

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNA MINERA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**ADOLFO OSORES BUENDIA**

**PROMOCIÓN  
2006 - II**

**LIMA – PERÚ  
2012**

**ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO  
DE UNA MINERA**

*A mis padres por su amor y apoyo incondicional  
a lo largo de mi vida, a mis hermanos, a Manuel  
y Jose por la confianza brindada en mi persona.*

## **SUMARIO**

El problema de la contaminación armónica se origina por el uso de cargas no lineales en los sistemas eléctricos de potencia, debido a esto se genera distorsión de la señal de tensión y corriente que producirían efectos no deseables que afectarían el buen funcionamiento y la calidad de servicio del sistema eléctrico.

El presente informe pretende establecer una metodología para el análisis de los armónicos del sistema eléctrico de la minera El Brocal, empresa que se dedica a la extracción de metales, la minera tiene un plan de expansión para aumentar su producción debido a esto habrá un incremento de demanda y por ende un aumento de cargas no lineales.

Para dicho análisis se modelan fuentes que producen los armónicos en el sistema que principalmente los variadores de velocidad de los motores, estos variadores se modelan como fuentes de corriente armónicas para poder simular los valores de distorsión armónica de tensión en el punto de acoplamiento común (PCC) y en cualquier parte del sistema eléctrico de la minera, teniendo en consideración los lineamientos establecidos en el estándar Std. IEE-519-1992 y la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos NTCSE.

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I .....</b>	<b>3</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>3</b>
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Importancia de los efectos de los armónicos .....	4
1.3 Planteamiento del problema .....	4
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>5</b>
<b>FUNDAMENTO TEORICO .....</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción.....	5
2.2. Análisis de señales no sinusoidales .....	5
2.3. Conceptos básicos .....	5
2.4. Relaciones de las componentes .....	7
2.5. Definición de Armónicos.....	7
2.6. Armónicos en sistemas eléctricos.....	8
2.6.1. Fuente de armónicos.....	9
2.6.2. Problemas que causan.....	9
2.7. Característica del sistema de respuesta.....	9
2.7.1. Banco de condensadores y cables aislados.....	10
2.7.2. Condiciones de resonancia .....	10
2.7.3. Flujo normal de las corrientes armónicas.....	10
2.7.4. Resonancia serie .....	11
2.7.5. Resonancia paralelo.....	11
2.7.6. Efecto de armónicos en transformadores.....	12
<b>CAPITULO III .....</b>	<b>13</b>
<b>ANÁLISIS DE ARMÓNICOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO EL BROCAL.....</b>	<b>13</b>
3.1 Introducción.....	13
3.2 Antecedentes.....	14
3.3 Descripción del sistema eléctrico El Brocal .....	14
3.4 Parámetros eléctricos del sistema eléctrico El Brocal .....	15
3.4.1 Líneas de transmisión .....	15

3.4.2	Transformadores de potencia .....	15
3.5	Demanda.....	16
3.6	Objetivos.....	17
3.7	Herramienta de estudio .....	17
3.8	Información utilizada.....	17
3.9	Criterios técnicos y metodología .....	18
3.9.1	Límite por distorsión total de voltaje según NTCSE.....	18
3.9.2	Límite por distorsión total de voltaje según IEEE519.....	19
3.9.3	Límite por distorsión de corriente .....	20
3.9.4	Metodología para el Estudio de Armónicos .....	20
3.9.5	Modelo de los componentes para el Estudio de Armónicos.....	20
3.9.6	Equipos generadores de armónicos .....	21
3.9.7	Generación de Corrientes Armónicas – Motores de 40 HP con variadores de velocidad.....	22
<b>CAPITULO IV.....</b>		<b>28</b>
<b>ANÁLISIS DE LOS CASOS DE ARMÓNICOS .....</b>		<b>28</b>
4.1	Configuración del Sistema Existente Armónicos de tensión.....	28
4.3	Configuración sistema proyectado Armónicos de Tensión.....	30
4.4	Configuración sistema proyectado Armónicos de Corriente.....	34
4.5	Configuración sistema proyectado con filtros Armónicos de Tensión .....	34
4.6	Configuración sistema proyectado con filtro Armónicos de Corriente .....	36
4.7	Cálculo del factor k del transformador .....	37
4.8	Evaluación del impacto económico debido al problema de distorsión armónica .....	37
4.9	Comparación del costo del filtro y las pérdidas económicas.....	38
4.10	Análisis de barrido en frecuencia .....	39
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>43</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>45</b>
<b>ANEXO A: Gráficas de Armónicos de Tensión Sistema Actual .....</b>		<b>46</b>
<b>ANEXO B: Diagramas Unifilares .....</b>		<b>61</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>68</b>

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia tienen como finalidad satisfacer la demanda eléctrica respetando los criterios de calidad establecidos en normas para dar un servicio de alta calidad motivo por el cual es importante diagnosticar mediante mediciones, modelamiento y simulación el comportamiento del sistema eléctrico en presencia de armónicos.

Por tal motivo es importante realizar un estudio que permita simular las condiciones de calidad del sistema eléctrico en los puntos de conexión o punto de acoplamiento común al sistema interconectado nacional con lo cual se pueda realizar los estudios de armónicos en el sistema.

De acuerdo a los diagramas unifilares de cada uno de los puntos donde se registran mediciones, se modelan fuentes de corrientes armónicas que emulan las mediciones realizadas (I.medida) y mediante cálculos empíricos se modelan fuentes armónicas de corrientes (I.calculada), que permiten representar las inyecciones de corrientes armónicas producidas por las cargas que no registran mediciones de armónicos. Con el módulo de flujos de potencia armónica (1) del software DIgSILENT Power Factory, se implementan las fuentes de corriente modeladas a redes eléctricas equivalentes para los puntos de acoplamiento común.

Los valores de distorsión armónica de tensión y corriente son comparados con los valores establecidos por la Norma Técnica de Calidad de Servicio Eléctrico. Esta comparación permite verificar si los límites establecidos en la regulación, guardan relación con las condiciones reales del sistema eléctrico. Adicionalmente y sobre la base de los análisis de armónicos realizados conforme al uso de las redes equivalentes obtenidas, se recomiendan posibles soluciones a los problemas de perturbaciones armónicas detectados.

### Objetivo del Informe

Debido al avance tecnológico las señales eléctricas en los sistemas de potencia presentan niveles de contaminación armónica, dicha contaminación se debe principalmente a la presencia de cargas que incluyen dispositivos de conmutación electrónica que inyectan corrientes armónicas que se reflejan en voltajes armónicos de mayor o menor magnitud en

función de las características de impedancia y frecuencia en los distintos puntos de los sistemas de potencia. Es por lo tanto necesario diagnosticar mediante medición, modelación y simulación, el comportamiento del sistema en lo referente a la presencia de armónicos. Sobre la base de los resultados obtenidos se podrán establecer recomendaciones tanto en crear planes de mitigación como reformulación de las regulaciones establecidas.

#### Contenido

El Capítulo 1 es esta introducción. En primer lugar, se presenta la problemática de la contaminación armónica en los sistemas eléctricos de potencia y las áreas de investigación a que ha dado lugar.

El Capítulo 2 recoge los conceptos fundamentales de armónicos, las fuentes que los generan y sobretodo el problema que se generan por la causa de armónicos en el sistema eléctrico.

El Capítulo 3 trata sobre el análisis de armónicos del sistema eléctrico, se empieza modelando el sistema eléctrico, se identifica que elementos son los generadores de armónicos, se modelan estos elementos como fuentes de corrientes armónicas y luego se analiza los valores de distorsión de tensión y de corriente en los diferente casos de estudio,

El Capítulo 4 está destinado a la descripción de las aportaciones realizadas, las conclusiones obtenidas.

El Capítulo 5 constituye una recopilación tanto de las referencias consultadas para la realización del presente informe de suficiencia.



# **CAPITULO I**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 Antecedentes**

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

Tradicionalmente, el estudio de los armónicos se realizaba para analizar el comportamiento particular de las cargas no lineales especiales, conectadas en un punto del sistema y sólo evaluaba su impacto en forma local; pero con la expedición de normas sobre la calidad del servicio de energía eléctrica se requiere observar el impacto de las cargas que producen armónicos, no solo en su punto de conexión, sino en otros puntos del sistema, para determinar claramente las características de la señal de tensión que se ofrece a todos los usuarios de la red eléctrica y establecer los correctivos que sean necesarios para evitar, así, las sanciones por baja calidad contempladas en la ley.

Los problemas generados por los armónicos se han agravado con el aumento de los condensadores utilizados para el control de pérdidas eléctricas y para mejorar la regulación en los sistemas de distribución. Aunque no son en sí mismos fuentes de armónicos, si se comportan como “amplificadores” de las señales armónicas.

Con el incremento de la conexión de cargas no lineales al sistema de distribución, las herramientas que tradicionalmente se emplean en su análisis han ido perdiendo vigencia, puesto que fueron desarrolladas sobre aproximaciones del comportamiento del sistema.

Las consideraciones de circuitos trifásicos balanceados y de señales perfectamente sinusoidales, que en el pasado se asumían en casi todos los estudios de sistemas eléctricos de distribución, no corresponden a las condiciones reales de operación en estado estacionario y, por supuesto, menos aun en estado estacionario.

El rango de frecuencias en el cual se estudia el sistema de distribución está entre 1Hz y 3kHz que corresponde a las frecuencias que se registran en el sistema en condiciones de

régimen permanente. Por lo tanto, los modelos considerados de los elementos constitutivos de los circuitos son validos en este rango y, en ningún caso, se consideran condiciones transitorias puesto que su análisis involucra frecuencias mayores.

## **1.2 Importancia de los efectos de los armónicos**

Como ya se conoce el impulso para el uso más eficiente de la energía eléctrica, se han creado muchas fuentes armónicas entre los cuales tenemos al convertidor estático de potencia como la más importante, este dispositivo es muy utilizado como modo de conmutación de fuentes de alimentación, variadores de velocidad, variadores de frecuencia, entre otras aplicaciones. También tenemos los dispositivos semiconductores estáticos que modulan el voltaje aplicado a las cargas, como son los arrancadores suaves de motores (static var) y cuando estos dispositivos son utilizados en el sistema eléctrico la corriente sufre una distorsión no sinusoidal.

Además de estas cargas no sinusoidales, nuevos condensadores para la mejorar el factor de potencia se están aplicando en los sistemas industriales y en la transmisión de electricidad y sistemas de distribución tanto para el control de la tensión y la liberación de la capacidad del sistema. Con la adición de cada nuevo banco de condensadores, la frecuencia resonante sistemas se baja, con la frecuencia de resonancia baja, los sistemas serán más susceptibles a la resonancia natural con cargas no sinusoidal. Con la reducción de la resonancia del sistema, los sistemas de energía será cada vez más y mayor el impacto por el flujo de las corrientes armónicas características producidas por estas cargas de ahí la importancia de entender efectos de los armónicos

## **1.3 Planteamiento del problema**

En la actualidad se ha acentuado con mayor severidad los efectos que producen las armónicas sobre los sistemas eléctricos y los dispositivos conectados a este, afectando principalmente a los parámetros de diseño como lo es la frecuencia y la tensión eléctrica, los cuales se ven modificados en la presencia de frecuencias armónicas.

El estudio del comportamiento de los sistemas eléctricos hasta hace algún tiempo se ha venido realizando a frecuencia fundamental, dejando a un lado el comportamiento que presenta el sistema en la presencia de armónicas.

Si no se realiza una acción para corregir los efectos producidos por la presencia de armónicas, el daño al cual se ven expuestos los dispositivos conectados al sistema se verá incrementado hasta la destrucción del equipo.

## CAPITULO II

### FUNDAMENTO TEORICO

#### 2.1. Introducción

Las armónicas en sistemas eléctricos, son funciones senoidales de tensión eléctrica y corriente cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema, donde su análisis se refiere a un problema en estado estable. En los últimos años los estudios de propagación de armónicas se han convertido en una herramienta importante para el análisis, diseño y regulación de los sistemas de distribución, se usan para cuantificar la distorsión de las formas de onda de tensión y corriente en un sistema eléctrico, y determinar la existencia y/o mitigación de condiciones de resonancia.

#### 2.2. Análisis de señales no sinusoidales

Teniendo en cuenta que las señales de tensión y de corriente que se presentan en un sistema de distribución son funciones periódicas, las cuales son objeto de análisis de este informe, a continuación se presentan los conceptos básicos y las definiciones fundamentales requeridos.

#### 2.3. Conceptos básicos

Una señal periódica no sinusoidal se puede representar como la combinación de una serie de señales sinusoidales, llamados armónicos, aplicando el teorema de Fourier.

Si la señal cumple que:

$$f(t) = f(t \pm kT) \quad (2.1)$$

Para  $k=0,1,2,\dots$  y  $T$  el periodo de la señal y además, satisface las dos condiciones siguientes:

- Tener un número finito de discontinuidades, de máximos y mínimos en un periodo  $T$ .
- Y para cualquier  $t_0$ , la integral  $\int_{t_0}^{t_0+T} |f(t)| dt$  existe.

Entonces la señal puede representarse como:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \text{sen}(n\omega t)] \quad (2.2)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \quad (2.5)$$

Donde:

$\omega_0$  : Frecuencia angular

$a_n, a_n, b_n$  : Coeficientes de Fourier

$n$  : Orden del armónico

$T$  : Periodo de la señal

Usando la descomposición de Fourier, las señales eléctricas de tensión y de corriente se pueden escribir como:

$$V(t) = v_0 + \sum_{k=1}^n \sqrt{2} V_k \cos(k\omega t + \theta) \quad (2.6)$$

$$I(t) = i_0 + \sum_{k=1}^n \sqrt{2} I_k \cos(k\omega t + \theta) \quad (2.7)$$

Donde:

$v_0$  : Valor medio de la señal de tensión (componente d.c.)

$i_0$  : Valor medio de la señal de corriente (componente d.c.)

$V_k$  : Valor eficaz de la componente k de la señal de tensión

$I_k$  : Valor eficaz de la componente k de la señal de corriente

$\theta$  : Ángulo de fase

De la ecuación (2.6), se puede observar que cada una de las componentes armónicas esta caracterizado por tres parámetros: frecuencia, amplitud y ángulo de fase.

Los valores eficaces de las señales son:

Valor eficaz de tensión

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.8)$$

Valor eficaz de la corriente

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.9)$$

## 2.4. Relaciones de las componentes

Una de las herramientas de uso frecuente en el análisis de sistemas trifásicos desbalanceados es la descomposición en componentes simétricas, por lo tanto, en esta sección se resaltan las relaciones entre los armónicos y estas componentes.

De la definición general de componentes simétricas se tiene que: un sistema de secuencia positiva o componente 1 es un sistema trifásico balanceado cuyas componentes tienen igual magnitud y una diferencia de fase de  $120^\circ$ . Un sistema de secuencia negativa o componente 2 es un sistema trifásico balanceado cuyas componentes tienen igual magnitud entre ellas y una diferencia de fase de  $240^\circ$ .

Un sistema de secuencia cero o componente 0 es un sistema trifásico balanceado cuyas componentes son idénticas, es decir, tiene igual magnitud y una diferencia de fase de 0 entre ellas.

Con una diferencia de fase entre sus componentes de  $120^\circ$  están los armónicos 1, 4, 7, 10, 13 .... : es decir, son sistemas trifásicos de secuencia positiva.

Con una diferencia de fase entre sus componentes de  $240^\circ$  están los armónicos 2, 5, 8, 11, 14 ..... es decir, son sistemas trifásicos de secuencia negativa.

Los armónicos triples 3, 6, 9, 12, 15,.....: son armónicos de secuencia cero, puesto que no tienen diferencia de fase.

Tabla N° 2.1. Secuencia Armónica in sistema trifásico balanceado

Secuencia		
Positiva	Negativa	Cero
1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
13	14	15
16	17	18
19	20	21
22	23	24
	etc.	

## 2.5. Definición de Armónicos

Un armónico se define como un componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que tiene una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Nótese que, por ejemplo, un componente de frecuencia doble que la de la frecuencia fundamental se llama el segundo armónico

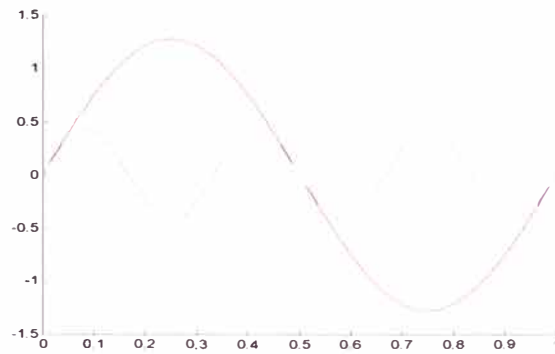


Figura N° 2.1. Onda sinusoidal y 2do Armónico de frecuencia

## 2.6. Armónicos en sistemas eléctricos

Como se enuncio en la presentación, el número de cargas no lineales que atienden los sistemas eléctricos ha aumentado considerablemente en la última década; por lo tanto, ya no se pueden considerar los sistemas de distribución como circuitos trifásicos balanceados como sinusoidales puras. Por esta razón, en este capítulo se presentan los conceptos básicos que se deben tener como referencia para estudiar las redes de distribución desde el punto de vista de armónicos.

Las herramientas tradicionales de análisis de armónicos trabajan con la serie de Fourier, obtenida mediante la transformada discreta (DFT), aunque es posible calcular la potencia activa y reactiva de cada componente del sistema, sin necesidad de efectuar la transformación de Fourier. Los armónicos se utilizan, primordialmente, para analizar la propagación de las señales armónicas en el circuito para diseño de filtros.

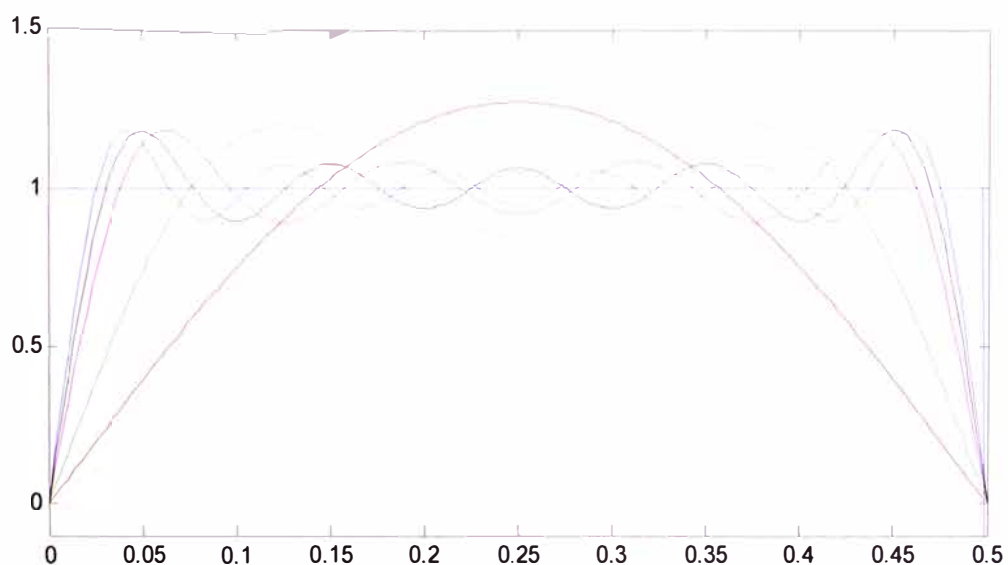


Figura N° 2.2. Descomposición de una onda distorsionada

### **2.6.1. Fuente de armónicos**

Las fuentes de armónicos primordialmente se deben a las cargas, aunque también algunos elementos constitutivos del sistema aportan su cuota. El efecto de una o varias fuentes de armónicos en un sistema, depende principalmente de sus características de respuesta de frecuencia.

A continuación se relacionan las principales fuentes de señales armónicas:

- Transformadores
- Convertidores
- Hornos y equipos de arco
- Lámparas fluorescentes
- Controladores de tensión
- Rectificadores e inversores
- Variadores de velocidad
- Fuentes ininterrumpidas de tensión

### **2.6.2. Problemas que causan**

El grupo de trabajo del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) que estudia los armónicos en sistemas de potencia, ha identificado los problemas que causan y los ha agrupado en la forma siguiente:

- Fallas en bancos de condensadores y en cables, por rompimiento de dieléctricos.
- Interferencia en las comunicaciones, particularmente en sistemas de onda portadora.
- Pérdidas excesivas, resultantes por calentamiento en máquinas sincrónicas
- Mayores pérdidas en el núcleo y en los devanados de los transformadores
- Resonancias que producen sobretensiones y sobrecorrientes en el sistema
- Errores de medición
- Mala operación de sistemas de control de estado sólido
- Operación en falsas protecciones
- Interferencia en comunicaciones

### **2.7. Característica del sistema de respuesta**

La cantidad de distorsión armónica de tensión que ocurre en cualquier sistema de distribución dependerá de la impedancia característica frente a la frecuencia visto por fuentes de corriente no lineales y por la magnitud de dichas corrientes. Cuando altas corrientes no lineales se trazan a través impedancias del sistema, se produce distorsión de

la tensión. Para fines de análisis, los dispositivos no lineales descritos anteriormente generalmente se puede representar como fuentes de corriente de los armónicos.

### **2.7.1. Banco de condensadores y cables aislados**

Los bancos de condensadores utilizados para el control de voltaje y / o mejora del factor de potencia, así como cables aislados, son componentes que tienen un efecto importante sobre las características del sistema de potencia de respuesta de frecuencia. La manera en que los condensadores están conectados puede causar condiciones de resonancia (tanto serie y en paralelo) que pueden magnificar armónicas niveles actuales. Los bancos de condensadores se utilizan como medio de soporte de tensión para la conmutación de los convertidores estáticos de potencia. Se pueden considerar en paralelo con el sistema en el cálculo de la reactancia de conmutación, y aumentar así el  $di/dt$  de conmutación. La capacitancia de la línea de carga de las líneas de transmisión y cables aislados son también en paralelo con la inductancia del sistema. Por lo tanto, son similares a los condensadores en derivación (condensadores de mejora de los factores), con respecto a las características del sistema que afecta a la respuesta de frecuencia. Por lo general, los bancos de condensadores son dominantes en los sistemas de distribución industrial y gastos generales.

### **2.7.2. Condiciones de resonancia**

Una condición de resonancia del sistema es el factor más importante que afecta a los niveles de armónicos del sistema. La resonancia en paralelo es una alta impedancia al flujo de corriente armónica, mientras que la resonancia en serie es una baja impedancia al flujo de corriente armónica. Cuando las condiciones de resonancia no son un factor, un sistema de energía tiene la capacidad de absorber una cantidad significativa de corriente armónica. Es solamente cuando estas corrientes ven una alta impedancia debido a una condición de resonancia en paralelo que una distorsión de la tensión y significa amplificación actual va a producir. Por lo tanto, es importante ser capaz de analizar las características de frecuencia de un sistema de respuesta con el fin de evitar tener problemas en el sistema de resonancia.

### **2.7.3. Flujo normal de las corrientes armónicas**

Las corrientes armónicas tienden a fluir de las cargas no lineales (fuentes armónicas) hacia el punto de impedancia más baja, que son por lo general las fuentes. La impedancia de la fuentes son por lo general mucho menor que trayectorias paralelas ofrecidas por cargas. Sin embargo, la corriente armónica se dividirá en función de las relaciones de impedancia de las rutas disponibles. Corrientes armónicas más altas, por lo tanto, el flujo a los condensadores que ofrecen baja impedancia a altas frecuencias. [2]



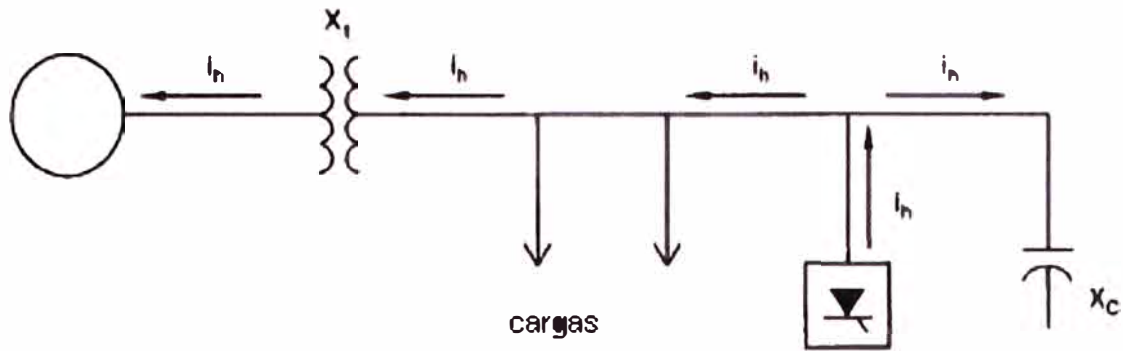


Figura N° 2.3 Flujo normal de corrientes armónicas

#### 2.7.4. Resonancia serie

En caso de que la tensión aguas arriba de la red esta distorsionada, el circuito de resonancia serie, formado por la capacitancia del banco de capacitores y la inductancia de cortocircuito del transformador de alimentación, puede derivar altas corrientes armónicas a través del capacitor. La resonancia serie puede producir alta distorsión de tensión en el lado de baja tensión del transformador. [2]

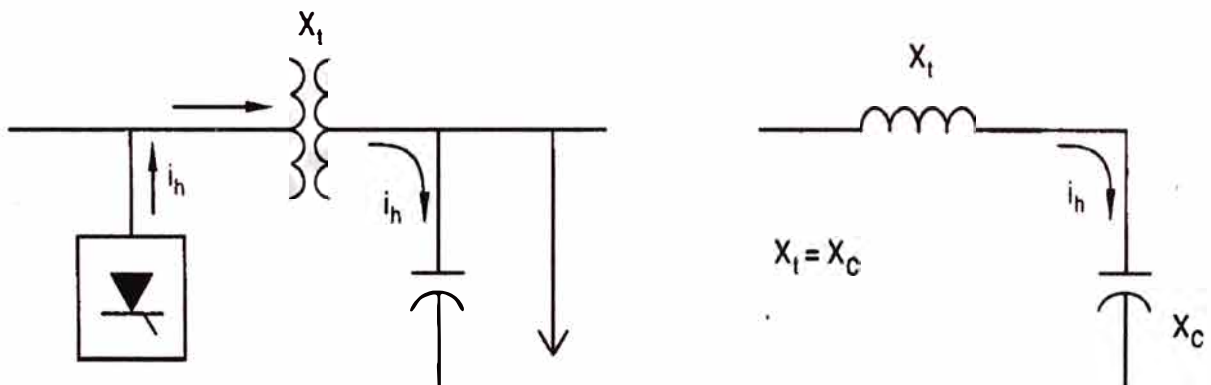


Figura N° 2.4 Banco de condensador que presenta resonancia en serie

#### 2.7.5. Resonancia paralelo

Resonancia en paralelo se produce cuando el sistema de reactancia inductiva y reactancia capacitiva son iguales a cierta frecuencia. Si la combinación de banco de condensadores y el resultado sistema inductancia en una resonancia en paralelo cerca de uno de los armónicos característicos generados por una carga no lineal, que la corriente armónica se excitar el circuito tanque, causando una corriente amplificada a oscilar entre el almacenamiento de energía en la inductancia y el almacenamiento de energía en la capacitancia. Esta corriente oscilante de alta tensión puede provocar una distorsión excesiva. [2]

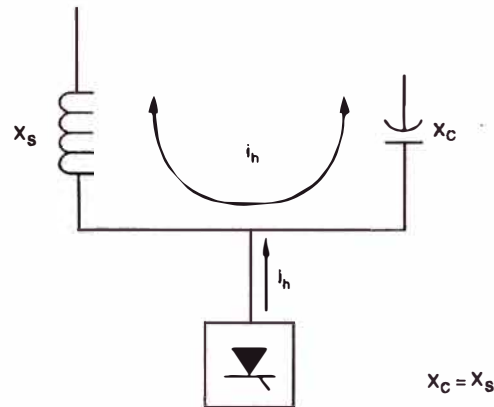


Figura N° 2.5 Banco Condición de resonancia en paralelo

### 2.7.6. Efecto de armónicos en transformadores

En los transformadores de potencia la principal consecuencia de las corrientes armónicas es un aumento de las pérdidas, principalmente en los arrollamientos, debido a la deformación de los campos de dispersión. El aumento de las 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 potencial reducción de su vida útil.

Por tanto, es preciso reducir la carga máxima del transformador, práctica que se conoce como desclasificación, o poner un especial cuidado en el diseño del transformador a fin de reducir aquellas pérdidas. Para evaluar la desclasificación del transformador, puede utilizarse el factor K de la carga. Este factor se calcula de acuerdo con el espectro armónico de la corriente de carga y es un indicativo de las pérdidas adicionales en la carga por corrientes parásitas. Refleja el exceso de pérdidas experimentado en el bobinado de un transformador tradicional.

A continuación se presenta la ecuación para el cálculo del factor K:

Donde:

$$k = \sum_{h=2}^n I_h^2 \cdot h^2 \quad (2.10)$$

n = orden del armónico

I<sub>h</sub> = fracción de la corriente eficaz total de correspondiente al h-ésimo armónico

Muchos dispositivos de medida de calidad de la energía miden directamente el K-factor de la corriente de la carga. Una vez que se conoce el K-factor de la carga, resulta sencillo especificar un transformador que presente una clasificación del K-factor superior, tomada de entre las de la gama estándar: 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50.

## **CAPITULO III**

### **ANÁLISIS DE ARMÓNICOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO EL BROCAL**

#### **3.1 Introducción**

SOCIEDAD MINERA EL BROCAL S.A.A. (EL BROCAL), es una empresa minera que se dedica a la extracción y concentración de diversos metales (poli metálica) en su Unidad Minera de Colquijirca, ubicada en el distrito de Tinyahuarco, provincia y departamento de Pasco, a 10 km al sur de la ciudad de Cerro de Pasco, a la altura del km 324 de la Carretera Lima – Cerro de Pasco – Huánuco.

