



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA PLANTA MINERA,  
SUS CAUSAS Y MITIGACIONES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
ELECTRICISTA

CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ MUÑOZ

PROFESOR GUIA:  
NELSON OMAR MORALES OSORIO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LUIS SANTIAGO VARGAS DIAZ  
AUGER EMILE AYCAGUER HUET

SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2008



RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: CARLOS ANDRÉS SÁNCHEZ MUÑOZ  
PROF.GUÍA: Sr. NELSON MORALES O.

## **ESTUDIO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA PLANTA MINERA, SUS CAUSAS Y MITIGACIONES**

En los últimos años, el Complejo Metalúrgico Altonorte ha sufrido una expansión acelerada de sus instalaciones, incluyendo nuevas plantas y procesos industriales; consecuencia directa de este crecimiento, ha sido la incorporación de mayor cantidad de equipos de Electrónica de Potencia. Estos equipos presentan la desventaja de demandar corrientes no-sinusoidales de la red, originando distorsiones en las tensiones y corrientes, provocando desde pérdida de calidad y confiabilidad del sistema eléctrico, hasta incluso causar graves fallas de alto costo.

No existen estudios previos en relación a las perturbaciones armónicas del sistema eléctrico de Altonorte, por lo que se ha propuesto un primer estudio con los siguientes objetivos: evaluar el grado actual de contaminación armónica de la red; identificar las principales fuentes de distorsión; evaluar mediante software posibles condiciones de resonancia u otras potenciales operaciones de riesgo, y establecer recomendaciones acerca de soluciones viables a los problemas de perturbaciones armónicas encontrados.

De acuerdo a los objetivos indicados, en este trabajo se realizó mediciones de distorsión en las distintas barras del sistema, y se compararon los resultados obtenidos con los límites propuestos por la Norma Chilena respectiva. Asumiendo características asociadas a un sistema balanceado, se desarrolló un modelo computacional usando el software PCFLOH, con el que fue posible realizar un análisis armónico, monofásico y de régimen permanente del sistema eléctrico.

Considerando las características topológicas de la red, fue posible dividir el análisis en dos subsistemas independientes. En forma general, de los resultados obtenidos, se puede afirmar que en relación a la distorsión armónica, ambos subsistemas cumplen con las exigencias de la Norma Chilena, aplicables en el Punto de Conexión Común. Al interior de ambos sistemas se encontraron algunos casos de distorsión excesiva, los cuales se demostró que no se asocian a resonancias, sino que principalmente a la operación de determinados equipos. El análisis del subsistema Subestación 1, se enfoca principalmente en evaluar la mejor manera de incrementar el factor de potencia, y se comprueba la conveniencia de retirar la Planta de Ácido N°2. El análisis del subsistema Subestación 1A, se centra en estudiar el impacto que tendrá la incorporación de una nueva Planta de Ácido, se analiza el funcionamiento de algunos equipos interesantes, y se identifica las principales fuentes de distorsión.

Apoyado en argumentos teóricos y en algunos casos en simulaciones, se propone alternativas de solución para los distintos problemas de distorsión armónica y factor de potencia encontrados. Se recomienda realizar un estudio técnico-económico para determinar las mejores alternativas de solución; un análisis de los efectos transientes de distorsión, que se producen por la conexión o desconexión de algunos equipos; un estudio trifásico de armónicas para el sistema asociado a la Subestación 1A.



## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a la gente de Altonorte, en especial a los Ingenieros Sres. Pedro Segovia y René Tapia y a la gente del Área de Sistemas, de quienes recibí constante apoyo y significativos aportes y por hacer el desarrollo de esta memoria una muy buena experiencia.

Deseo expresar mi reconocimiento al Ing. Sr. Patricio Bonilla por su confianza, por su apoyo y valiosas contribuciones que permitieron la materialización de esta memoria.

Agradezco a los Ingenieros Sres. Nelson Morales, Auger Aycaguer y Luis Vargas, por su buena disposición y cooperación durante este proceso.

Quiero expresar mis agradecimientos a mi familia antofagastina, mis primos y en especial a Eduardo y Corina, por su confianza y por hacerme sentir como en casa.

Agradezco a mis compañeros (“Desfasados”) y con un cariño especial a Andrés, Leopoldo y Javiera, por darle otro sentido a la universidad.

Con mucho amor agradezco a Ignacia, por su paciencia e incondicional apoyo.

Finalmente quiero agradecer enormemente a mi familia, papas y hermanos que me apoyaron y dieron fuerzas en todo mi período universitario, de seguro sin ellos nada de esto habría sido posible.

## Tabla de contenidos

Agradecimientos.....	v
Tabla de contenidos.....	vi
<b>1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos Generales.....	1
1.2 Objetivos Específicos .....	2
1.3 Alcances.....	2
1.4 Contenido.....	3
<b>2 Conceptos Básicos sobre armónicas .....</b>	<b>5</b>
2.1 Breve Definición.....	5
2.2 Origen de las Armónicas.....	8
2.3 Efectos de las Armónicas en un Sistema Eléctrico.....	9
2.3.1 Resonancia.....	10
2.4 Respuesta en Frecuencia del Sistema .....	12
2.4.1 Uso de Bancos de condensadores.....	12
2.4.2 Influencia de la carga.....	13
2.4.3 Capacidad de cortocircuito .....	14
2.5 Armónicas y el factor de Potencia .....	15
2.6 Métodos para reducir las armónicas dentro de un sistema .....	17
2.6.1 Conexiones de Transformadores .....	17
2.6.2 Filtros.....	19
<b>3 Estándares o normas sobre límites de armónicas en redes eléctricas. ....</b>	<b>22</b>
3.1 Propósito de los estándares .....	22
3.2 Definiciones .....	23
3.2.1 PCC.....	23
3.2.2 Índices de Distorsión Armónicas.....	23
3.3 Norma IEEE Std 519-1992.....	26
3.3.1 Límites de distorsión de tensión .....	26
3.3.2 Límites de Distorsión de Corriente.....	26
3.4 Norma Chilena.....	28
3.4.1 Armónicas de Tensión .....	28
3.4.2 Armónicas de Corriente.....	29
<b>4 Estudios de Armónicas en un Sistema Eléctrico .....</b>	<b>31</b>
4.1 Procedimiento para la realización de un estudio de armónicas .....	31
4.2 Mediciones de Armónicas. ....	33

4.3	Simulaciones computacionales.....	34
<b>5</b>	<b>Caso de Estudio .....</b>	<b>36</b>
5.1	Descripción General del sistema.....	36
5.2	Sistema eléctrico asociado a Subestación 1.....	36
5.3	Sistema eléctrico asociado a Subestación 1A.....	39
5.4	Herramientas utilizadas en el estudio.....	42
5.4.1	Software de simulación.....	42
5.4.2	Equipo Utilizado para realizar las mediciones.....	46
<b>6</b>	<b>DESARROLLO Y RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
6.1	Determinación del PCC.....	47
6.2	Situación actual del sistema Subestación 1. Mediciones y Norma.....	48
6.2.1	Comentarios.....	49
6.2.2	Distorsión armónica medida en barras del sistema eléctrico Subestación 1.....	50
6.2.3	Comentarios.....	52
6.3	Simulaciones del sistema eléctrico Subestación 1.....	53
6.3.1	Construcción del modelo.....	53
6.3.2	Comparación entre el valor teórico y las mediciones.....	54
6.3.3	Respuesta en frecuencia (Condición actual).....	56
6.3.4	Corrección del factor de potencia.....	57
6.3.5	Solución de distorsión armónica.....	60
6.3.6	Análisis de sensibilidad.....	63
6.4	Situación actual del sistema Subestación 1A. Mediciones y Norma.....	64
6.4.1	Comentarios.....	65
6.4.2	Distorsión armónica medida en barras del sistema Subestación 1A.....	65
6.4.3	Comentarios.....	68
6.5	Simulaciones del sistema eléctrico Subestación 1A.....	69
6.5.1	Construcción del modelo.....	69
6.5.2	Comparación entre el valor teórico y las mediciones.....	71
6.5.3	Respuesta en frecuencia (Condición actual).....	73
6.5.4	Sala eléctrica N°7 (Planta de Acido N°3).....	74
6.5.5	Análisis de sensibilidad.....	75
6.5.6	Filtros y compensación de potencia reactiva para el sistema Subestación 1A.....	76
6.6	Comentarios Generales acerca de las soluciones planteadas para el sistema eléctrico de Altonorte.....	78
6.6.1	Bancos de condensadores.....	78
6.6.2	Filtros.....	79

<b>Anexo N°1</b> .....	84
A1.1 Representación barra infinita .....	84
A1.2 Características técnicas de transformadores y conductores del sistema eléctrico Subestación 1. ....	84
A1.3 Características técnicas de transformadores y conductores del sistema eléctrico Subestación 1A. ....	86
<b>Anexo N°2</b> .....	87
A2.1 Sistema Subestación 1.....	87
A2.2 Sistema Subestación 1A.....	89
<b>Anexo N°3</b> .....	91
A3.1 Armónicas individuales, sistema eléctrico Subestación 1.....	91
A3.2 Armónicas individuales, sistema eléctrico Subestación 1A.....	97
<b>Anexo N°5</b> .....	106
A5.1 Validación del software .....	106
A5.2 HIOKI 3196 .....	108
<b>Anexo N°6</b> .....	110
A6.1 Simulaciones Sistema Subestación 1. ....	110
A6.1.1 Corrección del factor de potencia. ....	110
A6.1.2 Filtros.....	111
A6.1.2 Análisis de sensibilidad .....	112
A6.2 Simulaciones Sistema Subestación 1A. ....	113
A6.2.1 Análisis de sensibilidad .....	113
<b>Anexo N°7</b> .....	116
A7.1 Variador de frecuencia Secado (barra N°18) .....	116
A7.3 Variador bomba GEHO.....	117
<b>Anexo N°8</b> .....	119
A8.1 Desarrollo del sistema eléctrico Planta de Acido N°3. ....	119
A8.1.1 Sistema del Soplador principal.....	119
A8.1.2 Transformador .....	122
A8.1.3 Bancos de condensadores.....	123
<b>Referencias</b> .....	129

# 1 Introducción

En las últimas décadas, la industria ha aumentado su preocupación por optimizar los procesos para mejorar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica; como consecuencia de esto, se han incorporado, de manera masiva, equipos de electrónica de potencia. Si bien estos equipos han permitido controlar de modo más eficaz y versátil el intercambio de energía entre el sistema y los consumos finales, tienen la desventaja de demandar corrientes no sinusoidales de la red, originando distorsiones en las tensiones y corrientes.

Estas distorsiones armónicas producen una serie de consecuencias negativas en los sistemas eléctricos, cómo: aumento en las pérdidas; reducción de la vida útil de los equipos; pérdida de la calidad y confiabilidad del sistema eléctrico. Dependiendo de los efectos resonantes de la red, estos resultados se pueden ver agravados, producto del aumento significativo de los niveles de distorsión.

En los años recientes, el Complejo Metalúrgico Altonorte ha sufrido una expansión acelerada de sus instalaciones, incluyendo nuevas plantas y procesos industriales. Consecuencia directa de este crecimiento, ha sido la incorporación de mayor cantidad de equipos de electrónica de potencia y con esto la preocupación por la distorsión armónica de su sistema eléctrico.

Considerando todo lo dicho y que no existen estudios anteriores sobre el tema, se hace imperante la necesidad de conocer el estado actual de distorsión del sistema, a fin de evitar ulteriores complicaciones, situación que se desea aclarar con la presente memoria.

## 1.1 Objetivos Generales

El procedimiento adoptado en un estudio de armónicas va a depender, principalmente, de los objetivos que tenga éste. En este caso los objetivos generales propuestos son:

- Evaluar el estado actual de distorsión armónica de la red.
- Identificar principales fuentes de distorsión.
- Determinar posibles condiciones de resonancia.
- Realizar análisis de sensibilidad.
- Establecer recomendaciones.

## 1.2 Objetivos Específicos

Para cumplir con los objetivos principales de este estudio, se propuso concretar las siguientes tareas:

- Realizar mediciones en terreno, mediante el uso de un equipo adecuado. Comparar los resultados obtenidos de las mediciones con la respectiva norma y realizar un análisis del estado actual de distorsión del sistema.
- Construir un modelo computacional del sistema en estudio, basado en un circuito equivalente, considerando los principales equipos y consumos.
- Mediante el uso de software, determinar posibles condiciones de resonancia que provoquen la amplificación de perturbaciones armónicas en barras del sistema.
- Mediante el uso de software, evaluar distintas configuraciones del sistema, con tal de determinar posibles condiciones operacionales de riesgo.
- Evaluar el impacto que puede tener la incorporación de algunos equipos.
- Establecer recomendaciones acerca de posibles soluciones que pudiesen considerarse para los distintos problemas armónicos encontrados.

## 1.3 Alcances

Este estudio pretende concretar una primera etapa en el desarrollo de una solución para los problemas de distorsión armónica del sistema eléctrico de Altonorte.

Esto quiere decir que se limitará a aclarar el estado actual de distorsión del sistema, mediante mediciones en terreno, apoyando el análisis en la Norma Chilena y literatura respectiva. Se destaca el hecho de que estas mediciones realizadas no tienen validez legal, ya que para eso éstas debieran ser realizadas por un OMA (Organismo de Medición Autorizado).

A pesar de que la Norma indica que debe considerarse hasta la armónica de orden 50, en la práctica se tomará en cuenta hasta la armónica que se estime necesario para realizar un análisis que caracterice de buena forma el estado actual del sistema y permita desarrollar un modelo adecuado. Usualmente basta con considerar hasta la armónica de orden 30.

Se construirá un modelo computacional acorde a los requisitos del estudio. Esto quiere decir que se considerará un detalle suficiente como para obtener resultados representativos del comportamiento del sistema, acorde a la cantidad y calidad de la información y herramientas disponibles. Se considera suficiente un modelo monofásico del sistema.

Mediante el software y las mediciones en terreno, se pretende estimar posibles condiciones de resonancia que pudiera presentar actualmente el sistema. También se realiza un análisis de sensibilidad, donde se analiza sólo las principales configuraciones o variaciones que puede presentar el sistema. Se verifica el impacto que tendrá la incorporación de algunos equipos, en especial, la nueva Planta de Ácido.

El siguiente estudio se limita a establecer recomendaciones acerca de las posibles soluciones, tanto para la distorsión armónica dentro de los sistemas eléctricos, como para la corrección del factor de potencia, presentando en base a argumentos teóricos algunas opciones que se consideraron las más adecuadas, de la gran gama de soluciones disponibles en el mercado. En algunos casos se realizaron simulaciones considerando un modelo simplificado de la alternativa, con la intención de verificar la efectividad que tendría, pero en ningún caso se asegura que la solución propuesta sea la más óptima o mejor, ya que esto requiere de un análisis técnico y económico más detallado, que escapa de los objetivos de la presente memoria.

## **1.4 Contenido**

En el capítulo dos, se introducen algunos conceptos básicos acerca de las armónicas, como: su definición; su origen; las consecuencias que tienen en los sistemas eléctricos; su interacción con algunos de los equipos más comunes dentro de los sistemas industriales; y algunas formas usadas comúnmente para el control de estos.

En el capítulo tres, se hace una revisión acerca de dos de las normas relacionadas con la distorsión armónica, se revisa la norma de la IEEE y la Norma Chilena, la cual es usada posteriormente en el análisis.

En el capítulo cuatro, se incorporan algunos aspectos interesantes a considerar a la hora de realizar un estudio de este tipo.

En el capítulo cinco, se realiza una descripción general del sistema en estudio, se presentan y describen las herramientas utilizadas, como el software y el equipo para realizar las mediciones en terreno.

En el capítulo seis, se desarrolla en detalle el análisis de distorsión del sistema eléctrico de Altonorte. Se comparan los resultados obtenidos de las mediciones en terreno, con los respectivos límites propuestos por la Norma Chilena. Se presentan los resultados teóricos o esperados, obtenidos mediante software, se demuestra la efectividad y validez del programa con el cual además se desarrollan distintos análisis del sistema. En esta parte también se establece recomendaciones acerca de las posibles soluciones a los problemas encontrados

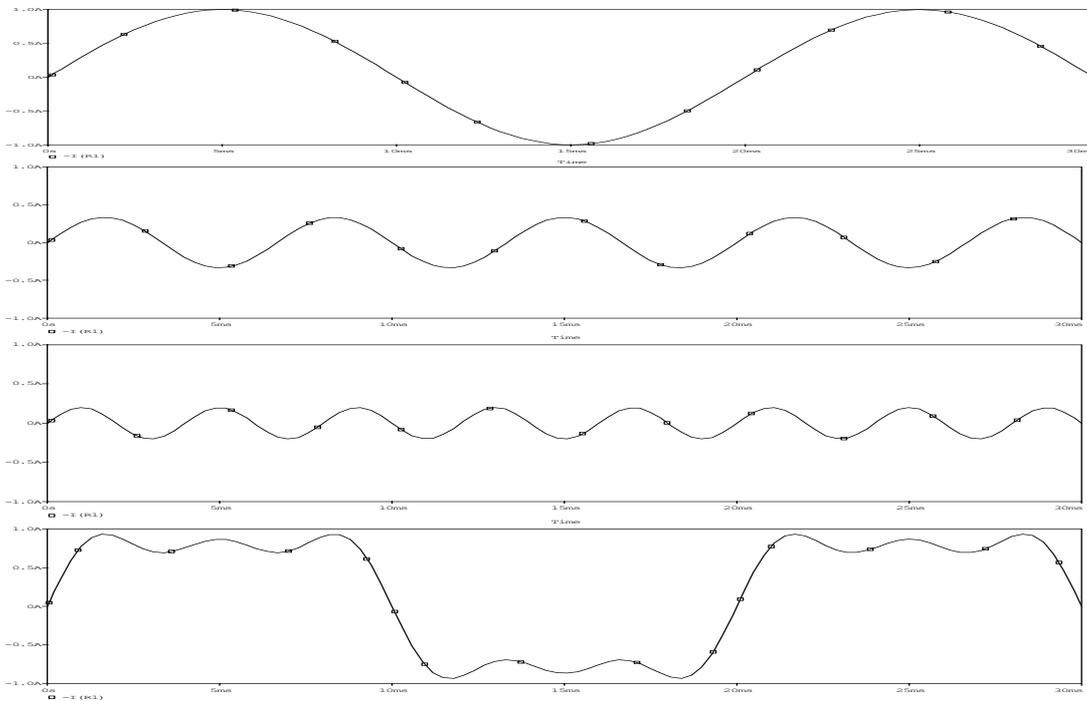
## 2 Conceptos Básicos sobre armónicas

El propósito de éste capítulo es introducir algunos conceptos básicos sobre la teoría de las armónicas, su origen, los efectos que estas tienen sobre el sistema y sus componentes, mostrar algunos comportamientos típicos característicos de sistemas contaminados con armónicas, y algunos métodos comúnmente usados para el control y disminución de éstas. Los gráficos y figuras que se ven a continuación, fueron obtenidos mediante simulaciones con los programas PSPICE y PCFLOH.