EL BROCAL recibe el suministro de energía eléctrica desde la Subestación Buena Vista 50 kV a través de las líneas de 50 kV Carhuamayo Shelby (L-6515) y Shelby – Buena Vista (L-6517A) y de las líneas de 50 kV Excelsior Vista Alegre (L-6517C) y Vista Alegre – Buena Vista (L-6517B). Estas instalaciones están bajo la administración de la concesionaria ELECTROANDES. Actualmente EL BROCAL tiene una demanda total de 9,1 MW; de los cuales 1,8 MW son atendidos por las centrales hidroeléctricas de Río Blanco y Jupayragra que operan en forma aisladas y 7,3 MW son retirados del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) a través de la línea de transmisión en 50 kV Buena Vista – Smelter.

De acuerdo al plan de expansión de Minera el Brocal, actualmente están en ejecución diversas obras de infraestructura para incrementar la producción de concentrados de 5000 a 7500 TMSD, las que se tiene previsto que entren en operación para abril del 2010. Por otro lado, Minera el Brocal está repotenciando sus centrales hidroeléctricas Jupayragra y Río Blanco, de manera que su producción se incremente de 1.8 MW actuales a 2.5 MW y ha llevado a cabo las adecuaciones del caso para que operen conectadas al SEIN; la puesta en operación de las centrales hidroeléctricas Jupayragra y Río Blanco, repotenciadas y conectadas al SEIN, está prevista también, para abril del año 2010.

El incremento de producción de Minera el Brocal implicará que la máxima demanda de energía eléctrica que se retira del SEIN se incremente de 7.3 MW actuales a 18.7 MW a

partir de abril del 2010. Por lo que será necesario realizar los análisis y estudios necesarios para verificar que no se alterarán en forma negativa las condiciones operativas en el Sistema Eléctrico de ELECTROANDES.

### 3.2 Antecedentes

El sistema actual que representa a la planta cuenta con una carga de 7.6 MW y posterior ampliación a 18.7 MW incluyendo los motores controlados con variadores de frecuencia que inyectan corrientes armónicas al sistema.

Se analiza la influencia de los variadores en los armónicos que se presentan en diferentes barras y se calculan los índices de distorsión y se comparan con los límites dados en la norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos NTCSE.

Para los puntos de conexión común PCC se calculan los índices de armónicos definidos en la norma IEEE -519-1992 para las corrientes en los puntos de conexión seleccionados. Los puntos de conexión común son enlaces como líneas, cables o transformadores del sistema en donde se calculan las corrientes armónicas.

Se verifica que los índices estén debajo de los rangos límites, y se plantean filtros en caso de superar los límites.

Finalmente se realiza la respuesta en frecuencia de la barra de interconexión con el SEIN para verificar posibles resonancias con los armónicos presentados.

### 3.3 Descripción del sistema eléctrico El Brocal

Minera El Brocal se conecta al SEIN a través de la línea Buena Vista – La Fundición 50 kV de propiedad de Electroandes. En la figura N° 3.1 se muestra gráficamente el diagrama unifilar actual de la mina.

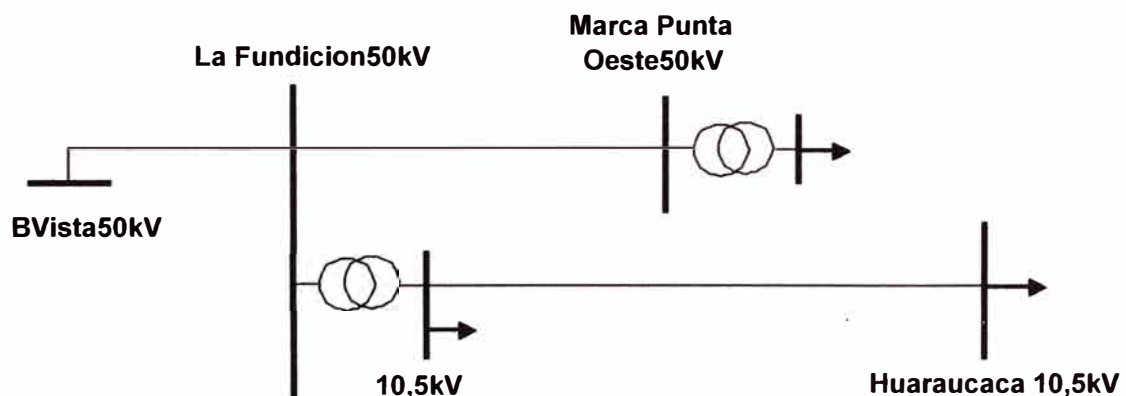


Figura N° 3.1 Diagrama unifilar actual de El Brocal

En la figura N° 3.2 se muestra el diagrama unifilar de la mina considerando la ampliación de carga y la interconexión de las pequeñas centrales hidroeléctricas en la subestación Huaraucaca 10 kV.

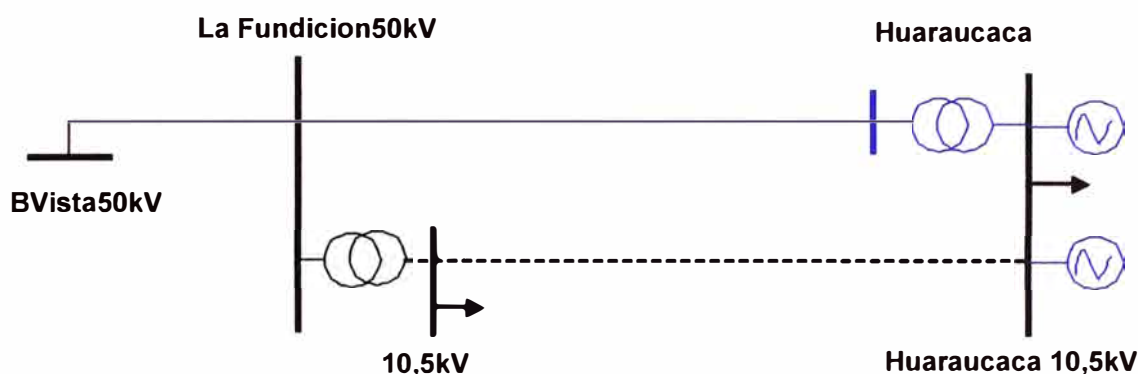


Figura N° 3.2 Diagrama proyectado El Brocal

El proyecto de incremento de carga consiste en ampliar la línea existente Fundición – Marca Punta 50 kV hasta la subestación Huaraucaca 50 kV con una longitud de 1,8 km e instalar un transformador de 15/18 MVA 50/10,5 kV en Huaraucaca. Con la construcción de la S.E. Huaraucaca se saca de servicio la línea Smelter – Huaraucaca 10 kV.

El sistema aislado de las centrales hidroeléctricas de Jupayragra y Río Blanco se interconectarán al SEIN en la subestación Huaraucaca 10 kV a través de una línea de transmisión de 10 kV cuyas longitudes son de 2 km y 7 km respectivamente.

### 3.4 Parámetros eléctricos del sistema eléctrico El Brocal

#### 3.4.1 Líneas de transmisión

Las características de las líneas de subtransmisión de propiedad de El Brocal se detallan la

Tabla N° 3.1 Líneas de subtransmisión

Línea	Tensión kV	Longitud km	R1	X1	B1	R0	X0	B0
			Ohm/km	Ohm/km	uS/km	Ohm/km	Ohm/km	uS/km
Smelter - Marcapunta	50,0	2,80	0,354	0,498	3,163	0,728	1,547	1,698
Marcapunta - Huaraucaca	50,0	1,80	0,267	0,472	3,536	0,457	1,890	1,794
Jupeyragra - Huaraucaca	10,0	2,00	0,427	0,408	2,636	0,721	1,865	1,698
Río Blanco - Huaraucaca	10,0	7,00	0,427	0,408	2,636	0,721	1,865	1,698

#### 3.4.2 Transformadores de potencia

Las características de los transformadores de potencia de propiedad de El Brocal, considerados en el presente estudio, se detallan en la Tabla N° 3.2:

Tabla N° 3.2 Transformadores

Subestación	Tensión kV		Potencia MVA	Impedancia %	Tipo Conexión	Tap Fijo
	Primario	Secundario				
Smelter	48,0	10,5	4/5 (*)	7,3%	YNd5	+/-2x2,5%
Huaraucaca	50,0	10,5	15/18 (*)	10,0%	YNd5	+/-2x2,5%
Jupayagra	10,5	6,3	2,0	5,45%	YNd5	+/-2x2,38%
Rio Blanco	10,5	6,3	1,5	5,12%	YNd5	+/-2x2,38%

(\*) ONAN/ONAF

### 3.5 Demanda

Para la elaboración del análisis de flujo de carga se utilizaron las demandas estimadas para el año 2012, los cuales corresponde al incremento de la demanda por la optimización del circuito de cobre arsenical y de la mina subterránea.

En Tabla 3.3 se presenta la demanda del 2009 y el incremento de la demanda para el 2012.

Tabla N° 3.3 Demanda de El Brocal

Subestación	Tensión (kV)	Demanda 2009	
		MW	MVAR
Smelter	10.5	1.09	0.56
Marcapunta	10.5	0.15	0.11
Huaraucaca(1)	10.5	3.21	1.25
Huaraucaca(2)	10.5	2.92	1.21
Total		7.37	3.13
Subestación	Tensión (kV)	Demanda 2012	
		MW	MVAR
Smelter	10.5	1.09	0.56
Marcapunta	10.5	0.15	0.11
Huaraucaca	10.5	17.48	6.63
Total		18.72	7.30

Actualmente la demanda de Huaraucaca (1) y (2) son alimentados desde Marcapunta Oeste y Smelter respectivamente; con la implementación de la subestación Huaraucaca 50/10,5 kV se unirán ambas barras.

El incremento de carga para el 2012 será de 11,4 MW, de los cuales 5,0 MW corresponden a la implementación de Molienda y Celda de Flotación. El factor de potencia actual de la carga total de El Brocal es de 0,92, el cual aumentará al incrementar la demanda debido a que se instalaren bancos de condensadores.

La subestación Smelter se conecta al SEIN mediante la línea de transmisión en 50 kV L-6518 Buenavista – Smelter, línea de propiedad de ELECTROANDES. La subestaciones Smelter y Marcapunta Oeste están enlazadas mediante una línea de transmisión en 50 kV de 2.8 km. Del lado de baja tensión (10.5 kV) de la subestación Smelter se suministra

energía eléctrica a la subestación Planta Concentradora Huaraucaca mediante una línea de distribución en 10.5 kV de 5 km de longitud y desde la subestación Marcapunta Oeste con una línea de distribución en 10.5 kV de 2.1 km de longitud.

En su Unidad Colquijirca, Minera el Brocal se dedica a las actividades de extracción de minerales y de su procesamiento para la producción de concentrado: por lo tanto sus cargas están constituidas principalmente por motores de inducción de diferentes tipos de arranque. EL BROCAL cuenta con las Centrales Hidroeléctricas Jupayragra ( 1.23 MW) y Río Blanco (0.79 MW) que generan tensión a 50 Hz; operando en forma aislada.

### **3.6 Objetivos**

El presente Estudio de Armónicos tiene los siguientes objetivos principales:

- Representación de la red del sistema eléctrico el BROCAL para el estudio de Armónicos.
- Representación de las fuentes de armónicos a partir de las características del espectro en frecuencia de los variadores de frecuencia en los motores con control VFD.
- Simulación de los flujos de armónicos para la red actual y futura de 18.7 MW.
- Verificación de los índices de calidad de los armónicos para diferentes puntos de Conexión o acoplamiento común PCC (point of common coupling).
- En caso sea necesario se calcula los filtros para mejorar los índices de calidad de los armónicos.
- Barrido de Impedancia en función de la frecuencia para el punto de conexión con el SEIN.

### **3.7 Herramienta de estudio**

Todos los cuadros de resultados numéricos y gráficos mostrados en el presente análisis, han sido obtenidos utilizando el programa computacional DIgSILENT Power Factory.

### **3.8 Información utilizada**

La información utilizada para efectuar el estudio de armónicos en la minera BROCAL es la siguiente:

- Red del SEIN en formato DIgSILENT para la Empresas entregada por el COES.
- Hojas de datos de los motores incluyendo el espectro de armónicos generado por el variador de velocidad.
- Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos.
- IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Std.519-1992



### 3.9 Criterios técnicos y metodología

La referencia para la distorsión total del voltaje es la NTCSE (Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos) cuyos índices se mencionan a continuación:

#### 3.9.1 Límite por distorsión total de voltaje según NTCSE

Los valores eficaces (RMS) de las Tensiones Armónicas Individuales ( $V_i$ ) y los THD, expresado como porcentaje de la tensión nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite ( $V_i'$  y  $THD'$ ) indicados en la siguiente tabla. Para efectos de esta Norma, se consideran las armónicas comprendidas entre la dos ( $2^\circ$ ) y la cuarenta ( $40^\circ$ ), ambas inclusive.

Tabla N° 3.4. Límites de distorsión de Armónicos de Voltaje Norma NTCSE [3]

ORDEN (n) DE LA ARMÓNICA ó THD	TOLERANCIA $ V_i' $ ó $ THD' $ (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Para tensiones mayores a: 60 kV	Para tensiones menores a: 60 kV
<b>(Armónicos Impares no múltiplos de 3)</b>		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	$0.1+2.5/n$	$0.2+12.5/n$
<b>(Armónicos Impares múltiplos de 3)</b>		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
<b>(Pares)</b>		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.5
THD	3.0	5.0



El Factor de Distorsión Total por Armónicas (THD) está definido como:

$$THD = \sqrt{\sum_{i=2}^{40} \frac{V_i^2}{V_n^2}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Donde:

$V_i$ : Es el valor eficaz (RMS) de la tensión armónica “i” (para  $i=2\dots40$ ) expresada en voltios.

$V_N$ : Es la tensión nominal del punto de medición expresada en Voltios.

Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad, si los indicadores de las perturbaciones medidas se encuentran fuera del rango de tolerancias establecidas en este numeral, por un tiempo superior al 5% del Período de Medición. Cada tipo de perturbación se considera por separado.

Los indicadores  $V_i$ , THD se evalúan separadamente para cada Intervalo de Medición de diez (10) minutos durante el Período de Medición de perturbaciones, que como mínimo será de siete (7) días calendarios continuos.

A continuación se muestra la siguiente tabla con los límites de distorsión armónica de voltaje según la Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos correspondientes a los diferentes niveles de tensión.

### 3.9.2 Límite por distorsión total de voltaje según IEEE519

Como referencia adicional se tienen los criterios definidos por la Guía IEEE Sta.519-1992.

Respecto a los límites de los índices que se mencionan a continuación:

Tabla N° 3.5. Límites de distorsión de Armónicos de Voltaje

Tensión punto común de acoplamiento con el consumidor	Distorsión de voltaje individual	Distorsión de voltaje total
$V_n \leq 69 \text{Kv}$	3	5
$69 \text{kV} < V_n \leq 161 \text{Kv}$	1.5	2.5
$V_n > 161 \text{kV}$	1	1.5

Donde:

Harmónicos individuales ( $ID\%$ ):

$$ID_v = \frac{V_n * 100\%}{V_1} \quad (3.2)$$

$$ID_i = \frac{I_n * 100\%}{I_1} \quad (3.3)$$

Distorsión Armónica total (THD%)

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (3.4)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} * 100\% \quad (3.5)$$

### 3.9.3 Límite por distorsión de corriente

Se menciona que la norma NTCSE no pone límites a la distorsión de la corriente, sin embargo se tomará como referencia la Guía de la IEEE Std 519-1992.

La distorsión de la corriente total de carga se calcula sobre la corriente de demanda del sistema (IL) y depende del punto de conexión común PCC.

El límite de distorsión también depende de la corriente de corto circuito proporcionada por la fuente del sistema externo (Isc) que también depende del punto PCC.

Tabla N° 3.6. Límites de distorsión de Armónicos de Corriente.

Isc/IL	<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h	TDD
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

### 3.9.4 Metodología para el Estudio de Armónicos

- La metodología del estudio de armónicos consiste en realizar simulaciones de flujos de armónicos para las condiciones de carga actual y futura.
- Para las barras se calculan las distorsiones por tensión y se comparan los límites según la norma NTCSE.
- De manera referencial se determinan los índices de distorsión en los puntos de conexión PCC (punto de acoplamiento común) y se comparan con los límites dados por la IEEE 519.
- Se analiza la red eléctrica BROCAL considerando una barra equivalente en la conexión 50 kV con el SEIN.
- Se analiza el SCAN de frecuencia considerando todo el SEIN.

### 3.9.5 Modelo de los componentes para el Estudio de Armónicos

Para tal finalidad se aplica el programa Power Factory DIgSILENT que permite:

- Cargas modeladas como fuentes de corriente con espectro de armónicos.
- Parámetros dependientes de la frecuencia en líneas de transmisión y cables.

- SCAN de frecuencia en nodos del sistema.
- Generación de reportes e índices de armónicos.

Respecto a las líneas y cables sus parámetros están en función de la frecuencia y se modela la reactancia inductiva mediante la expresión  $2 \pi Fh$ , donde  $Fh$  es la frecuencia armónica.

Para la red equivalente del SEIN se utiliza la reactancia detrás de una fuente de 60 Hz para las demás frecuencia solo varia la reactancia en función de la frecuencia.

Para el SCAN de frecuencia se modela el SEIN completo.

Los convertidores de frecuencia son los únicos componentes que se simulan como fuente de armónicos de corriente con espectro en función de la frecuencia cuyos valores se han tomado del estudio de la referencia ABB.

### 3.9.6 Equipos generadores de armónicos

Se considera que los elementos que son los equipos generadores de armónicos son los variadores de frecuencia de los motores de inducción, que son un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

Tabla N° 3.7. Motores de la Planta El Brocal.

Barra	Tensión (kV)	Potencia activa por tipo de arranque (Kw)					A	HP	P. Activa total (KW)	Cos Ø	Condición
		Directo	Estr - Delta	Resistencia	Soft Start	Variador					
Smelter Chanc	0.46	238	40		10		0		288	0.80	Existente
Smelter Sand	0.46	7			143		0		150	0.80	Existente
Smelter	0.46	66	145	57	307	77	121	100	652	0.80	Existente
MPO 10	10.5				99	51	4	70	150	0.80	Existente
Concentradora A/B	0.46	1211	395	2853	544	821	1290	1100	5824	0.80	Existente
Ampliación Mo (T6)	4.16	1568			2241		0		3809	0.85	Proyectada
Ampliación Zn (T7)	0.46	70			599	224	331	300		0.85	Proyectada Carga On Line
								150			
								150			
								150			Stand by
								150			Stand by
								150			Stand by
Ampliación Pb (T8)	0.46	8			196	868	1283	1160	1072	0.85	Proyectada Carga On Line
								500			
								500			
								450			Stand by
								450			Stand by
								200			Stand by
								200			Stand by
Nueva Planta Mo (T9)	4.16				2247		0		2247	0.80	Proyectada
Nueva Planta Zn (T10)	0.46	897			590	180	283	240	1667	0.80	Proyectada Carga On Line
								100			
								100			
								100			Stand by
								100			Stand by
								40			
								40			Stand by
								40			Stand by
								40			Stand by
								40			Stand by
								40			Stand by
Nueva Planta Pb (T11)	0.46	633			612	421	* 661	560	1666	0.80	Proyectada Carga On Line
								100			Stand by
								100			Stand by
								150			Stand by
								150			Stand by
								150			Stand by
								150			Stand by
								40			Stand by
								40			Stand by
								60			Stand by
								60			Stand by
								250			
								250			

Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como drivers de frecuencia ajustable (AFD), drivers de CA, microdrivers o inversores.

Los equipos de control que generan armónicos apreciables son los variadores de frecuencia de los motores de inducción. Los cuales están distribuidos en la planta según la siguiente tabla 3.7.

Se ha programado los motores que normalmente están presentes en la planta, los otros motores están en Stand by y entran en operación alternadamente.

Los espectros de corriente para los motores se han tomado de motores similares según la presencia de motores de determinada potencia en HP cuyos valores porcentuales de corriente de armónicos se presentan en el punto 3.9.7.

### 3.9.7 Generación de Corrientes Armónicas – Motores de 40 HP con variadores de velocidad

Se ha identificado que los equipos que generan distorsión armónica en el sistema eléctrico son los variadores de velocidad de los motores, a continuación se muestran las corrientes de armónicos generados por el variador de velocidad de un motor de 40HP

Datos del motor 40HP

Tabla N° 3.8. Armónicos de Corriente del VFD.

Orden de Armónicos	F (Hz)	VFD CON MOTOR DE 40 HP	
		I (A)	Ih/I1%
1	60	1.90	100.00
5	300	0.90	47.40
7	420	0.50	26.30
11	660	0.20	10.50
13	780	0.10	5.30
17	1020	0.10	5.30
19	1140	0.10	5.30
23	1380	0.10	5.30
25	1500	0.10	5.30
29	1740	0.10	5.30

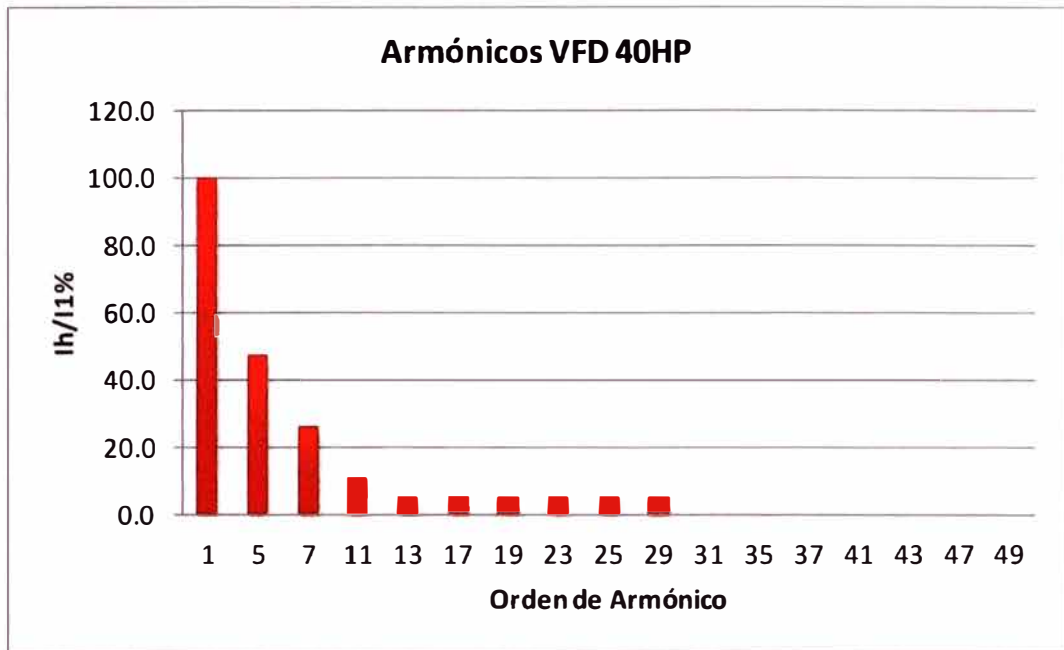
Variador de velocidad de Motor de 40HP

Datos del motor 40HP

$P_n = 40\text{HP}$

$f.p = 0.85$

$V_n = 0,46\text{ kV}$



Grafica N° 3.3. Motores de la Planta El Brocal.

Variador de velocidad de Motor de 60HP

Datos del motor 60HP

$P_n = 60\text{HP}$

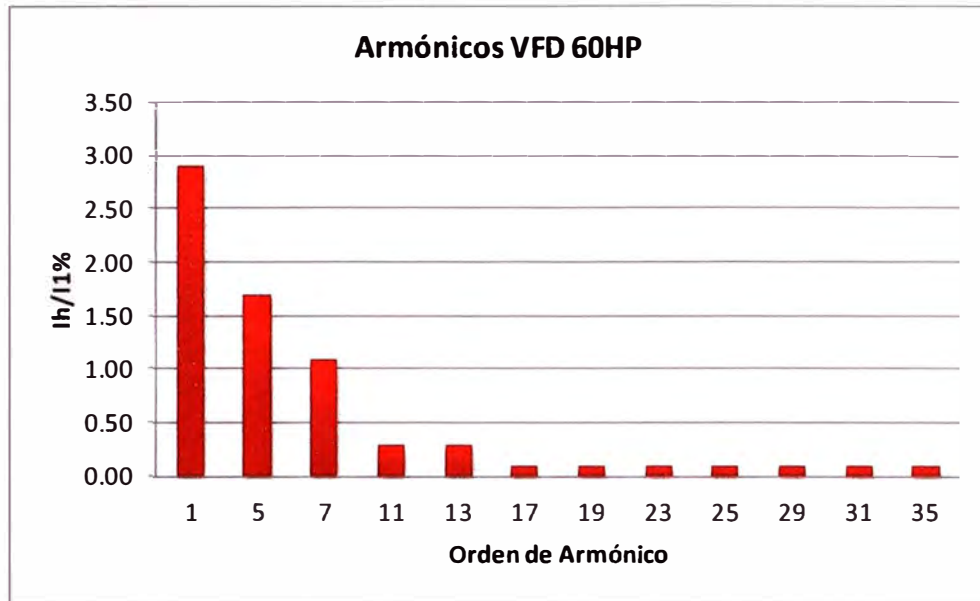
$f.p = 0.85$

$V_n = 0,46\text{ kV}$

Tabla N° 3.9. Armónicos de Corriente del VFD.

Orden de Armónicos	F (Hz)	VFD CON MOTOR DE 60 HP	
		I (A)	Ih/I1%
1	60	2.90	100.00
5	300	1.70	58.60
7	420	1.10	37.90
11	660	0.30	10.30
13	780	0.30	10.30
17	1020	0.10	3.40
19	1140	0.10	3.40
23	1380	0.10	3.40
25	1500	0.10	3.40
29	1740	0.10	3.40
31	1860	0.10	3.40
35	2100	0.10	3.40

En la tabla N° 3.9 se puede apreciar los espectros de armónicos que se generan con el variador de velocidad para el motor de 60 HP.



Grafica N° 3.4. Motores de la Planta El Brocal.

Variador de velocidad de Motor de 100HP

Datos del motor 100HP

$P_n = 100\text{HP}$

$f.p = 0.85$

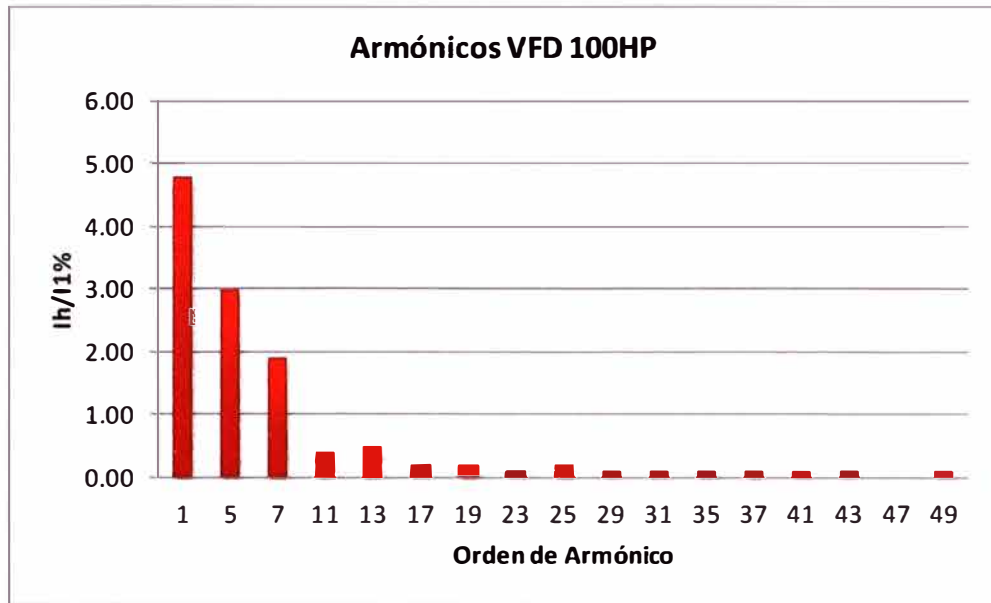
$V_n = 0,46\text{ kV}$

Tabla N° 3.10. Armónicos de Corriente del VFD.

Orden de Armónicos	F (Hz)	VFD CON MOTOR DE 100 HP	
		I (A)	Ih/I1%
1	60	4.80	100.00
5	300	3.00	62.50
7	420	1.90	39.60
11	660	0.40	8.30
13	780	0.50	10.40
17	1020	0.20	4.20
19	1140	0.20	4.20
23	1380	0.10	2.10
25	1500	0.20	4.20
29	1740	0.10	2.10
31	1860	0.10	2.10
35	2100	0.10	2.10
37	2220	0.10	2.10
41	2460	0.10	2.10
43	2580	0.10	2.10
47	2820	0.00	0.00
49	2940	0.10	2.10

En la tabla N° 3.10 se puede apreciar los espectros de armónicos que se generan con el variador de velocidad para el motor de 100 HP.





Grafica N° 3.5. Motores de la Planta El Brocal.

Variador de velocidad de Motor de 150HP

Datos del motor 150HP

$P_n = 150\text{HP}$

$f.p = 0.85$

$V_n = 0,46\text{ kV}$

Tabla N° 3.11. Armónicos de Corriente del VFD.

Orden de Armónicos	F (Hz)	VFD CON MOTOR DE 150 HP	
		I (A)	Ih/I1%
1	60	7.00	100.00
5	300	3.10	44.30
7	420	1.60	22.90
11	660	0.60	8.60
13	780	0.50	7.10
17	1020	0.30	4.30
19	1140	0.20	2.90
23	1380	0.20	2.90
25	1500	0.10	1.40
29	1740	0.10	1.40
31	1860	0.10	1.40
35	2100	0.10	1.40
37	2220	0.10	1.40
41	2460	0.00	0.00
43	2580	0.00	0.00
47	2820	0.00	0.00
49	2940	0.00	0.00

En la tabla N° 3.11 se puede apreciar los espectros de armónicos que se generan con el variador de velocidad para el motor de 150 HP.

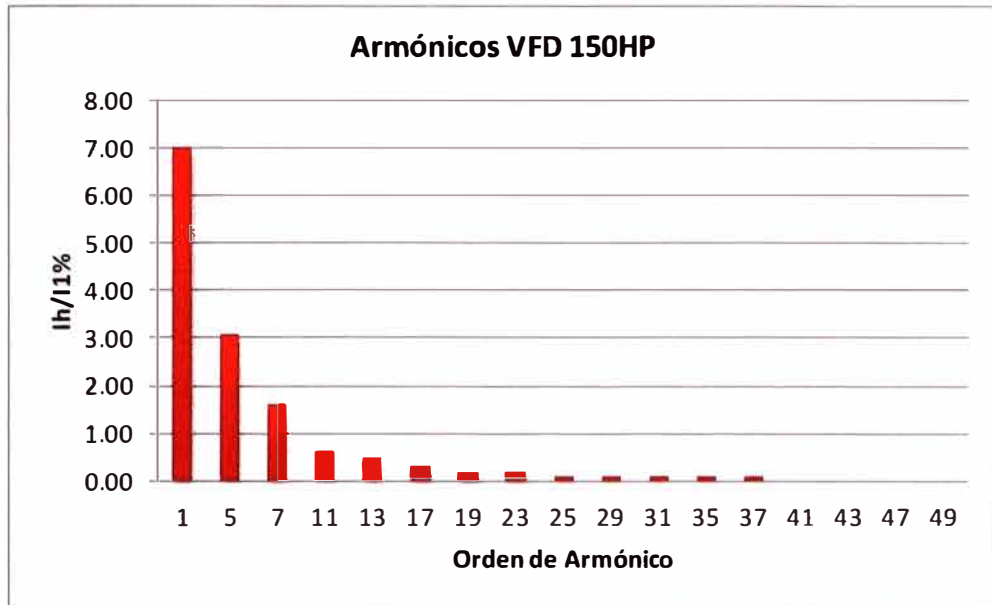


Tabla N° 3.6. Motores de la Planta El Brocal.

Variador de velocidad de Motor de 250HP

Datos del motor 250HP

$P_n = 250\text{HP}$

$f.p = 0.85$

$V_n = 0,46\text{ kV}$

Tabla N° 3.12. Armónicos de Corriente del VFD.

Orden de Armónicos	F (Hz)	VFD CON MOTOR DE 250 HP	
		I (A)	Ih/I1%
1	60	11.70	100.00
5	300	4.80	41.00
7	420	2.30	19.70
11	660	0.99	8.50
13	780	0.70	6.00
17	1020	0.50	4.30
19	1140	0.30	2.60
23	1380	0.30	2.60
25	1500	0.20	1.70
29	1740	0.20	1.70
31	1860	0.11	0.90
35	2100	0.11	0.90
37	2220	0.11	0.90
41	2460	0.00	0.00
43	2580	0.00	0.00
47	2820	0.00	0.00
49	2940	0.00	0.00

En la tabla N° 3.11 se puede apreciar los espectros de armónicos que se generan con el variador de velocidad para el motor de 250 HP.



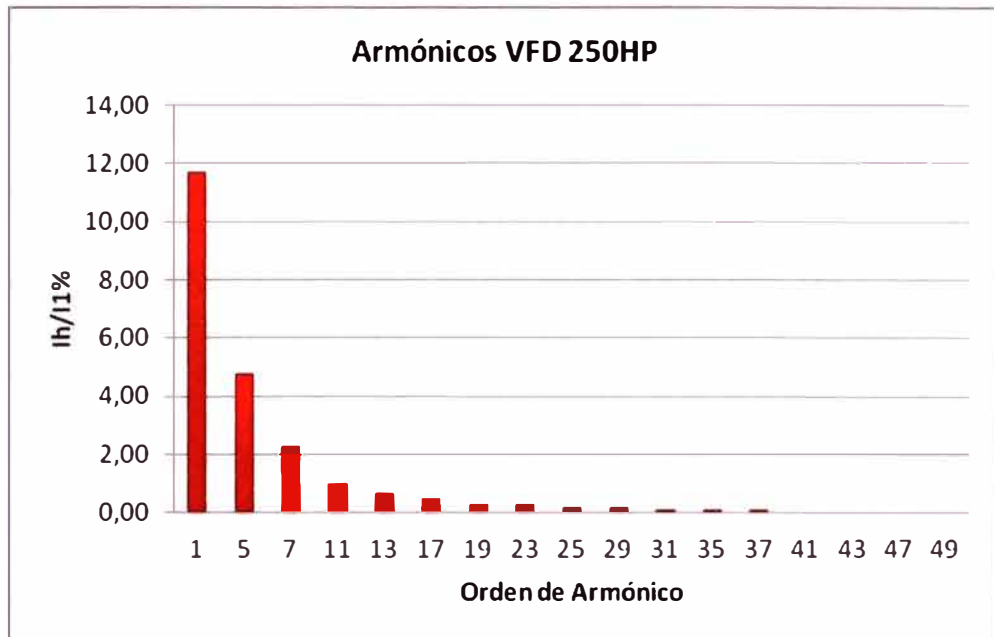


Tabla N° 3.7. Motores de la Planta El Brocal.

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS DE LOS CASOS DE ARMÓNICOS

Para el análisis de los casos de armónicos se presentan tres casos que son los siguientes:

- Sistema eléctrico actual.
- Sistema eléctrico proyectado.
- Sistema eléctrico proyectado con filtros.

Para los tres casos se analizaran las distorsiones de tensión y corriente en el punto de acoplamiento común y en algunas de las barras principales del sistema.

#### 4.1 Configuración del Sistema Existente Armónicos de tensión

Teniendo el sistema existente con una carga de 7 MW alimentada desde el transformador principal de SMELTER y desde la línea SMELTER-MPO se simula el flujo de armónicos resultado una distorsión total de tensión del orden de 0.39% en la barra de FUNDICIÓN 50kV.

En la tabla siguiente se muestran la distorsión de los armónicos individuales y el THD total del sistema eléctrico existente con índices de armónicos del orden del 49 armónico para las barras que conforman el sistema existente de la minera El Brocal

Tabla N° 4.1. Armónicos de Tensión en la Barras.

Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		5	7	11	13	17	19	23	31
SE SMELTER_50	50	0.368052	0.112673	0.023017	0.033134	0.00392	0.006069	0.022632	0.024544
SE SMELTER_10	10.5	0.326828	0.001252	0.170481	0.234078	0.042297	0.055562	0.148711	0.161251
HUARAUCACA_10	10.5	0.725682	0.35132	0.302388	0.405518	0.109109	0.132207	0.255304	0.271802
MPO 50	50	0.456475	0.143831	0.024256	0.033718	0.00423	0.006003	0.022739	0.024637
SE HUARAUC N_10	10.5	3.344506	1.162535	0.146605	0.129357	0.047278	0.042774	0.025188	0.024566
SAMD_046	0.46	0.323691	0.00124	0.168699	0.231615	0.041849	0.054972	0.147129	0.159534
CHANC_046	0.46	0.615324	0.027643	0.1204	0.097933	0.008765	0.008837	0.015335	0.013846
SE CONCENTRADORA B_105	10.5	0.725682	0.351321	0.302389	0.405518	0.109109	0.132207	0.255305	0.271804
SE CONCENTRADORA A_105	10.5	3.387631	1.17768	0.148613	0.13108	0.047947	0.043388	0.025269	0.024593
FUNDICION 50	50	0.368052	0.112673	0.023017	0.033134	0.00392	0.006069	0.022632	0.024544
MPO_10	10.5	0.879487	0.485149	0.351777	0.469154	0.147811	0.175748	0.292582	0.309758
SMELTER EQ	0.46	1.13939	1.263145	0.614925	0.792508	0.395245	0.45474	0.460553	0.511161
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	3.387631	1.17768	0.148613	0.13108	0.047947	0.043388	0.025269	0.024593
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	3.885026	1.353614	0.171926	0.150996	0.055801	0.050609	0.025864	0.02447

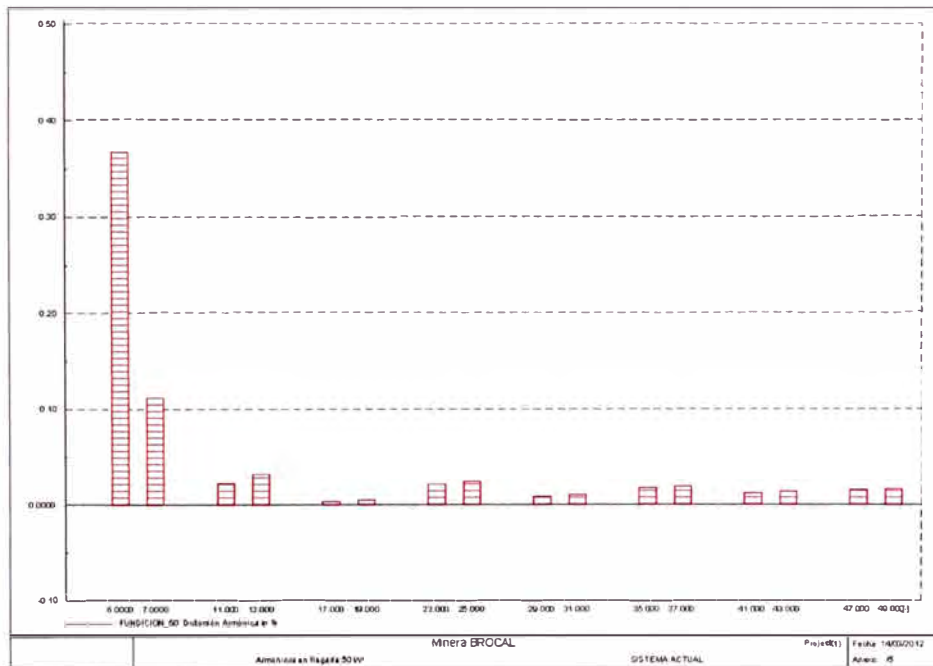
De las tablas 4.1 y 4.1.2 se obtienen los valores de THD que se encuentran dentro de los valores que indica la norma. Se puede apreciar que el valor de distorsión total de tensión en la barra de la Fundación en 50 kV está por debajo de los valores establecidos por la norma tanto en el armónico individual como en el total.

Tabla N° 4.2. Armónicos de Tensión en la Barras.

Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		29	31	35	37	41	43	47	49
SE_SMELTER_50	50	0.009465	0.01138	0.018363	0.019796	0.012515	0.014498	0.016354	0.016762
SE_SMELTER_10	10.5	0.064643	0.075535	0.124757	0.134558	0.083052	0.095922	0.112419	0.114768
HUARAUCACA_10	10.5	0.133915	0.138975	0.223449	0.229363	0.163992	0.16642	0.211123	0.201635
MPO 50	50	0.009422	0.011392	0.018207	0.019613	0.012485	0.014439	0.016088	0.016494
SE_HUARAUC_N_10	10.5	0.013009	0.01329	0.0098	0.010211	0.006782	0.0076	0.00306	0.002964
SAMD_046	0.46	0.063954	0.07473	0.123426	0.133121	0.082165	0.094898	0.111219	0.113543
CHANC_046	0.46	0.004032	0.00409	0.005236	0.00503	0.00251	0.002829	0.002567	0.002406
SE CONCENTRADORA B_105	10.5	0.133916	0.138976	0.223452	0.229366	0.163995	0.166423	0.211128	0.20164
SE CONCENTRADORA_A_105	10.5	0.013136	0.013371	0.009718	0.010134	0.006704	0.007507	0.003045	0.002968
FUNDICION_50	50	0.009485	0.01138	0.018363	0.019796	0.012515	0.014498	0.016354	0.016782
MPO_10	10.5	0.164585	0.167638	0.254089	0.257621	0.190066	0.188047	0.236318	0.222005
SMELTER EQ	0.46	0.325277	0.372591	0.362865	0.420837	0.274982	0.345086	0.302708	0.340115
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	0.013136	0.013371	0.009718	0.010134	0.006704	0.007507	0.003045	0.002968
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	0.014598	0.014225	0.008687	0.00926	0.005545	0.00617	0.004108	0.004333

Tabla N° 4.3. Resultados THD en barras.

Barras	Tensión Nominal en kV	Armonicos de Tensión	
		THD %	<5%
SE_SMELTER_50	50	0.39	OK
SE_SMELTER_10	10.5	0.57	OK
HUARAUCACA_10	10.5	1.16	OK
MPO 50	50	0.48	OK
SE_HUARAUC_N_10	10.5	3.55	OK
SAMD_046	0.46	0.57	OK
CHANC_046	0.46	0.64	OK
SE CONCENTRADORA B_105	10.5	1.16	OK
SE CONCENTRADORA_A_105	10.5	3.59	OK
FUNDICION_50	50	0.39	OK
MPO_10	10.5	1.4	OK
SMELTER EQ	0.46	2.39	OK
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	3.59	OK
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	4.12	OK



Gráfica N° 4.1. THD en barra La Fundición.

En la grafica N° 4.1 se muestran los valores de THD en la barra de La Fundición que es el punto de acoplamiento común (PCC).

### 4.2 Configuración sistema existente Armónicos de Corriente

La distorsión en el punto de acoplamiento común de interconexión con el sistema hacia FUNDICIÓN 50 presenta una distorsión de 3.9% que es menor del límite para  $50 < I_{cc}/IL < 100$ .

Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		5	7	11	13	17	19	23	31
FUNDICION_50	50	3.804882	0.832078	0.139728	0.139728	0.008173	0.007	0.003941	0.004079
		<b>29</b>	<b>31</b>	<b>35</b>	<b>37</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>47</b>	<b>49</b>
		0.002856	0.003015	0.002136	0.002423	0.001638	0.001923	0.00139	0.001537

Tabla N° 4.4 .Resultados de Armónicos de Corriente.

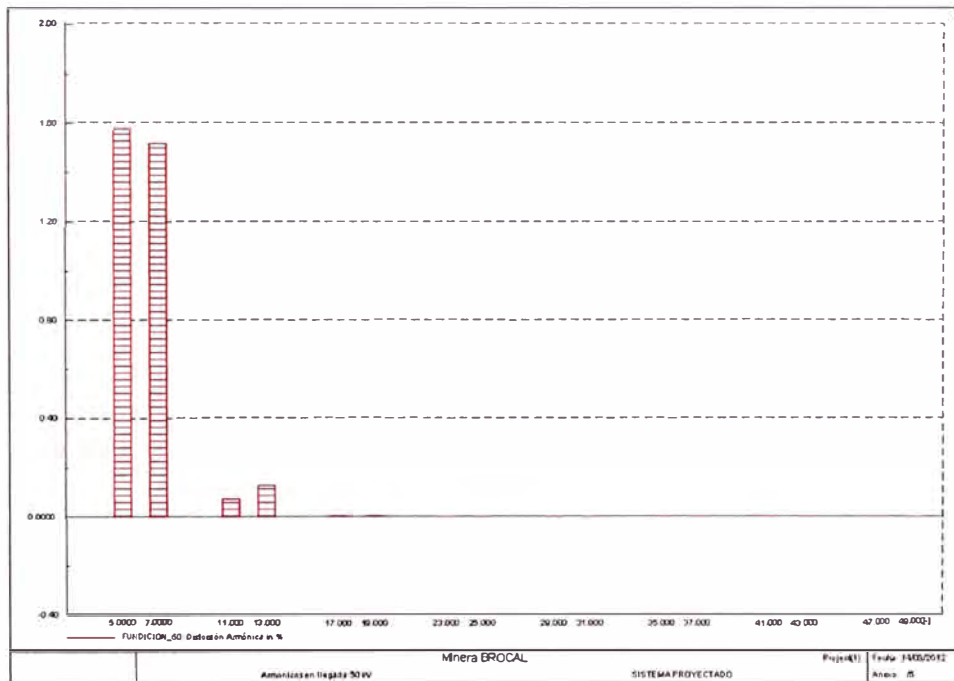
Barras	Tensión Nominal en kV	Armonicos de Corriente			
		I <sub>cc</sub> (kA)	IL (kA)	I <sub>cc</sub> /IL	TDD %
FUNDICION_50	50	5.216	0.09	57.96	3.90

Tabla N° 4.5. Resultados de Armónicos de Corriente.

### 4.3 Configuración sistema proyectado Armónicos de Tensión

Teniendo el sistema proyectado con una carga de 18 MW alimentada desde el transformador principal de SMELTER y desde la línea SMELTER-MPO se simula el flujo de armónicos resultado una distorsión total de tensión del orden de 2,2% en la barra de FUNDICIÓN 50kV.

El valor calculado presenta menor distorsión respecto al caso existente debido a los refuerzos conseguidos mediante la instalación del transformador de 18 MVA en HUARAUCACA.



Gráfica N° 4.2. THD en barra La Fundición.



En la tabla siguiente se muestran la distorsión de los armónicos individuales y el THD total.

Como se puede apreciar en la tabla N° 4.2.3 existen tres barras que están por encima del valor de 5% de THD de tensión, mientras que el valor de THD en la Barra Fundición es del orden de 2,2% valor que está dentro de los límites permisibles.

A continuación se presentaran las gráficas de los armónicos de tensión en la barra principal que es La Fundición y también las barras que tienen un valor de THD que está por encima de los límites permisibles.

Tabla N° 4.6. Armónicos de Tensión en la Barras.

Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		5	7	11	13	17	19	23	31
SE_SMELTER_50	50	1.585369	1.521526	0.076495	0.129474	0.006205	0.005438	0.003627	0.00402
SE_SMELTER_10	10.5	1.363918	3.144667	0.120359	0.149255	0.084643	0.097005	0.075098	0.084637
HUARAUCACA_10	10.5	3.589386	0.768417	0.283627	0.88649	0.059387	0.040269	0.014517	0.011292
MPO50	50	1.968363	1.818698	0.093196	0.161048	0.00481	0.002994	0.001521	0.001625
SE_HUARAUC_N_10	10.5	3.589386	0.768417	0.283627	0.88649	0.059387	0.040269	0.014517	0.011292
SAMD_046	0.46	1.350916	3.113073	0.119109	0.147695	0.083753	0.095983	0.074305	0.083742
CHANC_046	0.46	2.071961	10.507441	0.154276	0.099501	0.02565	0.022148	0.010884	0.010148
SE CONCENTRADORA B_105	10.5	3.589387	0.768417	0.283627	0.886491	0.059387	0.040269	0.014517	0.011292
SE CONCENTRADORA A_105	10.5	3.550719	0.704791	0.24779	0.60418	0.038789	0.027885	0.010036	0.007136
FUNDICION_50	50	1.584075	1.520284	0.076433	0.129369	0.0062	0.005434	0.003624	0.004016
MPO_10	10.5	3.744244	0.901242	0.233348	0.830578	0.056715	0.053058	0.04374	0.043427
SMELTER EQ	0.46	0.584969	2.720339	0.572358	0.699676	0.456909	0.52172	0.400333	0.449544
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	3.550719	0.704791	0.24779	0.60418	0.038789	0.027885	0.010036	0.007136
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	2.935931	0.558407	0.558991	3.306474	0.344411	0.243911	0.100152	0.088974
SE AMPLIACION T8_105	10.5	3.513622	0.702175	0.265092	0.880751	0.049169	0.025382	0.004756	0.008265
SE AMPLIACION T6_T7_105	10.5	3.568183	0.751262	0.278816	0.884672	0.056112	0.035576	0.010316	0.005509
Ampliacion Pb_046	0.46	3.478401	5.37443	1.988459	2.770845	1.745548	2.003152	1.545989	1.739365
Ampliacion Zn_046	0.46	1.860005	0.849572	0.402203	1.052717	0.410184	0.479253	0.379165	0.430164
Ampliacion Mo_416	4.16	5.785994	3.669237	0.286636	0.425283	0.010914	0.005755	0.001172	0.000748
CH RIO B_105	10.5	3.438085	0.736037	0.271713	0.849281	0.056906	0.038589	0.013915	0.010825
CH JUPAYR_105	10.5	2.952123	0.632389	0.233703	0.730984	0.049057	0.0333	0.012034	0.009374
CR_10	10.5	3.629794	0.80485	0.285108	0.810636	0.047886	0.032927	0.011013	0.008539
SE_HUARAUC_N_50	50	2.279986	2.059223	0.10682	0.186775	0.004005	0.001218	0.000224	0.00036
SE NUEVA PLANTA_105	10.5	3.652645	0.826676	0.286227	0.771833	0.042084	0.029242	0.009303	0.007157
Nueva Planta Mo_416	4.16	5.785994	3.669237	0.286636	0.425283	0.010914	0.005755	0.001172	0.000748
Nueva Planta Zn_046	0.46	3.370242	1.346815	0.346407	0.266958	0.142394	0.115198	0.052963	0.048611
Nueva Planta Pb_046	0.46	2.532616	1.776974	1.479924	0.053573	0.292577	0.165908	0.100631	0.063845

Tabla N° 4.7. Armónicos de Tensión en la Barras.

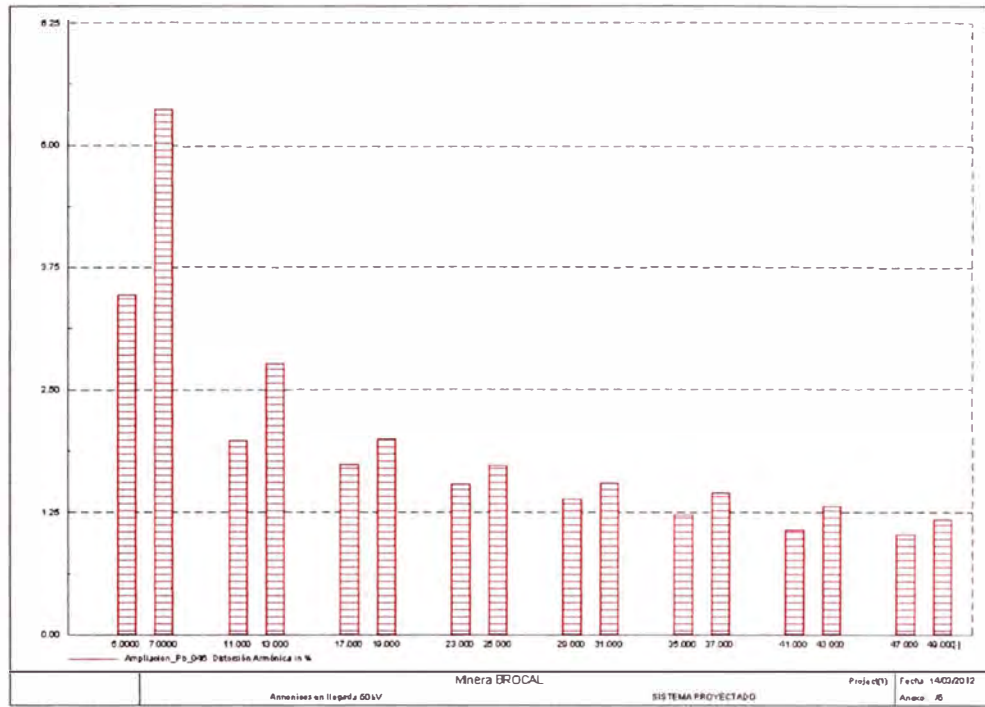
Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		29	31	35	37	41	43	47	49
SE_SMELTER_50	50	0.003241	0.003657	0.002933	0.003523	0.002648	0.003265	0.002584	0.002981
SE_SMELTER_10	10.5	0.067973	0.076165	0.060072	0.07156	0.053005	0.064925	0.050781	0.058279
HUARAUCACA_10	10.5	0.004186	0.002728	0.000004	0.00086	0.001716	0.002535	0.002291	0.002893
MPO 50	50	0.001319	0.001508	0.001248	0.001521	0.001172	0.00146	0.001176	0.001367
SE_HUARAUC_N_10	10.5	0.004186	0.002728	0.000004	0.00086	0.001716	0.002535	0.002291	0.002893
SAMD_046	0.46	0.067253	0.075359	0.059435	0.070802	0.052443	0.064237	0.050242	0.057661
CHANC_046	0.46	0.00587	0.005692	0.003464	0.00367	0.002192	0.002432	0.001582	0.001666
SE CONCENTRADORA B_105	10.5	0.004186	0.002728	0.000004	0.00086	0.001716	0.002535	0.002291	0.002893
SE CONCENTRADORA A_105	10.5	0.001515	0.000991	0.001874	0.002755	0.002654	0.003433	0.00265	0.003101
FUNDICION_50	50	0.003238	0.003654	0.00293	0.00352	0.002646	0.003262	0.002582	0.002979
MPO_10	10.5	0.032842	0.03243	0.031075	0.028354	0.029533	0.027289	0.022392	0.017717
SMELTER EQ	0.46	0.358971	0.401366	0.315482	0.375312	0.277394	0.339481	0.265132	0.304098
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	0.001515	0.000991	0.001874	0.002755	0.002654	0.003433	0.00265	0.003101
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	0.048258	0.045672	0.026797	0.028008	0.016395	0.018066	0.011663	0.012256
SE AMPLIACION T8_105	10.5	0.011145	0.014338	0.013382	0.016775	0.013473	0.016921	0.013522	0.015773
SE AMPLIACION T6_T7_105	10.5	0.000466	0.001573	0.003373	0.004866	0.004673	0.006148	0.005105	0.00612
Ampliacion Pb_046	0.46	1.391917	1.557464	1.225389	1.458198	1.07831	1.319831	1.030743	1.182332
Ampliacion Zn_046	0.46	0.347751	0.390531	0.308821	0.368108	0.272985	0.334433	0.261392	0.300023
Ampliacion Mo_416	4.16	0.000129	0.000067	0.000049	0.00007	0.000066	0.000081	0.000056	0.000062
CH RIO B_105	10.5	0.004014	0.002616	0.000004	0.000825	0.001647	0.002434	0.002201	0.00278
CH JUPAYR_105	10.5	0.003486	0.002276	0.000003	0.000722	0.001447	0.002143	0.001947	0.002466
CR_10	10.5	0.002549	0.001581	0.000634	0.001306	0.001771	0.002471	0.002111	0.00261
SE_HUARAUC_N_50	50	0.000274	0.000273	0.000151	0.000143	0.000058	0.000045	0.000001	0.000015
SE NUEVA PLANTA_105	10.5	0.001708	0.00102	0.000961	0.001559	0.001821	0.002458	0.002029	0.002474
Nueva Planta Mo_416	4.16	0.000129	0.000067	0.000049	0.00007	0.000066	0.000081	0.000056	0.000062
Nueva Planta Zn_046	0.46	0.027341	0.026273	0.015736	0.016594	0.009858	0.01093	0.007118	0.007506
Nueva Planta Pb_046	0.46	0.043134	0.025557	0.017123	0.013737	0.00816	0.00775	0.005309	0.006789

Tabla N° 4.8. Resultados THD en barras.

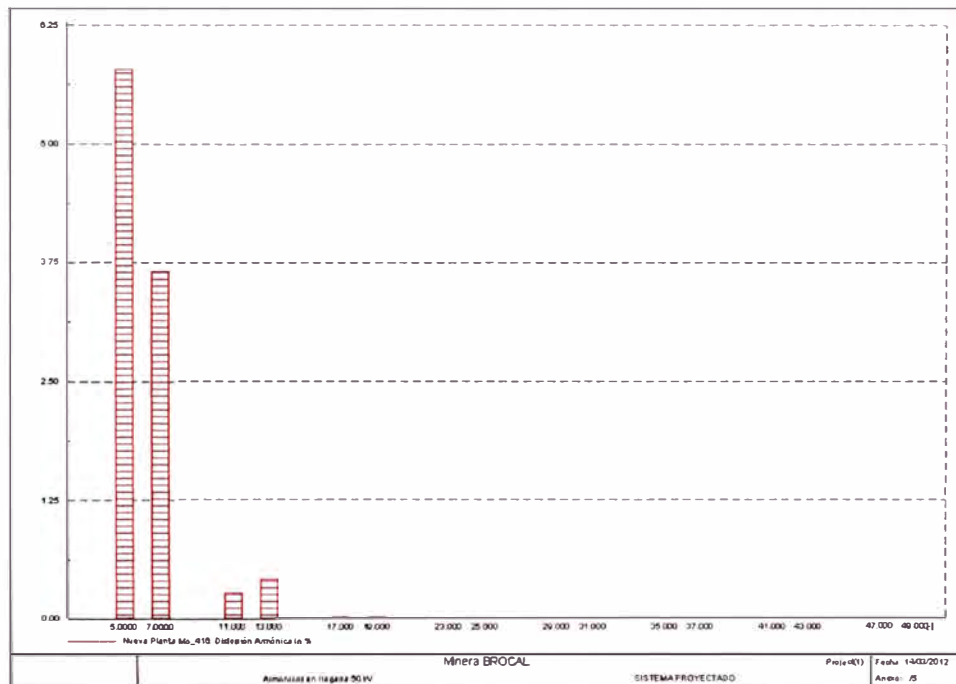
Barras	Tensión Nominal en kV	Armonicos de Tensión	
		THD %	<5%
SE_SMELTER_50	50	2.2	OK
SE_SMELTER_10	10.5	3.44	OK
HUARAUCACA_10	10.5	3.79	OK
MPO 50	50	2.69	OK
SE_HUARAUC_N_10	10.5	3.79	OK
SAMD_046	0.46	3.41	OK
CHANC_046	0.46	10.71	NO CUMPLE
SE CONCENTRADORA B_105	10.5	3.79	OK
SE CONCENTRADORA A_105	10.5	3.68	OK
FUNDICION_50	50	2.2	OK
MPO_10	10.5	3.95	OK
SMELTER EQ	0.46	3.21	OK
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	3.68	OK
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	4.51	OK
SE AMPLIACION_T8_105	10.5	3.7	OK
SE AMPLIACION_T6_T7_105	10.5	3.76	OK
Ampliacion_Pb_046	0.46	8.86	NO CUMPLE
Ampliacion_Zn_046	0.46	2.65	OK
Ampliacion_Mo_416	4.16	3.55	OK
CH RIO B_105	10.5	3.63	OK
CH JUPAYR_105	10.5	3.12	OK
CR_10	10.5	3.82	OK
SE_HUARAUC_N_50	50	3.08	OK
SE NUEVA PLANTA_105	10.5	3.83	OK
Nueva Planta Mo_416	4.16	6.87	NO CUMPLE
Nueva Planta Zn_046	0.46	3.66	OK
Nueva Planta Pb_046	0.46	3.45	OK



Gráfica N° 4.3. THD en barra Chanc 046.