### 2.1 Breve Definición.

La distorsión armónica no es un fenómeno nuevo, ya en el siglo 18 el matemático francés J.B.J Fourier (1768-1830) establece las bases para el cálculo de armónicas, donde postulaba que cualquier señal periódica en el tiempo puede ser representada como la suma o superposición de una componente sinusoidal fundamental y una serie de otras sinusoides de mayor frecuencia.[2][11]

Eléctricamente una “armónica”, se puede definir, como una componente sinusoidal de una señal, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental, es decir, la principal frecuencia producida por los generadores.



**Figura 2.1:** Las primeras tres armónicas que forman una onda cuadrada. Primero la fundamental de 50 Hz, después la 3<sup>era</sup> y la 5<sup>ta</sup> armónicas respectivamente, finalmente el cuarto gráfico corresponde a la suma de las tres curvas anteriores.

En la figura anterior se observa como mediante la combinación de tres armónicas se puede formar una señal periódica, en este caso una señal cuadrada. Cabe destacar que al considerar las otras armónicas de órdenes mayores, la curva resultante se hace mas clara. [3]

Usando las series de Fourier, se puede realizar la descomposición de una señal periódica distorsionada, en su componente fundamental y una serie de armónicas. La serie de Fourier de una señal o función periódica  $x(t)$  puede ser expresada mediante la siguiente expresión: [16]

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n \cdot w \cdot t) + b_n \sin(n \cdot w \cdot t)) \quad (2.1)$$

Donde:

- $w$  = Frecuencia angular de la función ( $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ )
- $n$  = Orden de la armónica
- $a_0$  = Valor medio de la función
- $a_n, b_n$  = Coeficientes de las series, amplitudes de las componentes rectangulares.

Los coeficientes de las series de Fourier se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(wt) \cdot dwt$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(wt) \cdot \cos(nwt) \cdot dwt \quad (2.2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(wt) \cdot \sen(nwt) \cdot dwt$$

Donde el término  $a_0$  corresponde a la componente continua de la señal y para  $n=1$  se tiene la componente fundamental.

La amplitud de las componentes armónicas de una señal, cumplen idealmente la siguiente relación.

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (2.3)$$

Las armónicas de tensión para el caso ideal de un sistema trifásico balanceado con tensión no-sinusoidal, pueden ser expresadas mediante las siguientes expresiones: [6]

$$\begin{aligned}
 V_{ah}(t) &= \sqrt{2}V_h \sin(hw_o t + \theta_h) \\
 V_{bh}(t) &= \sqrt{2}V_h \sin(hw_o t - 2h\pi/3 + \theta_h) \\
 V_{ch}(t) &= \sqrt{2}V_h \sin(hw_o t + 2h\pi/3 + \theta_h)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Donde h corresponde al orden de la armónica.

Dada las ecuaciones y condiciones anteriores se tiene que las armónicas siguen las siguientes secuencias de fase

Orden h	1	2	3	4	5	6	...
secuencia	+	-	0	+	-	0	...

**Tabla 2.1:** Secuencia de fases de armónicas en un sistema trifásico balanceado

Se tiene entonces componentes de todas las secuencias dentro del sistema y que las armónicas Triplens o múltiplos de la tercera son de secuencia cero. Cabe destacar que lo anterior no se cumple para sistemas desbalanceados. [6]

## 2.2 Origen de las Armónicas

Las armónicas son un subproducto de la electrónica moderna. Cargas no lineales que se caracterizan por ser equipos cuyo funcionamiento consiste en un proceso de conmutación de alta velocidad, donde absorben corriente solo en una fracción controlada de la onda de tensión de alimentación. Esto provoca armónicos en la corriente de carga y por ende la distorsión de dicha tensión en la barra.

Las fuentes armónicas más convencionales son:

- Puentes rectificadores
- Inversores de corriente o tensión
- Convertidores estáticos de potencia en general
- Cicloconvertidores
- Hornos de arco

A estas fuentes se les suele llamar convencionales ya que generan una serie de armónicas “características”, cuantificables mediante modelos matemáticos conocidos, y que son un producto inevitable, y forman parte del funcionamiento normal de estos equipos.

Por otro lado están las fuentes armónicas no convencionales, que se caracterizan por generar armónicas “no-características”, las cuales aparecen originadas por alguna condición anómala o funcionamiento deficiente de algunos equipos. Si bien estas son inevitables en un sistema con características industriales, cuantificar en forma teórica la magnitud de éstas, en un sistema con multiplicidad de consumos, es un proceso complicado y que no se justifica si lo que se necesita es resultados rápidos y representativos.

Las fuentes armónicas no convencionales más usuales son:

- Equipos electrónicos con proceso de conmutación deficiente.
- Desbalance o asimetría en las tensiones de la red (en amplitud y/o fase).
- Máquinas rotatorias donde la distribución de flujo es irregular, por problemas de diseño.
- Saturación de los materiales ferromagnéticos de transformadores y máquinas rotatorias.
- Consumos con bruscas variaciones de carga que producen deformaciones en la corriente.
- Electrónica de menor potencia.

## 2.3 Efectos de las Armónicas en un Sistema Eléctrico.

Idealmente un sistema eléctrico debiera presentar una tensión con características de amplitud y frecuencia constante, forma de onda sinusoidal y simetría en el caso de redes trifásicas. Bajo estas condiciones, las máquinas y equipos eléctricos debieran presentar un comportamiento normal y acorde al cual fueron diseñados. En presencia de corrientes armónicas, se producen caídas de tensión de frecuencia distinta de la fundamental, originando que la tensión en la barra se distorsione y por ende se produzca una serie de fenómenos indeseados en distintos equipos dentro del sistema eléctrico. Algunos efectos típicos que se pueden observar se resumen en la siguiente tabla: [3]

<b>Equipo afectado</b>	<b>Efecto indeseado</b>
<b>Banco de condensadores</b>	Sobrecalentamiento Deterioro de aislación Operación de fusibles
<b>Protecciones</b>	Falsa operación No operación
<b>Equipos de medida</b>	Medidas erróneas
<b>Transformadores</b>	Sobrecalentamiento Deterioro de aislación Reducción de vida útil
<b>Motores</b>	Ruido Vibraciones adicionales Sobrecalentamiento
<b>Conductores</b>	Sobrecalentamiento Deterioro aislación
<b>Equipos electrónicos</b>	Transmisión de datos deficiente Sobre/bajo voltaje Parpadeo en pantallas
<b>Lámparas incandescentes</b>	Parpadeo Reducción de vida útil

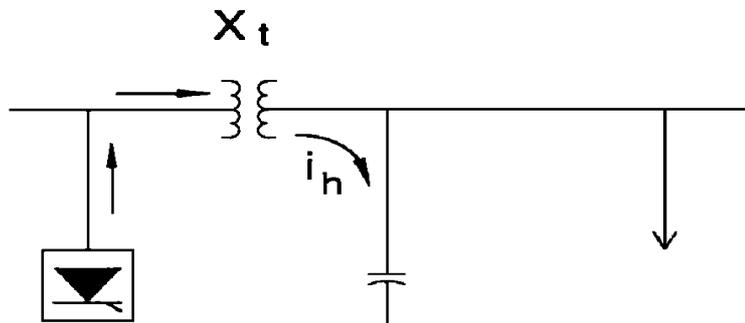
**Tabla 2.2:** Efectos mas comunes de las armónicas en un sistema eléctrico.

### 2.3.1 Resonancia

La resonancia armónica, es un fenómeno que se encuentra comúnmente en sistemas eléctricos de potencia donde se dispone de grandes bancos de condensadores, usualmente instalados para corregir el factor de potencia. La interacción a determinadas frecuencias, de la reactancia capacitiva de estos bancos con la reactancia inductiva del sistema, puede ocasionar dos tipos de resonancias, serie o paralelo. [6] [13]

#### 2.3.1.1 Resonancia Serie

La resonancia serie es el resultado de la combinación serie de un banco de condensadores y la inductancia del sistema (transformadores, líneas, motores). La resonancia serie crea un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas y tiende a atrapar estas corrientes a las cuales está sintonizada. Esto puede resultar en altos niveles de distorsión en la tensión entre el banco y la inductancia del circuito. Puede provocar la sobrecarga del banco de condensadores, quemando los fusibles o resultando en un deterioro del banco. Cabe destacar que en caso de ocurrir esto, la falla del banco desintoniza el circuito y la resonancia desaparece.



**Figura 2.2:** Esquema circuito. Resonancia Serie.  
(IEEE Std 519)

### 2.3.1.2 Resonancia Paralelo

La resonancia paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva y capacitiva del sistema se igualan a cierta frecuencia. Si la combinación de un banco de condensadores y la inductancia del sistema resulta en una resonancia paralelo cercana a una determinada armónica característica o armónica presente en el sistema, se crea un camino de alta impedancia, pudiendo generar una gran distorsión de la tensión en la barra, y sobrecorrientes.

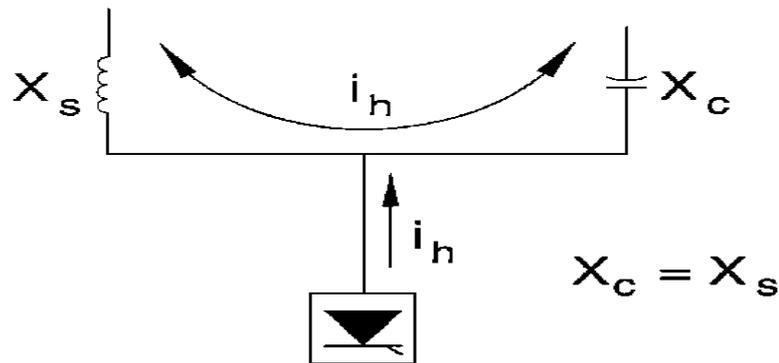


Figura 2.3: Esquema circuito. Resonancia Paralelo.  
(IEEE Std 519)

### 2.3.1.3 Otros aspectos importantes sobre la resonancia

Es importante aclarar que siempre que se tengan bancos de condensadores se van a tener frecuencias de resonancia. Por lo general los sistemas de distribución presentan resonancias cerca de las 5<sup>ta</sup> y la 7<sup>ma</sup> armónicas. Sin embargo, la resonancia pasa a ser un problema sólo cuando se alcanza los suficientes amperes armónicos como para provocar que la distorsión total de tensión o  $THD_v$ , supere el 5%, lo que generalmente se da cuando estas frecuencias coinciden con alguna armónica característica del sistema.

Es común encontrar que en caso de una resonancia paralelo, la máxima distorsión de tensión se produzca en la barra de la carga no-lineal. En cambio para resonancias serie la mayor distorsión de tensión se tiene generalmente en un punto remoto, tal vez muchos metros lejos de la fuente perturbadora, o en un alimentador adyacente, alimentado por el mismo transformador.

Actualmente podemos encontrar sistemas con varios bancos de condensadores ubicados en distintas barras, por lo tanto se van a tener muchas configuraciones posibles de sistemas resonantes, tanto paralelo como serie, por lo que se hace muy necesario un análisis mediante simulaciones computacionales con tal de predecir éstas. Los análisis de impedancia vs frecuencia resultan una herramienta muy útil para identificarlas, ya que nos entregan una imagen visual del nivel de impedancia y posible distorsión de tensión en una barra. En éstos se puede ver gráficamente como peaks las resonancias paralelo, y como valles las resonancias series, pudiendo determinar fácilmente las frecuencias involucradas. [13][19] [26]

En caso de no presentar bancos de condensadores, conductores de un largo considerable u otra forma de compensación de potencia reactiva, el sistema eléctrico no debiera presentar frecuencias de resonancia y su impedancia debiera seguir un comportamiento lineal creciente (inductivo), en función de la frecuencia.[16]

## **2.4 Respuesta en Frecuencia del Sistema**

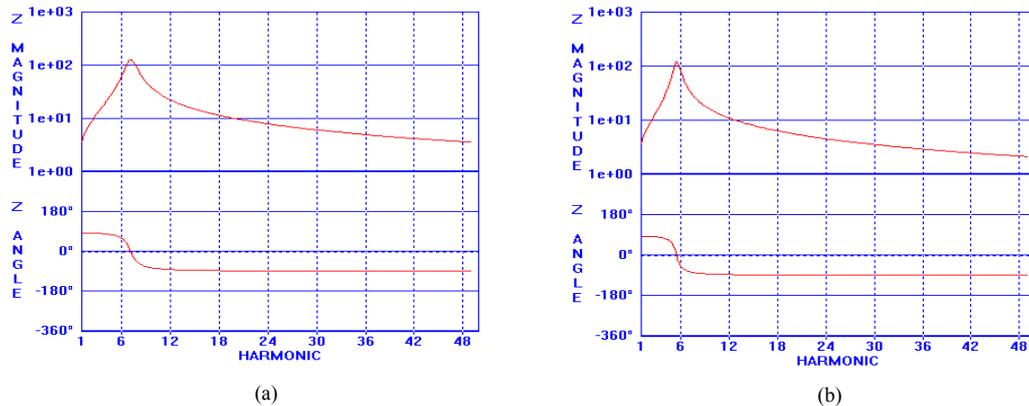
Los efectos de las armónicas en un sistema van a depender principalmente de la respuesta en frecuencia que tenga éste. Generalmente los consumos no lineales se pueden representar como fuentes inyectoras de corrientes armónicas. Es por esto que la distorsión armónica de tensión en el sistema, va a depender de las características impedancia vs frecuencia que vean estas fuentes de corrientes. Esta respuesta del sistema va a depender de varios factores, los cuales deben ser considerados en un análisis. Algunos de los más importantes se mencionan a continuación. [13] En esta parte se presentan algunos gráficos obtenidos mediante simulaciones con el programa PCFLOH y usando el mismo circuito del Punto 5.4.1.1, figura 5.4.

### **2.4.1 Uso de Bancos de condensadores**

Los bancos de condensadores usados típicamente para corregir el factor de potencia, son uno de los principales componentes que afectan la respuesta en frecuencia del sistema. La conexión de éstos puede generar condiciones de resonancia, tanto serie como paralela, provocando incrementos en los niveles de armónicos (Ver 2.3.1). Los bancos de condensadores además presentan un camino de baja impedancia para las componentes de altas frecuencias por lo que cuando éstas alcanzan cierta magnitud pueden sobrecargar los bancos e incluso llegar a destruirlos.

También hay que tener en cuenta cuando se considera la incorporación de estos bancos de condensadores, que generalmente se mueve las frecuencias de resonancia a valores menores lo que es mas peligroso ya que generalmente a estas frecuencias las amplitudes de las armónicas son mayores pudiendo incrementarse la distorsión total de la barra.[16][19]

En la siguiente figura se observa la respuesta en frecuencia de la impedancia del sistema en la barra 3 del circuito presentado en la Punto 5.4.1.1, figura 5.4, donde inicialmente se usó un banco de condensadores de 6 MVAR, y luego el efecto de incorporar un banco de 10 MVAR.



**Figura 2.4:** Respuesta en frecuencia  $Z$ [%]. (a) Con banco de condensadores de 6 MVAR. (b) Con banco de condensadores de 10 MVAR.

Se observa que la frecuencia de resonancia se mueve a valores menores acercándose a la 5<sup>ta</sup> armónica que usualmente es de mayor amplitud y resulta ser una armónica característica en sistemas industriales.

## 2.4.2 Influencia de la carga

Hay dos efectos importantes que tiene la carga sobre la respuesta en frecuencia del sistema. [16][19]

- La parte resistiva de la carga produce un amortiguamiento que afecta la impedancia del sistema cerca de las frecuencias de resonancia (ver 2.3.1).
- Los consumos tipo motor y otros consumos dinámicos que contribuyen con la capacidad de cortocircuito del sistema, pueden cambiar la frecuencia de resonancia del sistema. Los consumos tipo motor no producen un amortiguamiento significativo a las frecuencias de resonancia.

Esto se puede demostrar usando el circuito simulado mediante PCFLOH en el Punto 5.4.1. Donde se observa que inicialmente para una carga de 2.24 MW en la barra 3, se tiene una resonancia de alta impedancia o resonancia paralelo (ver punto 2.3.1.2) coincidente con la

armónica de orden 7. Luego al aumentar la carga en esa barra a 10 MW se observa una amortiguación de la amplificación de la impedancia a la frecuencia de resonancia, efecto que no aparece a otras frecuencias.

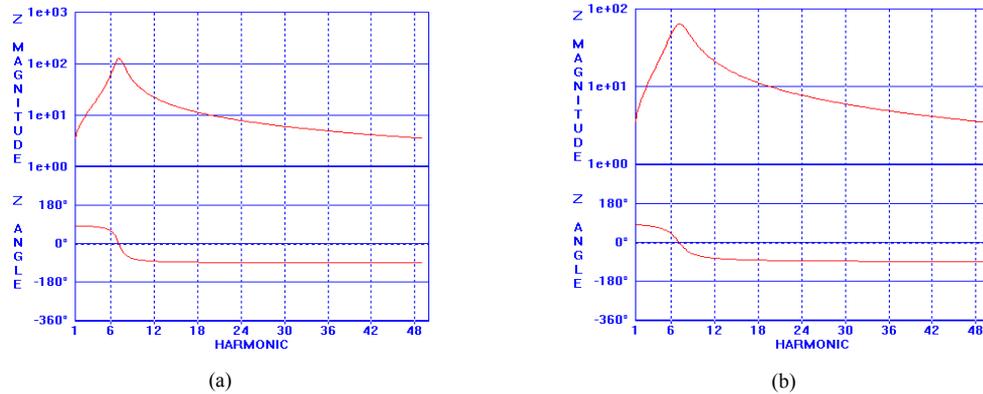


Figura 2.5: Respuesta en frecuencia  $Z$  [%]. (a) Con carga de 2.24MW. (b) Con carga de 10MW.

### 2.4.3 Capacidad de cortocircuito

Es un indicador de la impedancia del sistema a frecuencia fundamental, en un determinado punto del sistema. Cambios en el nivel de cortocircuito producen un corrimiento en la frecuencia de resonancia del sistema. Este efecto se puede producir debido a la alteración de la configuración de operación de la red. [15]

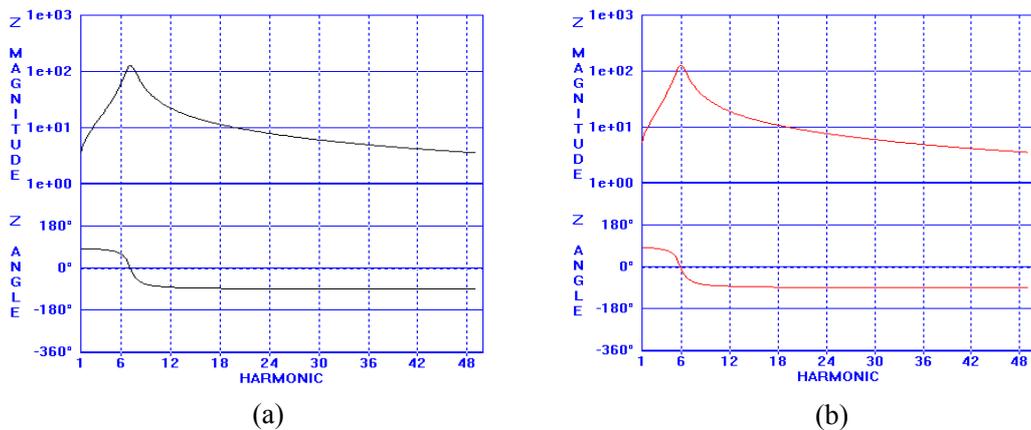


Figura 2.6: Respuesta en frecuencia  $Z$  [%]. (a) Con Scc de 1000 MVA. (b) Con Scc de 100 MVA

Generalmente sistemas débiles o de baja potencia de cortocircuito, son más vulnerables a la distorsión. En la figura anterior se observa cómo la frecuencia de resonancia (peak), se mueve a frecuencias menores al reducir la potencia de cortocircuito. Gráficos obtenidos mediante simulación con PCFLOH del circuito mostrado en 5.4.1.1, figura 5.4.