Gráfica N° 4.4. THD en barra Ampliación Pb046.



Gráfica N° 4.5. THD en barra Nueva Planta Mo 416.

Analizando el resultado de las gráficas se puede observar que en la barra Chanc046 se requiere mitigar el 7mo armónico, en la barra Ampliación Pb046 se requiere mitigar el 7mo armónico y finalmente en la barra Nueva planta Mo 416 se requiere mitigar el 5to armónico. Cabe resaltar que son barras que pertenecen dentro del sistema de la mina es recomendable reducir estos armónicos para no tener un mal funcionamiento de los equipos en la planta.

#### 4.4 Configuración sistema proyectado Armónicos de Corriente

La distorsión en el punto de acoplamiento común de interconexión con el sistema hacia FUNDICIÓN 50 presenta una distorsión de 8,98% que es superior al límite para  $20 < I_{cc}/I_L < 50$  que tiene un valor del orden de 8%.

Tabla N° 4.9. Resultados de Armónicos de Corriente.

Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		5	7	11	13	17	19	23	31
FUNDICION_50	50	7.406281	5.077659	0.139728	0.139728	0.008173	0.007	0.003941	0.004079
		<b>29</b>	<b>31</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>47</b>	<b>49</b>
		0.002856	0.003015	0.002136	0.002423	0.001638	0.001923	0.00139	0.001537

Tabla N° 4.10. Resultados de Armónicos de Corriente.

Barras	Tensión Nominal en kV	Armonicos de Corriente			
		I <sub>cc</sub> (kA)	I <sub>L</sub> (kA)	I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub>	TDD %
FUNDICION_50	50	5.346	0.20	26.73	8.98

#### 4.5 Configuración sistema proyectado con filtros Armónicos de Tensión

Teniendo el sistema proyectado con una carga de 18.7 MW alimentada desde el transformador principal de SMELTER y desde la línea SMELTER-MPO.

Como ya se había mostrado en el sistema proyectado se encontraron barras en las cuales excedían el valor recomendado por la norma por lo cual se recomienda colocar filtros.

Se simula el flujo de armónicos en el sistema, adicionando la instalación de los siguientes Filtros:

Barra de Ampliación Pb en 0.46kV con Filtro de 7ma armónica de 0,3 Mvar

Barra Nueva Planta Mo 416 con filtro de 5ta armónica de 1,2 Mvar

Barra Chanc\_046 con filtro de 7ma armónica de 0,4 Mvar.

Se consideran las inyecciones de corriente dado por el espectro de los motores con variadores de velocidad, resultado una distorsión total de tensión del orden de 0,93% en la barra de Fundición 50kV.

Las demás barras del sistema BROCAL se encuentran en índices menores a 5%.

Se puede afirmar que los valores de distorsión para la tensión están debajo de los límites permitidos por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos NTCSE.

En la Tabla N° 4.13 se muestran la distorsión de los armónicos individuales y el THD total.

El Listado del caso para la distorsión se muestra en la Tabla N° 4.11 y Tabla N° 4.12.



Tabla N° 4.11. Armónicos de Tensión en la Barras.

Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		5	7	11	13	17	19	23	31
SE_SMELTER_50	50	0.105592	0.918229	0.05217	0.058819	0.005067	0.004379	0.003116	0.003489
SE_SMELTER_10	10.5	0.379704	0.848524	0.104656	0.134032	0.083013	0.095885	0.074558	0.084075
HUARAUCACA_10	10.5	0.32764	1.208933	0.179327	0.380298	0.051339	0.028218	0.008591	0.00648
MPO_50	50	0.13935	1.220761	0.067288	0.076788	0.004658	0.002292	0.001172	0.001285
SE_HUARAUC_N_10	10.5	0.32764	1.208933	0.179327	0.380298	0.051339	0.028218	0.008591	0.00648
SAMD_046	0.46	0.376095	0.840025	0.103573	0.132635	0.082142	0.094877	0.073773	0.083189
CHANC_046	0.46	0.198326	1.593541	0.165729	0.098187	0.026069	0.022439	0.010947	0.010178
SE_CONCENTRADORA_B_105	10.5	0.32764	1.208934	0.179328	0.380298	0.051339	0.028218	0.008591	0.006481
SE_CONCENTRADORA_A_105	10.5	0.326617	1.146662	0.14469	0.257396	0.022946	0.013258	0.005113	0.003855
FUNDICION_50	50	0.105472	0.917188	0.052111	0.058752	0.005061	0.004374	0.003112	0.003485
MPO_10	10.5	0.340899	1.340355	0.132182	0.321076	0.035577	0.037625	0.039879	0.039533
SMELTER EQ	0.46	1.812683	1.095357	0.55904	0.703948	0.454738	0.519983	0.399317	0.448448
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	0.326617	1.146662	0.14469	0.257396	0.022946	0.013258	0.005113	0.003855
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	0.474663	0.325067	0.47234	1.440733	0.394776	0.255648	0.098817	0.086719
SE_AMPLIACION_T8_105	10.5	0.324374	1.183323	0.171208	0.372811	0.049643	0.024447	0.003952	0.002334
SE_AMPLIACION_T6_T7_105	10.5	0.323914	1.193239	0.174528	0.377131	0.049878	0.025137	0.0049	0.00216
Ampliacion_Pb_046	0.46	0.435671	1.341131	0.717114	0.955172	0.669463	0.771724	0.600246	0.6772
Ampliacion_Zn_046	0.46	1.563696	0.691248	0.403395	0.632926	0.409818	0.469163	0.365163	0.412489
Ampliacion_Mo_416	4.16	0.307851	1.130256	0.164945	0.356265	0.047096	0.023732	0.004625	0.002039
CH RIO B_105	10.5	0.315906	1.165654	0.172931	0.366747	0.049519	0.02722	0.008289	0.006253
CH JUPAYR_105	10.5	0.274354	1.012955	0.15044	0.31927	0.043177	0.023757	0.007251	0.005477
CR_10	10.5	0.367078	1.165361	0.203567	0.373066	0.041068	0.022024	0.005706	0.004277
SE_HUARAUC_N_50	50	0.168246	1.465806	0.079585	0.0915	0.005033	0.001577	0.000434	0.000527
SE NUEVA PLANTA_105	10.5	0.397163	1.144351	0.216737	0.369427	0.035786	0.018872	0.004388	0.003225
Nueva Planta Mo_416	4.16	0.383352	1.102498	0.208556	0.355398	0.034419	0.018149	0.004219	0.003101
Nueva Planta Zn_046	0.46	1.920769	0.762492	0.406463	0.115653	0.135288	0.107513	0.049318	0.045378
Nueva Planta Pb_046	0.46	2.917586	0.865323	1.489648	0.326494	0.277217	0.155502	0.094355	0.059788

Tabla N° 4.12 Armónicos de Tensión en la Barras.

Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		29	31	35	37	41	43	47	49
SE_SMELTER_50	50	0.002828	0.00319	0.002551	0.00306	0.002292	0.002823	0.00223	0.00257
SE_SMELTER_10	10.5	0.067542	0.075682	0.059682	0.07109	0.052648	0.064483	0.050429	0.057872
HUARAUCACA_10	10.5	0.002405	0.001541	0.000002	0.000453	0.000936	0.001358	0.001109	0.001403
MPO_50	50	0.001064	0.001219	0.001007	0.001225	0.00094	0.001171	0.000943	0.001094
SE_HUARAUC_N_10	10.5	0.002405	0.001541	0.000002	0.000453	0.000936	0.001358	0.001109	0.001403
SAMD_046	0.46	0.066829	0.074883	0.059052	0.070339	0.052091	0.063802	0.049895	0.05726
CHANC_046	0.46	0.005862	0.005677	0.003446	0.003648	0.002176	0.002412	0.001568	0.00165
SE_CONCENTRADORA_B_105	10.5	0.002405	0.001541	0.000002	0.000453	0.000936	0.001358	0.00111	0.001403
SE_CONCENTRADORA_A_105	10.5	0.001369	0.001726	0.00181	0.002312	0.00192	0.002359	0.001633	0.001827
FUNDICION_50	50	0.002825	0.003186	0.002548	0.003056	0.00229	0.00282	0.002228	0.002568
MPO_10	10.5	0.031688	0.031268	0.029433	0.027168	0.027292	0.024781	0.022309	0.01813
SMELTER EQ	0.46	0.358114	0.400406	0.314718	0.374397	0.276708	0.338637	0.264466	0.303331
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	0.001369	0.001726	0.00181	0.002312	0.00192	0.002359	0.001633	0.001827
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	0.046479	0.043867	0.025666	0.026802	0.015662	0.017238	0.011094	0.011636
SE_AMPLIACION_T8_105	10.5	0.003563	0.004984	0.005087	0.006507	0.005409	0.006836	0.005392	0.006315
SE_AMPLIACION_T6_T7_105	10.5	0.001327	0.002255	0.003206	0.004259	0.003745	0.004789	0.003773	0.004457
Ampliacion_Pb_046	0.46	0.544125	0.60973	0.480795	0.572634	0.424025	0.519283	0.40591	0.465775
Ampliacion_Zn_046	0.46	0.331619	0.371707	0.293126	0.349043	0.258435	0.316411	0.247057	0.283452
Ampliacion_Mo_416	4.16	0.001252	0.002407	0.003026	0.004019	0.003534	0.004519	0.00356	0.004206
CH RIO B_105	10.5	0.002321	0.001487	0.000002	0.000438	0.000904	0.001313	0.001073	0.001357
CH JUPAYR_105	10.5	0.002039	0.001308	0.000002	0.000387	0.000803	0.001169	0.00096	0.001217
CR_10	10.5	0.000975	0.000537	0.000626	0.000977	0.001118	0.001473	0.0011	0.001326
SE_HUARAUC_N_50	50	0.000388	0.000405	0.000268	0.000289	0.000178	0.000199	0.000127	0.000134
SE NUEVA PLANTA_105	10.5	0.00025	0.000263	0.000949	0.001261	0.001234	0.001558	0.001115	0.001309
Nueva Planta Mo_416	4.16	0.000241	0.000253	0.000913	0.001212	0.001187	0.001498	0.001072	0.001258
Nueva Planta Zn_046	0.46	0.025663	0.024722	0.014857	0.01568	0.009316	0.010322	0.006708	0.007064
Nueva Planta Pb_046	0.46	0.040588	0.024055	0.016172	0.012987	0.007716	0.007322	0.005002	0.00639

En las tablas N° 4.11 y N° 4.12 se muestran los valores de distorsión de tensión hasta el orden del 49vo armónico de todas las barras del sistema eléctrico proyectado con filtros, claramente se puede apreciar que en las barras donde se tenía un valor de THD por encima de la norma se han reducido debido al efecto de los filtros que se sintonizan a la frecuencia del armónico que se desea mitigar. De esta manera se obtiene la reducción de los armónicos indeseados.

Barras	Tensión Nominal en kV	Armonicos de Tensión	
		THD %	<5%
SE_SMELTER_50	50	0.93	OK
SE_SMELTER_10	10.5	0.95	OK
HUARAUCACA_10	10.5	1.33	OK
MPO 50	50	1.24	OK
SE_HUARAUC_N_10	10.5	1.33	OK
SAMD_046	0.46	0.94	OK
CHANC_046	0.46	1.56	OK
SE CONCENTRADORA B_105	10.5	1.33	OK
SE CONCENTRADORA A_105	10.5	1.23	OK
FUNDICION_50	50	0.93	OK
MPO_10	10.5	1.43	OK
SMELTER EQ	0.46	2.61	OK
CONCENTRADORA EQ 10.5	10.5	1.23	OK
CONCENTRADORA EQ 046	0.46	1.68	OK
SE AMPLIACION_T8_105	10.5	1.3	OK
SE AMPLIACION_T6_T7_105	10.5	1.31	OK
Ampliacion_Pb_046	0.46	2.69	OK
Ampliacion_Zn_046	0.46	2.21	OK
Ampliacion_Mo_416	4.16	1.24	OK
CH RIO B_105	10.5	1.28	OK
CH JUPAYR_105	10.5	1.12	OK
CR_10	10.5	1.3	OK
SE_HUARAUC_N_50	50	1.49	OK
SE NUEVA PLANTA_105	10.5	1.28	OK
Nueva Planta Mo_416	4.16	1.24	OK
Nueva Planta Zn_046	0.46	2.15	OK
Nueva Planta Pb_046	0.46	3.35	OK

Tabla N° 4.13. Resultados de Armónicos de Corriente.

En la tabla N° 4.13 se puede apreciar que los valores de THD están por debajo del valor máximo establecido, por lo tanto al utilizar los filtros se logran mitigar los armónicos en el sistema eléctrico.

#### 4.6 Configuración sistema proyectado con filtro Armónicos de Corriente

La distorsión en el punto de interconexión con el sistema Fundición 50 kV para el sistema Proyectado presenta una distorsión de corriente de 3,92% que es menor del límite para  $20 < I_{cc}/I_L < 50$  y cumple con la Std.519 IEEE.

Estos casos son referenciales debido a que se está considerando solo la Norma NTCSE.

En la Tabla N° 4.15 se muestra la distorsión de los armónicos individuales y el TDD total.

Tabla N° 4.14. Resultados de Armónicos de Corriente

Barras	Tensión Nominal en kV	Orden de Armonico %							
		5	7	11	13	17	19	23	31
FUNDICION_50	50	0.65731	3.863401	0.139728	0.139728	0.008173	0.007	0.003941	0.004079
		<b>29</b>	<b>31</b>	<b>35</b>	<b>37</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>47</b>	<b>49</b>
		0.002856	0.003015	0.002136	0.002423	0.001638	0.001923	0.00139	0.001537

. Tabla N° 4.15 Resultados de Armónicos de Corriente.

Barras	Tensión Nominal en kV	Armonicos de Corriente			
		Icc (kA)	IL (kA)	Icc/IL	TDD %
FUNDICION_50	50	7.426	0.23	32.29	3.92

#### 4.7 Cálculo del factor k del transformador

A continuación se muestra el cálculo del factor K para el transformador que cuenta con un variador de velocidad de un motor de 150 HP.

Tabla N° 4.16 Calculo del factor K.

Orden de Armónicos	F (Hz)	VFD CON MOTOR DE 150 HP				
		I (A)	Ih/I1%	Ih/I1	(Ih/I1)^2	(Ih/I1)^2*h^2
1	60	7.00	100.00	1.00	1.00	1.00
5	300	3.10	44.30	0.44	0.20	4.91
7	420	1.60	22.90	0.23	0.05	2.57
11	660	0.60	8.60	0.09	0.01	0.89
13	780	0.50	7.10	0.07	0.01	0.85
17	1020	0.30	4.30	0.04	0.00	0.53
19	1140	0.20	2.90	0.03	0.00	0.30
23	1380	0.20	2.90	0.03	0.00	0.44
25	1500	0.10	1.40	0.01	0.00	0.12
29	1740	0.10	1.40	0.01	0.00	0.16
31	1860	0.10	1.40	0.01	0.00	0.19
35	2100	0.10	1.40	0.01	0.00	0.24
37	2220	0.10	1.40	0.01	0.00	0.27
41	2460	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
43	2580	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
47	2820	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
49	2940	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>K =</b>					<b>12.49</b>	

Para determinar el factor K consiste en calcular los cuadrados de los valores proporcionales a cada armónico de corriente multiplicado por el orden de armónico al cuadrado con lo que se obtiene un valor de 12,49 sería adecuado para esta carga un valor de clasificación de 20, valor adecuado para un variador de velocidad.

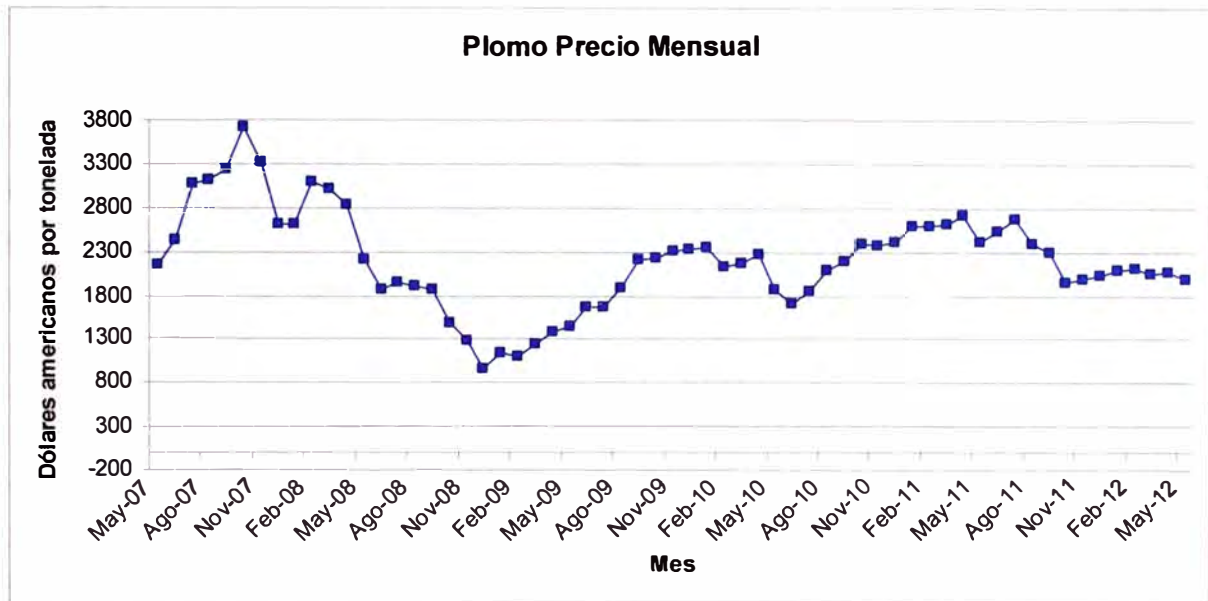
#### 4.8 Evaluación del impacto económico debido al problema de distorsión armónica

La barra de Ampliación Pb produce en condiciones normales unas 7000 Ton/día (toneladas por día), de los cuales el 10% se convierte en metal procesado, en caso de una falla por presencia de armónicos esta producción se reduce al 50% con lo cual se tendría unos 3500 Ton/día que en material procesado son 350 Ton/día que se dejan de producir.

La barra de Nueva Planta Mo produce en condiciones normales unas 3000 Ton/día, de los cuales el 10% se convierte en metal procesado, en caso de una falla por presencia de

armónicos esta producción se reduce al 100% con lo cual se tendría unos 3000 Ton/día que en material procesado son 300 Ton/día que se dejan de producir.

Se ha recogido la información de la página web *indexmundi* que tiene como fuente al Banco mundial para obtener el precio mensual del plomo en dólares americanos como se muestra en la gráfica N° 4.6. El valor del plomo por tonelada es de 1,999.25 dólares americanos.



Gráfica N° 4.6. Plomo Precio Mensual - Dólares americanos por tonelada métrica.

A continuación se muestra la tabla 4.17 donde se puede apreciar las consecuencias económicas debidas a la distorsión armónica.

Tabla 4.17 Consecuencias económicas de la distorsión armónica.

Problema de Armónicos	Producción Normal Ton/día	Producción en caso de Falla Ton/día	Material producido Ton/día	Pérdidas Totales (US \$)
Nueva Planta Mo	3,000.00	0.00	300.00	599,700.00
Ampliación Pb	7,000.00	3,500.00	350.00	699,650.00
			Total	1,299,350.00

#### 4.9 Comparación del costo del filtro y las pérdidas económicas

Se tiene un precio referencial proporcionado por ABB para los precios de los filtros en DDP (entrega de derechos pagados) donde el vendedor paga todos los gastos hasta dejar la mercancía en el punto convenido en el país de destino, en este caso será en la planta de la minera y comprador no realiza ningún tipo de trámite.

En la Tabla 4.18 se puede apreciar el costo total de los filtros recomendados a instalar.



Tabla 4.18 Descripción de costo del filtro

Costo Final de los Filtros				
		0.4 MVAR	0.3 MVAR	1.2 MVAR
Descripción de costos	Porcentaje/Precio DDP	PRECIO en USD	PRECIO en USD	PRECIO en USD
Precio DDP		29,000.00	21,080.00	85,000.00
IGV	18.00%	5,220.00	3,794.40	15,300.00
Transporte	5.00%	1,450.00	1,054.00	4,250.00
Total sin instalación		35,670.00	25,928.40	104,550.00
Costo conforme a obra				
Puesta en Marcha	55.00%	19,618.50	14,260.62	57,502.50
SubTotal		55,288.50	40,189.02	162,052.50
			<b>Total</b>	<b>257,530.02</b>

Según la tabla 4.18, el costo del filtro representa el 20% de la pérdida total generada.

#### 4.10 Análisis de barrido en frecuencia

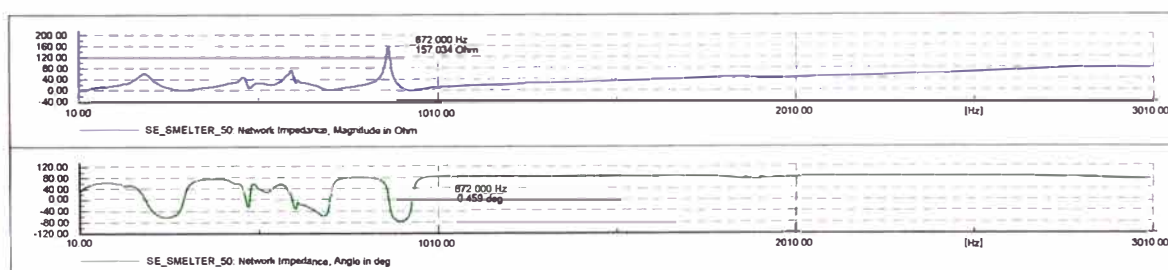
Se realiza el SCAN de frecuencia en la barra LAFUND 50 kV que interconecta la mina BROCAL con la red completa del SEIN.

Las posibles resonancias se presentan cuando el ángulo de la impedancia esta cercano a cero por lo que tiene poca amortiguación ante cualquier fuente de armónicos.

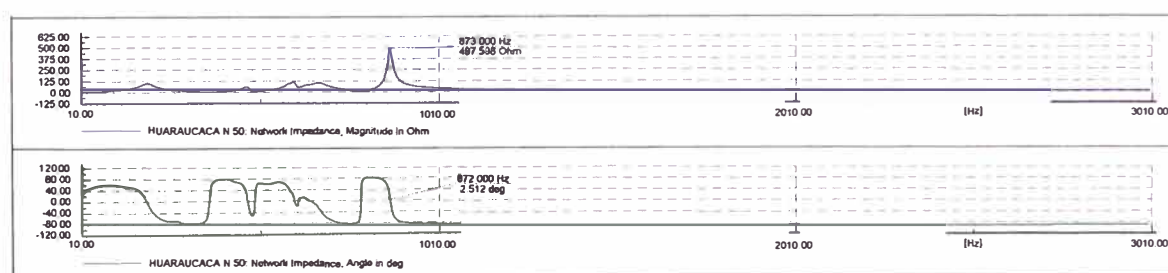
En el barrido de frecuencia o SCAN de Frecuencia una impedancia que alcanza un pico máximo es una posible resonancia paralelo y una corriente pequeña armónica puede producir un alto voltaje armónico.

Para una impedancia que alcanza un pico mínimo es una posible resonancia seria y una pequeña variación de voltaje armónica puede producir una alta corriente armónica.

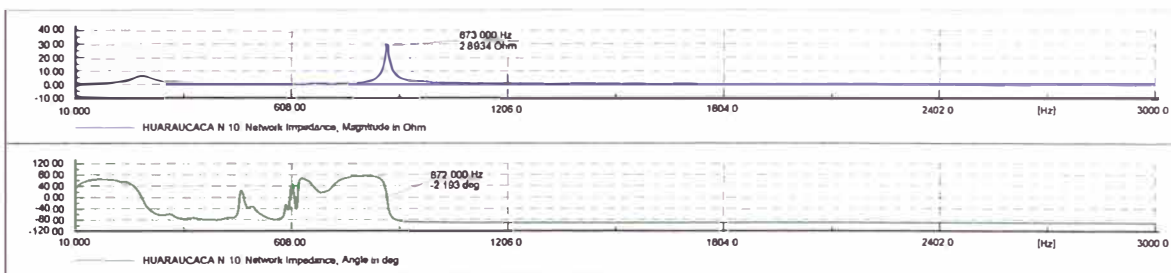
Los resultados del Scan de frecuencia para las diferentes barras se presentan a continuación en gráficos y cuadros.



Gráfica N° 4.7. Scan de frecuencia para la máxima demanda Barra SE\_Smelter\_50.



Gráfica N° 4.8. Scan de frecuencia para la máxima demanda Barra Huaraucaca N 50.



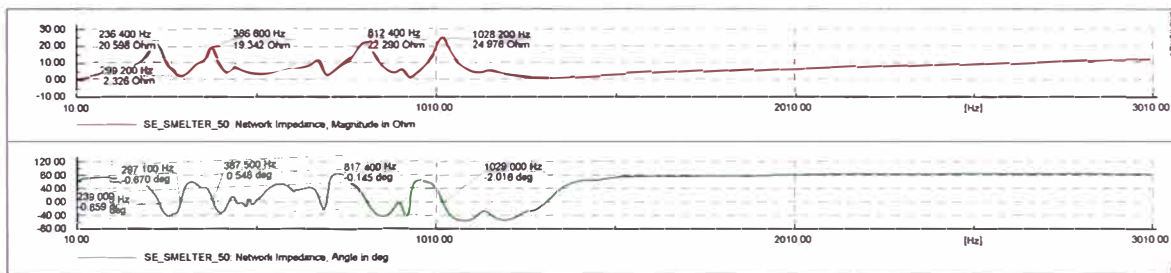
Gráfica N° 4.9. Scan de frecuencia para la máxima demanda Barra Huaraucaca N 10.

A continuación se muestran las tablas para máxima demanda con los puntos de máximas y mínimas scan de frecuencia para las diferentes barras del sistema.

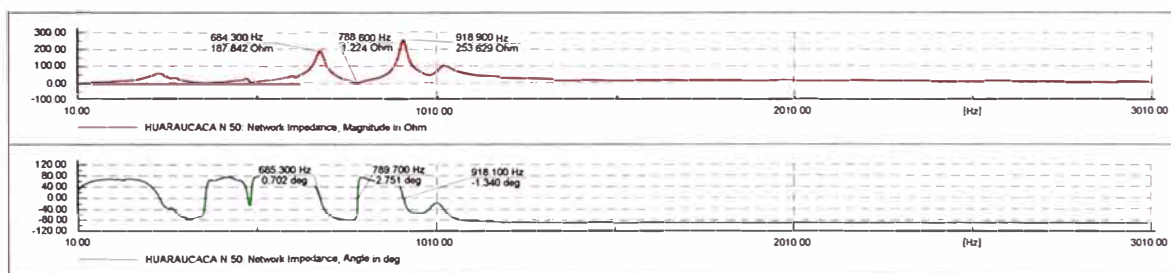
Tabla 4.19 Puntos de máximas y mínimas Scan de frecuencia Máxima Demanda

MAXIMA DEMANDA											
SE SMELTER 50 kV				SE HUARAUCACA 50 kV				SE HUARAUCACA 10 kV			
MAGNITUD	ANGULO			MAGNITUD	ANGULO			MAGNITUD	ANGULO		
HZ	OHM	HZ	GRADOS	HZ	OHM	HZ	GRADOS	HZ	OHM	HZ	GRADOS
872	157	872	0.459	873	497.5	872	2.512	873	28.9	872	2.193

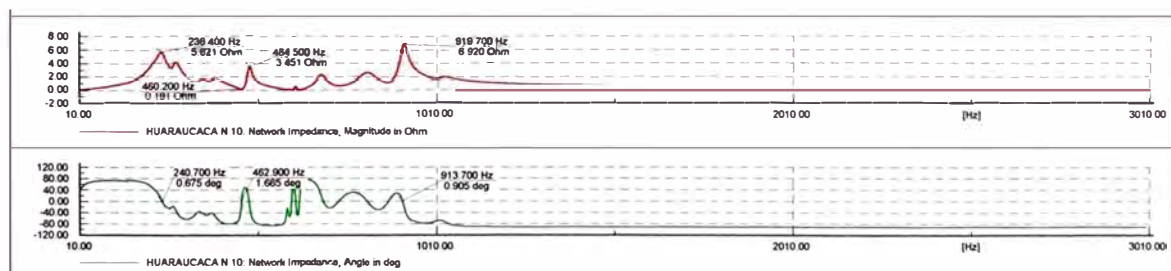
Los resultados del Scan de frecuencia para media demanda para las diferentes barras se presentan a continuación.



Gráfica N° 4.10. Scan de frecuencia para la media demanda Barra SE\_Smelter\_50.