## 2.5 Armónicas y el factor de Potencia

Si bien las armónicas de corriente y voltaje producidas por cargas no-lineales incrementan las pérdidas y por lo tanto tienen un impacto negativo en los sistemas eléctricos y sus componentes, es muy complejo definir y generalizar la relación real que éstas tienen con las pérdidas en el sistema. Una medida de esta relación se puede obtener usando la correcta definición del factor de potencia, que incluye en su cálculo la existencia de las armónicas.

El concepto de factor de potencia nace de la necesidad de cuantificar cuan eficiente un consumo utiliza la energía del sistema. Para sistemas idealmente sinusoidales éste se define como:

$$F.P = F.P_{desp} = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (2.5)$$

También conocido como Factor de Potencia o Factor de Desplazamiento, y corresponde al valor que registran los equipos de medición.

Donde se tiene que P es la potencia activa y S la potencia aparente definidas como:

$$\begin{aligned} P &= V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \\ S &= V_{ef} \cdot I_{ef} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Donde:

$V_{ef}$  = Valor efectivo de voltaje.

$I_{ef}$  = Valor efectivo de corriente.

$\varphi$  = Angulo de desfase entre la tensión y la corriente.

En caso de sistemas no-sinusoidales debido a la presencia de armónicas, se define un factor de potencia real, que depende de dos factores, el de desplazamiento y un factor de distorsión. [2][5][16]

$$F.P_{real} = \frac{I_1}{I_{ef}} \cdot \cos\varphi = \mu \cdot \cos\varphi = F.P_{dist} \cdot F.P_{desp} \quad (2.7)$$

Donde:

$I_1 =$  Componente fundamental de corriente  
 $\mu =$  Factor de distorsión

Otra definición equivalente, usada para expresar este factor de potencia real es la siguiente: [17]

$$F.P_{real} = \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I/100)^2}} \cdot \cos\varphi = F.P_{dist} \cdot F.P_{desp} \quad (2.8)$$

Donde:

$THD_I =$  Distorsión total de corriente

En esta última expresión se observa de forma mas clara la dependencia del factor de potencia con la distorsión armónica de corriente. Se tiene entonces que como el factor de desplazamiento nunca toma valores mayores que uno, éste queda limitado por el factor de distorsión. Por ejemplo si se considera un consumo monofásico, como el de un computador que generalmente tienen distorsiones cercanas al 100% ( $THD_I$ ), entonces su factor de potencia real no va a superar los 0.707 aunque el factor de desplazamiento esté cerca de la unidad

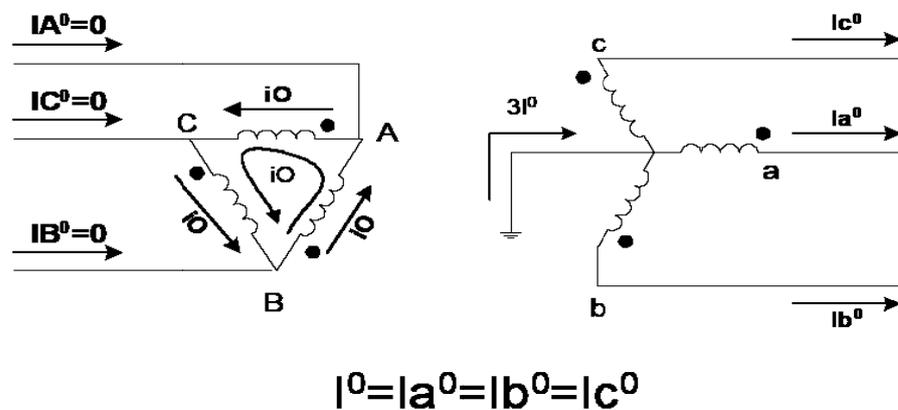
También hay que tener en cuenta que cuando se agrega bancos de condensadores para corrección del factor de potencia, lo que se está haciendo es mejorando el factor de desplazamiento. Si se quiere mejorar el factor de distorsión es necesario hacerlo mediante filtros, mayor número de pulsos en convertidores de potencia, o aplicando algún otro método de reducción de armónicos. Algunos ejemplos de estos métodos se detallan a continuación. [2][16][19][25]

## 2.6 Métodos para reducir las armónicas dentro de un sistema

Considerando los efectos que producen el exceso de armónicas en los sistemas eléctricos y el aumento en el uso de equipos de electrónica de potencia asociado a los procesos industriales, se han desarrollado diversos métodos que de una u otra manera ayudan a limitar el flujo de armónicas desde su fuente hacia donde la presencia de éstas es indeseable, o para disminuirlas a niveles aceptables (Ver Cap. III). En esta parte se muestran algunos de los métodos más comunes, como ciertas conexiones de transformadores que eliminan o reducen la circulación de determinadas armónicas, y la utilización de filtros.

### 2.6.1 Conexiones de Transformadores

Algunas conexiones y configuraciones de transformadores son usadas comúnmente para reducir el flujo de armónicas en los sistemas eléctricos. Las conexiones más usadas en transformadores son la  $\Delta$ -Y, Y-Y,  $\Delta$ - $\Delta$ , y la Y- $\Delta$ .

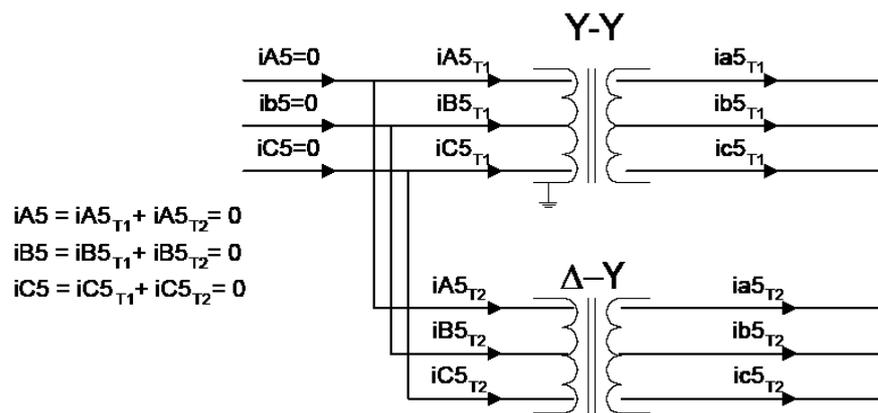


**Figura 2.7:** Conexión  $\Delta$ -Y de transformadores trifásicos. Efecto sobre las armónicas de secuencia cero.

La figura 2.7 muestra como la conexión  $\Delta$ -Y elimina el flujo de corrientes armónicas de secuencia cero en las líneas del lado de la  $\Delta$ , debido a que éstas se limitan a circular sólo dentro de la  $\Delta$ . En el caso de tener que la Y del secundario no esté conectada a tierra, se tendría que la corriente del neutro sería nula y por lo tanto las corrientes de secuencia cero por estar en fase no tendrían trayectoria posible en el secundario del transformador. Un fenómeno similar ocurre cuando se deja sin conectar a tierra el neutro de alguno de los lados de un transformador Y-Y.

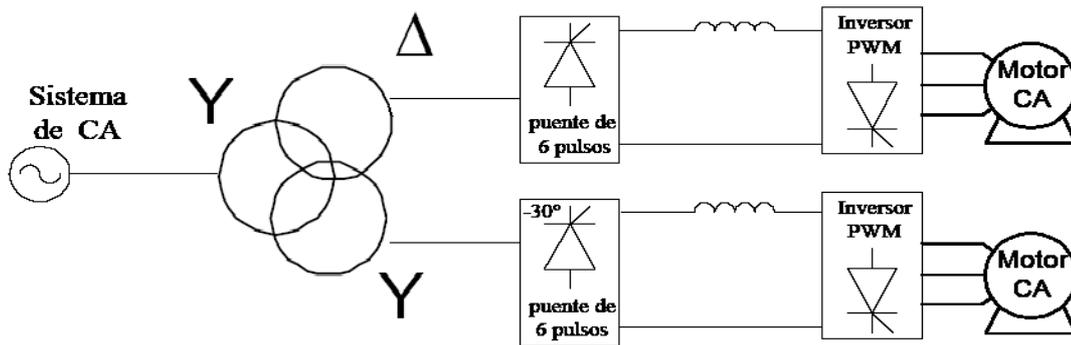
Tal como se menciona en la parte 2.1 (Tabla 2.1), las terceras armónicas y los múltiplos de éstas (Triplens), se comportan como componentes de secuencia cero, por lo tanto son filtradas usando estas conexiones de transformadores. [27] Cabe destacar que esto solo ocurre en el caso ideal de tener una red totalmente balanceada, por lo general se va a tener una atenuación de estas armónicas.

Otro sistema ampliamente usado, sobretodo para consumos de altas potencias (algunos mega Watts) y convertidores de 12 o mas pulsos, es la combinación de transformadores con estas conexiones. [27][19]



**Figura 2.8:** Combinación de transformadores Y-Y,  $\Delta$ -Y, para la eliminación de la quinta armónica.

En la figura 2.8 se muestra la combinación de un transformador  $T_1$  de conexión Y-Y con otro  $T_2$  de conexión  $\Delta$ -Y, cuyos primarios están en paralelo, y suponiéndose que estos alimentan dos consumos no lineales idénticos. Dado que el secundario del transformador  $T_1$  no está aterrizado y que el primario de  $T_2$  es de conexión  $\Delta$ , no existe camino posible hacia la fuente, para las armónicas de secuencia cero. Además dado el desfase de 180 grados que se produce para la 5<sup>ta</sup> armónica, en el primario de  $T_2$  con respecto al de  $T_1$ , se tiene que ésta también se elimina, y no fluye hacia la fuente. Cabe destacar que este efecto se repite para las armónicas 7, 17 y 19. Alternativamente se puede utilizar un único transformador con secundario en  $\Delta$  y un terciario en Y, como se muestra en la siguiente figura. [27][19]



**Figura 2.9:** Transformador con conexión Ydy, para la eliminación de la quinta y séptima armónica.

Cuando una determinada armónica no es de la misma magnitud en ambos transformadores, no se va a tener una eliminación de ésta, pero si una reducción. Para eliminar armónicas de orden superior es necesario aplicar filtros.

### 2.6.2 Filtros.

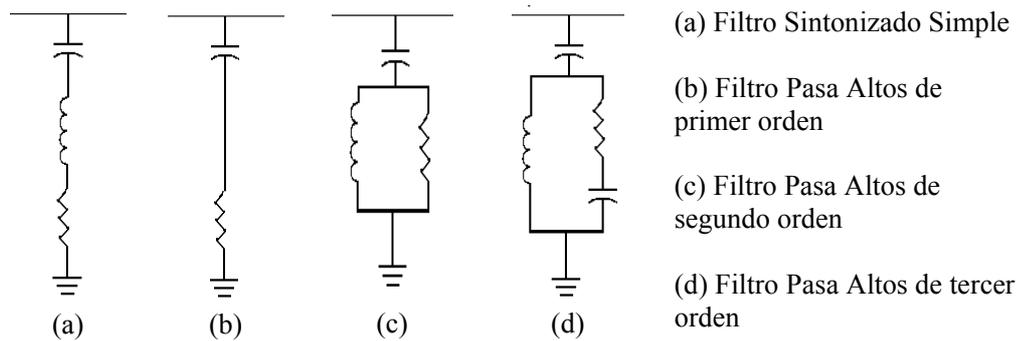
El uso de filtros es un mecanismo muy usado en la industria, sobretodo cuando se busca el control de la distorsión armónica, y además corregir el factor de potencia. Básicamente estos se clasifican como filtros pasivos y filtros activos. Los más usados son los pasivos, los cuales pueden ser diseñados como filtros sintonizados a una frecuencia específica o como filtro pasa altos.

Los filtros activos son sistemas mas sofisticados, que operan en un amplio rango de frecuencias, ajustando su operación a las condiciones actuales del sistema. [11][16]

En esta parte se dan a conocer algunas de las principales características de los filtros, pero dado lo extenso y complejo del tema, no se da mayor detalle acerca de su diseño u operación específica, especialmente en el caso de los filtros activos.

### 2.6.2.1 Filtros Pasivos

Estos filtros consisten en combinaciones de condensadores, inductores y resistencias, los cuales a determinada frecuencia generan un camino de mínima impedancia, provocando así que esas componentes de frecuencia salgan del circuito a través del filtro. En la siguiente figura se muestran las configuraciones básicas de los Filtros pasivos mas usados. [11][16]



**Figura 2.10:** Configuraciones básicas de Filtros Pasivos .

Estos filtros se caracterizan por tener una frecuencia de sintonía o de resonancia, que coincide con la o las frecuencias que se quieren eliminar. El filtro Sintonizado Simple se caracteriza por ser diseñado para la eliminación de una armónica determinada, en cambio el filtro Pasa Altos permite la eliminación de un amplio rango de frecuencias por sobre la frecuencia de sintonía. Otra ventaja de los filtros Pasivos es que a frecuencia fundamental pueden proporcionar la potencia reactiva requerida por la red.

El diseño de este tipo de filtros debe ser cuidadosamente estudiado ya que estos al interactuar con el sistema pueden provocar resonancia paralelo al igual que los bancos de condensadores, pueden presentar desintonías debido a tolerancias de elementos con la temperatura, desgaste, o variaciones de la frecuencia fundamental, y además se debe considerar que éstos atraen corrientes armónicas de todos los puntos de la red, desde fuentes conocidas como desconocidas por lo que si no están bien dimensionados se pueden ver sobrecargados. Dadas estas dificultades, se aconseja tener en cuenta las siguientes consideraciones prácticas: [11] [19] [16] [3]

- Los Filtros deben ser ubicados cerca de los principales consumos no-lineales o fuentes contaminantes.
- Dado que estos filtros se usan para compensar potencia reactiva, en momentos de baja carga se puede desconectar parte de éste, con tal de evitar posibles sobretensiones en el sistema.

- Se debe tener cuidado de no provocar una resonancia paralelo en el sistema en torno a una armónica característica. Para esto es necesario la utilización de software, con tal de verificar el comportamiento de la impedancia del sistema ante la introducción de este nuevo filtro.
- El filtro se debe sintonizar bajo la frecuencia de la armónica que se quiere eliminar, así se previene que la frecuencia de sintonía se mueva hacia frecuencias mayores en caso de que uno o mas condensadores fallen o sus fusibles se quemen.
- Las corrientes por el inductor y la tensión por el capacitor deben ser pensadas incluyendo tanto la componente fundamental como las respectivas componentes armónicas.

### **2.6.2.2 Filtros Activos.**

Ésta es una nueva y prometedora tecnología, la cual consiste básicamente en circuitos de electrónica de potencia que están activamente inyectando armónicas de igual magnitud pero signo contrario a las de la red, produciendo la cancelación de éstas y reduciendo por lo tanto la distorsión total. Algunas ventajas que tienen estos filtros respecto a los Pasivos son: [3] [19]

- Operación activa, en el dominio del tiempo, por lo que se “sintoniza” automáticamente, dependiendo las condiciones del sistema.
- Son de tamaño más pequeño. Dada las altas frecuencias de operación (switching), permite el uso de inductores y capacitores de menor tamaño.
- Mayor flexibilidad.
- Poseen limitadores de corriente por lo que no se sobrecargan.
- Pueden ejercer monitoreo múltiple en distintos puntos del sistema por lo que pueden simultáneamente reducir la distorsión en puntos remotos.

Claramente estas ventajas deben ser comparadas con el tiempo de diseño y costo extra que significa el uso de filtros de este tipo.

### **3 Estándares o normas sobre límites de armónicas en redes eléctricas.**

Existen variadas guías y estándares relacionados con la limitación de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia. Estos varían según las características de las redes eléctricas y de los consumidores en los diferentes países, y generalmente estos tienen el carácter de recomendación o “práctica recomendada”, donde aconsejan valores individuales y totales, tanto para corrientes como para tensiones de barra. En general son el resultado de un acuerdo entre las partes involucradas. [13] [16]

#### **3.1 Propósito de los estándares**

El propósito de estos estándares y normas se puede resumir en la necesidad de [2]:

- i. Controlar la distorsión de tensión y corriente a niveles que los equipos conectados al sistema puedan tolerar
- ii. Garantizar que los clientes tendrán una tensión con una forma adecuada a sus necesidades
- iii. Limitar el nivel de distorsión que un cliente puede introducir a la red.
- iv. Asegurar que las armónicas no interfieran con otros sistemas, tales como los sistemas telefónicos.

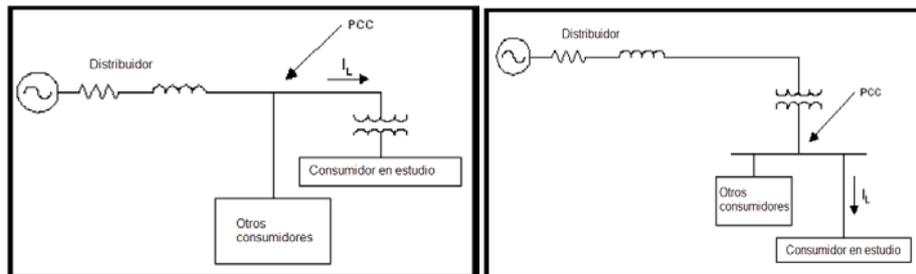
Los estándares especifican el nivel de distorsión sobre el cual la probabilidad de falla o alteración en el sistema es alta. Por lo tanto para cuantificar la calidad de energía en el sistema, se comparan las mediciones de terreno con los valores dados por la norma. De ésta manera, las medidas fuera de norma se asocian con una operación poco confiable o de alto riesgo para los equipos involucrados.

## 3.2 Definiciones

Existen algunos conceptos e índices que es necesario definir antes de presentar los estándares o normas.

### 3.2.1 PCC

Este concepto es importante de introducir ya que se presta, en muchos casos para confusiones. Se define como el punto de conexión común más cercano al consumidor, desde el lado del distribuidor, donde otro consumidor puede o no ser abastecido. [13] [30] [20]



**Figura 3.1:** Punto de conexión común  
(IEEE 519 Applications Guide)

En general los estándares definen índices recomendados para éste punto en particular, aunque la mayoría de las veces éstos índices son considerados como referencia para analizar otros puntos dentro de un sistema, como barras donde se encuentran consumos no lineales y otros consumos conectados.