Gráfica N° 4.11. Scan de frecuencia para la media demanda Barra Huaraucaca N 50.



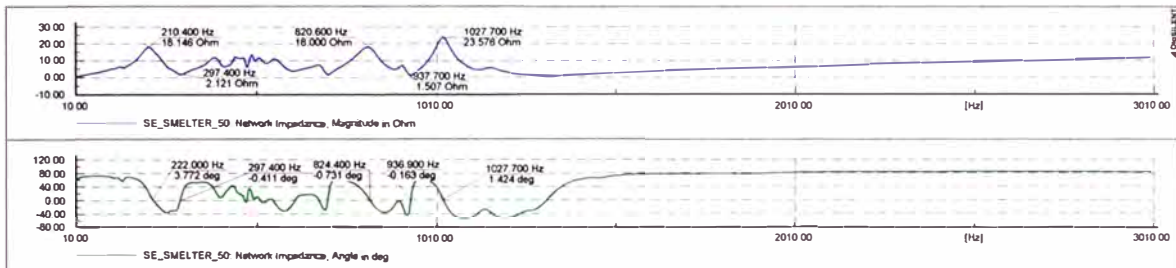
Gráfica N° 4.12. Scan de frecuencia para la media demanda Barra Huaraucaca N 10.

A continuación se muestran las tablas para media demanda con los puntos de máximas y mínimas scan de frecuencia para las diferentes barras del sistema.

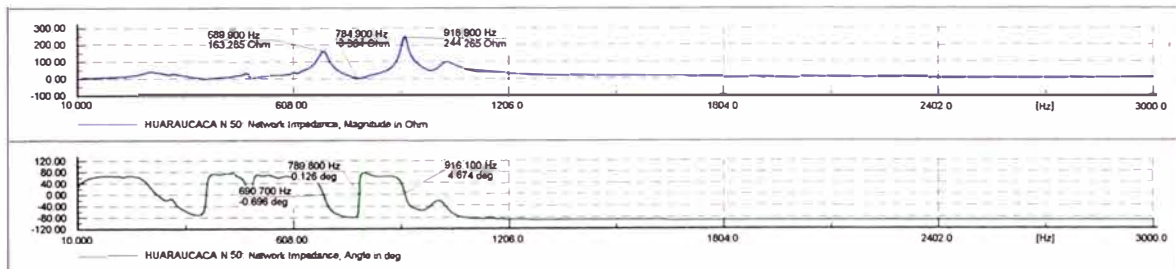
Tabla 4.20 Puntos de máximas y mínimas Scan de frecuencia Máxima Demanda

MEDIA DEMANDA											
SE SMELTER 50 kV				SE HUARAUCACA 50 kV				SE HUARAUCACA 10 kV			
MAGNITUD	ANGULO			MAGNITUD	ANGULO			MAGNITUD	ANGULO		
HZ	OHM	HZ	GRADOS	HZ	OHM	HZ	GRADOS	HZ	OHM	HZ	GRADOS
236.4	20.59	239	-0.85					236.4	5.621	240	0.675
299.2	2.326	297	0.67								
386.8	19.34	387	0.548								
				684.3	187.8	685	0.7	460.2	0.191	462	1.665
				788.6	1.224	789	-2.751				
812.4	22.29	817.4	-0.145								
				918.9	253.6	918	-1.34	919.7	6.92	913.7	0.905
1028.2	24.976	1029	-2.016								

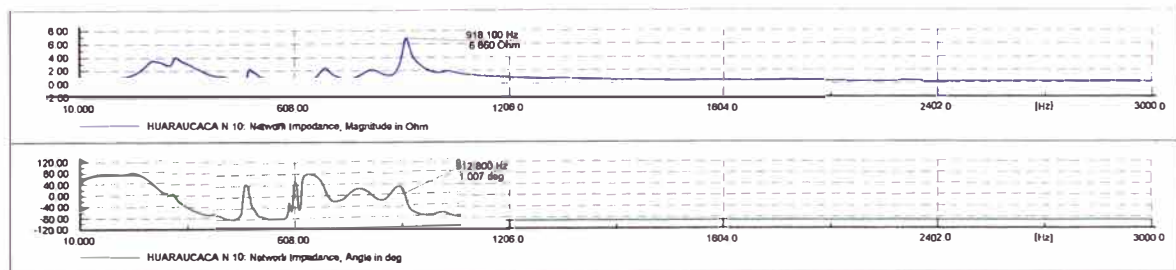
Los resultados del Scan de frecuencia para media demanda para las diferentes barras se presentan a continuación.



Gráfica N° 4.13. Scan de frecuencia para la mínima demanda Barra SE\_Smelter\_50.



Gráfica N° 4.14. Scan de frecuencia para la mínima demanda Barra Huaraucaca N 50.



Gráfica N° 4.15. Scan de frecuencia para la mínima demanda Barra Huaraucaca N 10.

A continuación se muestran las tablas para mínima demanda con los puntos de máximas y mínimas scan de frecuencia para las diferentes barras del sistema.

Tabla 4.21 Puntos de máximas y mínimas Scan de frecuencia Máxima Demanda

SE SMELTER 50 kV				SE HUARAUCACA 50 kV				SE HUARAUCACA 10 kV			
MAGNITUD		ANGULO		MAGNITUD		ANGULO		MAGNITUD		ANGULO	
HZ	OHM	HZ	GRADOS	HZ	OHM	HZ	GRADOS	HZ	OHM	HZ	GRADOS
210.4	18.1	222	3.77								
297.4	2.12	297	-0.41								
				689.9	163.2	690	-0.696				
				784.9	3.3	789	-0.126				
820.6	18	824	-0.731								
				918.9	244.26	916.1	4.674	918.1	6.86	912.8	1
937.7	1.5	936	-0.163								
1027.7	23.5	1027	1.424								

En general son curvas que dan una tendencia a los posibles puntos de resonancias y de sensibilidad a los incrementos de las corrientes de armónicos debido a futuras ampliaciones.

En Máxima demanda no se presentan máximas ni mínimas para los armónicos generados por las fuentes de corriente de la planta.

En Media demanda se presentan los siguientes máximos y mínimos relacionados a los armónicos generados por las fuentes de corriente de la planta.

Tabla 4.22 Puntos de posible resonancia

POSIBLE RESONANCIA				
	ARMONICA	OHM	AMP	V (fase)
MINIMO	5	2.3	14.2	33.0
MAXIMO	11	187.8	0.6	109.6
MINIMO	13	1.2	0.4	0.5
MAXIMO	17	24.9	0.0	0.1

En los máximos con la corriente armónica calculada y la impedancia del SCAN se tiene para el 11vo armónico una tensión de 109.6 Voltios que equivale al 0.37% de 28900 voltios fase, lo cual es inferior al 3.5% de la norma..

Tabla 4.23 Puntos de posible resonancia

POSIBLE RESONANCIA				
	ARMONICA	OHM	AMP	V (fase)
MINIMO	5	2.1	14.2	30.2
MAXIMO	11	163.2	0.6	95.3
MINIMO	13	3.3	0.4	1.4
MAXIMO	17	23.5	0.02	0.4

Respecto a la mínima la corriente calculada de 5to armónico es 14.2 Amperios que resulta con una tensión de 33 voltios fase. Si se presentara corrientes mayores por incremento de convertidores en la planta la corriente puede elevarse debido a este mínimo. En Mínima demanda se presentan los siguientes máximos y mínimos relacionados a los armónicos generados por las fuentes de corriente de la planta.



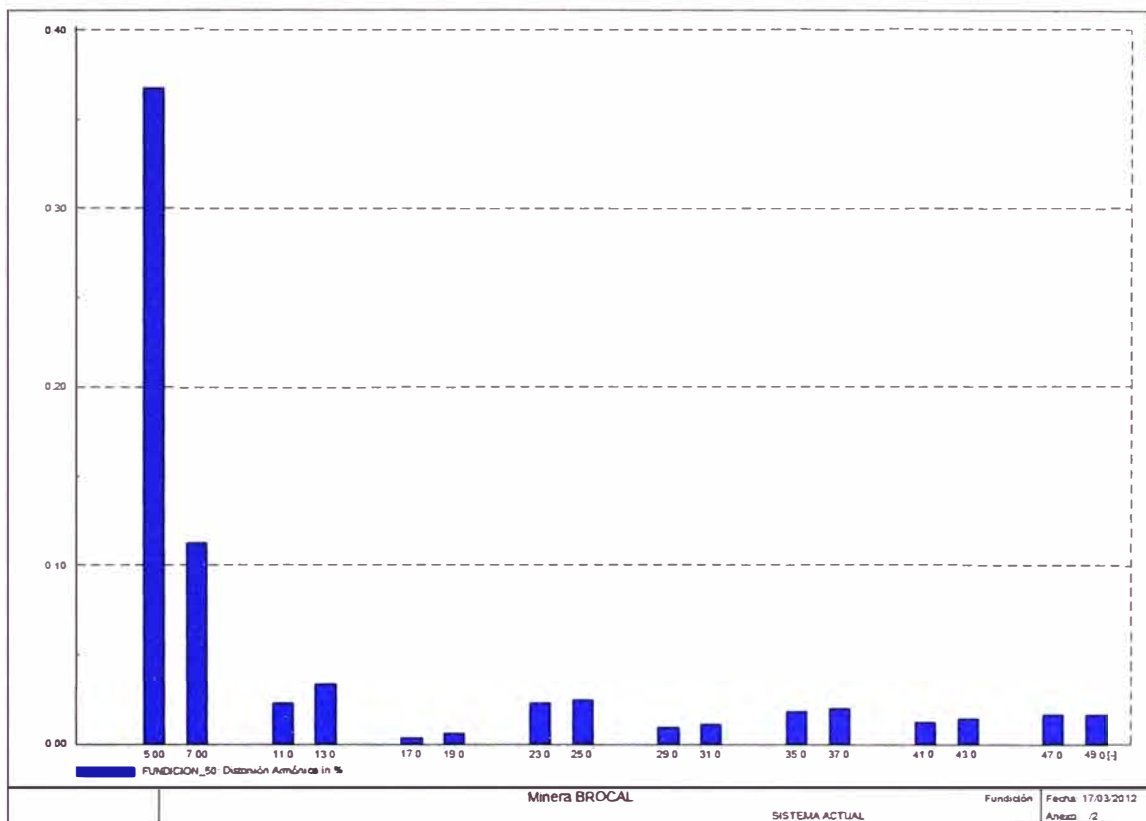
## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) Del Análisis de la distorsión de voltaje por la generación de armónicos proveniente de los variadores de velocidad de los motores (VFD) del BROCAL se concluye que no se presentan distorsiones de voltaje que afecten la calidad en la barra FUNDICIÓN 50kV. Los índices dan valores menores del 5% por distorsión de voltaje debido a los armónicos.
- 2) Para el sistema proyectado con demanda de 18 MW, que considera la Ampliación y Nueva Planta en el BROCAL, los motores con variadores de velocidad de los motores (VFD) que operaran no generan distorsiones mayores del 5% en la barra de FUNDICIÓN 50kV.
- 3) Respecto a los armónicos de corriente en el Sistema Proyectado de 18 MW en el BROCAL se presenta alto contenido de armónicos en el enlace de CHANC con índices THD del orden de 10.71%. En la barra Ampliacion\_Pb\_046 se encuentra con índices de THD del orden de 8,86% y por ultimo en la barra Nueva Planta Mo\_416 se encuentra con índices de THD del orden de 6,87%. Estas barras, si bien es cierto son barras internas del sistema eléctrico EL BROCAL no cumplen con el valor establecido deberían establecerse la mitigación de los armónicos para el buen funcionamiento de los equipos y el sistema
- 4) Se recomienda para el sistema proyectado con 18 MW la instalación de filtros de 7 mo armónico de 0,4 MVAR en la barra de CHANC 0.46 kV, que mitigan estas tensiones, alcanzando reducir el índice THD de 10.71% a 1,56%. En la barra Ampliación para Pb 0.46 kV se recomienda utilizar un filtro de 0,3 MVAR para mitigar el 7mo armónico y reducir el THD de 8,86% a 2,69%. En la barra Nueva planta Mo 416 se recomienda utilizar un filtro de 0. MVAR para mitigar el 5to armónico y reducir el THD de 6,87% a 1,24%.
- 5) Se recomienda utilizar transformadores con factor K, que están diseñados para reducir los efectos por calentamiento de las corrientes armónicas creadas por las cargas no lineales.

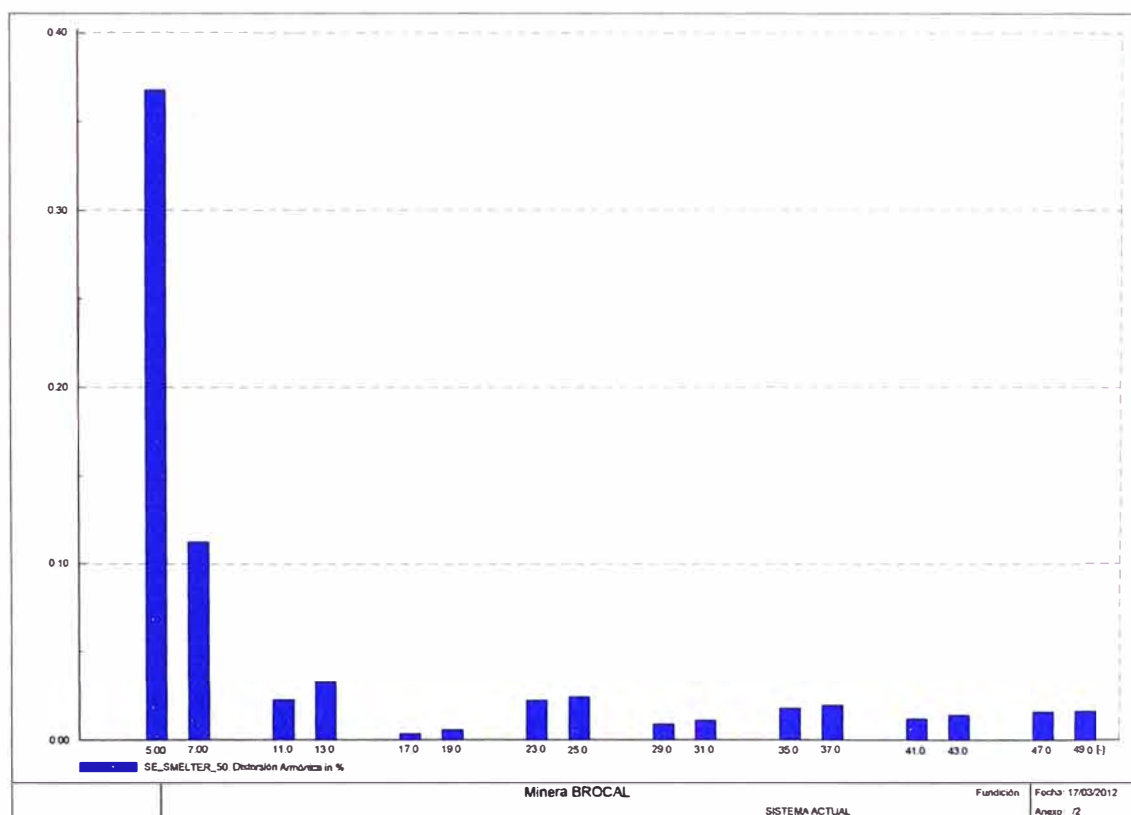
- 6) Como se puede apreciar el costo de la inversión de la inversión de los filtros representa el 20% de las perdidas generadas por el problema de los armónicos, por tanto se recomienda la instalación de los filtros en las barras donde el valor de THD excede el valor establecido por la norma para un mejor funcionamiento del sistema eléctrico de la minera.

## **ANEXOS**

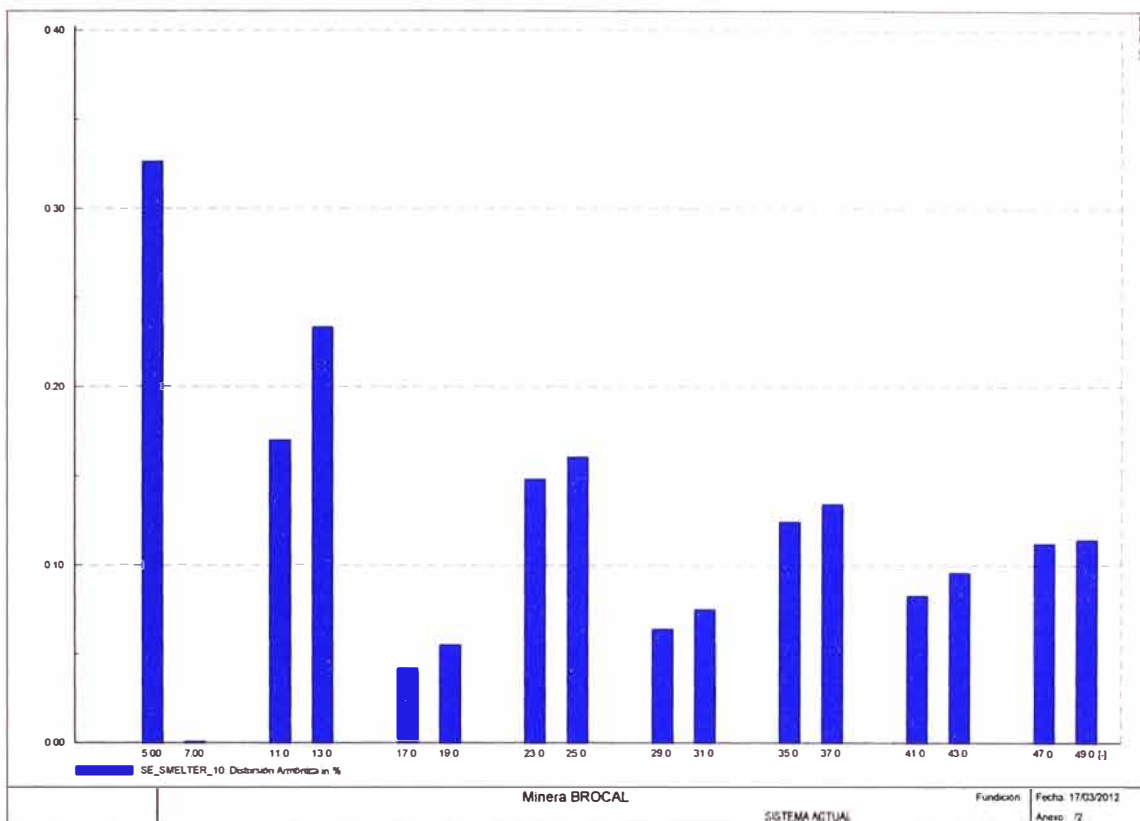
## ANEXO A: Gráficas de Armónicos de Tensión Sistema Actual



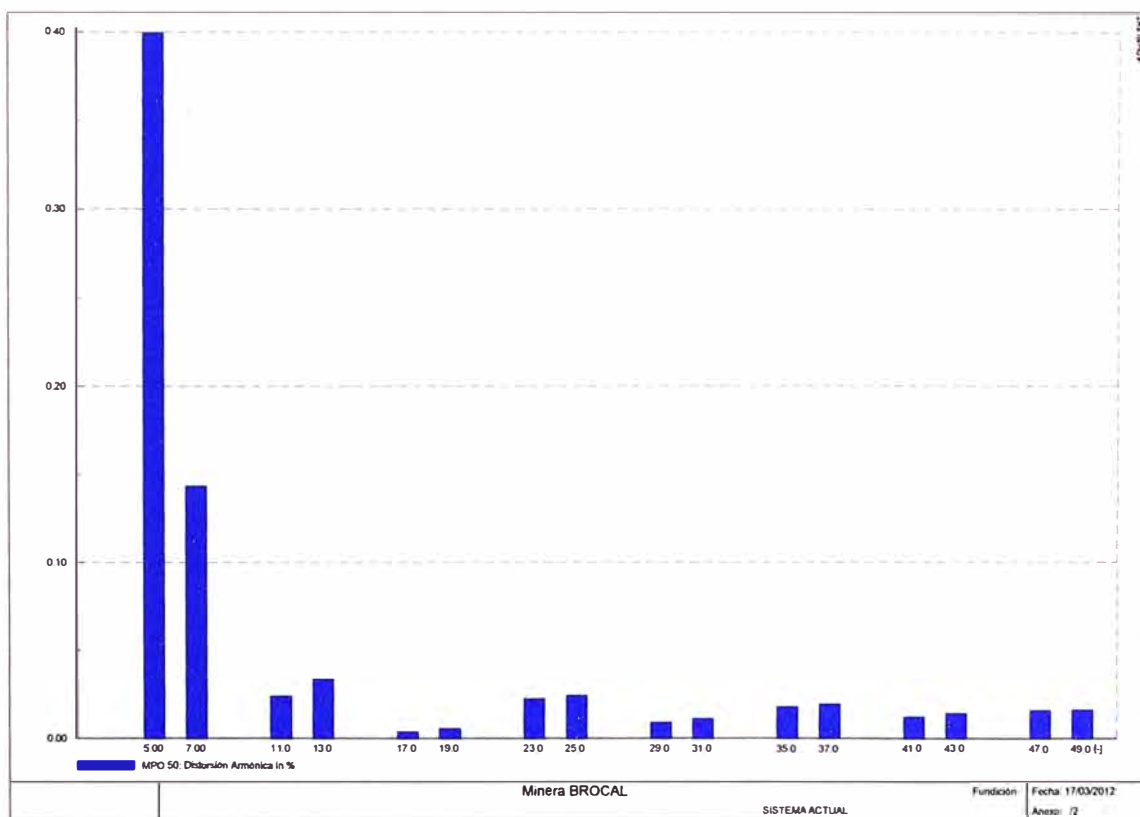
Armónicos de tensión barra FUNDICION 50 kV



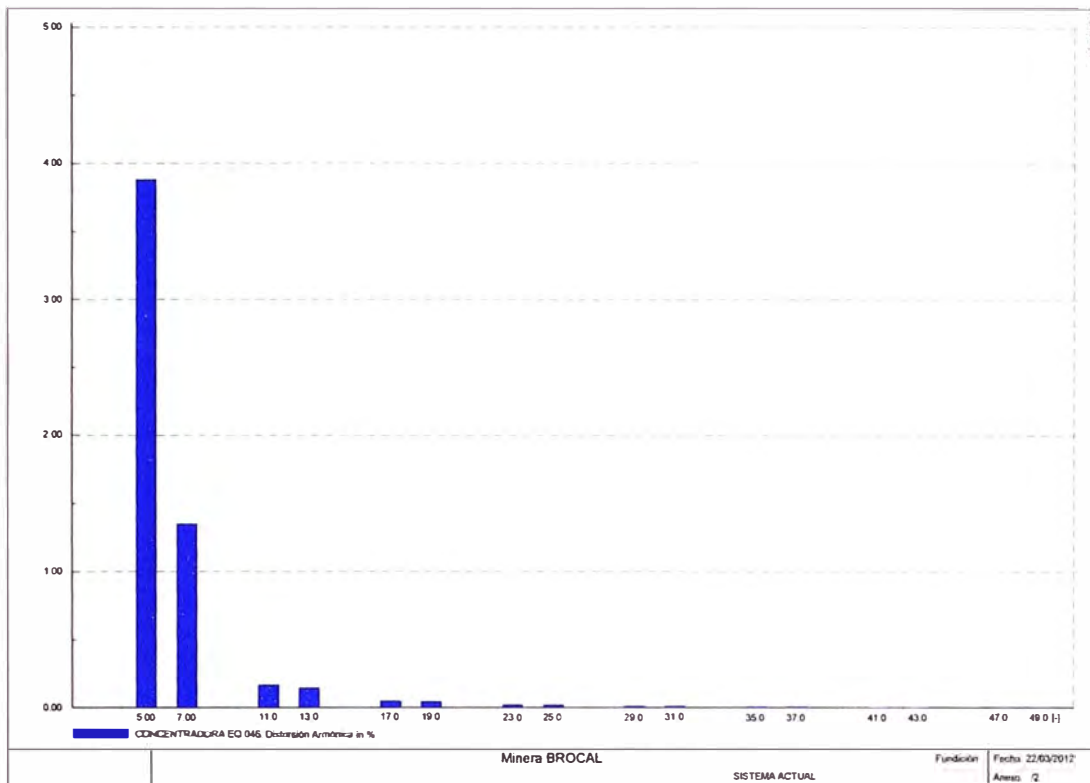
Armónicos de tensión barra SMELTER 50 kV



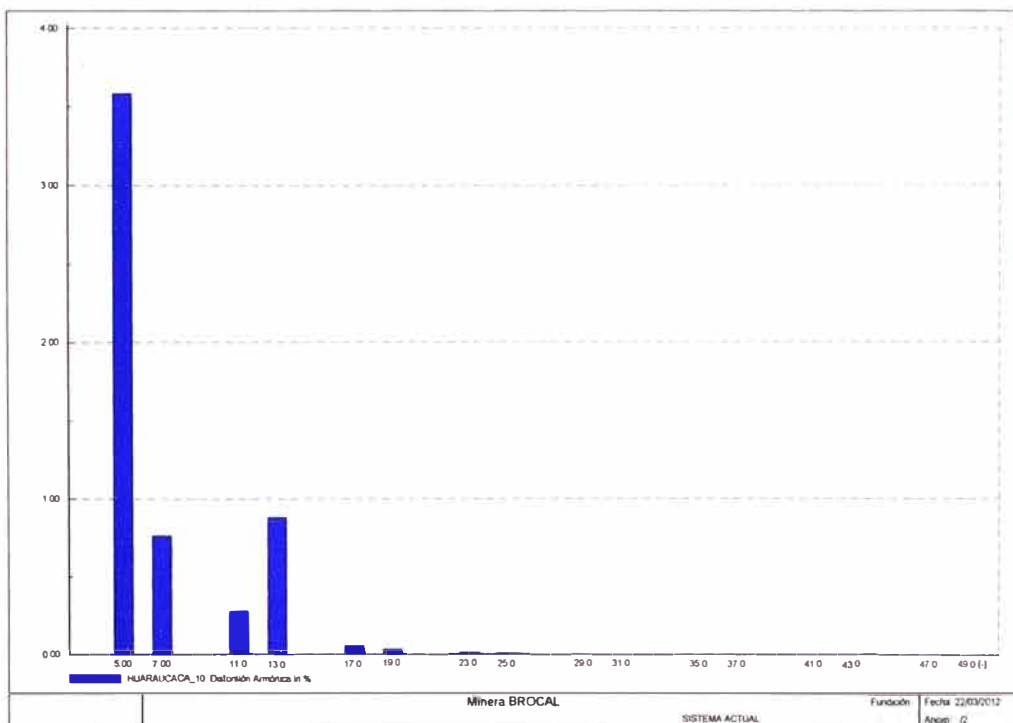
Armónicos de tensión barra SMELTER 10.5 kV



Armónicos de tensión barra MPO

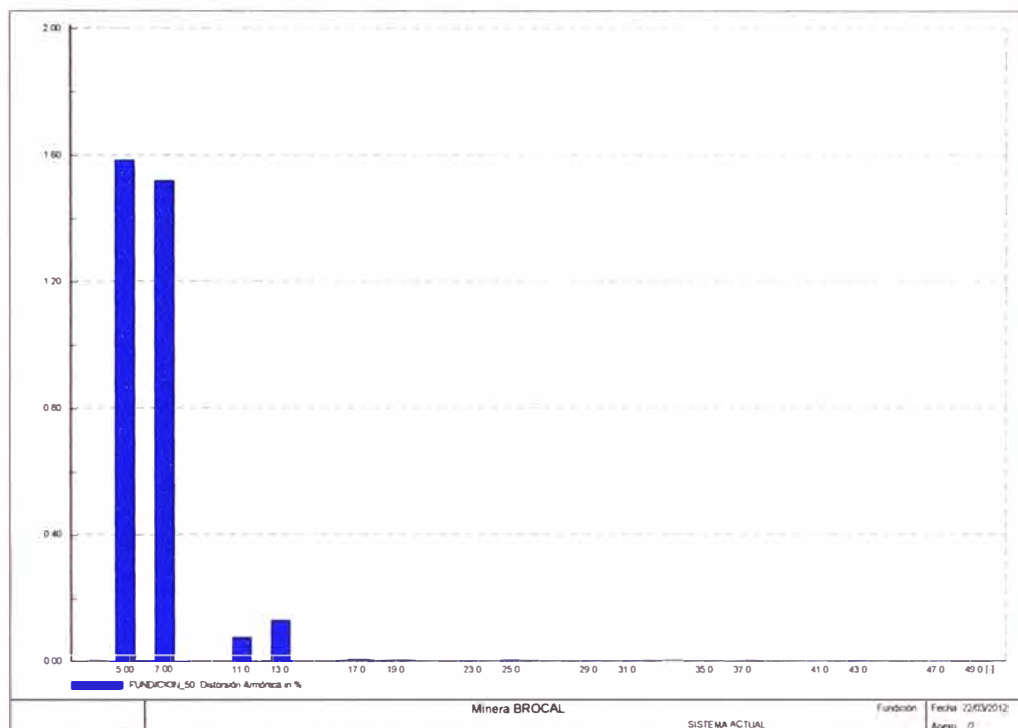


Armónicos de tensión barra CONCENTRADORA EQ 046

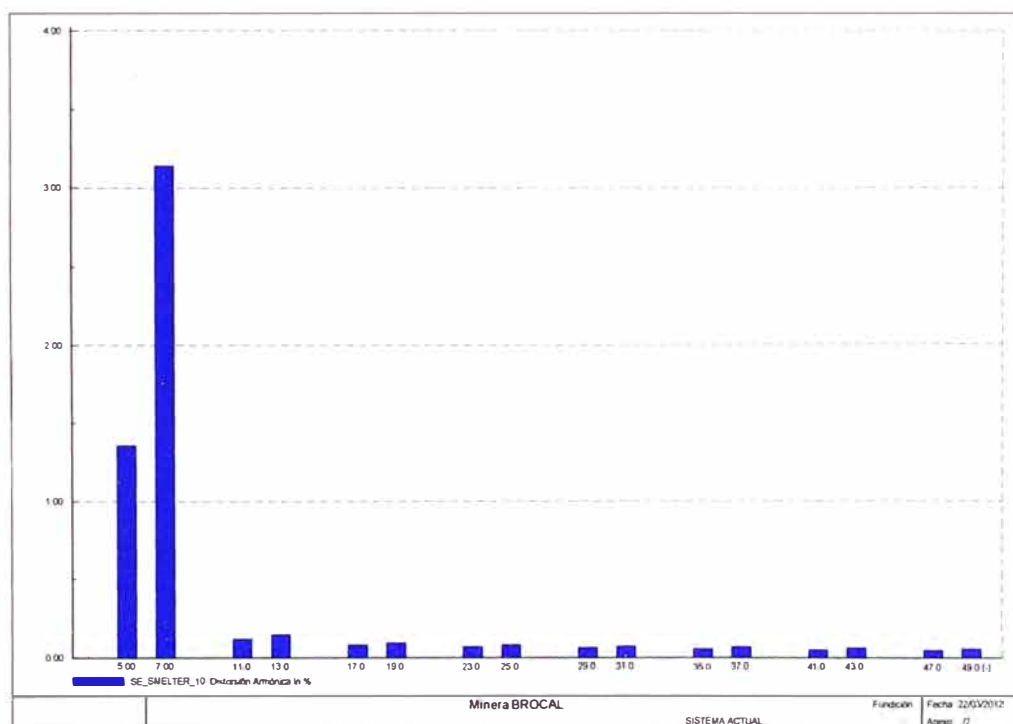


Armónicos de tensión barra HURAUCACA 10

Armónicos de tensión Sistema Proyectado

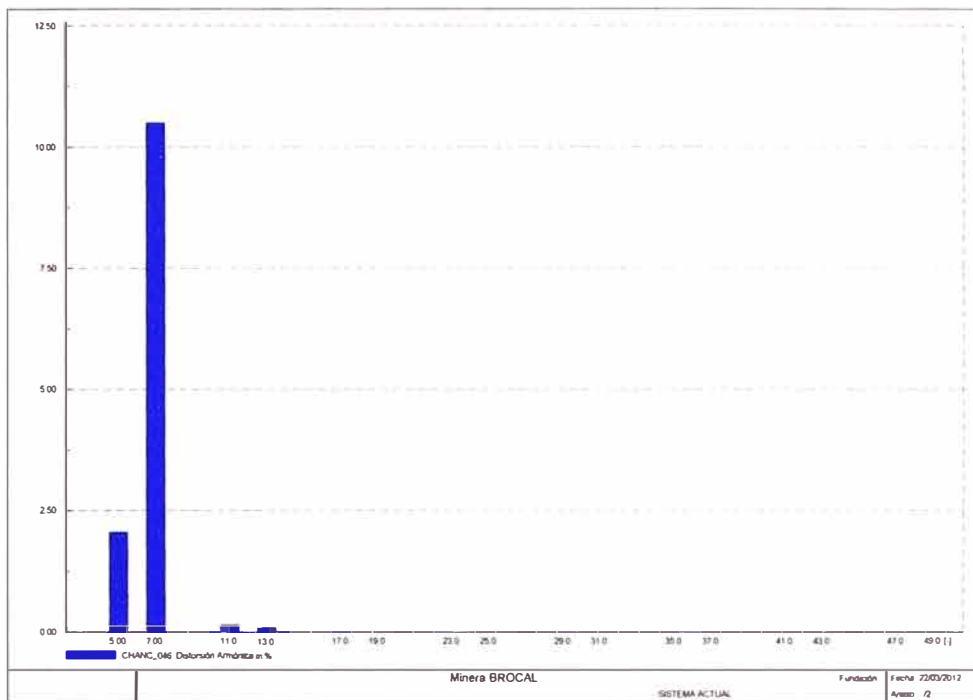


Armónicos de tensión barra FUNDICION 50 kV

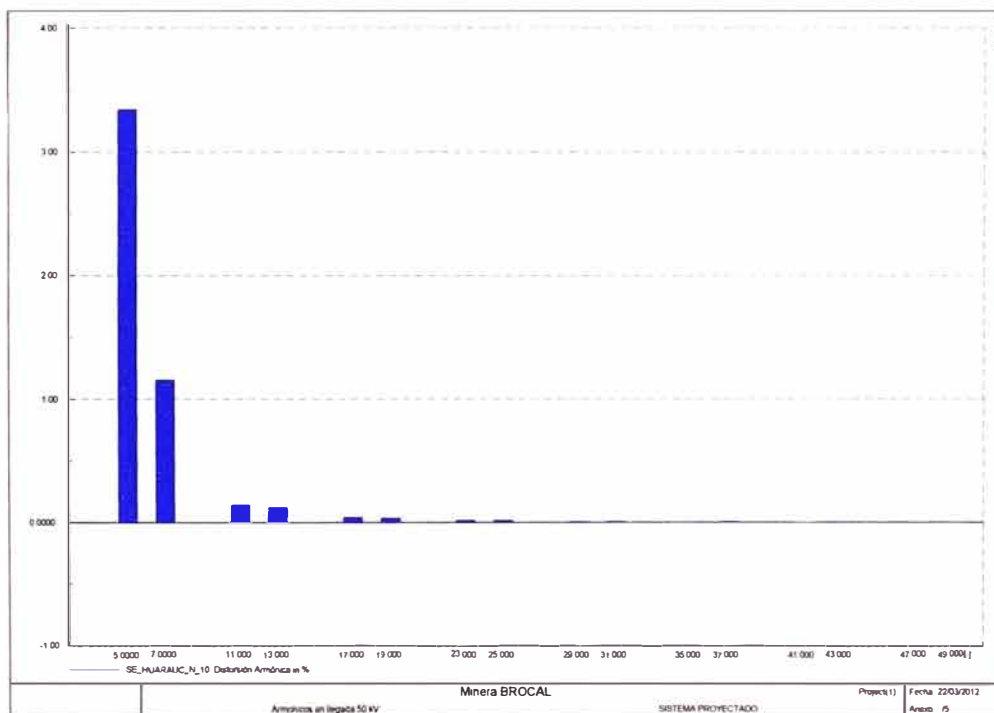


Armónicos de tensión barra SE SMELTER 10

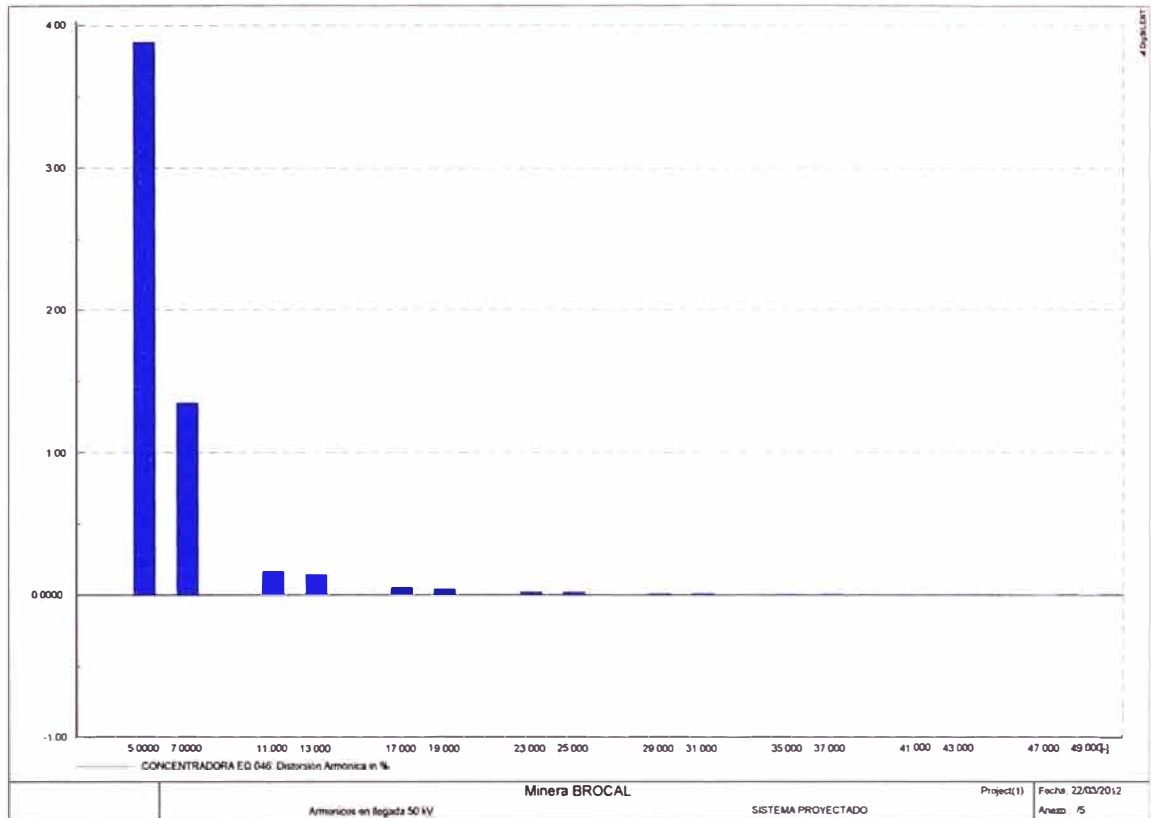




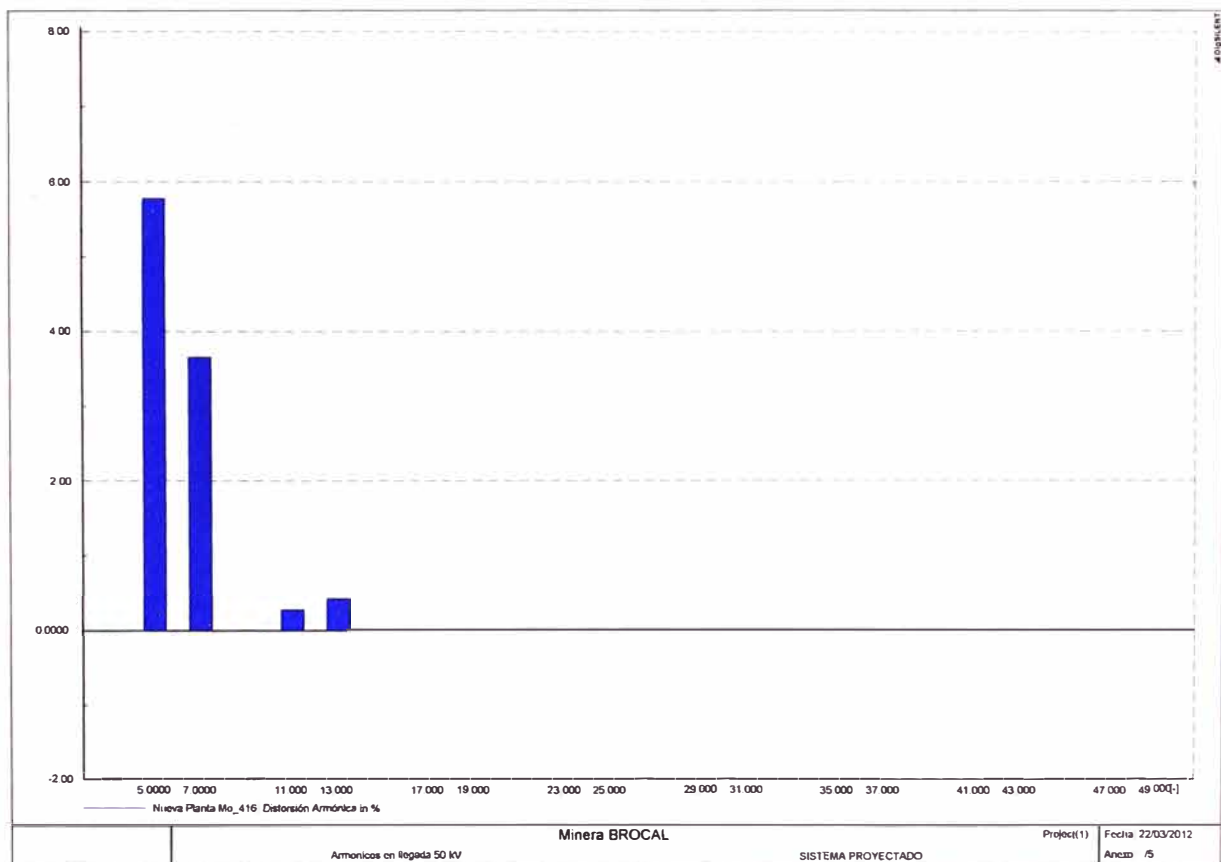
Armónicos de tensión barra CHANC\_046



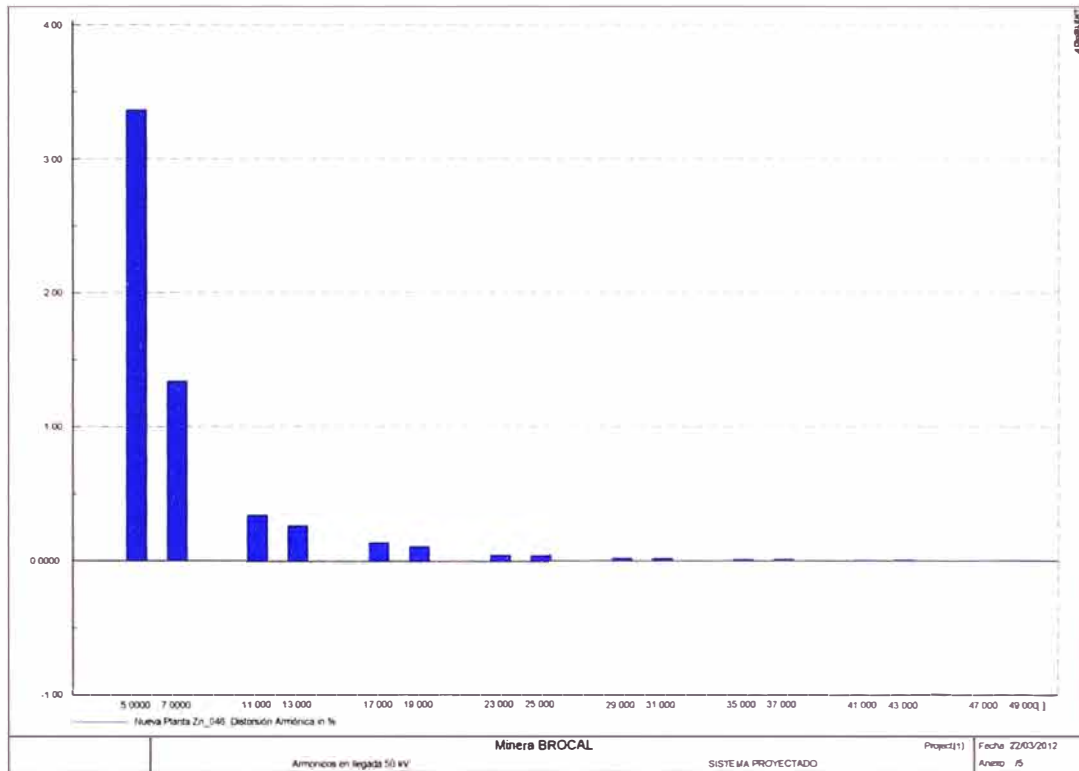
Armónicos de tensión barra SE HURAUACA N 10



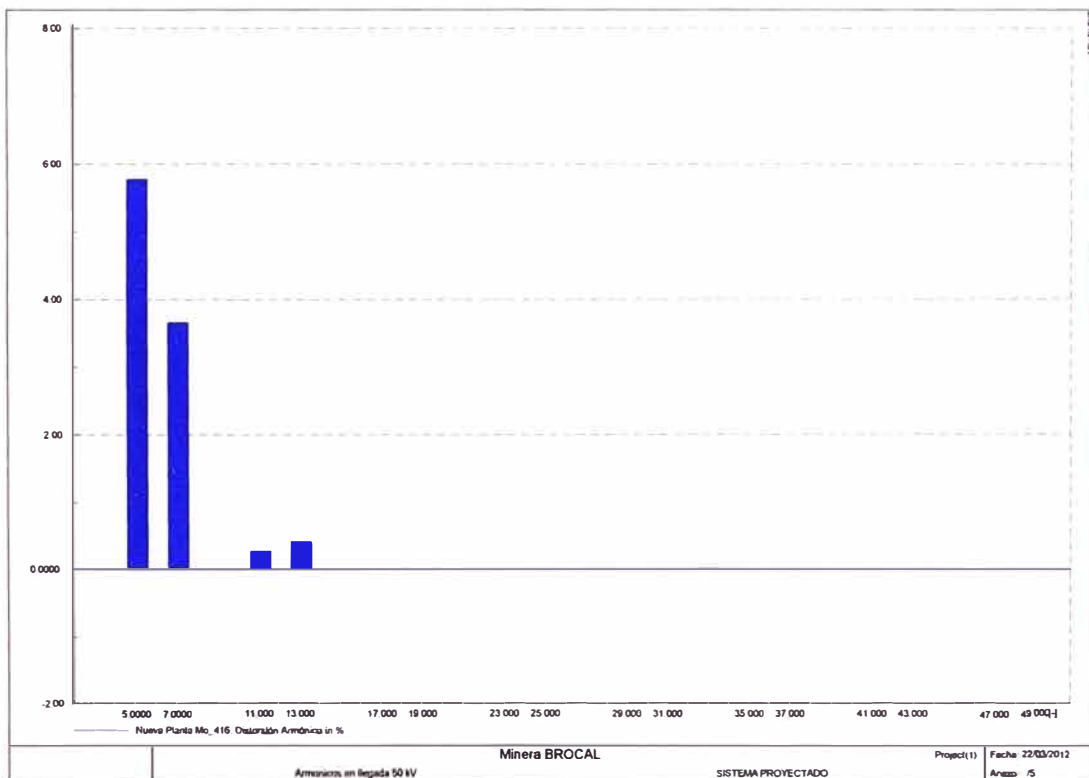
Armónicos de tensión barra CONCENTRADORA EQ 046



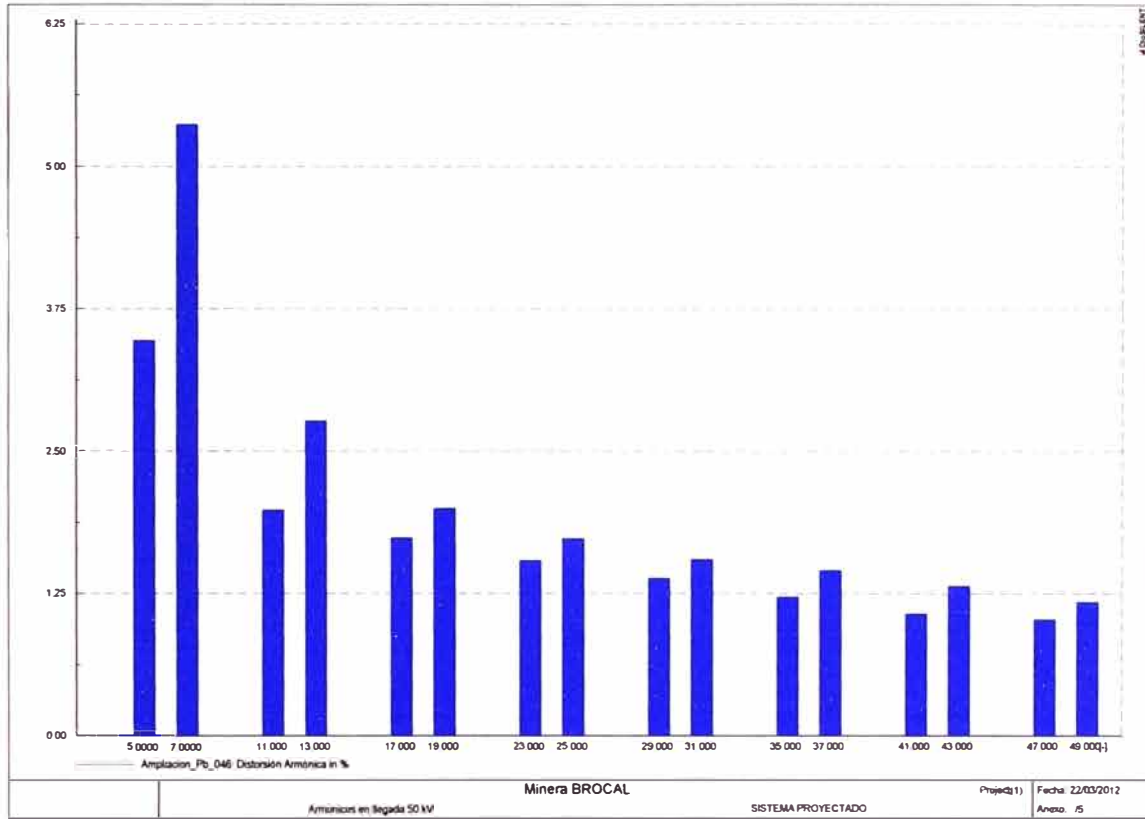
Armónicos de tensión barra Nueva Planta 416



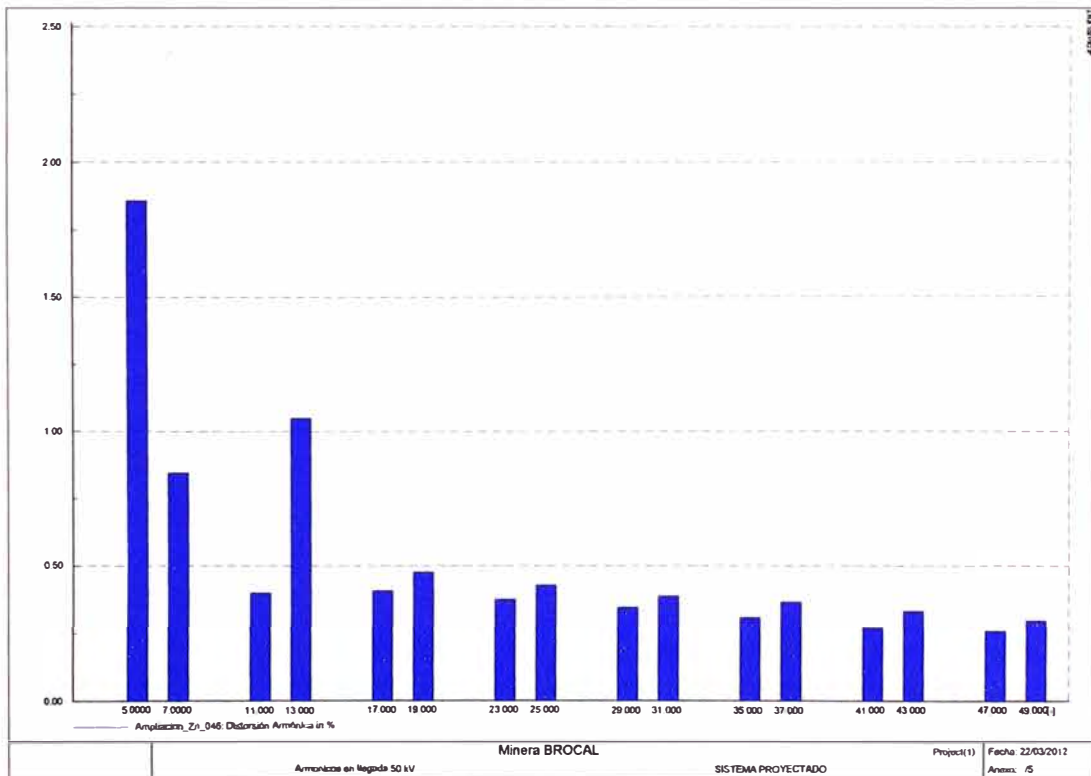
Armónicos de tensión barra Nueva Planta Zn 046



Armónicos de tensión barra Nueva Planta Mo 416

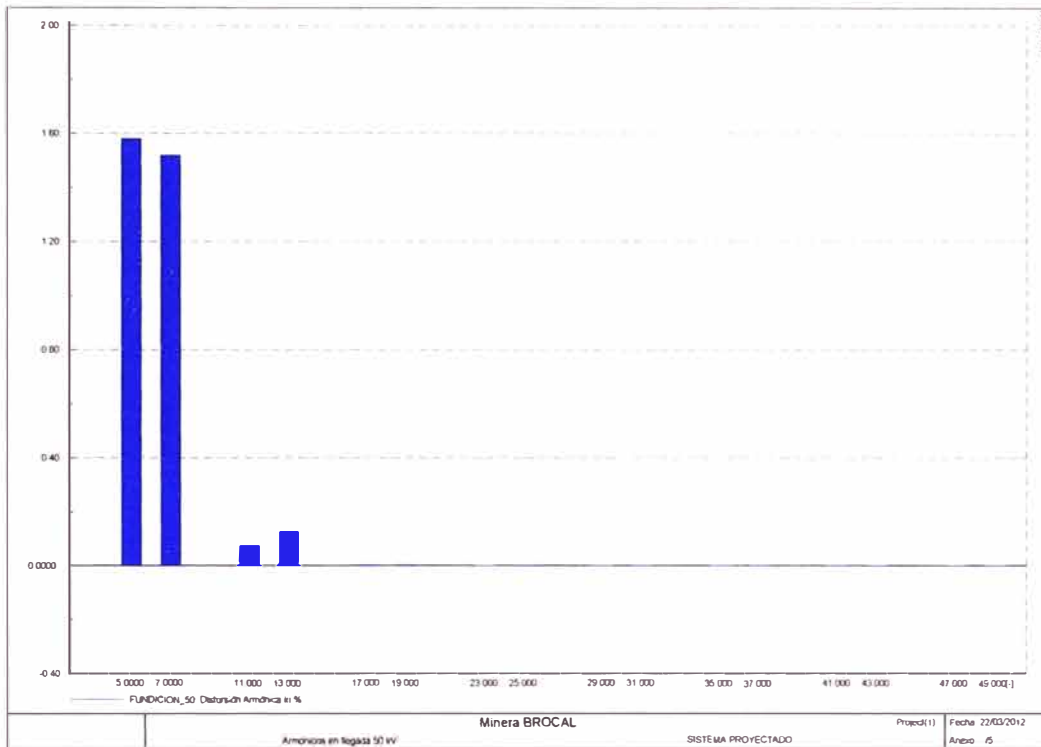


Armónicos de tensión barra Ampliación Pb 046

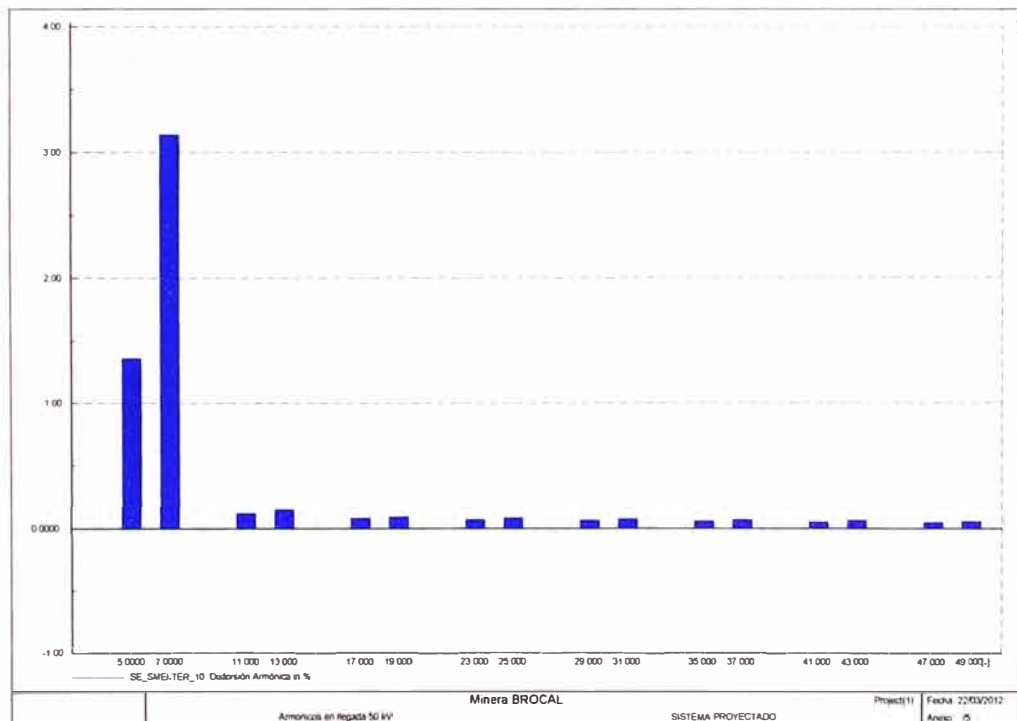


Armónicos de tensión barra Ampliación Zn 046

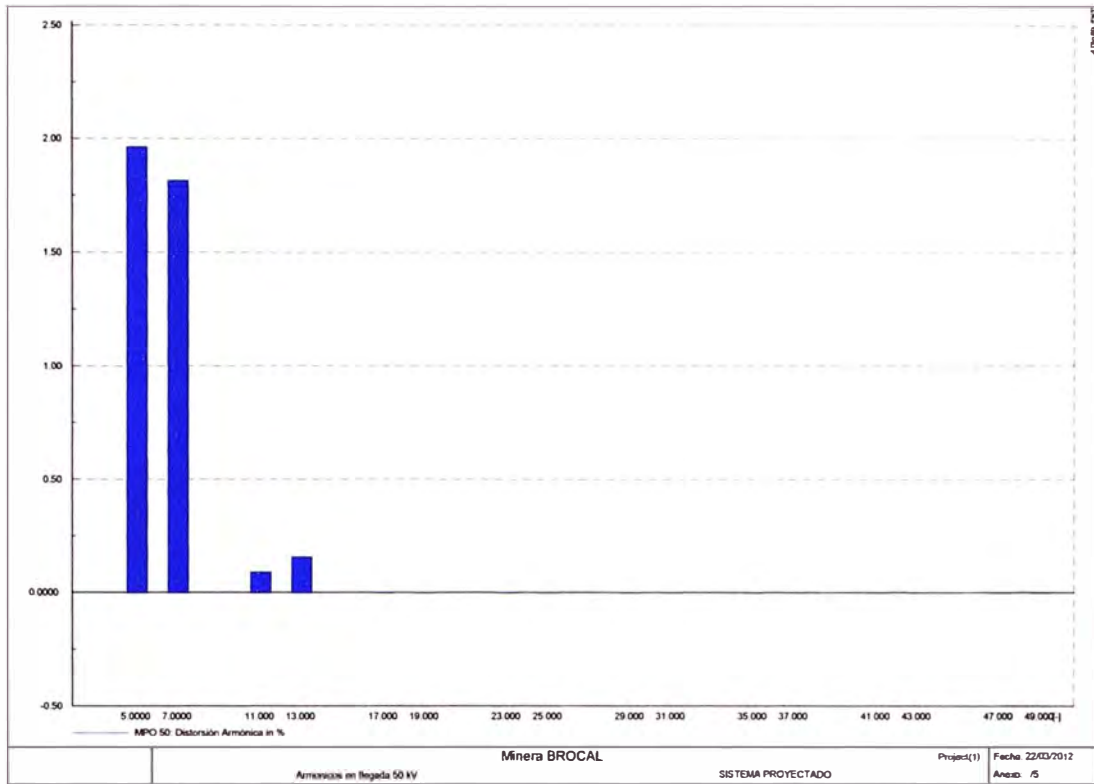
### Armónicos de tensión Sistema Proyectado con filtro