### 3.2.2 Índices de Distorsión Armónicas

Se han definido una serie de índices que permiten cuantificar el nivel de distorsión en un sistema eléctrico, así como también determinar el aporte de cada armónica a éste. [16] [30]

### 3.2.2.1 Distorsión Individual

Indica el grado de distorsión porcentual debido a cada orden de armónica, en relación al valor efectivo de la componente fundamental.

\* De tensión 
$$D_{vh} = \frac{V_h}{V_1} \times 100[\%] \quad [3.1]$$

\* De corriente 
$$D_{Ih} = \frac{I_h}{I_1} \times 100[\%] \quad [3.2]$$

Donde:

$V_h, I_h$ =amplitud o valor efectivo de la armónica h-ésima.

$V_1, I_1$ =amplitud o valor efectivo de la fundamental.

### 3.2.2.2 Distorsión Armónica Total (THD)

Este índice es el más comúnmente utilizado, y se define como el valor efectivo de las componentes armónicas sobre la fundamental, dividido por el valor efectivo de la componente fundamental, entregando así una medida del grado de distorsión de la variable.

\* De tensión 
$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} V_h^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad [3.3]$$

\* De corriente 
$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}{I_1} \times 100[\%] \quad [3.4]$$

Cabe mencionar que el THD de una onda sinusoidal perfecta a la frecuencia fundamental, según esta definición, es cero.

### 3.2.2.3 Distorsión total de demanda

Se define como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}{I_L} \times 100[\%] \quad [3.5]$$

Donde:

$I_L$  = máxima corriente de carga medida en un intervalo de 15 a 30 minutos en el PCC (no un peak instantáneo – una importante distinción).

Se destaca que este índice se diferencia del  $THD_I$ , dado que éste considera la distorsión con respecto a  $I_L$ , lo que lo hace mucho más representativo. Principalmente porque ayuda a prevenir que un usuario sea injustamente penalizado por su nivel de armónicos durante períodos de baja carga. Durante los períodos de baja carga, debido a que la componente fundamental puede sufrir fuertes variaciones, puede parecer que el nivel de armónicos se ha incrementado en términos de porcentaje, incluso habiéndose mantenido o disminuido la magnitud en amperes de las componentes armónicas de corriente, no así si se ocupa el TDD como referencia.

Es importante mencionar que los equipos de medidas de armónicos, usualmente entregan el THD (en función de la componente fundamental) como indicador del nivel de distorsión, y en general esta información es suficiente para hacer un análisis y no se hace necesario convertir las medidas de  $THD_I$  en porcentaje de  $I_1$ , en porcentaje de  $I_L$  (TDD). Normalmente si se tiene que la distorsión total medida como  $THD_I$  cumple con los límites propuestos en las tablas anteriores, por definición el TDD también debiera cumplir con estos ( $I_L$  debiera ser siempre mayor o igual a  $I_1$ ). En caso de que los límites sean ampliamente sobrepasados, o haya una disputa entre el usuario y el distribuidor, se hace necesario realizar la conversión. [30]

### 3.3 Norma IEEE Std 519-1992.

Este standard titulado “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System”, establece niveles de distorsión de tensión aceptables en sistemas de distribución, y límites para la distorsión armónica de corrientes que los usuarios pueden inyectar al sistema. Hay que considerar que éstos son definidos para ser aplicados en el PCC (ver 3.2.1), y como valores de “peor caso” para operación normal del sistema (condiciones válidas por más de una hora). Para períodos cortos, durante partidas o condiciones inusuales, los límites pueden ser excedidos en un 50%. [13] [30]

#### 3.3.1 Límites de distorsión de tensión

En la siguiente tabla se muestran los límites para la tensión propuestos por esta norma.

Tensión en barra PCC	Distorsión Individual de Tensión (%)	Distorsión Total de Tensión THD <sub>v</sub> (%)
Hasta 69kV	3.0	5.0
69.001 kV a 161kV	1.5	2.5
161.001 kV y más	1.0	1.5

**Tabla 3.1:** Límites de distorsión de tensión, % de la componente fundamental.  
IEEE Std. 519-1992

#### 3.3.2 Límites de Distorsión de Corriente

Éste estándar establece límites de distorsión de corriente aplicables para el caso de rectificadores de 6 pulsos y situaciones generales de distorsión. Cuando se usan convertidores con número de pulsos ( $q$ ) de más de 6, los límites para las armónicas características son incrementados por un factor  $\sqrt{q/6}$ , con tal que las amplitudes de las armónicas no características sean menores que el 25% de los límites especificados.

En las siguientes tablas se muestran los límites de distorsión de corriente para armónicas impares en sistemas distribución general.

Distorsión Individual de Corrientes Armónicas impares en porcentaje de $I_L$						
$I_{sc}/I_L$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

**Tabla 3.2:** Límites de distorsión de corriente para sistemas desde 120 [V] a 69 [kV].  
IEEE Std. 519-1992

Distorsión Individual de Corrientes Armónicas impares en porcentaje de $I_L$						
$I_{sc}/I_L$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
$50 < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
$100 < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

**Tabla 3.3:** Límites de distorsión de corriente para sistemas desde 69.001[kV] a 161[kV].  
IEEE Std. 519-1992

Donde:

$I_{sc}$  = corriente máxima de cortocircuito en el PCC.

$I_L$  = máxima corriente de demanda (componente fundamental), en el PCC.

Para las armónicas pares los límites corresponden al 25% de los mostrados en la tabla anterior. Cabe destacar que en las tablas anteriores se usa el TDD como indicador de la distorsión total (en vez del THD<sub>I</sub>), lo que es importante, dado lo mencionado en el punto 3.2.2.3.

### 3.4 Norma Chilena

De acuerdo al Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos, elaborado por la Comisión Nacional de Energía, se establece en la NORMA TÉCNICA: ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN POR INYECCIÓN DE ARMÓNICAS DE TENSIÓN Y CORRIENTE (Artículo 250° del D.S.327/97). En condiciones normales de operación, se deberá cumplir para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o siete días consecutivos que: el 95% de los valores estadísticos de las componentes armónicas (corrientes, tensiones), y de su índice de distorsión total, cumplen con lo indicado en las tablas siguientes. El valor estadístico de las componentes armónicas, y de su índice de distorsión será obtenido para cada intervalo de diez minutos, como resultado de evaluar estadísticamente un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo, de acuerdo a lo establecido en la norma correspondiente. [7]

Las disposiciones establecidas en esta norma técnica son de carácter obligatorio. Corresponderá a la Superintendencia, la fiscalización e interpretación del cumplimiento de lo establecido en esta norma técnica, al igual que aplicar las sanciones conforme a la legalidad vigente.

#### 3.4.1 Armónicas de Tensión

En la siguiente tabla se pueden ver los límites propuestos por esta norma para las armónicas individuales de tensión.

Armónicas Impares No múltiplo de 3			Armónicas impares múltiplos de 3			Pares		
Orden	Armónica de voltaje (%)		Orden	Voltaje (%)		Orden	Voltaje (%)	
	$\leq 110kV$	$> 110kV$					$\leq 110k$	$> 110kV$
5	6	2	3	5	2	2	2	1.5
7	5	2	9	1.5	1	4	1	1
11	3.5	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	3	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
17	2	1	>21	0.2	0.2	10	0.5	0.4
19	1.5	1				12	0.2	0.2
23	1.5	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.5	0.7						
> 25	$0.2+1.3 \cdot 25/h$	$0.2+0.5 \cdot 25/h$						

**Tabla 3.4:** Límites de distorsión de tensión.

Los valores de tensiones armónicas se expresan en porcentaje de la tensión de frecuencia fundamental. Al aplicar la estadística del 95% a los valores registrados del índice de distorsión armónica total ( $THD_v$ ), se debe cumplir para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos y para tensiones iguales o inferiores a 110kV, que éste índice deberá ser inferior a 8%. Y para tensiones superiores a los 110kV, se debe cumplir que éste índice debe ser inferior a 3%.

### 3.4.2 Armónicas de Corriente.

En la siguiente tabla se muestran los límites propuestos por ésta norma para el  $THD_i$  y los índices individuales de distorsión para las armónicas de corriente.

Máxima Distorsión Armónica de Corriente Expresada como % de la Fundamental						
	Orden de la Armónica (armónicas impares)					
$I_{sc}/I_L$	< 11	$11 \leq H < 17$	$17 \leq H < 23$	$23 \leq H < 35$	$35 < H$	$THD_i$
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

**Tabla 3.5:** Límites de distorsión de corrientes armónicas, en % de la componente fundamental.

Donde:

$I_{sc}$  = corriente máxima de cortocircuito en el PCC.

$I_L$  = máxima corriente de demanda (componente fundamental), en el PCC.

- Las armónicas pares está limitadas al 25% de los límites establecidos en la tabla anterior.
- Todos los equipos de generación de potencia están limitados a los valores indicados de distorsión armónica de corriente, independiente de la razón  $I_{sc}/I_L$ .

- Para el caso de clientes en Puntos Comunes de Conexión comprendidos entre 69 kV y los 154 kV, los límites son el 50% de los límites establecidos en la Tabla.
- Para el caso de clientes en PCC superiores a 154 kV se aplicarán los límites de 110 kV.
- Se hace la observación de que estos límites para la corriente coinciden con los del Std-519. (Ver 3.3)

Según la NORMA TÉCNICA: PROCEDIMIENTO DE MEDICIONES Y REGISTRO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE SUMINISTRO (Artículo 241° del D.S.327/97).[8] Las mediciones deben ser realizadas por un OMA (Organismo de Medición Autorizado), para luego ser verificadas por la Superintendencia, de acuerdo a las especificaciones y exigencias que ésta establezca.

## **4 Estudios de Armónicas en un Sistema Eléctrico**

No es fácil justificar económicamente la realización de un estudio de armónicas, sobretodo cuando se trata de un sistema que está con todos sus equipos funcionando, tal vez con algunos problemas, pero funcionando. Es por eso que es importante definir en que casos es necesario realizar un estudio de éste tipo. [16]

Generalmente estos estudios son necesarios en las siguientes situaciones:

- Cuando se tenga indicios operacionales inquietantes como la quemazón de fusibles, cables, filtros o bancos de condensadores, sin una causa aparente.
- Cuando se esté considerando la incorporación de algún equipo importante, aún más cuando se trate de un consumo no-lineal, o fuente de armónicos, como las vistas en la parte 2.2.
- Cuando se esté considerando la incorporación de un banco de condensadores, o algún tipo de filtro para el control y atenuación de armónicas.
- En redes débiles, con potencia de cortocircuito baja, que tengan cargas no-lineales que inyectan corrientes armónicas. (ver parte 2.4.3)
- Cuando la potencia de las cargas contaminantes es importante con respecto a la potencia instalada total del Sistema.
- Cuando un cliente sospecha que la concesionaria le está inyectando armónicas o viceversa.

### **4.1 Procedimiento para la realización de un estudio de armónicas**

La manera como se lleva a cabo un estudio de éste tipo, depende en gran parte de los objetivos que tenga éste, de la información disponible, y del tipo de sistema que se quiera analizar. Las mediciones del nivel de armónicos en un sistema eléctrico, mediante un instrumento especializado, puede ser de gran ayuda para determinar las condiciones actuales del nivel de distorsión en la red. Pero si lo que se busca es dimensionar o aproximar el impacto de poner en servicio un nuevo equipo, o verificar el comportamiento que tendría el sistema frente a distintas configuraciones, se hace necesario utilizar un software de simulación.

Por lo tanto existen variadas formas de realizar un estudio. En éste capítulo se propone una forma de hacerlo, la que cabe destacar, no descarta otras maneras de realizarlo. Se propone los siguientes pasos cronológicos a seguir:

- Definir los objetivos del estudio
- Recopilación de la información relevante del sistema, diagramas unilineales, tipos de consumos, bancos de condensadores, filtros, transformadores, y conductores.
- Modelado del sistema mediante un programa computacional. Esto significa incluir en el modelo todos los elementos del sistema, tratando de realizar agrupaciones de carga y las aproximaciones correspondientes, con tal de reducir el modelo lo máximo posible sin perder representatividad del sistema.
- Realizar un estudio preliminar del sistema mediante el modelo. Con esto ya se pueden definir los índices de distorsión que en teoría según el modelo debieran existir en las distintas barras del sistema.
- Se deben realizar mediciones en terreno con un equipo especializado (que permita medir las variables que se presentan en el punto 4.2), con el que se pueda medir en forma continua, por un tiempo que permita obtener datos representativos del comportamiento del sistema o de la carga donde se mide. Usualmente se recomienda un mínimo de dos días.[19]
- Con los resultados obtenidos en terreno se puede validar los obtenidos mediante simulación, ajustar y modificar el modelo computacional para que entregue resultados acordes al comportamiento real del sistema. Con esto ya se tiene una herramienta poderosa para estudiar eficazmente el sistema.
- Estudios de otros casos, como la incorporación de filtros, bancos de condensadores, o distintas configuraciones del sistema. Con tal de determinar posibles condiciones resonantes, y caracterizar el comportamiento del sistema.

## 4.2 Mediciones de Armónicas.

Antes de realizar mediciones en terreno, es necesario definir los objetivos de éstas, y los puntos donde se medirá. Estos puntos pueden ser determinados con apoyo de un estudio de armónicas previo. En general se pueden considerar los siguientes aspectos: [16]

- Barras con equipos de electrónica de potencia o cargas no-lineales.
- Barras con condensadores, filtros, o asociadas a conductores largos, donde la capacitancia de la línea puede no ser despreciable.
- Alimentadores principales y punto de conexión de suministro de energía o PCC (Ver parte 3.2.1).

En general, para las mediciones de armónicas se considera el sistema eléctrico en estado estacionario. A menos que se quiera analizar el efecto producto de una maniobra específica en la red. En un punto dado, se mide usualmente para una fase las variables siguientes: [13]

- Distorsión armónica individual de voltajes y corrientes en una barra.
- Distorsión armónica total de voltajes.
- Distorsión armónica total de corrientes.
- Valores RMS de voltajes y corrientes.
- Corriente y distorsión en el neutro, en caso de existir.
- Tensiones y corrientes armónicas con sus respectivos ángulos de fase, hasta la de orden 50 (por norma), aunque normalmente se hace suficiente hasta la de orden 30.

Para realizar estas mediciones es necesario disponer del equipo adecuado, el cual debe tener un ancho de banda suficiente como para medir frecuencias entre 0 y 3kHz al menos. Debe permitir mediciones continuas por tiempos prolongados, una semana al menos (Por norma, ver 3.4) y además ser capaz de registrar todas las variables indicadas en los puntos anteriores.

### 4.3 Simulaciones computacionales.

Existen variados tipos de programas computacionales. Cuando se está analizando un sistema de tipo industrial, generalmente basta con un programa que permita realizar un estudio basado en un modelo de secuencia positiva (análisis monofásico). Ya que se asumen características asociadas a un sistema balanceado, siempre y cuando no se tenga una fuente de armónicos monofásica grande, como un tren eléctrico, o bien un desbalance considerable en la red. Las razones de esto son: [13]

- La mayoría de las fuentes armónicas son consumos trifásicos y balanceados tal como los variadores de frecuencia.
- Los bancos de condensadores generalmente son trifásicos, teniendo un efecto balanceado en la propagación de armónicas.
- La identificación y cuantificación del nivel y fase de los consumos monofásicos por lo general es información que no está disponible o no es fácil de obtener.
- Se utiliza reglas de inyección de corriente como aproximación, para definir de mejor manera los consumos no lineales, ya que la información acerca del funcionamiento de estos generalmente es pobre.

En caso de tener condiciones desbalanceadas, se debe utilizar un programa que permita una representación trifásica para el análisis del sistema. En estos últimos casos, cada armónica va a tener sus propias componentes de secuencia positiva, negativa y cero. [13]

El estudio de sistemas desbalanceados es bastante más complejo ya que se ha notado que en estos casos los conductores tanto de fase como de neutro, pueden presentar armónicas de todos los órdenes y secuencia y que los equipos suelen generar armónicas no-características. [6]

Una típica pregunta o interrogante que se tiene a la hora de realizar un estudio de armónicas mediante un programa computacional, es qué tanto detalle debe ser considerado en la simulación, para obtener resultados confiables. Esto va a depender principalmente en la cantidad y calidad de la información que se tenga del sistema, pero en general se puede recomendar las siguientes reglas a seguir: [19]

- Incluir en el modelo todos los alimentadores asociados a una misma subestación, y con mismo detalle. El lado de alta o primario del transformador en la subestación puede ser representado mediante un equivalente de Thevenin simple, usando la impedancia de cortocircuito (se define como la barra infinita del sistema).

- Entre diez y veinte barras por alimentador son usualmente suficiente detalle.
- La distribución del consumo total, por lo general no es conocido. Sin embargo las potencias de los transformadores si son conocidas, por lo que se considera una buena aproximación, distribuir el consumo total proporcionalmente en relación a estas potencias.
- Considerar en el análisis el “peor caso”, el cual es generalmente cuando los consumos no-lineales se encuentran a plena carga y los consumos lineales se encuentran con baja carga. Estos últimos producen amortiguación y reducen los niveles de distorsión, ya que sus corrientes sinusoidales en cierta forma “diluyen” las corrientes inyectadas por los consumos no-lineales.
- Los bancos de condensadores son muy importantes y deben ser incluidos en el modelo. Algunos bancos están siempre activos, otros son controlados por tiempo, tiempo-temperatura, factor de potencia, tensión, u otros parámetros. Usualmente se analizan mínimo dos casos; con todos los condensadores conectados y sin condensadores conectados. También otros escenarios pueden ser analizados.
- Si hay conductores muy largos, o subterráneos, sus capacitancias pueden ser importantes de incluir en el modelo. Como buena aproximación se considera “importante” de incluir, desde los 100 kVAR.

## **5 Caso de Estudio**

En este capítulo se presenta un caso práctico de estudio de distorsión armónica de un sistema eléctrico de potencia. Se realiza una descripción general del sistema y se describen las herramientas utilizadas en su estudio.

### **5.1 Descripción General del sistema**

El sistema eléctrico estudiado, es una red de tipo industrial. Un complejo minero ubicado en Antofagasta, donde sus principales procesos son la fundición de concentrado de cobre, extracción de ácido sulfúrico y tostación de concentrado de molibdeno. El circuito eléctrico de la planta está constituido por dos subestaciones principales, ambas alimentadas desde las Subestaciones Capricornio y Antofagasta, con un nivel de tensión de 110 kV, en el Punto de Común Acoplamiento (PCC). El consumo total de la planta es de 35 MW promedio y de frecuencia 50Hz.

Cada sistema asociado a las respectivas subestaciones, en adelante Subestación 1 y Subestación 1A, pueden ser considerados como sistemas independientes, con sus consumos y características que pueden ser resumidos en los diagramas que se muestran en las Puntos 5.2 y 5.3 respectivamente, donde se detallan además las características particulares de cada subsistema. Debido a la independencia de ambos sistemas y a las diferencias que presentan, el siguiente análisis armónico de régimen permanente se desarrolla considerando dos casos de estudio por separado.

### **5.2 Sistema eléctrico asociado a Subestación 1.**

En el siguiente diagrama unilineal simplificado se muestra el sistema asociado a la Subestación 1, se pueden ver los alimentadores y barras principales, con sus respectivos consumos equivalentes. Cabe destacar que este diagrama está sujeto a las aproximaciones y agrupaciones de cargas en las barras, consideradas en el análisis. Por lo tanto no corresponde al unilineal real de la planta.

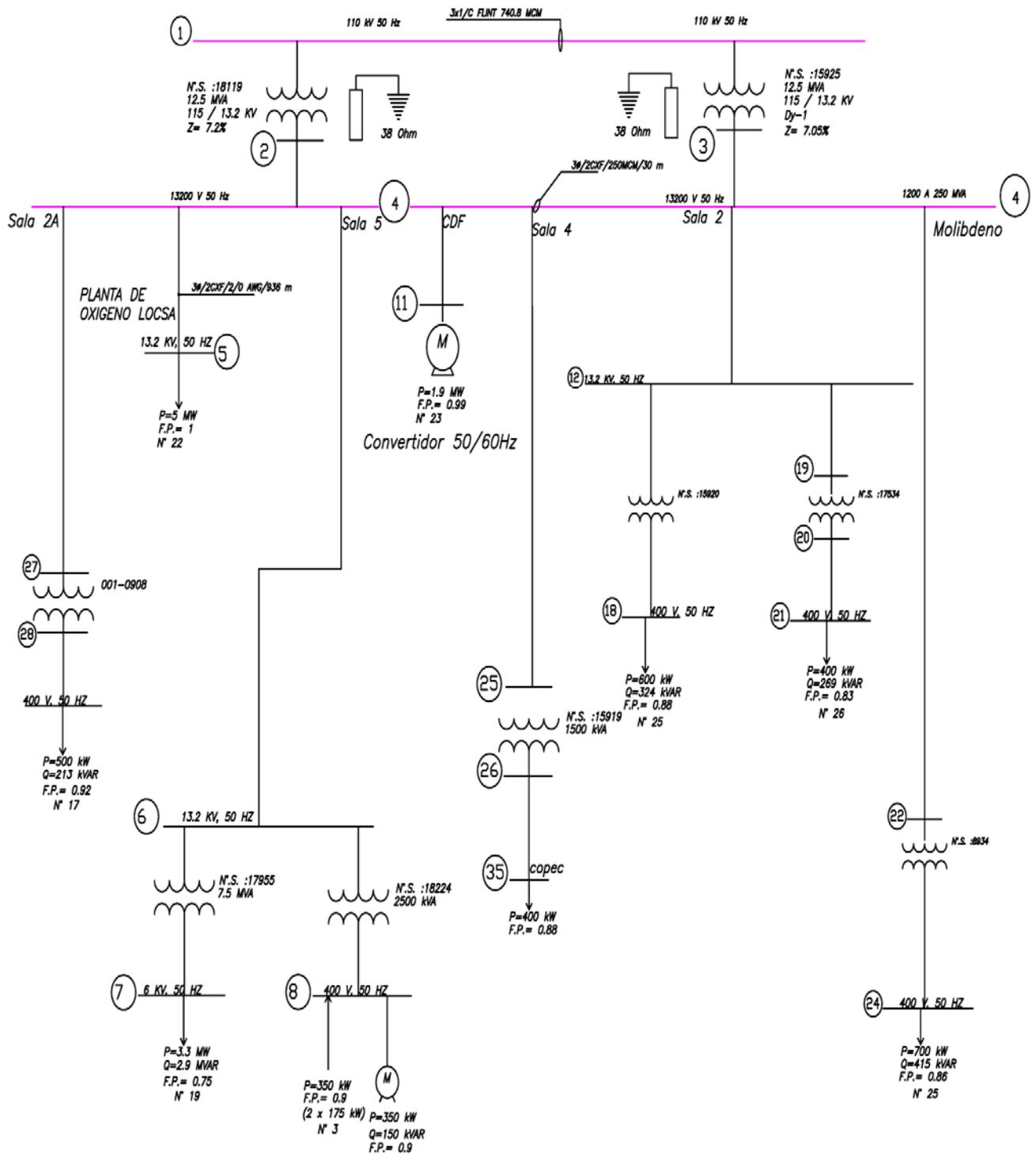


Figura 5.1: Diagrama unilineal simplificado, sistema asociado a Subestación 1.

Las características principales de este sistema se pueden resumir en la siguiente tabla.

<b>Consumo total promedio</b>	13,5 MW
<b>Frecuencia</b>	50 Hz, 60Hz y CC
<b>Consumo no-lineal promedio</b>	1,7 MW (13 % aprox del total)
<b>Factor de Potencia promedio en barra principal (110 kV)</b>	0,93
<b>Bancos de condensadores en actividad</b>	0 kVAR
<b>Filtros de armónicas</b>	NO

**Tabla 5.1:** Características principales del sistema asociado a Subestación 1.

De la figura 5.1, se observa que este sistema consta de 7 alimentadores principales conectados a la barra de 13,2 kV, los cuales llegan a las distintas salas eléctricas, asociadas a los distintos procesos productivos. El consumo total del sistema y el de cada alimentador principal, fueron obtenidos de un registro mensual, entregado por la empresa. El factor de potencia fue determinado mediante mediciones diarias en cada alimentador, con las cuales fue posible obtener un promedio representativo del consumo de cada sala eléctrica. El detalle de estos valores se puede ver en el Anexo N° 2, Tabla A2.1.

Dado que los planos e información existente de este sistema se encuentran desactualizados, para determinar el tipo y magnitud de los consumos asociados a las distintas barras principales que se muestran en el diagrama unilineal anterior (figura 5.1), fue necesario complementar la información con mediciones en terreno, al igual que con información entregada directamente por los jefes o encargados de las distintas áreas. Una vez recopilada la información y aclarada la configuración actual de sistema, fue posible realizar de una manera mas precisa las agrupaciones de carga correspondientes en cada una de las barras del sistema, pudiendo así simplificar la construcción del modelo, logrando un detalle acorde a las capacidades del software y a los objetivos del estudio. Mayor detalle de las aproximaciones y agrupaciones de carga utilizadas en la construcción del modelo computacional se detallan más adelante en el Punto 6.2. Los consumos aproximados asociados a cada barra junto con la inyección de armónicas pueden verse en el Anexo N°2, tabla A2.2.

Este sistema posee un área cuya frecuencia principal de consumo es de 60 Hz, esta parte se encuentra acoplada al resto del sistema mediante un convertidor de frecuencia de tipo motor-generador, el cual queda representado en el unilineal anterior por el motor síncrono conectado a la barra N°11. Esta aproximación es válida ya que al ser un acople mecánico, el sistema de 60 Hz queda “aislado” eléctricamente del resto del sistema. Inicialmente se consideró realizar un análisis independiente para el sistema de 60 Hz, pero dado que actualmente, sólo se encuentran en actividad un par de motores (Turbosopladores) en este sistema, se consideró innecesario

realizar un estudio aparte para éste. Es por eso que, para considerar el efecto de esta parte del sistema, es representado como un consumo equivalente al motor del convertidor de frecuencia (motor síncrono), considerando los datos de potencia e inyección de armónicas respectivas, medidas en su alimentador correspondiente.

Observando los datos de la Tabla 5.1 se puede pensar a priori que este sistema no debiera tener gran problema de distorsión armónica, dado el pequeño porcentaje de consumos no-lineales, en relación al consumo total y dada la ausencia de filtros y bancos de compensación de reactivos, por lo que no debieran presentarse condiciones de resonancia en la red.

El principal problema que presenta este sistema, es que posee muy bajo factor de potencia, dado que la Norma Chilena establece, para un nivel de tensión de 110kV, que el factor de potencia debiera ser mayor o igual a 0,98 inductivo y en este caso es de 0,93 inductivo [9]. Son conocidos los problemas causados por operar con bajo factor de potencia en los sistemas eléctricos, como son: la regulación de voltajes; funcionamiento inadecuado de máquinas; y aumento de pérdidas, que en definitiva se ven traducidos en una reducción de la capacidad y eficiencia eléctrica del sistema. Considerando lo anterior, en el Punto 6.2.4, se realiza un análisis comparativo de las alternativas para compensación de potencia reactiva, principalmente de los casos como utilizar bancos de condensadores y filtros pasivos de armónicas.

### **5.3 Sistema eléctrico asociado a Subestación 1A.**

En el siguiente diagrama unilineal simplificado se muestra el sistema asociado a la Subestación 1A, se pueden ver los alimentadores y barras principales, con sus respectivos consumos equivalentes. Este diagrama también está sujeto a las aproximaciones y agrupaciones de cargas en las barras, consideradas en el análisis. Por lo tanto no corresponde al unilineal real de la planta.

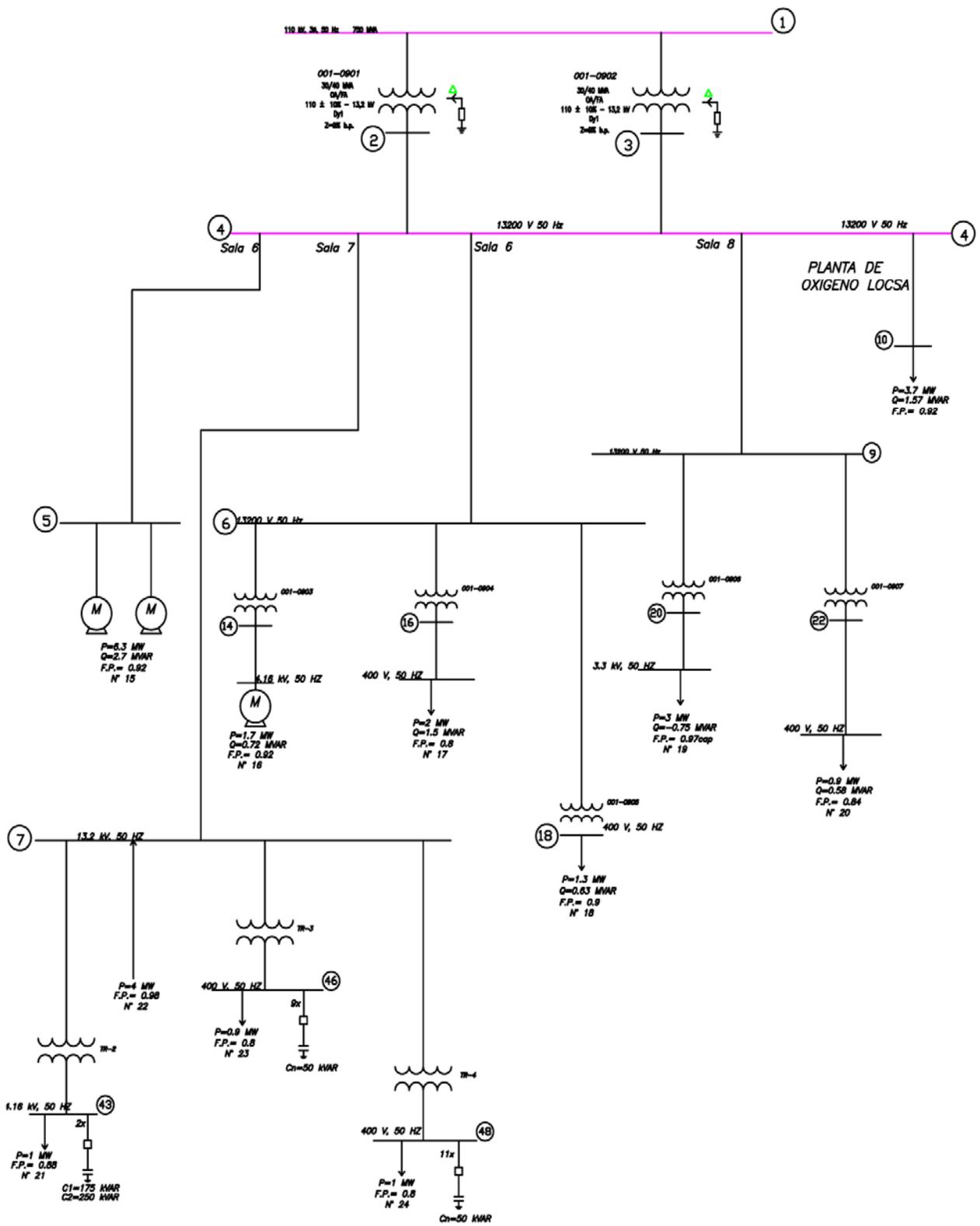


Figura 5.2: Diagrama unilíneal simplificado, sistema asociado a Subestación 1A.

Las características principales de este sistema se pueden resumir en la siguiente tabla.

<b>Consumo total promedio</b>	25 MW
<b>Frecuencia</b>	50 Hz
<b>Consumo no-lineal promedio</b>	5,5 MW (22 % aprox del total)
<b>Factor de Potencia promedio en barra principal (110 kV)</b>	0,93
<b>Bancos de condensadores, activos</b>	1425 kVAR
<b>Filtros de armónicas</b>	SI

**Tabla 5.2:** Características principales del sistema asociado a Subestación 1A.

Se observa en la figura 5.2 que este sistema consta de 5 alimentadores principales, los cuales llegan a las distintas salas eléctricas, asociadas a los distintos procesos productivos. El consumo total del sistema y el de cada alimentador principal, fueron obtenidos de un registro mensual entregado por la empresa. El factor de potencia fue determinado mediante mediciones diarias en cada alimentador, con las cuales fue posible obtener un promedio representativo del consumo total de cada sala eléctrica. El detalle de estos valores se puede ver en el anexo N° 2, tabla A2.3. Los consumos asociados a cada barra fueron aproximados mediante la información obtenida directamente de los planos del sistema y complementada con mediciones en terreno; el detalle de los consumos equivalentes considerados en cada barra puede verse en el Anexo N°2, tabla A2.2.

Este sistema se diferencia del anterior principalmente por tener mayor cantidad de consumos no-lineales, de los cuales se destaca la presencia de un variador de frecuencia de doce pulsos y de alta potencia en la Sala 7 (Pta. de ácido N°3), y el uso de bancos de condensadores de características especiales, para la compensación de potencia reactiva.

Se destaca además, que actualmente se está desarrollando la incorporación de una nueva Planta de Ácido al complejo, la cual va a ser agregada al consumo de la Subestación 1A. Esta planta debiera entrar en funcionamiento a fines de este año 2008, por lo que resulta interesante realizar un análisis acerca del impacto que tendrá esta expansión del sistema.

## 5.4 Herramientas utilizadas en el estudio.

Cuando se tiene un problema de armónicas, es aconsejable realizar una evaluación preliminar de las posibles soluciones, los costos de los equipos involucrados generalmente son altos y una medida mal analizada puede agravar aún más el problema.

Debido a que el sistema analizado es de tipo industrial, no presenta consumos monofásicos de importancia y cumple con las características mencionadas en el Punto 4.3, se considera suficiente realizar un estudio asumiendo características asociadas a un sistema balanceado, es decir se considera: un equilibrio ideal entre fases; perturbaciones sinusoidales; perturbaciones simétricas y equilibradas. Teniendo en cuenta lo anterior fue necesario buscar un software con el que fuera posible realizar un análisis armónico, monofásico y de régimen permanente, del sistema eléctrico.

### 5.4.1 Software de simulación.

Ya que en la empresa no se contaba con una herramienta computacional para realizar un estudio de este tipo, se optó por usar el software PCFLOH, desarrollado por el Profesor Mack Grady del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación de la Universidad de Texas. Éste es un software especialmente desarrollado para estudios de armónicas, gratuito, que se puede descargar desde internet, donde se pueden simular sistemas hasta de quinientas barras, suficientes para la magnitud del sistema que se quiere analizar. Este programa ha sido utilizado ampliamente en estudios de armónicas, algunas memorias anteriores y algunas publicaciones. Ejemplo de éstos, se pueden ver en las siguientes referencias [6] [18] [19] [21].

PCFLOH es un programa que trabaja con una serie de archivos de entrada, que pueden ser creados y modificados mediante Excel. Los resultados arrojados por el programa pueden ser vistos gráficamente mediante una interfaz que viene incluida, llamada HARM PLOT, o bien se pueden ver como datos mediante Excel. Para crear los archivos de entrada en PCFLOH, es necesario entender cómo este programa modela los distintos elementos del sistema eléctrico. Las siguientes consideraciones y aproximaciones se hacen al respecto:

- **Barra infinita:** Para el estudio y simulación de perturbaciones armónicas en un sistema, se requiere identificar la barra que en régimen permanente suple todos los requerimientos de potencia, y no es afectada en forma apreciable por las perturbaciones existentes. El parámetro usado para representar esta barra infinita es la impedancia de cortocircuito a frecuencia fundamental. Se considera que el voltaje armónico inyectado por el resto del sistema es cero, que la parte resistiva de la impedancia no varía con la frecuencia y que la reactancia crece proporcional a ésta.
- **Transformadores:** Se representan con su impedancia de cortocircuito a frecuencia fundamental. Se considera el desfase en grados, producido por la conexión del transformador. No se considera el efecto de magnetización.

- **Conductores:** Se considera el modelo PI equivalente, es decir, un modelo con resistencia, reactancia inductiva y reactancia capacitiva (en caso de ser necesario).
- **Generadores:** Son representados mediante un equivalente de Thevenin simple, considerando su impedancia subtransitoria a frecuencia fundamental.
- **Bancos de condensadores:** Son considerados mediante su potencia reactiva, se ingresan con el signo negativo, siguiendo la misma convención que para las cargas.
- **Filtros:** Son considerados mediante sus valores de resistencia, reactancia inductiva y capacitiva.
- **Consumos no lineales:** Son considerados como fuentes inyectoras de corrientes armónicas. En el programa se debe ingresar la potencia activa, factor de potencia y el tipo de consumo. Existen algunos tipos predeterminados, pero también se pueden crear nuevas fuentes inyectoras de armónicas.
- **Cargas:** sin mayor información, se consideran aproximadamente como cargas inductivas-resistivas. En el programa, se ingresan como consumos caracterizados por su potencia activa y reactiva.

Cabe destacar que todos los valores son ingresados en relación a una base común, definida por el usuario y las componentes armónicas son definidas en % de la componente fundamental.

Este programa permite desarrollar un análisis del comportamiento frecuencial de las impedancias de barra, y así verificar posibles condiciones de resonancias (ver Punto 2.4). También permite realizar flujos de potencia con el método de inyección de corrientes, siendo posible determinar las distorsiones de tensión y corrientes armónicas, en las distintas barras.

### 5.4.1.1 Validación del programa

Antes de aventurar una simulación y sobretodo si no se tiene mayores referencias respecto al software que se va a utilizar, es necesario validar o comprobar que éste cumple con los requisitos necesarios para el uso que se le piensa dar y así verificar que los resultados que se obtendrán sean confiables. Una técnica muy usada para esto es simular un circuito ya estudiado mediante otro programa conocido. En este caso se escogió un sistema eléctrico de trece barras que es representativo de una planta industrial de tamaño mediano. Éste es muy usado en cálculos y ejemplos en los libros de colores de la IEEE. [6] [22]

La planta es alimentada en 69 kV y el sistema de distribución interno de ésta opera en 13,8 kV. El sistema se muestra en el unilineal de la Figura 5.4 y sus características se pueden ver en las Tablas A5.1-A5.4, en el Anexo N°5. Dada la naturaleza balanceada del sistema solo se considera los datos de secuencia positiva. La capacitancia de los conductores es despreciada.