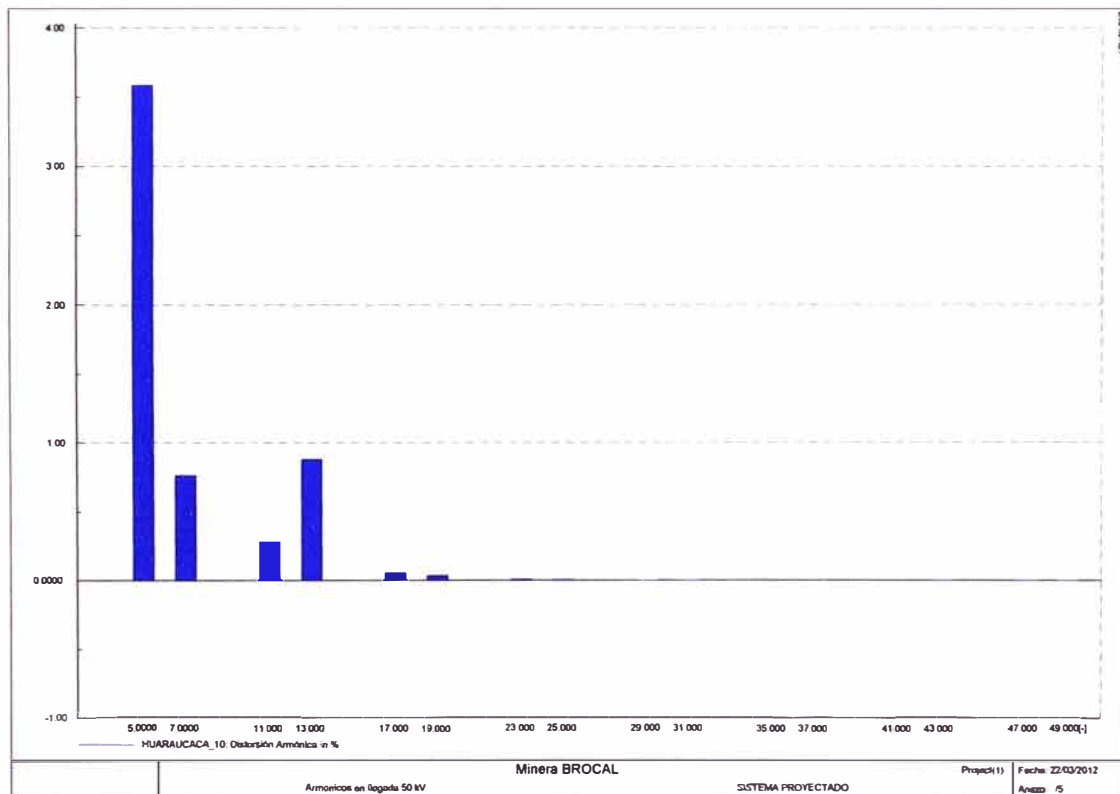
### Armónicos de tensión barra FUNDICION 50 kV



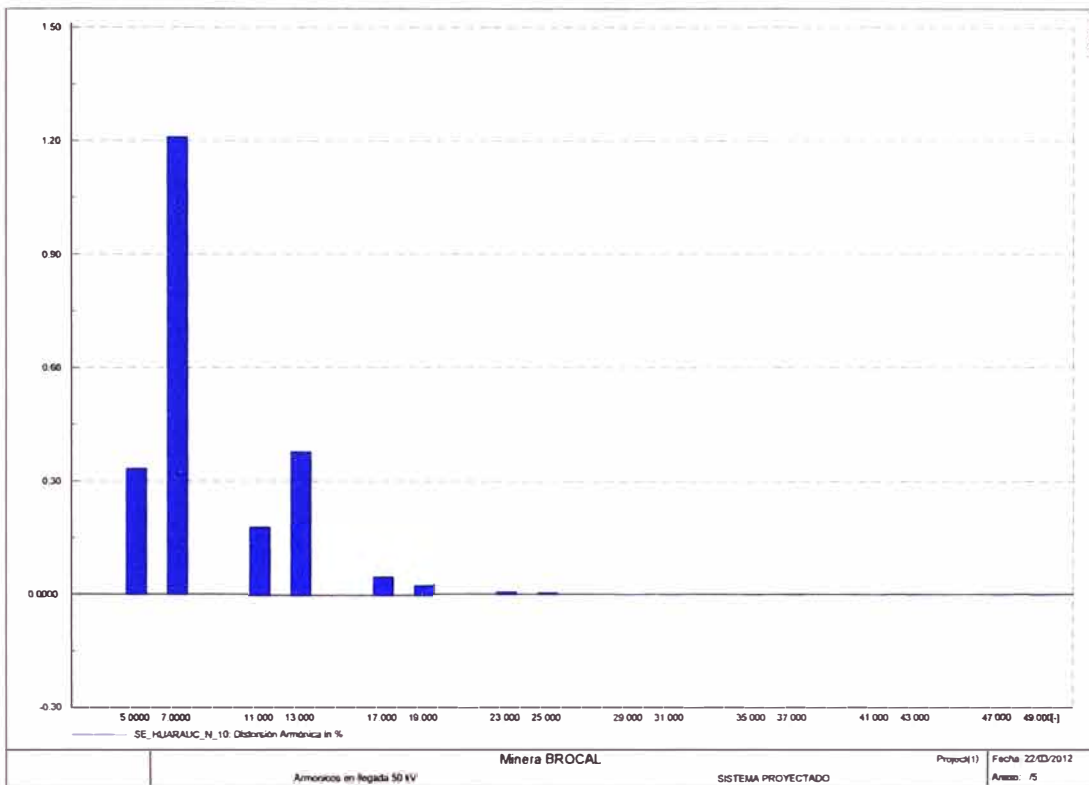
### Armónicos de tensión barra SE SMELTER 10



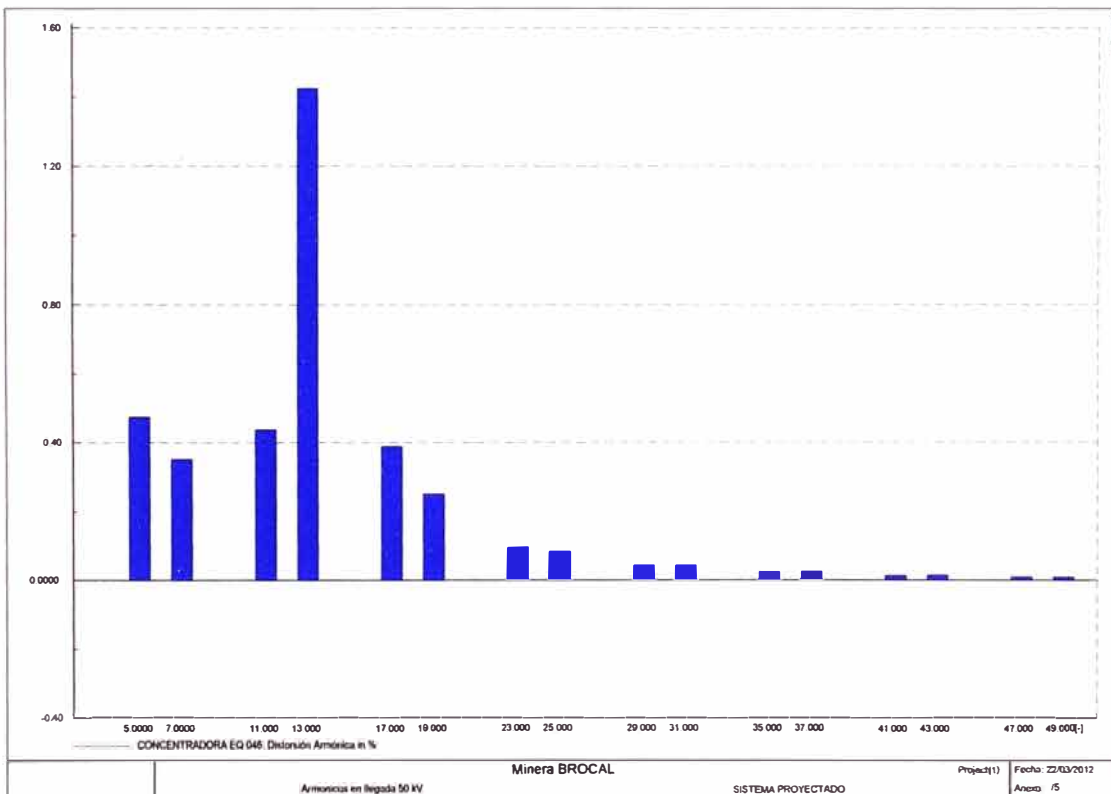
Armónicos de tensión barra MP● 50



Armónicos de tensión barra HUARAUCA 10

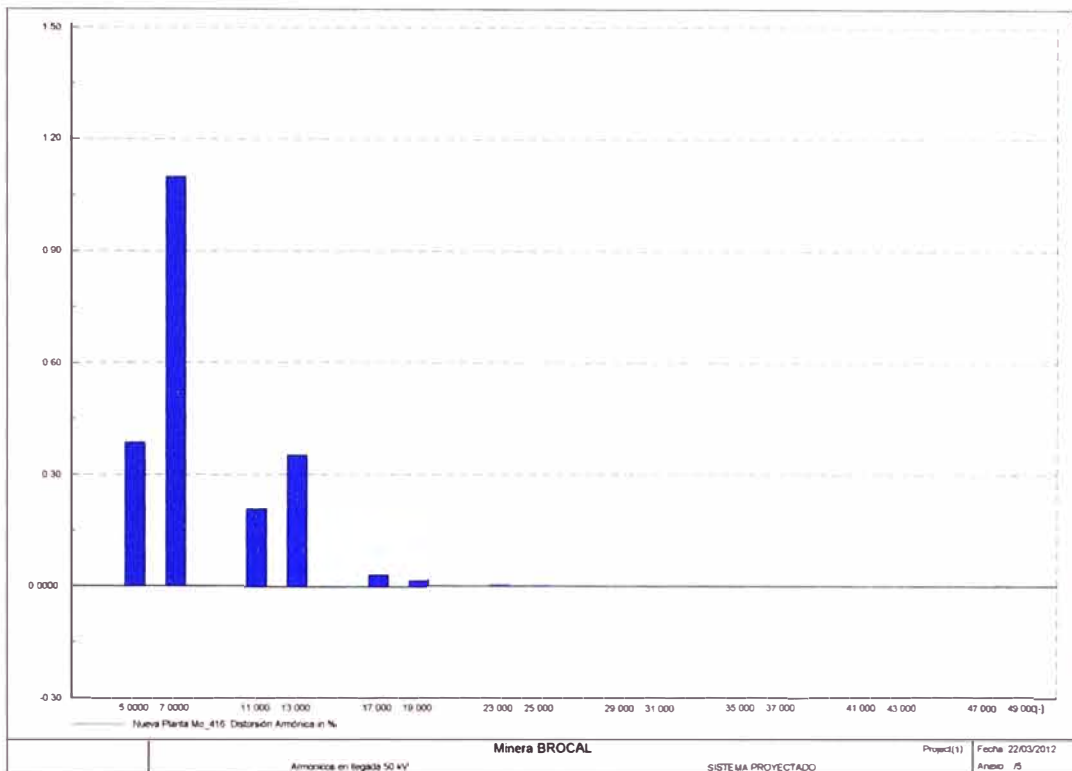


Armónicos de tensión barra SE HUARAUCA N 10

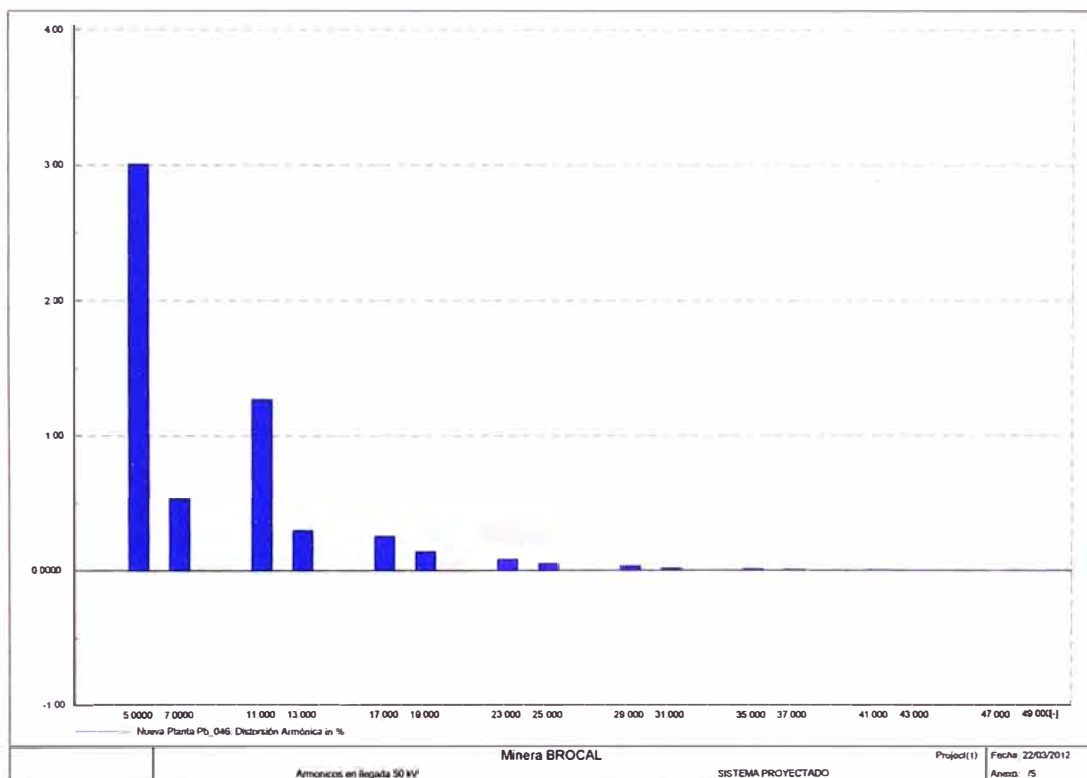


Armónicos de tensión barra CONCENTRADORA EQ 046

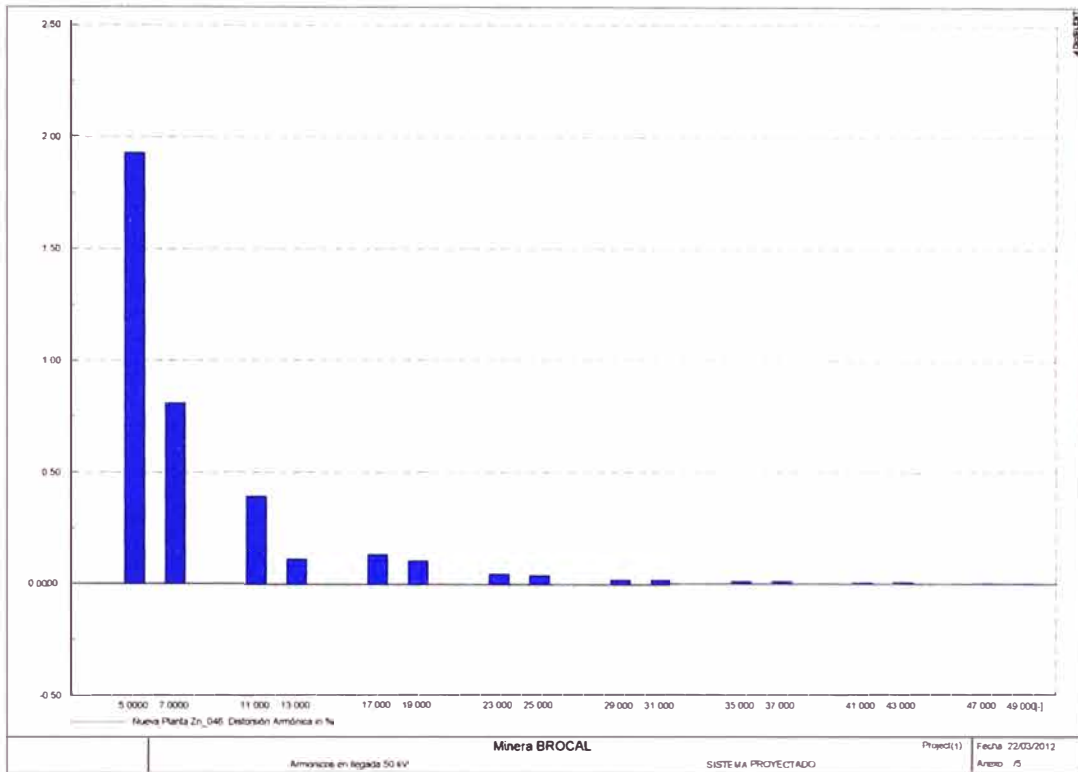




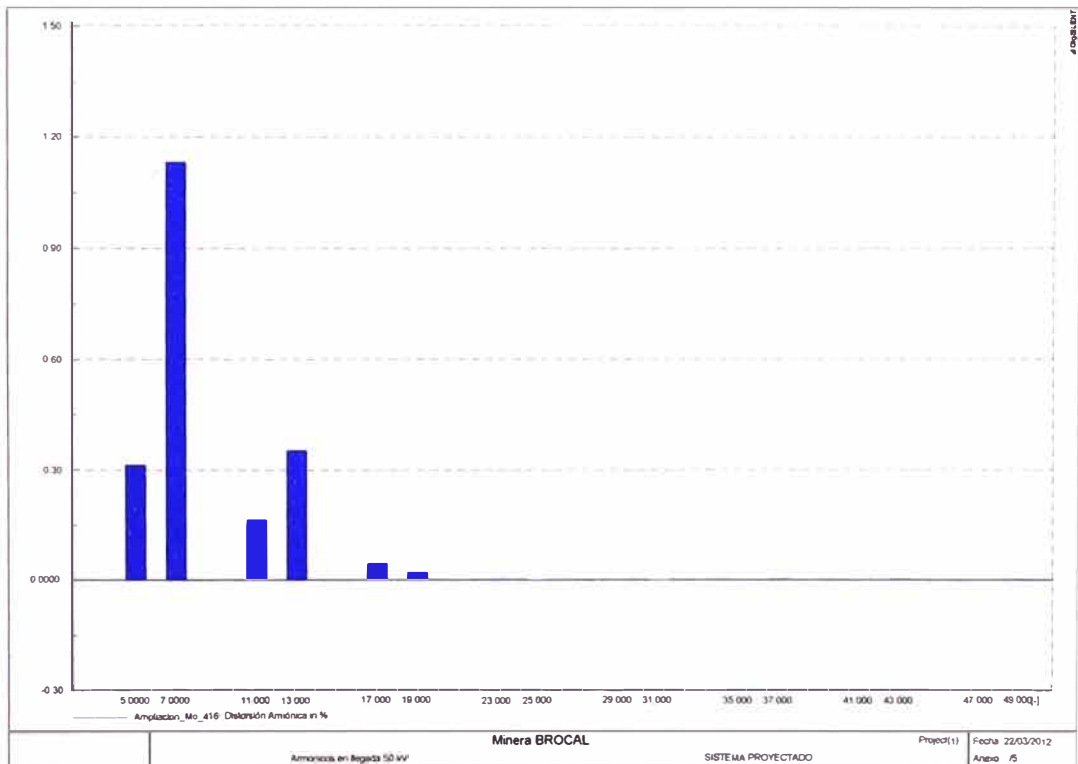
Armónicos de tensión barra Nueva Planta Mo 416



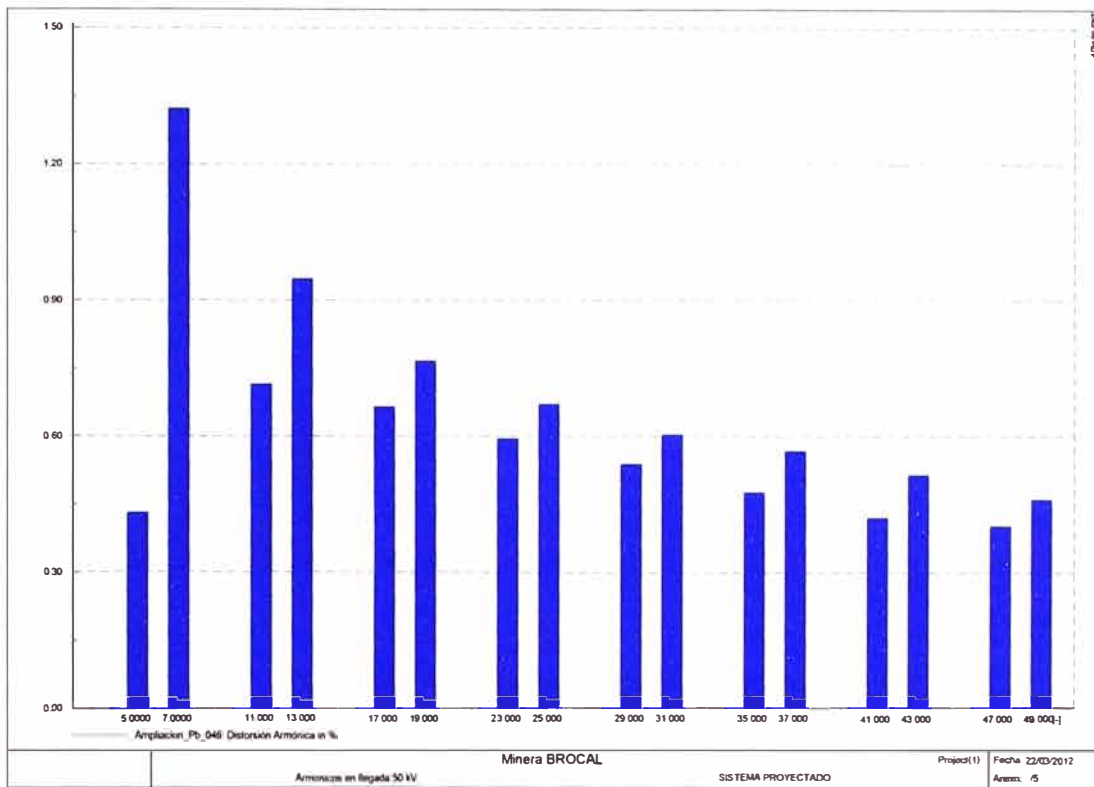
Armónicos de tensión barra Nueva Planta Pb 046



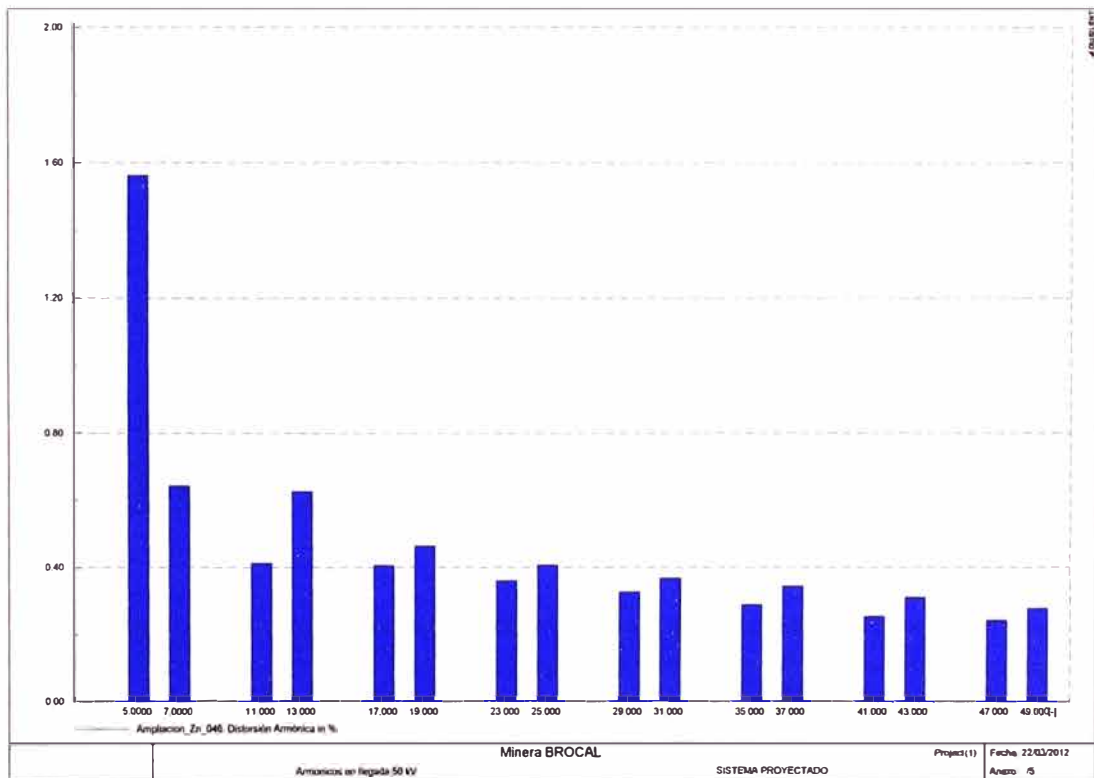
Armónicos de tensión barra Nueva Planta Zn 046



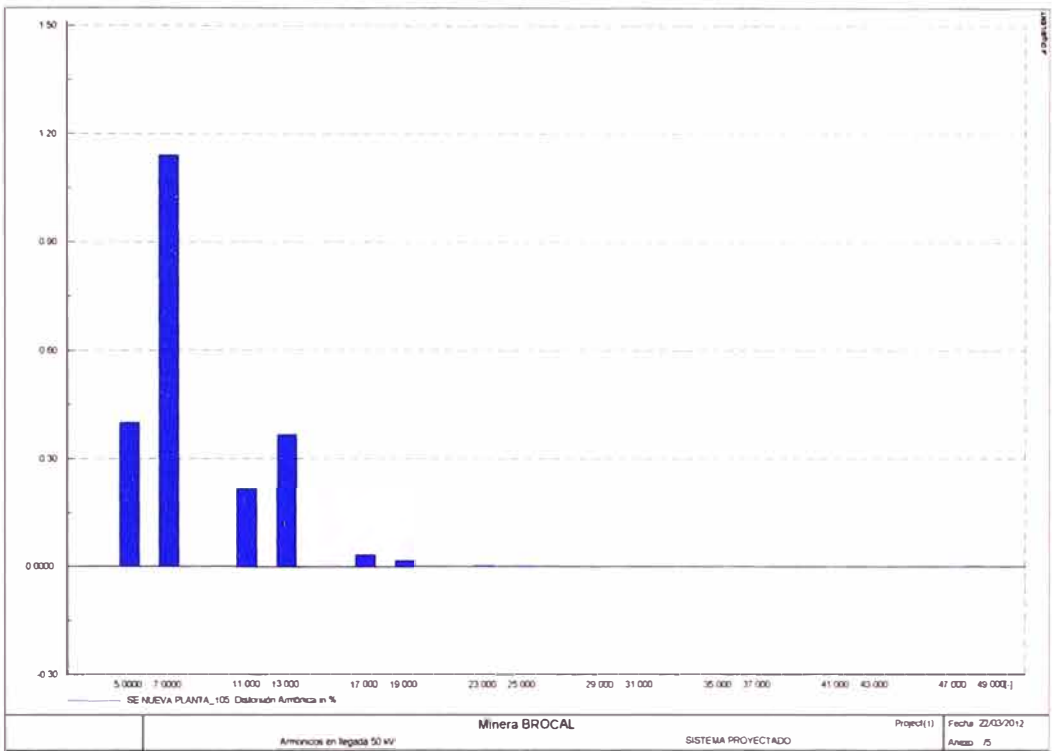
Armónicos de tensión barra Nueva Planta Mo 416