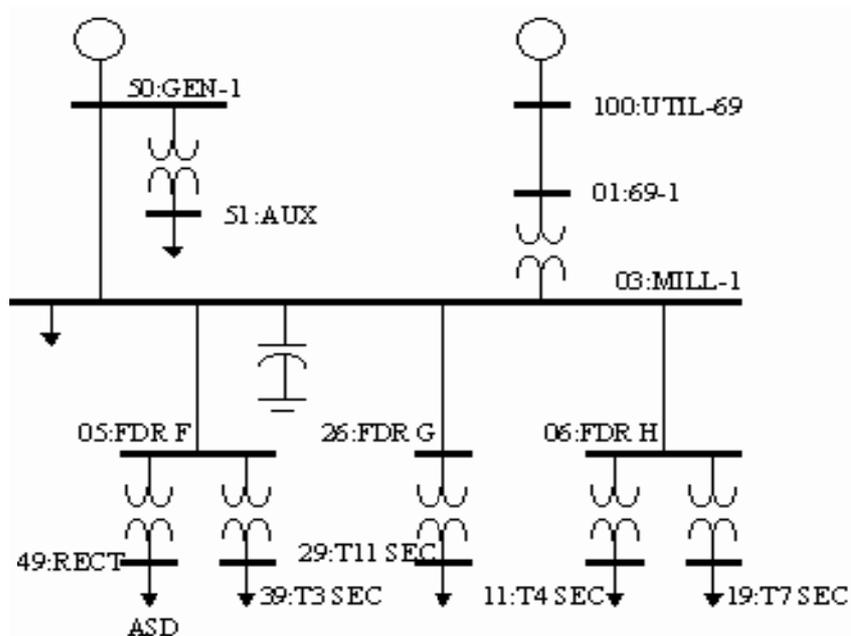


Figura 5.4: Sistema de prueba. Sistema industrial y balanceado.

Información adicional relevante para desarrollar un estudio de armónicas para el sistema industrial propuesto anteriormente es:

- La impedancia del sistema en el PCC es determinada usando la potencia de cortocircuito (MVA) y la relación X/R. Estos valores son 1000 MVA y 22,2 respectivamente.

- El generador interno de la planta se representa con un equivalente de Thevenin simple. La impedancia equivalente, corresponde a la impedancia sub-transiente que es  $0,0366+j1,3651\Omega$ .
- EL banco de condensadores para corrección del factor de potencia, es de 6000 kVAR. La resistencia interna del banco no se considera.
- El factor de potencia del variador de frecuencia (ASD) es 0,97 inductivo, típico de estos equipos funcionando a plena carga.
- Todas las cargas se modelan con un equivalente resistencia-inductancia en serie.
- No se considera la dependencia de la resistencia con la frecuencia, dada la discrepancia que existe entre los distintos programas de simulación respecto a este tema.
- La magnetización de los transformadores no se considera

En la tabla 5.3, se puede ver la comparación de los resultados de distorsión total de tensión ( $THD_v$ ) obtenidos, con los propuestos en la literatura. [6] [22]

<b>Barra</b>	<b><math>THD_v</math> (%)</b>	<b><math>THD_v</math> PCFLOH (%)</b>
<b>100:UTIL-69</b>	0,28	0,3
<b>01:69-1</b>	0,37	0,31
<b>03:MILL-1</b>	1,93	1,92
<b>50:GEN1</b>	1,87	1,86
<b>51:AUX</b>	1,81	1,88
<b>05:FDR F</b>	1,94	1,93
<b>49:RECT</b>	8,02	7,81
<b>39:T3 SEC</b>	1,80	1,83
<b>26:FDR G</b>	1,93	1,93
<b>06:FDR H</b>	1,93	1,93
<b>11:T4 SEC</b>	1,90	1,95
<b>19:T7 SEC</b>	1,81	1,83
<b>29:T11 SEC</b>	1,84	1,85

**Tabla 5.3:** Sistema de prueba. Comparación de  $THD_v$ ,

#### **5.4.2 Equipo Utilizado para realizar las mediciones.**

El método empleado para realizar las mediciones en terreno en el Sistema Eléctrico de la planta, consistió en medir las señales entregadas por los transformadores de corriente (TT/CC) y de potencial (TT/PP), del sistema de instrumentación y protecciones. En algunos casos para tensiones menores (400 V), se realizaron mediciones directamente en la barra de conexión.

El equipo usado para realizar las mediciones, es un analizador de calidad de energía (Power Quality Analyzer), marca HIOKI, modelo 3196. Este equipo cumple con el IEEE Standard 1159, donde se establecen los requisitos mínimos que debe cumplir un instrumento de medición de este tipo [14]. Este permite realizar mediciones de armónicos, y obtener información de todas las variables relevantes mencionadas en el Punto 4.2. Algunas características del equipo se pueden ver en el Anexo N°5, Punto A5.2.

## 6 DESARROLLO Y RESULTADOS

En el presente capítulo se desarrolla en detalle el análisis de distorsión del sistema eléctrico de Altonorte. Se comparan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en terreno, con los respectivos límites propuestos por la Norma Chilena. Se presentan los resultados teóricos o esperados, obtenidos mediante el software, se demuestra la efectividad y validez del programa con el cual además se desarrollan distintos análisis del sistema. En esta parte también se establece recomendaciones acerca de las posibles soluciones a los problemas encontrados

### 6.1 Determinación del PCC

La determinación del punto de común acoplamiento es de importancia ya que es precisamente en este punto donde la norma obliga a cumplir con ciertos límites (Ver 3.2.1). En este caso coincide que el PCC para ambos subsistemas, Subestación 1 y Subestación 1A respectivamente, es el mismo y corresponde a la barra de 110 kV, o barra N°1, en los unilineales. Gráficamente esto se puede ver en la Figura 6.1.

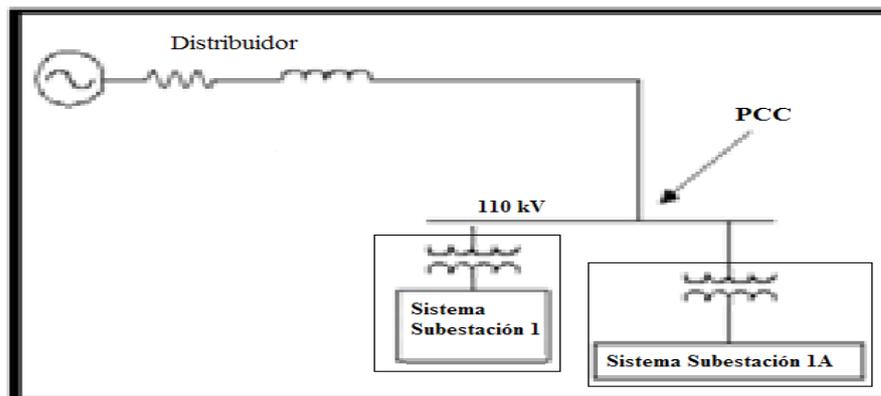


Figura 6.1: Punto de Común Acoplamiento

Tal como es definido por la norma, éste corresponde al punto de conexión común más cercano al consumidor, desde el lado del distribuidor, donde otro consumidor puede ser abastecido. Es por eso la importancia de controlar especialmente el nivel de distorsión de corrientes armónicas que introduce cada consumidor conectado a esta barra, ya que ésta puede afectar directamente a los demás consumidores.

## 6.2 Situación actual del sistema Subestación 1. Mediciones y Norma.

Lo primero en evaluar, es la distorsión de tensión e inyección de corrientes armónicas en el punto de común acoplamiento. En la siguiente tabla se muestran los valores **máximos** medidos en el PCC, para la distorsión armónica total de tensión y corrientes (ver 3.2.2), y su comparación con los límites establecidos por la Norma Chilena. Los valores se presentan en % de la componente de frecuencia fundamental.

	THD <sub>v</sub> (%)	Valor norma (%)	THD <sub>i</sub> %	Valor norma (%)
<b>Subestación 1</b>	2,08	8	1,51	2,5

**Tabla 6.1:** Distorsión total de tensión y corriente máximas, medidas en el PCC (110 kV Subestación 1). Valores en % de la componente fundamental

La siguiente Tabla 6.2, muestra los valores **máximos** de distorsión individuales medidos en el PCC. Sólo se incluyen en esta tabla, las armónicas más importantes o de mayor magnitud medidas.

Orden	I [%]	Norma I [%]	U [%]	Norma U [%]
2	0,13	0,5	0,03	2
3	0,18	2	0,28	5
4	0,13	0,5	0,03	1
5	1,23	2	1,38	6
7	0,84	2	0,62	5
11	0,44	1	0,20	3,5
13	0,48	1	0,78	3
17	0,18	0,75	0,17	2
19	0,18	0,75	0,19	1,5
23	0,13	0,3	0,29	1,5
25	0,09	0,3	0,14	1,5
29	0,04	0,3	0,12	1,3
31	0,09	0,3	0,21	1,2
35	0,04	0,15	0,13	1,1

**Tabla 6.2:** Distorsión individual de tensión y corrientes máximas, medidas en el PCC (110 kV Subestación 1). Valores en % de la componente fundamental. Comparación con valores propuestos por norma chilena.

De las tablas anteriores se observa que el 100 % de los valores registrados, tanto para la distorsión total como para las individuales, están ampliamente bajo los índices establecidos por la norma. Considerando lo anterior y tomando en cuenta el tiempo que se contaba para realizar las mediciones, se estimó suficiente un registro por un período de dos días consecutivos.

### 6.2.1 Comentarios

El nivel de perturbación, es una variable que depende directamente de la operación del sistema y su fluctuación queda determinada por el grado de carga en los equipos, principalmente en los de electrónica de potencia. De esta manera, mediciones realizadas en diferentes instantes de tiempo en general arrojarán resultados diferentes, pero dentro de un rango acotado. Dado que en este caso, el total de los valores medidos se encuentran bajo los límites establecidos por la norma, resulta simple concluir que el nivel de distorsión en el PCC cumple con los requisitos. En caso de encontrar valores fuera de norma, se tendría que realizar un análisis estadístico más detallado de los índices medidos.

En base a estos resultados y considerando lo mencionado en el Capítulo 3, Punto 3.1, se puede afirmar lo siguiente:

- Los índices de inyección de corrientes armónicas hacia la red de distribución, indican una operación adecuada del sistema (Subestación 1), en relación a lo establecido por la norma.
- El nivel de tensión armónica suministrado por la compañía de distribución al consumidor (Altonorte), cumple con lo que se considera un suministro de “buena calidad”, en relación a la distorsión armónica.

En este sistema, las principales fuentes perturbadoras son convertidores estáticos de potencia (variadores de frecuencia y puentes rectificadores) de seis pulsos, por lo que en teoría debieran encontrarse únicamente armónicas de orden 5, 7, 11, 13, 23, 25..., y en general de orden  $6k \pm 1$  con  $k$  entero, armónicas “características” de este tipo de convertidores. Como se mencionó en el Capítulo 2, Punto 2.2, la existencia de armónicas “no-características”, son inevitables, sobretodo en sistemas industriales. Principalmente debido al desbalance de la red, funcionamiento defectuoso de algunos equipos y electrónica de menor potencia. [2]

Se consideran armónicas no-características, en este caso las siguientes:

- Armónicas de orden par
- Armónicas impares múltiplos de 3 (Triplens).
- Armónicas impares no múltiplos de 3, con excepción de las de orden  $6k \pm 1$  con  $k$  entero.

También se confirma que a pesar de presentar únicamente transformadores con conexión delta-estrella y de haber realizado la medición en el lado de 110 kV (primario en delta), se tiene la presencia de corrientes armónicas de orden 3 y múltiplos. Como se menciona en el Capítulo 2, parte 2.6.1, estas aparecen debido al desbalance inevitable entre fases del sistema, que en este caso es del orden de 1.5 %, para la corriente. Se destaca también de la tabla 6.1.1, la presencia de una quinta armónica de una magnitud considerablemente mayor que el resto, situación que se aclara en el siguiente punto 6.1.2.

## 6.2.2 Distorsión armónica medida en barras del sistema eléctrico Subestación 1.

En las dos tablas siguientes, se muestran los índices de distorsión total de tensión y corrientes **máximos** medidos en las barras principales del sistema, presentadas en el Unilineal del Punto 5.2 (Figura 5.1). Y su comparación con los respectivos límites establecidos por la norma chilena.

Barra	Sistema Subestación 1			Norma (%)
	N° barra	Tensión	THDv (%)	
<b>Sala 2A</b>				<b>8</b>
General	4	13,2 kV	2,79	
Convertidores	28	400 V	2,68	
<b>LOCSA</b>				
General	4	13,2 kV	2,98	
<b>Sala 5 (Pta. Acido N°2)</b>				
General	6	13,2 kV	2,69	
	7	6 kV	2,95	
	8	380 V	#	
<b>Convertidor de frecuencia</b>				
General	4	13,2 kV	2,92	
<b>Sala 4</b>				
General	4	13,2 kV	3	
copec	35	400 V	#	
<b>Sala 2</b>				
General	12	13,2 kV	2,92	
alimentadores Ingersol Rand	18	400 V	4,51	
refino y moldeo	20	400 V	2,28	
<b>Molibdeno</b>				
General	4	13,2 kV	2,47	
	23	400 V	#	
<b># Valores no medidos</b>				

**Tabla 6.3:** Distorsión armónica total de tensión máxima, medida en barras principales de sistema Subestación 1. Valores en % de la componente fundamental. Comparación con índices propuestos por norma chilena.

Alimentador	Entre barras N°	Sistema Subestación 1		
		Tensión	THDI (%)	Norma (%)
<b>Sala 2A</b>				
General	4-27	13,2 kV	<b>29,18</b>	15
<b>LOCSA</b>				
General	4-5	13,2 kV	1,29	5
<b>Sala 5 (Pta. Acido N°2)</b>				
General	4-6	13,2 kV	2,71	5
	6-7	6 kV	2,75	5
	6-8	380 V	#	
<b>Convertidor de frecuencia CDF</b>				
General	4-11	13,2 kV	5,96	12
<b>Sala 4</b>				
General	4-25	13,2 kV	4,23	15
<b>Sala 2</b>				
General	4-12	13,2 kV	2,82	15
alimentadores Ingersol Rand	12-18	400 V	<b>12,1</b>	12
refino y moldeo	19-20	400 V	2,91	12
<b>Molibdeno</b>				
General	4-22	13,2 kV	6,48	12
<b># Valores no medidos</b>				

**Tabla 6.4:** Distorsión armónica total de corrientes máximas, medidas en alimentadores principales de sistema Subestación 1. Valores en % de la componente fundamental. Comparación con índices propuestos por norma chilena.

En la siguiente tabla se muestran los alimentadores principales donde se encontró la presencia de armónicas individuales con valores superiores o muy cercanos a los indicados por la norma. Sólo se presentan las armónicas principales o de mayor magnitud medida, las cuales coinciden con las primeras armónicas características. El detalle de las armónicas individuales, de tensión y corrientes, para todas las barras se pueden ver en el Anexo N°3, Punto A.3.1.

		Armónica característica de corriente							
		5		7		11		13	
Alimentador	Entre barras N°	Medido (%)	Norma (%)	Medido (%)	Norma (%)	Medido (%)	Norma (%)	Medido (%)	Norma (%)
<b>Sala 2A</b>	4-27	<b>24,79</b>	12	<b>12,8</b>	12	4,08	5,5	2,8	5,5
General, 13.2 kV									
<b>Sala 2</b>	12-18	9,33	10	6,45	10	3,25	4,5	2,22	4,5
Ingersoll Rand, 400 V									

**Tabla 6.5:** Principales armónicas individuales. Valores máximos medidos en barras donde se registraron los mayores índices de distorsión. Valores en % de la componente fundamental. Comparación con índices propuestos por norma chilena.

En la tabla anterior, solo aparecen medidas de distorsión individual de corrientes armónicas, dado que las tensiones armónicas no presentan problemas. Se observa además que las barras donde se registraron problemas con armónicas individuales, coinciden con las que presentan una mayor distorsión total de corriente o  $THD_I$  (tabla 6.4).

### 6.2.3 Comentarios.

Considerando que los datos mostrados en las tablas anteriores (punto 6.2.2), corresponden a valores máximos medidos, es necesario en los casos que se registraron índices de distorsión que superan los establecidos por la norma, analizar si esos valores corresponden a una condición de operación prolongada en el tiempo, lo que se asocia con una condición de riesgo.

La Sala 2A presenta el 100 % de sus valores de  $THD_I$  registrados, ampliamente sobre el límite establecido por la norma. Lo anterior se traduce en una alta inyección de corrientes armónicas desde la Sala 2A, hacia la barra principal de la Subestación 1 (13,2 kV). De la Tabla 6.5 se observa que esta inyección es principalmente de 5<sup>ta</sup> armónica, la que considerablemente supera el límite de la norma y en el total de sus valores medidos. También se tiene que la 7<sup>ma</sup> armónica presenta magnitudes que se mantienen cercanas al límite, sobrepasando éste en un 4.7% de los datos medidos. Esta situación se debe principalmente a la operación de los variadores de frecuencia asociados al giro de los CPS (Convertidores Pierce Smith). Considerando el hecho de que la barra de la Sala 2A, correspondiente a la N°28 en el unilineal Figura 5.1 (400 V), no presenta mayor distorsión de tensión, esta condición se considera de poco riesgo para los equipos involucrados directamente a esta barra. Principalmente se estaría viendo afectado el transformador de bajada asociado a esta sala y el resto del sistema a través de la barra principal, debido a la alta inyección de corrientes armónicas. Se descarta a priori posible condición de resonancia, debido al comportamiento aproximadamente lineal que debiera presentar la

impedancia del sistema, con respecto a la frecuencia, debido a la ausencia de bancos de condensadores, conductores de largo considerable o cargas capacitivas de algún tipo. [16] Condición que se confirma con las simulaciones computacionales, en el Punto 6.3.3.

La Sala 2, en su barra N°18, Ingersoll Rand (400 V), presenta el 2 % de sus valores medidos de  $THD_I$ , que superan la norma, el resto de los registros se encuentran considerablemente bajo los límites (valor promedio de  $THDI$  es 7 %), por lo tanto no se considera una operación de riesgo, dado que tampoco se presenta una distorsión de tensión apreciable en la barra. Esta distorsión se considera como parte de la operación normal de los consumos relacionados a esta barra, especialmente debido a la presencia de los puentes rectificadores, vinculados al funcionamiento de las grúas de corriente continua. También se observa que el  $THD_I$  medido en el alimentador principal de la sala es bajo, por lo que no se estaría afectando mayormente al resto del sistema.