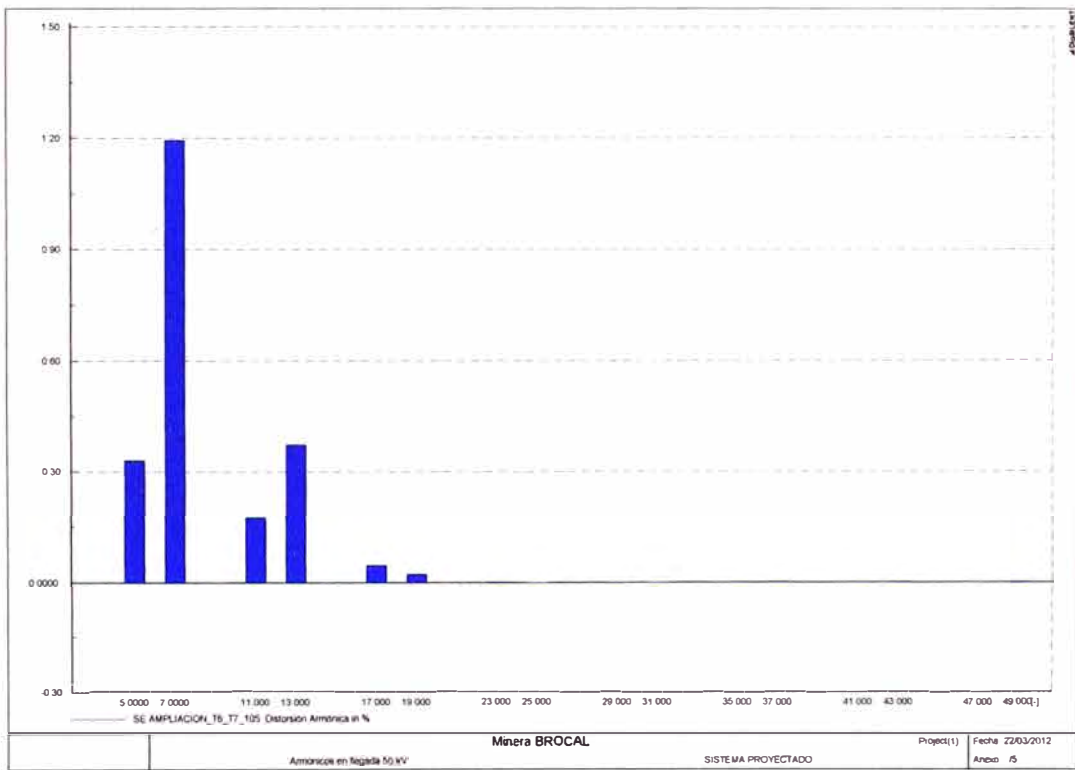
Armónicos de tensión barra Nueva Planta Pb 046



Armónicos de tensión barra Nueva Planta Mo 046



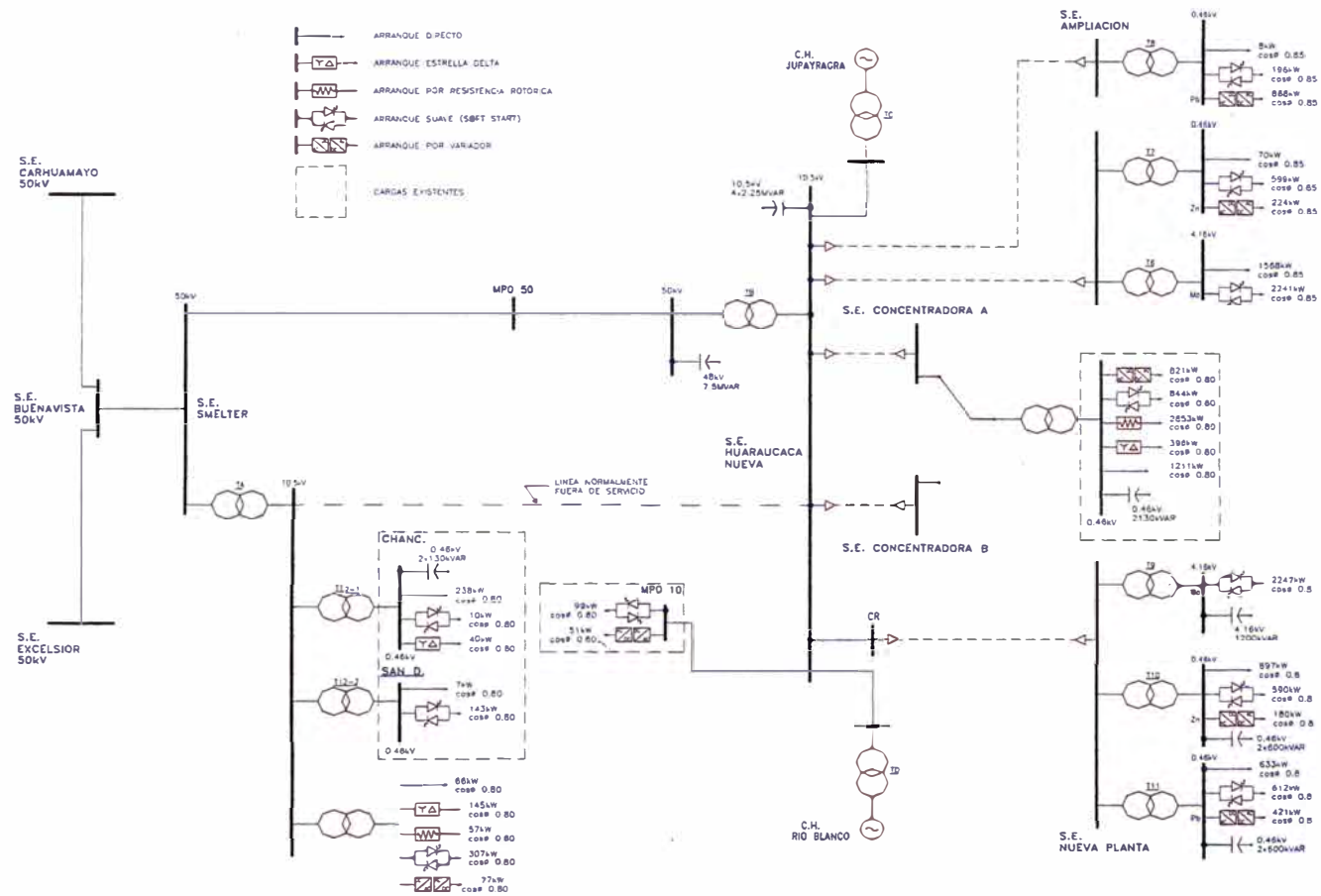
Armónicos de tensión barra SE Nueva Planta 105



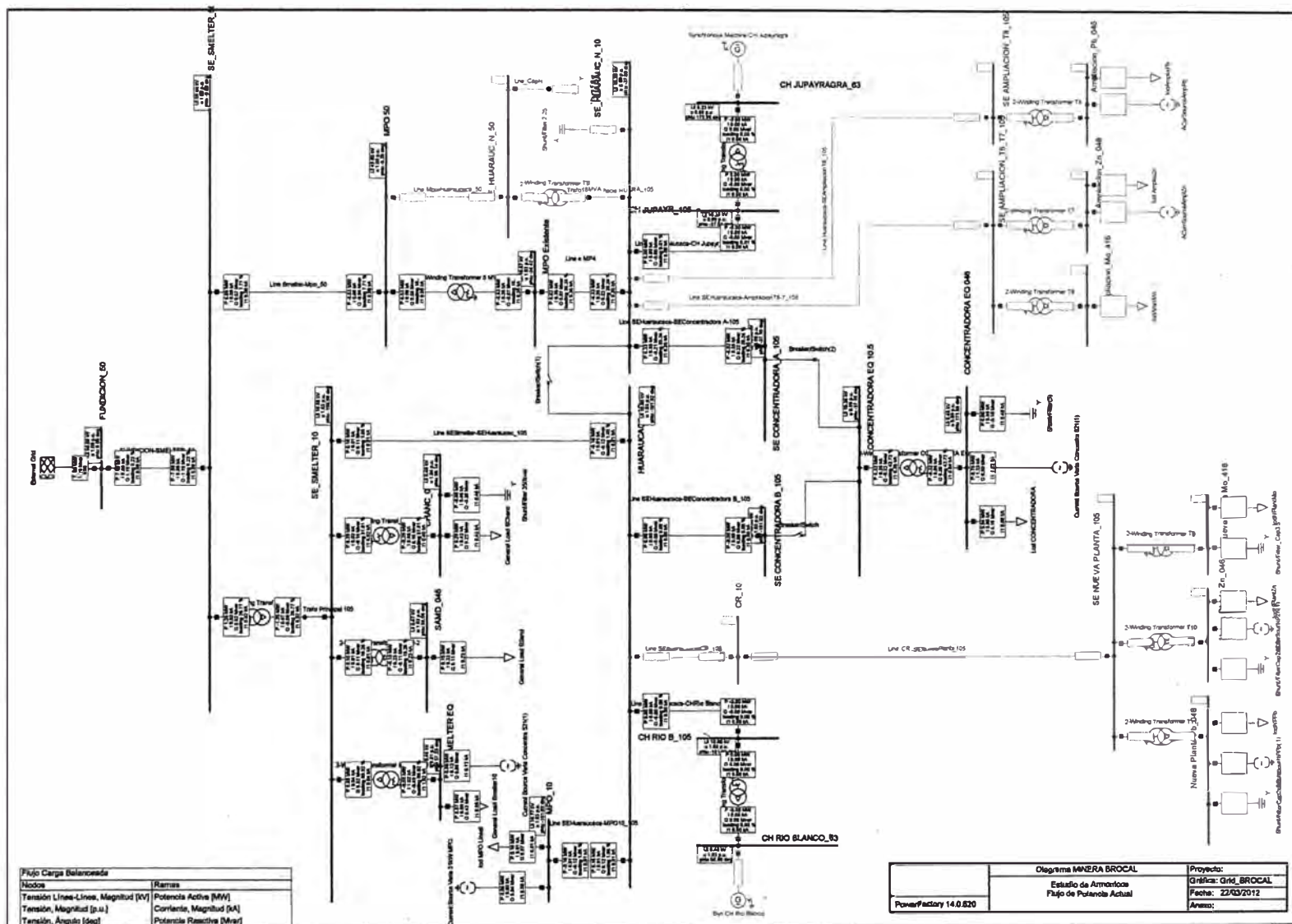
Armónicos de tensión barra SE Ampliación T6 T7 105

**ANEXO B: Diagramas Unifilares**

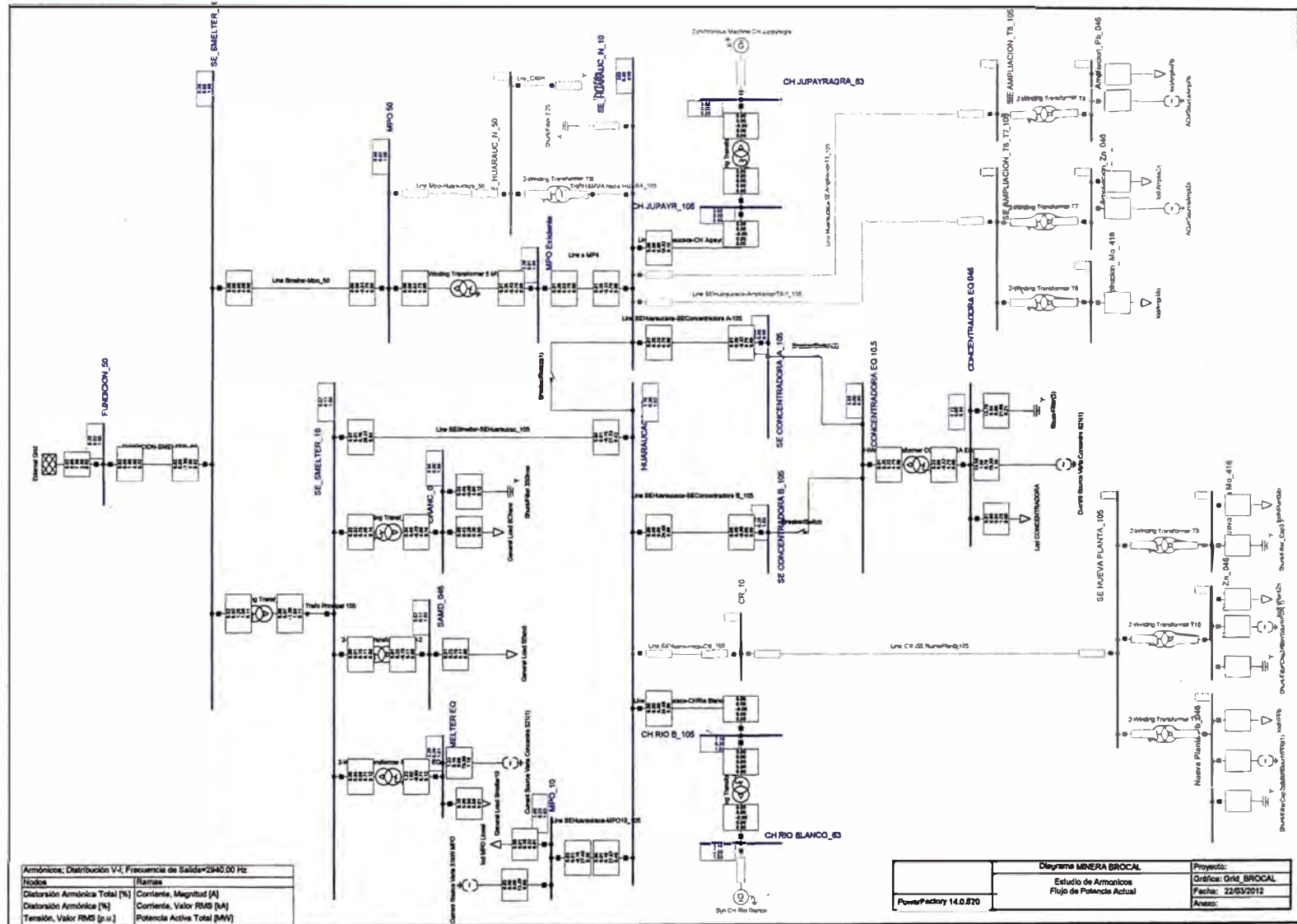
**DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO EL BROCAL POR TIPO DE CARGA**



# DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO EXISTENTE

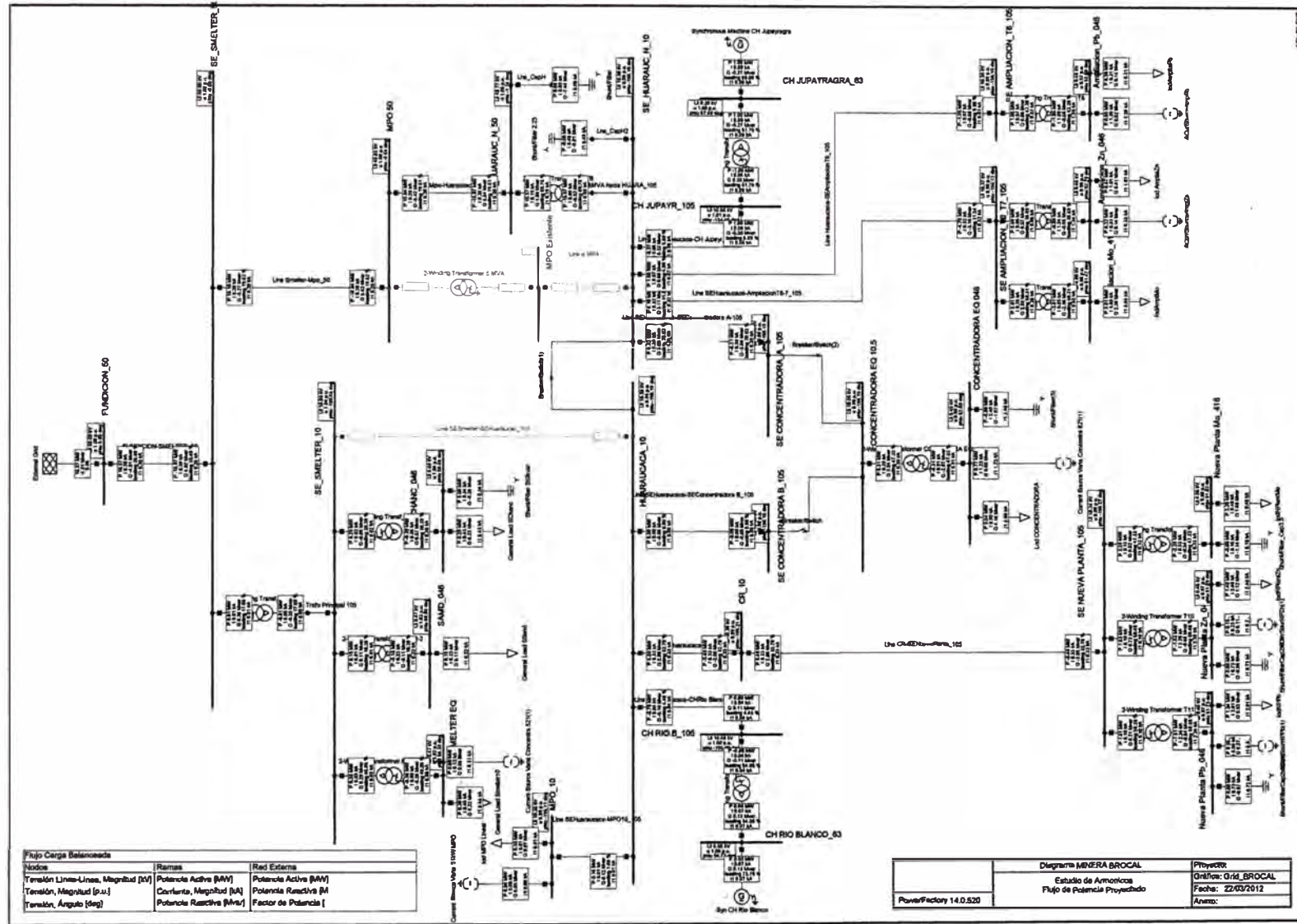


# DIAGRAMA FLUJO ARMÓNICO DEL SISTEMA ELECTRICO EXISTENTE



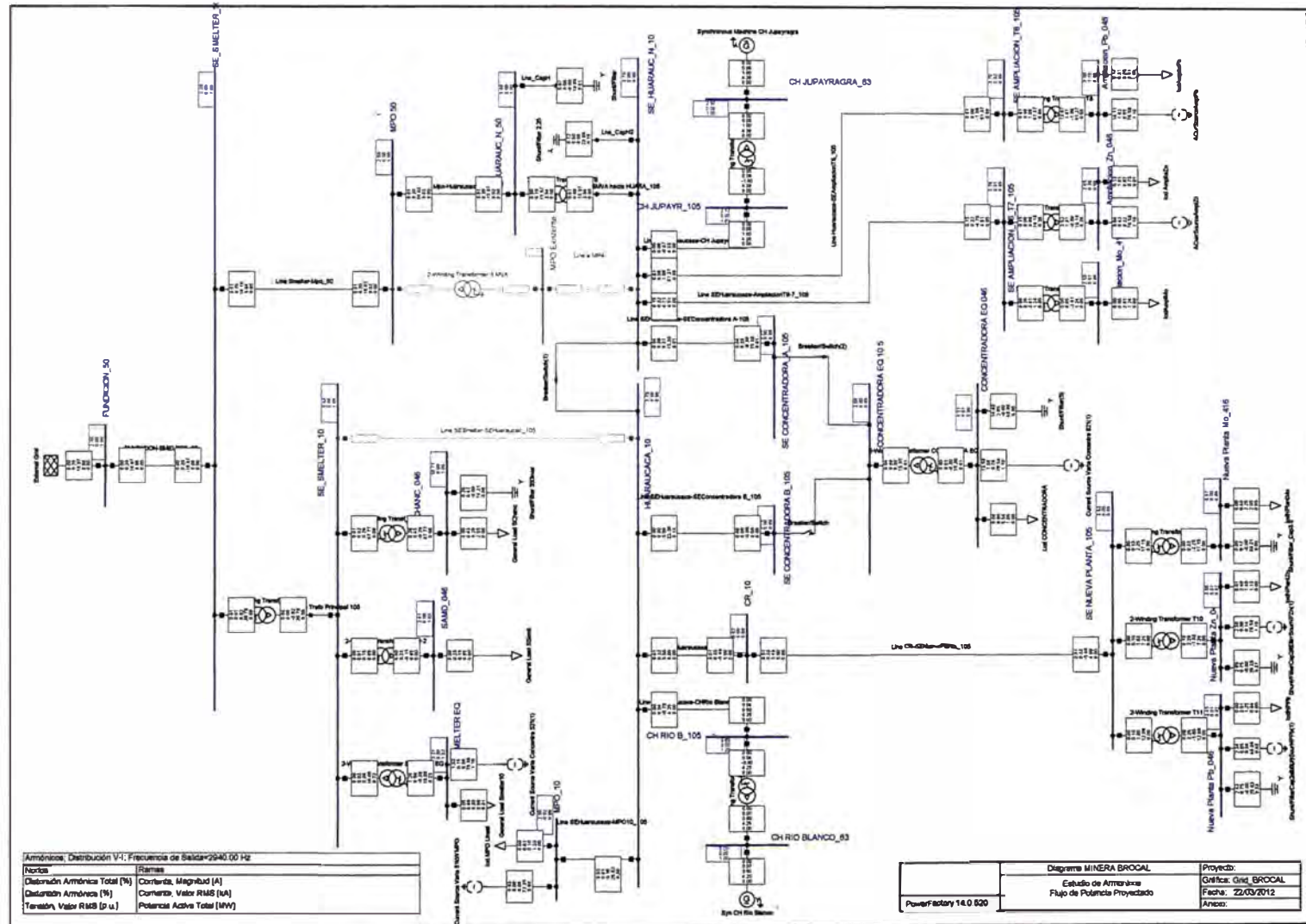


# DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO PROYECTADO

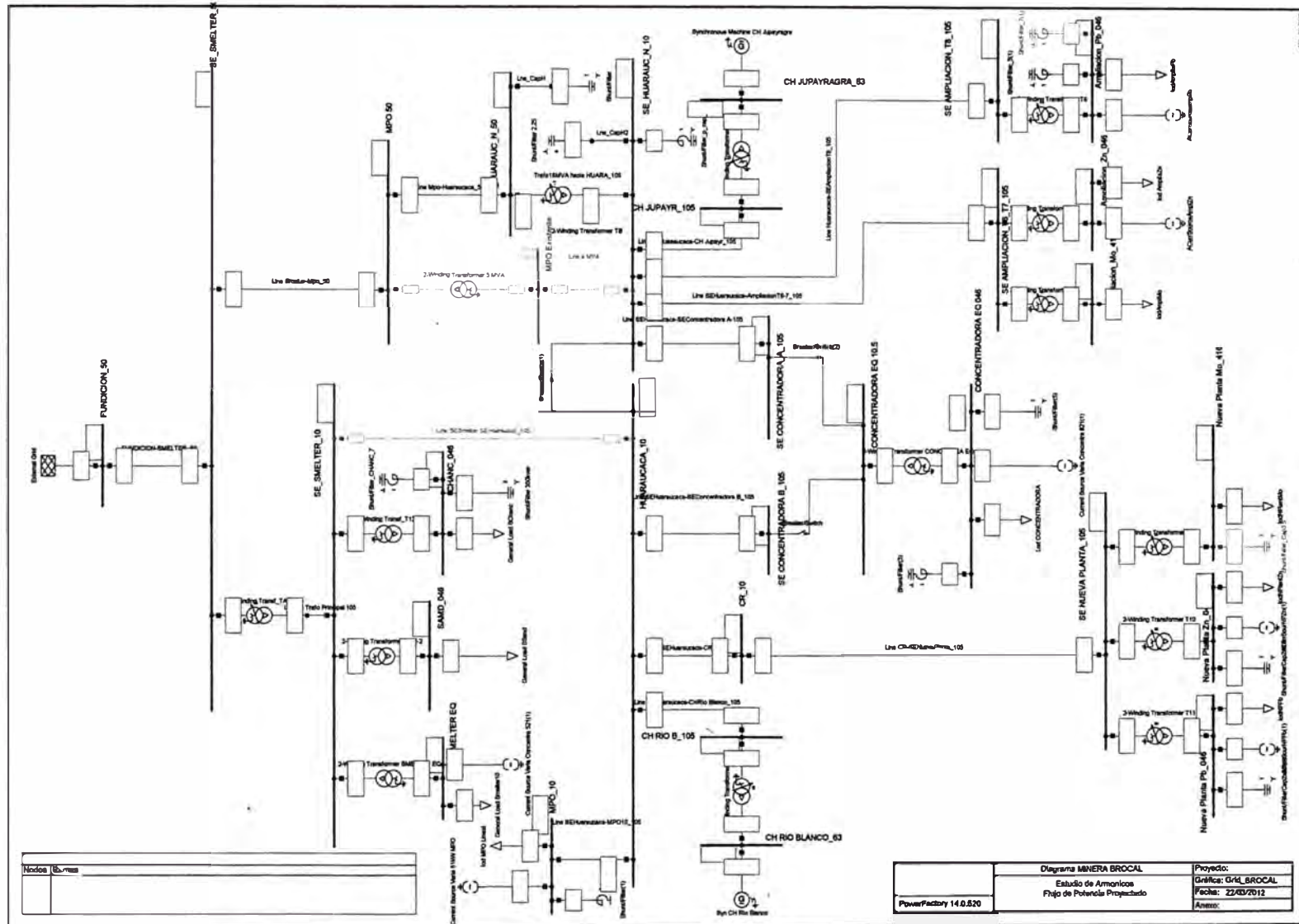




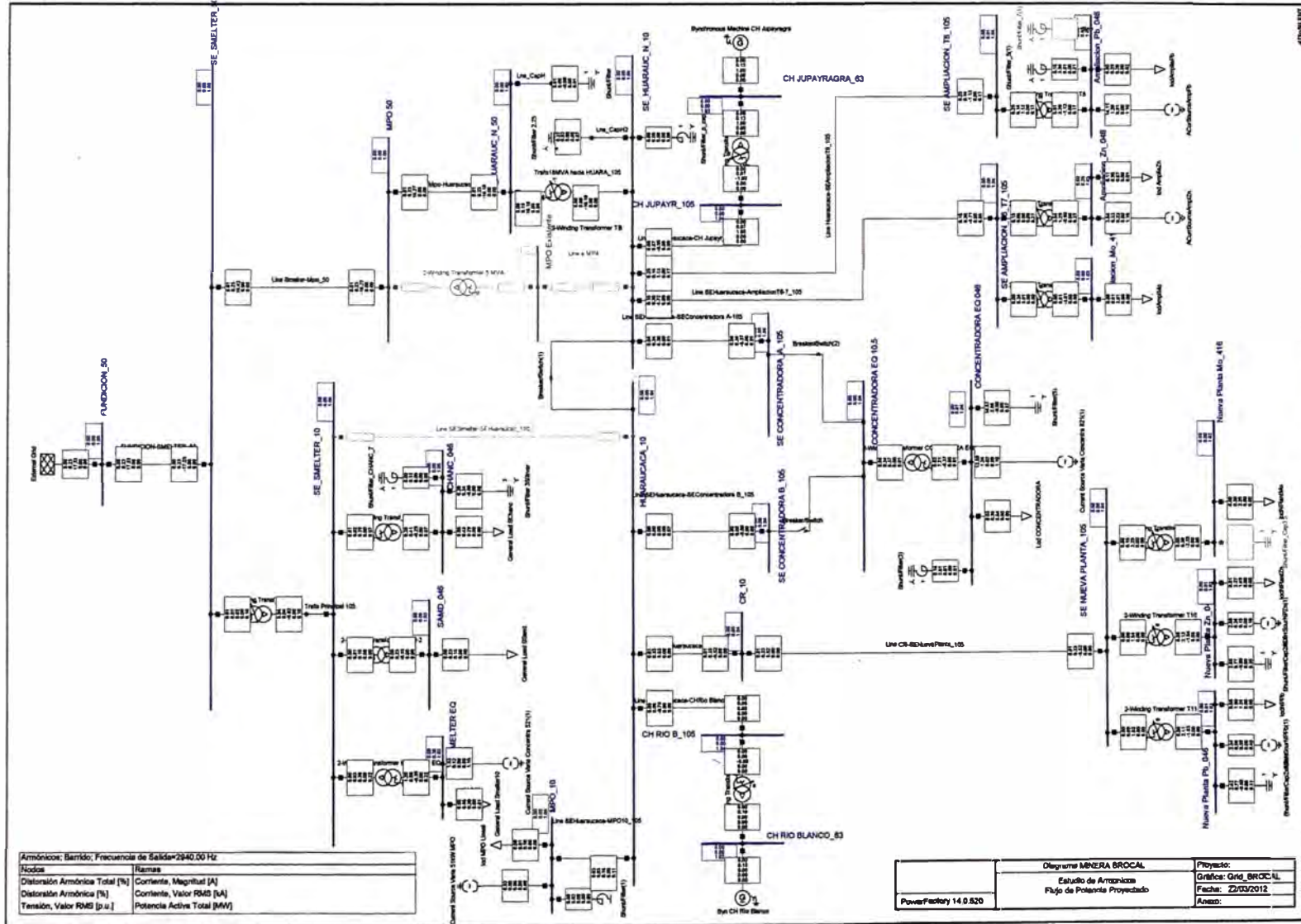
## DIAGRAMA FLUJO ARMÓNICO DEL SISTEMA ELECTRICO PROYECTADO



# DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO PROYECTADO CON FILTRO



# DIAGRAMA FLUJO ARMÓNICO DEL SISTEMA ELECTRICO PROYECTADO CON FILTRO



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electric Power System. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1992.
- [2] IEEE Std. 141-1993 IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial plants.. Pág. 443 - 474
- [3] Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos,
- [4] Jos Arrillaga, Bruce C Smith Power System Harmonic Analysis. Pág. 1-189
- [5] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. Análisis de Sistemas de Potencia. 391-438
- [6] Power Factory Manuals Power Factory Version 14.0520.1 Germany Pág. 24 1-15