En las tablas presentadas en el Anexo N°3, Punto A.3.1, se confirma la presencia de armónicas “no-características” en todas las barras del sistema, aunque éstas en todos los casos presentan valores bajos respecto a los especificados por la norma, lo que asegura una alimentación confiable y una baja probabilidad de funcionamiento defectuoso de los equipos en general.

## **6.3 Simulaciones del sistema eléctrico Subestación 1.**

### **6.3.1 Construcción del modelo**

Conocido como el software (PCFLOH) modela los distintos elementos del sistema eléctrico (Capítulo 5, Punto 5.4.1), se procede a recopilar toda la información necesaria para el desarrollo de un modelo completo y acorde a los requisitos del estudio. En el Anexo N°1, Punto A1.2, se detallan las especificaciones técnicas de conductores y transformadores, consideradas en la simulación. En el Anexo N°2, Punto A2.1, se detalla la información de los consumos considerados en cada barra. Como se dijo anteriormente, todos los valores son ingresados en relación a una base común, en este caso 100 MVA. Las corrientes armónicas son ingresadas en % de la componente fundamental. Considerando el largo de los conductores, el efecto capacitivo es despreciable.

Los consumos asociados a cada barra del sistema fueron aproximados mediante mediciones en terreno; éstas fueron realizadas con un instrumento de medición especializado (Ver 5.4.2). Con estas mediciones, fue posible realizar agrupaciones de carga, en caso de tener varios consumos no-lineales conectados a una misma barra y considerar de una forma más precisa el efecto de cancelación o reducción de algunas armónicas. Efecto que se aprecia comúnmente en la práctica, dado los distintos ángulos de fase de las armónicas generadas por los diferentes equipos. Es común que este efecto sea obviado en las simulaciones, donde lo que se hace es considerar el mismo ángulo de desfase para las armónicas generadas por todos los consumos no-lineales,

lográndose así como resultado una red sobrecargada de armónicas. También gracias a estas mediciones es posible incluir en el análisis las armónicas no características, que en caso de considerar sólo los modelos teóricos e idealizados de las fuentes contaminantes, incluidas en la biblioteca del software utilizado, o los recomendados por la literatura, no se estarían tomando en cuenta.

El área de 60Hz de este sistema se considera tal como se dijo anteriormente (Punto 5.2), representándola mediante una máquina síncrona correspondiente al motor del convertidor de frecuencia y considerando en su simulación el consumo total promedio de este sistema, junto con el espectro de inyección de corrientes armónicas medido directamente en el alimentador del convertidor.

La barra infinita es representada en el modelo mediante la impedancia de cortocircuito a frecuencia fundamental, en la barra de 110 kV (lado de alta de transformador principal), obtenida mediante el programa Digsilent Power Factory v13.1 (con la base del CDEC-SING, cortesía de EMSERVI). Estos valores se pueden ver en el Anexo N°1, Punto A1.1.

Si bien las condiciones de la simulación no son las peores, éstas representan un caso desfavorable, tomando en cuenta que se realizaron las siguientes consideraciones en el desarrollo del modelo:

- El efecto Skin no es considerado. Esto determina una condición desfavorable dado el efecto amortiguador que tiene a frecuencias de resonancia. (ver Capítulo 2, Punto 2.4.2).
- Se considera los mayores valores registrados (medidos), para cada armónica incluida en los modelos de los consumos no-lineales.
- Se supone inyección de armónicas con igual ángulo de fase, para representar los consumos no-lineales en los casos que no fue posible realizar mediciones, o que no se tenía mayor información.

### **6.3.2 Comparación entre el valor teórico y las mediciones.**

En esta parte se presentan los valores teóricos o esperados de distorsión total de corrientes ( $THD_I$ ) y tensiones ( $THD_V$ ), en las barras principales del sistema eléctrico Subestación 1, obtenidos mediante simulaciones con PCFLOH. En las siguientes tablas se comparan los índices obtenidos de las mediciones en terreno (mostrados en punto 6.2.2) y los valores esperados que entrega la simulación computacional.

<b>Sistema Subestación 1</b>				
<b>Alimentador</b>	<b>Entre barras N°</b>	<b>Tensión</b>	<b>THDI Medido (%)</b>	<b>THDI Teórico (%)</b>
<b>Sala 2A</b>				
General	4-27	13,2 kV	29,18	28,6
<b>LOCSA</b>				
General	4-5	13,2 kV	1,29	1,9
<b>Sala 5 (Pta. Acido N°2)</b>				
General	4-6	13,2 kV	2,71	3,8
	6-7	6 kV	2,75	2,8
	6-8	380 V	#	12,4
<b>Convertidor de frecuencia</b>				
General	4-11	13,2 kV	5,96	6,1
<b>Sala 4</b>				
General	4-25	13,2 kV	4,23	3,9
<b>Sala 2</b>				
General	4-12	13,2 kV	2,82	8,2
alimentadores Ingersol Rand	12-18	400 V	12,1	14
refino y moldeo	19-20	400 V	2,91	3,1
<b>Molibdeno</b>				
General	4-22	13,2 kV	6,48	5,9

**Tabla 6.6:** Comparación de índices teóricos obtenidos mediante simulación, con los valores de distorsión armónica total de corriente máxima, medidas en alimentadores principales de sistema Subestación 1. Valores en % de la componente fundamental.

<b>N° de barra</b>	<b>Tensión</b>	<b>THDv Medido (%)</b>	<b>THDv Teórico (%)</b>
1	110 kV	2,08	1,28
4	13,2 kV	3	2,16
5	13,2 kV	2,9	2,16
6	13,2 kV	2,69	2,19
12	13,2 kV	2,92	2,16
7	6 kV	2,95	2,62
8	380 V	#	4,22
18	400 V	4,51	5,31
20	400 V	2,28	2,01
23	400 V	#	2,47
28	400 V	2,68	3,7
35	400 V	#	3,9

**Tabla 6.7:** Comparación de índices teóricos obtenidos mediante simulación, con los valores de distorsión armónica total de tensión máximas, medidas en alimentadores principales de sistema Subestación 1. Valores en % de la componente fundamental.

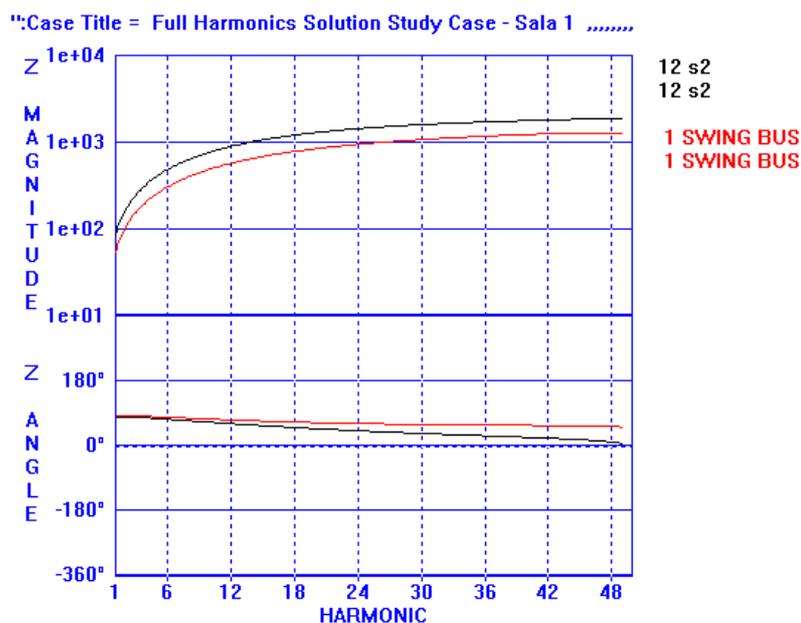
Una operación normal y estable del sistema involucra fluctuaciones de carga, lo cual se traduce en variaciones de distorsión. Esta es una de las razones por la cual los valores que entrega la simulación computacional no coinciden en forma exacta con las mediciones en terreno, consecuencia de la aleatoriedad del fenómeno de perturbaciones.

Una diferencia importante de justificar en este caso, es el  $THD_V$  en el PCC, donde se observa que en la práctica el índice de distorsión es bastante mayor, pero si se considera que este valor corresponde al máximo medido y que el promedio de la distorsión medida en este punto es de 1.5 %, se tiene que es bastante mas representativo

### 6.3.3 Respuesta en frecuencia (Condición actual).

Tal como se menciona en el Capítulo 5, Punto 5.2, este sistema no debiera presentar condiciones de resonancia armónicas, debido principalmente a la ausencia de filtros de armónicas, bancos de condensadores, conductores de largo considerable u otra forma de compensación de potencia reactiva. Por lo tanto si se observa un gráfico de impedancia vs frecuencia, en cualquier barra del sistema debiera presenciarse una respuesta aproximadamente lineal inductiva (creciente), tal como lo indica la literatura. [16][23]

Esto se confirma con la Figura 6.2 siguiente, donde se puede ver la respuesta en frecuencia de la impedancia en dos barras del sistema, comportamiento que se repite en todas las demás barras. (Ver Capítulo 2, punto 2.3.1.3)



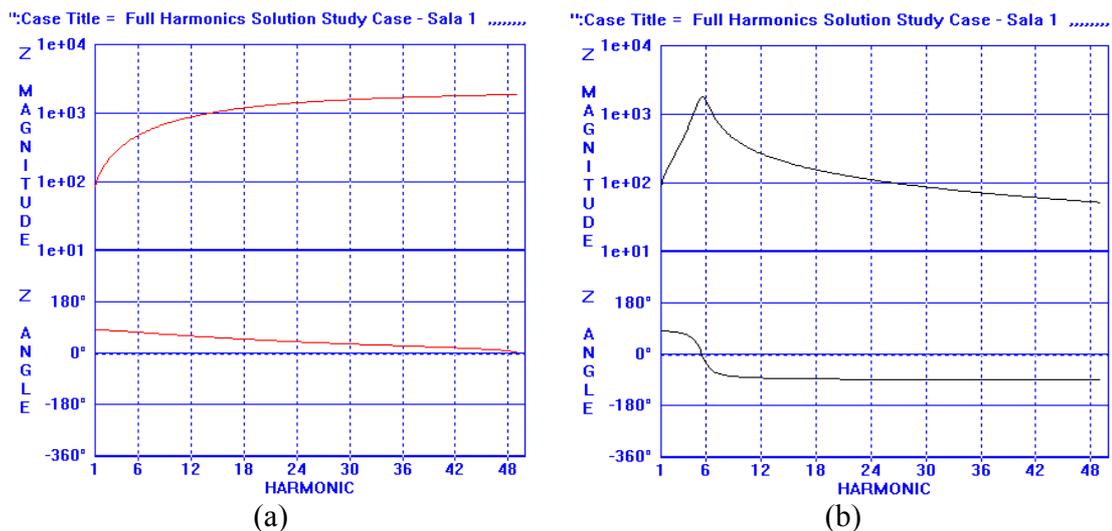
**Figura 6.2:** Comportamiento frecuencial de las impedancias de barra. Considerando configuración actual del sistema

### 6.3.4 Corrección del factor de potencia.

Tal como se menciona en el Capítulo 5, Parte 5.2, y observando las Tablas A2.1 y A2.2, del Anexo N°2, se confirma que un problema operacional importante que presenta actualmente este sistema eléctrico Subestación 1, es que tiene bajo factor de potencia en su barra principal. Considerando que éste es de 0.93 inductivo, y que por norma debiera ser de 0.98 inductivo (en barra de 110kV). [9]

La solución ampliamente utilizada para este problema, ha sido la instalación de bancos de condensadores para la compensación de potencia reactiva. Desafortunadamente estos bancos interactúan con el sistema eléctrico formando circuitos R-L-C que producen resonancias, siendo las frecuencias naturales del sistema una función de las componentes inductivas y capacitivas de la red (ver Capítulo 2, Punto 2.3.1). Por eso que en estos casos existe una especie de tradeoff en la planificación de la mejor o más conveniente forma de compensación de reactivos, con tal de no provocar un aumento excesivo de la distorsión armónica en la red. Si se considera la opción de usar un solo gran banco de condensadores instalado en la barra principal, es posible que resulte mas económico, se incremente el factor de potencia, y se minimice el número de frecuencias de resonancia del sistema. Pero en caso de coincidir la frecuencia de resonancia con alguna armónica característica del sistema, se pueden alcanzar niveles de distorsión extremadamente altos, considerando la dimensión del banco y la baja resistencia entre el banco y la impedancia del sistema, para provocar amortiguamiento. En cambio si se considera muchos bancos de condensadores distribuidos en distintos puntos del sistema, se va a tener muchas posibles frecuencias de resonancia que pueden ir cambiando según la operación del sistema, haciendo más difícil su análisis, en caso de que llegara a existir un problema de armónicos. En este caso la resistencia entre los bancos de condensadores y la inductancia del sistema serían mayores significando que una menor amplificación de la distorsión armónica ocurriría, comparado con el caso de usar un solo gran banco de condensadores en la barra principal.

Se simula el efecto que tendría sobre el sistema en estudio, el incorporar un solo gran banco de condensadores que supliera el total de los reactivos necesarios para llevar el factor de potencia a valores que estén dentro de lo aceptado por la norma. En la siguiente Figura 6.3, se observa como cambia la respuesta en frecuencia del sistema al instalar un banco de condensadores de 4 MVAR, en la barra principal de la Subestación 1 (barra N°4, de 13.2kV), suficiente para llevar el factor de potencia a un valor cercano a la unidad (valor sobre la norma). Gráfico de la derecha corresponde al caso con compensación.



**Figura 6.3:** Respuesta en frecuencia de la impedancia en barra principal (13.2 kV). Comparación entre caso con y sin compensación de reactivos. (a) Caso sin compensación. (b) Caso con compensación.

De la figura anterior (gráfico de la derecha), se observa una frecuencia de resonancia a los 280 Hz, ésta se encuentra muy cerca de la 5<sup>ta</sup> armónica. Se puede ver un aumento en el valor de la impedancia, efecto característico de la resonancia paralela (peak). Cabe destacar que la curva de “abajo”, donde se presenta la variación del ángulo de la impedancia, muestra como inicialmente la impedancia tiene un comportamiento inductivo (ángulo  $>0^\circ$ , respuesta creciente con la frecuencia), a la frecuencia de resonancia adopta una naturaleza resistiva (ángulo  $0^\circ$ ), y para valores mayores al de la frecuencia de resonancia es capacitiva (ángulo  $<0^\circ$ , respuesta decreciente con la frecuencia).

En la siguiente tabla se muestra como cambia la distorsión total de tensión en las barras principales del sistema, donde se aprecia un aumento considerable en el caso que incluye la incorporación del banco de condensadores. El detalle de los valores de distorsión obtenidos de esta simulación, para todas las barras del sistema y su comparación con el caso previo a la compensación, se puede ver en el Anexo N°6, Tabla A6.1.1.

Nº de barra	Nivel de tensión	THDv sin compensación (%)	THDv con compensación (%)
1	110 kV	1,28	3,49
4	13,2 kV	2,16	5,48

**Tabla 6.8:** Distorsión total de tensión. Comparación de casos con y sin banco de condensadores.

En la siguiente figura se muestra la forma de onda de tensión y corriente y la magnitud de la armónica predominante en ambos casos, en la barra N°4, donde se ubicó el banco de condensadores. Se confirma la presencia de una 5<sup>ta</sup> armónica, de valores muy altos debido a la resonancia paralelo que se genera por la interacción del banco con el sistema.

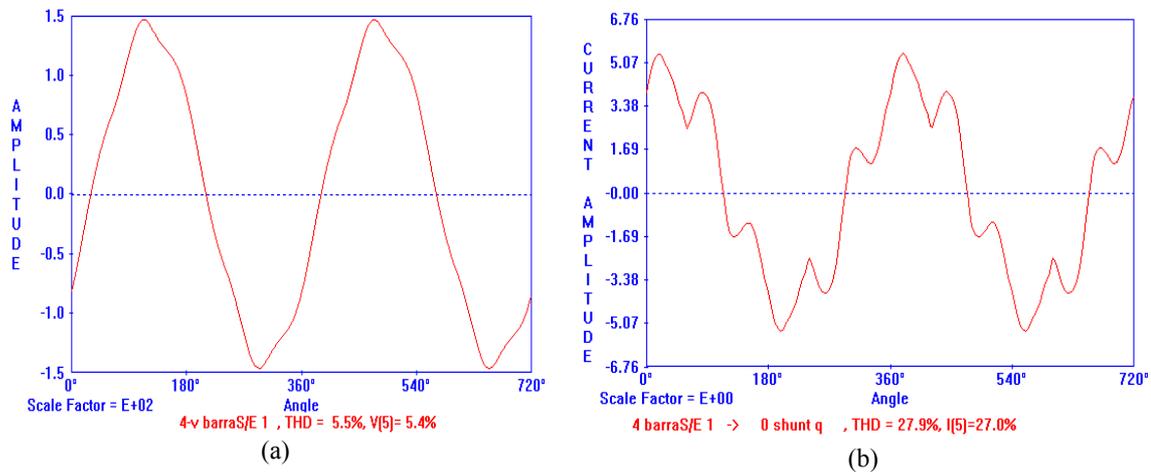


Figura 6.4: Gráficos caso con compensación. (a) Tensión. (b) Corriente.

### 6.3.4.1 Comentarios

Tomando en cuenta los resultados obtenidos para el caso de compensación mostrado en la parte anterior, se confirma que el uso de un solo banco de condensadores, si bien puede ser una opción más económica, puede presentar ciertos problemas importantes de considerar. Una solución al caso anterior, puede ser el de incluir reactores (inductancias) conectados en serie con el banco de condensadores y sintonizarlo como un banco anti-resonante (se describe con mayor detalle la configuración de estos bancos en el Punto 6.5.4). Esta configuración está orientada principalmente a evitar que se produzcan resonancias a ciertas armónicas características del sistema y no a filtrar armónicas por lo que es usada en sistemas con baja distorsión. La solución anterior permite incrementar el factor de potencia a niveles sobre la norma, con lo que se puede evitar una posible multa y además evitar los efectos producidos por la resonancia paralelo. Hay que considerar que esta opción tiene un costo mucho mayor, dado por los reactores y que además no se está eliminando los efectos que tiene sobre el sistema y sus equipos, el operar con bajo factor de potencia, como son el sobrecalentamiento, el aumento de las pérdidas, funcionamiento inadecuado, etc. Para lograr que el sistema realmente trabaje de manera más eficiente, se debe compensar reactivos de una manera mas focalizada.

Una consideración muy importante acerca de este sistema es que el consumo correspondiente a la Planta de Ácido N°2 (Sala 5), tiene un factor de potencia promedio de 0,78, lo que es muy bajo, sobretodo considerando que esta planta corresponde aproximadamente al 30% del consumo total

del sistema (Ver Tabla A2.1, Anexo N°2). Esta planta es muy antigua y su funcionamiento es muy ineficiente, por lo que actualmente se está analizando su retiro, considerando además que se está incorporando una nueva planta de ácido al complejo, que debiera entrar en operación a fines de este año. Si se concreta el retiro de esta planta, el factor de potencia de la planta en la barra principal se incrementaría considerablemente incluso alcanzando un valor superior a la norma.

Si se considera una solución mas focalizada, como incluir equipos independientes para cada sala o equipos que presenten un consumo alto de potencia reactiva, se debe tener en cuenta la presencia de armónicas en el sistema. En algunos casos se hace necesario considerar filtros pasivos sintonizados a ciertas frecuencias específicas que pudieran estar provocando problemas de distorsión.

### **6.3.5 Soluciones para la distorsión armónica del sistema Subestación 1.**

Considerando los datos mostrados en el Punto 6.2.2, donde se concluye que existe un problema de inyección excesiva de corrientes armónicas desde la Sala eléctrica 2A, principalmente de 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas y tomando en cuenta que esta situación no se asocia a un problema de resonancia y que se mantiene constante sin importar las variaciones de carga en esta parte de la planta, se considera una buena opción tanto para reducir la distorsión armónica del sistema, como para compensar el consumo de potencia reactiva de los equipos asociados a esta Sala 2A, el uso de filtros pasivos selectivos, sintonizados a las frecuencias de las armónicas de mayor magnitud medida. Se simula el efecto que tendría el incorporar un filtro para la 7<sup>ma</sup> y otro para la 5<sup>ta</sup> armónica en la barra principal de esta sala (barra N°28, 400 V). El cálculo de diseño, y las componentes consideradas en la simulación de estos filtros se detalla en el Anexo N°6, Punto A6.1.2.

Lo primero es confirmar si es que ambos filtros quedaron bien sintonizados, para esto comparamos el gráfico de impedancia vs frecuencia en la barra de conexión, antes y después de la incorporación de los filtros.

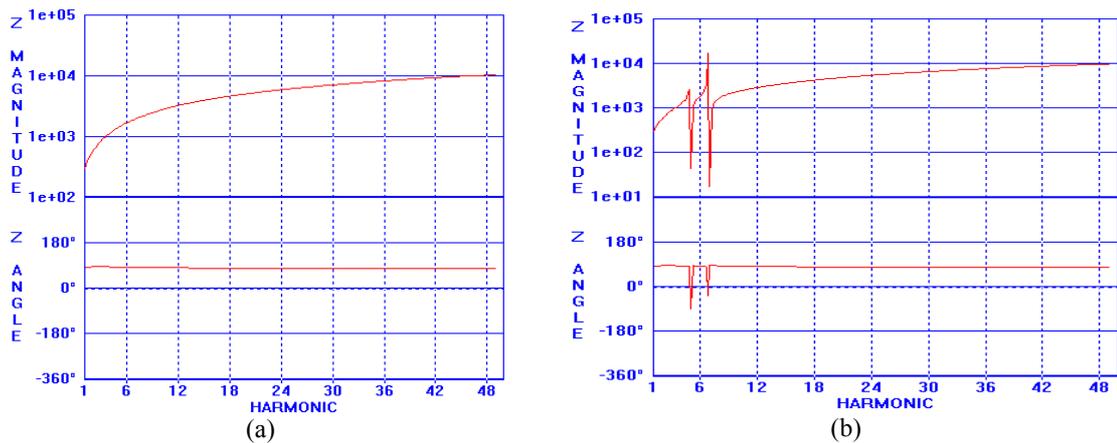


Figura 6.5: Impedancia vs frecuencia en barra N°28. (a) Sin filtros. (b) Con filtros.

Luego en la siguiente figura, se observa la corriente por los filtros, donde se confirma que estos están absorbiendo la 5ta y 7ma armónicas respectivamente.

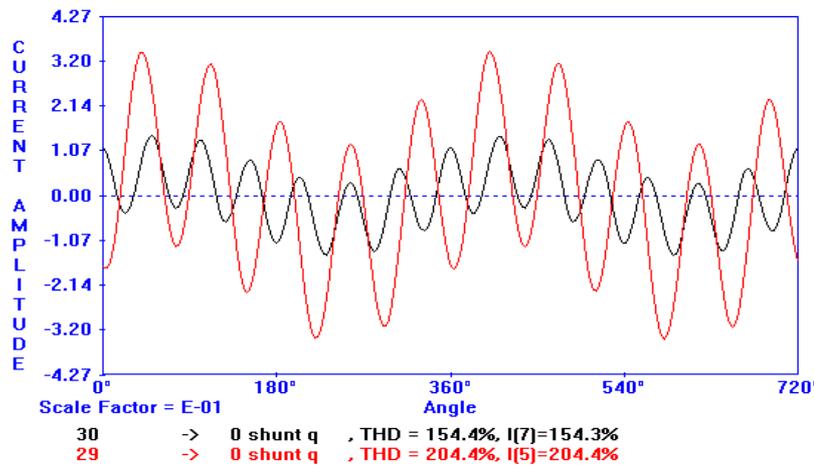


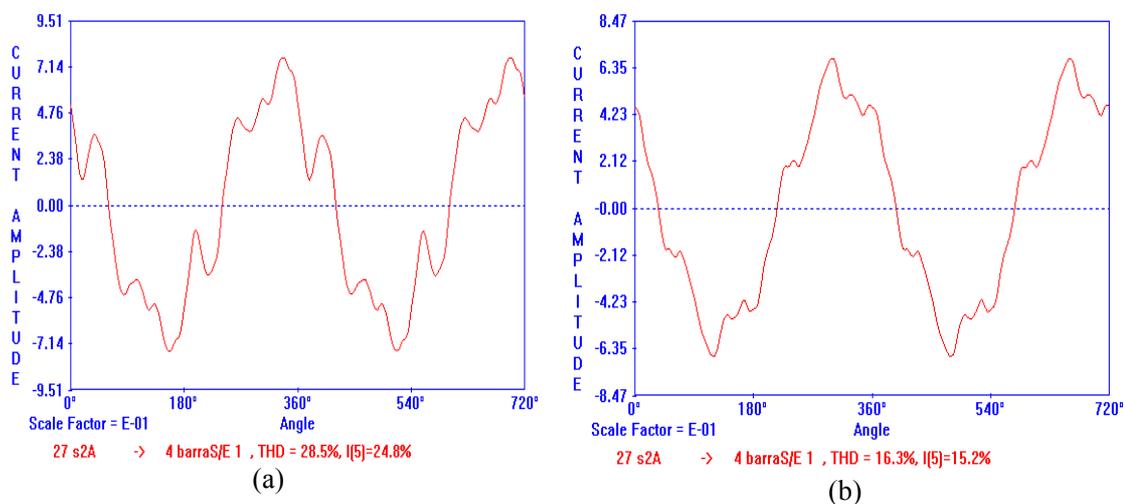
Figura 6.6: Corriente por los filtros.

El efecto que produce sobre el sistema la operación de estos filtros, se observa en la siguiente tabla donde se muestra la distorsión de tensión en las barras del sistema antes y después de la incorporación de los filtros. Se puede ver la reducción de la distorsión de tensión en las barras del sistema.

N° de barra	Tensión	THDv Teórico sin filtro (%)	THDv Teórico con filtro (%)
1	110 kV	1,28	0,85
4	13,2 kV	2,16	1,36
5	13,2 kV	2,16	1,35
6	13,2 kV	2,19	1,39
12	13,2 kV	2,16	1,36
7	6 kV	2,62	1,92
8	380 V	4,22	3,75
18	400 V	5,31	4,62
20	400 V	2,01	1,41
23	400 V	2,47	1,67
28	400 V	3,7	1,29
35	400 V	3,9	3,47

**Tabla 6.9:** Distorsión total de tensión teórica. Comparación de casos con y sin filtro.

En la siguiente figura se muestra como se reduce la inyección de corrientes armónicas desde la Sala 2A, hacia la barra principal del sistema (barra N°4, 13.2 kV). Se observa que inicialmente el THD<sub>I</sub> es de 28,5 % (con I(5) = 24,8 %) y que este disminuye a 16,3 % (con I(5) = 15,2%).



**Figura 6.7:** Comparación de corrientes en alimentador Sala 2A. (a) Caso sin filtro. (b) Caso con filtro.

El ejemplo anterior ilustra de manera clara el efecto que tiene el uso de un filtro de este tipo. Si se quisiera reducir aún más la distorsión se podría considerar un filtro de mayor capacidad para la 5ta armónica. Cabe destacar que la solución presentada anteriormente, considera un diseño aproximado y para ser aplicado en la práctica requiere de un diseño de ingeniería más detallado.

donde se debe considerar la sobretensión que se produce en el banco, entre otros aspectos que se comentan mas adelante en el Punto 6.6.

Tomando en cuenta lo mencionado en el Punto 6.2.3 para la Sala 2, se recomienda incorporar un filtro relacionado directamente al funcionamiento del puente rectificador, asociado a la operación de las grúas. Esto quiere decir que debiera filtrar al menos la 5ta y 7ma armónicas y debiera ser instalado en la misma barra del rectificador. Esta solución debiera ser suficiente para incrementar el factor de potencia y a la vez disminuir el índice de distorsión.

### **6.3.6 Análisis de sensibilidad**

Se analiza la variación de la distorsión ante diferentes configuraciones del sistema. Es conveniente especificar si alguna situación, como el retiro de líneas u otros elementos del sistema, es o no recomendable en lo referente a perturbaciones armónicas. Para esto se simula las diferentes situaciones y se comparan los resultados de distorsión obtenidos con los del caso base o condición actual del sistema. Se presentan los dos casos siguientes.

- **Caso 1**

La barra principal de este sistema presenta dos transformadores de bajada (de 110 kV a 13,2kV). Aunque no corresponde a la operación normal del sistema, es común que funcione con uno solo de estos transformadores, cuando se deben realizar mantenciones, o algunas pruebas. Simulando esta configuración del sistema, se obtiene que la distorsión en el PCC se mantiene invariante, no así en las demás barras del sistema, donde la distorsión de tensión se incrementa. En el Punto A6.1.3 (Anexo N°6), se detallan los valores de distorsión obtenidos de la simulación. Si bien no se superan los límites especificados por la norma, considerando que la distorsión en la barra principal de 13,2 kV se incrementa un 40 %, la operación anterior no se recomienda por tiempos muy prolongados.

- **Caso 2**

Considerando lo planteado en el Punto 6.3.4.1, acerca de la planta de ácido N°2 (Sala 5), se analiza el efecto que tiene sobre el sistema sacar de operación esta planta. Simulando esta situación, se observa que la distorsión en barras del sistema se ve ampliamente reducida, alcanzando valores de distorsión hasta un 50 % menos que los actuales. En el Anexo 6, punto A6.1.3, se detallan los índices de  $THD_V$  obtenidos en barras del sistema y se comparan con los valores teóricos iniciales. Considerando lo anterior referente a la distorsión armónica del sistema, se confirma la conveniencia de retirar la planta de ácido N°2.

## 6.4 Situación actual del sistema Subestación 1A. Mediciones y Norma.

Lo primero a evaluar, es la distorsión de tensión e inyección de corrientes armónicas en el punto de común acoplamiento. En la siguiente tabla se muestran los valores **máximos** medidos en el PCC, para la distorsión armónica total de tensión y corrientes (ver 3.2.2), y su comparación con los límites establecidos por la Norma Chilena. Los valores se presentan en % de la componente de frecuencia fundamental.

	THD <sub>v</sub> (%)	Valor norma (%)	THD <sub>i</sub> %	Valor norma (%)
<b>Subestación 1A</b>	2,08	8	1,97	2,5

**Tabla 6.10:** Distorsión total de tensión y corriente máximas, medidas en el PCC (barra de 110 kV Subestación 1A). Valores en % de la componente fundamental

La tabla 6.11, muestra los valores máximos de distorsión individuales medidos en el PCC. Sólo se incluyen en esta tabla, las armónicas de mayor importancia, o magnitud medida.

Orden	I [%]	Norma I[%]	U [%]	Norma U[%]
2	0,10	0,5	0,03	2
3	0,27	2	0,28	5
4	0,05	0,5	0,03	1
5	0,84	2	1,38	6
7	0,28	2	0,62	5
9	0,08	2	0,17	1,5
11	<b>1,1</b>	1	0,20	3,5
13	0,68	1	0,78	3
15	0,03	1	0,05	0,3
17	0,27	0,75	0,17	2
19	0,15	0,75	0,19	1,5
23	0,17	0,3	0,29	1,5
25	0,18	0,3	0,14	1,5
27	0,02	0,3	0,02	1,4
29	0,05	0,3	0,03	1,3
31	0,07	0,3	0,05	1,2
35	0,08	0,15	0,09	1,1

**Tabla 6.11:** Distorsión individual de tensión y corrientes máximas, medidas en el PCC (110 kV Subestación 1A). Valores en % de la componente fundamental. Comparación con valores propuestos por norma chilena.

De las tablas anteriores se observa que el único límite sobrepasado se encuentra en la armónica individual de corriente, de orden 11, la que supera el límite en el 35 % de los valores registrados en terreno, aunque siempre con valores muy cercanos al límite (promedio 0.95). En este caso también se consideró un registro de dos días consecutivos.

#### **6.4.1 Comentarios**

Al comparar los índices de distorsión total de corriente y tensión en el PCC, se observa que este cumple con los requerimientos, al presentarse el total de los valores medidos bajo los límites establecidos por la norma. Al comparar este sistema con el de la Subestación 1, se tiene que éste presenta una mayor distorsión de corriente. Efecto causado especialmente por la presencia de una 11<sup>ava</sup> armónica de corriente que presenta valores sobre la norma. Efecto que se debe principalmente a la operación del variador de frecuencia de doce pulsos conectado a la barra principal de 13,2 kV en la Sala 7 (Pta. de ácido N°3). Esto se desarrolla con mayor detalle en el siguiente Punto 6.4.2.

La energía suministrada por la compañía de distribución presenta un nivel de tensión (110 kV), que se asocia a los mismos niveles de distorsión mostrados en el Punto 6.2, al corresponder al punto de común acoplamiento, o misma barra de conexión, para ambos sistemas.

Se confirma al igual que en el Punto 6.2.1, la presencia de armónicas no-características. También se corrobora la presencia de armónicas Triplens, a pesar de haber realizado la medición en el lado de 110 kV (primario en delta), debido al desbalance inevitable de la red que en este caso es del orden de 1,2 % promedio, para la corriente entre fases.

#### **6.4.2 Distorsión armónica medida en barras del sistema Subestación 1A.**

En las dos tablas siguientes, se muestran los índices de distorsión total de tensión y corrientes máximos medidos en las barras principales del sistema, presentadas en el Unilineal del Punto 5.3 (figura 5.2), y su comparación con los respectivos límites establecidos por la norma chilena.

Barra	Sistema Subestación 1A			Norma (%)
	N° barra	Tensión	THDv (%)	
<b>Sala 6 (Reactor)</b>				8
Barra Turbo Sopladores	5	13,2 kV	3,34	
Barra Gral Reactor	6	13,2 kV	3,33	
Switchgear compresores	14	4,16 kV	2,98	
Switchgear manejo secado y concentrado	16	400 V	2,07	
Switchgear manejo de gases	18	400 V	3,31	
<b>Sala 7 (Pta. Acido N°3)</b>				
General	7	13,2 kV	4,04	
Secundario TR2	43	4,16 V	3	
Secundario TR3	46	400 V	1,99	
Secundario TR4	48	400 V	1,65	
<b>Sala 8 (Pta. Tratamiento escoria)</b>				
General	9	13,2 kV	3,51	
Molinos	20	3,3 kV	2,45	
Flotación Escoria	22	400 V	2,99	
<b>LOCSA 2</b>				
General	10	13,2 kV	3,95	

**Tabla 6.12:** Distorsión armónica total de tensión **máxima**, medida en barras principales de sistema Subestación 1. Valores en % de la componente fundamental. Comparación con índices propuestos por norma chilena

Barra	Sistema Subestación 1A			Norma (%)
	Entre barras N°	Tensión	THDI (%)	
<b>Sala 6 (Reactor)</b>				
Alimentador Turbo Sopladores	4-5	13,2 kV	2,26	12
Alimentador Gral. Reactor	4-6	13,2 kV	2,93	12
Switchgear compresores	6-14	4,16 kV	1,69	8
Switchgear manejo secado y concentrado	6-16	400 V	1,96	8
Switchgear manejo de gases	6-18	400 V	<b>16,34</b>	12
<b>Sala 7 (Pta. Acido N°3)</b>				
General	5-7	13,2 kV	5,71	12
Secundario TR2	7- 43	4,16 V	2,56	12
Secundario TR3	7-46	400 V	3,16	8
Secundario TR4	7-48	400 V	5,52	8
<b>Sala 8 (Pta. Tratamiento escoria)</b>				
General	4-9	13,2 kV	3,66	12
Molinos	9-20	3,3 kV	4,06	12
Flotación Escoria	9-22	400 V	<b>13,67</b>	12
<b>LOCSA 2</b>				
General	4-10	13,2 kV	1,53	12

**Tabla 6.13:** Distorsión armónica total de corriente **máxima**, medidas en alimentadores principales de sistema Subestación 1A. Valores en % de la componente fundamental. Comparación con índices propuestos por norma chilena.

En la siguiente tabla se muestran los alimentadores donde se encontró la presencia de armónicas individuales con valores superiores a los indicados por la norma; sólo se presentan las armónicas principales o de mayor magnitud medida, las cuales coinciden con las primeras armónicas características. El detalle de las armónicas individuales obtenidas para cada una de las barras se pueden ver en el Anexo N°3, Punto A.3.2.

		Orden Armónica característica de corriente							
		5		7		11		13	
Alimentador	Entre barras N°	Medido (%)	Norma (%)	Medido (%)	Norma (%)	Medido (%)	Norma (%)	Medido (%)	Norma (%)
<b>Sala 6</b>	6-18	<b>12,70</b>	10,00	8,84	10,00	1,81	4,50	1,67	4,50
Switchgear manejo de gases									
<b>Sala 7</b>	5-7	2,58	10,00	1,32	10,00	<b>4,20</b>	4,50	2,36	4,50
General, 13.2 kV									
<b>Sala 8</b>	9-22	<b>11,14</b>	10,00	6,87	10,00	1,69	4,50	1,58	4,50
Flotación, 400V									

**Tabla 6.14:** Distorsión armónica individual de corriente **máxima**, medidas en alimentadores principales de sistema Subestación 1. Valores en % de la componente fundamental. Comparación con índices propuestos por norma chilena.

En la tabla anterior, solo aparecen medidas de distorsión individual de corrientes armónicas, dado que las tensiones armónicas individuales no presentan problemas.

La Sala 6 además de los índices mostrados en las tablas anteriores, presenta algunas características importantes de tener en cuenta en el análisis posterior, como son:

- En barra N°16, del Switchgear Manejo de Secado, se tiene una corriente de neutro que alcanza un máximo medido de 14 A, mayoritariamente de componente fundamental.
- En barra N°18, del Switchgear Manejo de Gases, se tiene una corriente de neutro que alcanza un máximo medido de 7 A, mayoritariamente de componente fundamental.

### 6.4.3 Comentarios.

Teniendo en cuenta que los datos mostrados en las tablas anteriores (Punto 6.4.2), corresponden a valores máximos medidos, es necesario en los casos que se registraron índices de distorsión que superan los establecidos por la norma, analizar si ese valor corresponde a una condición de operación prolongada en el tiempo, lo que se asocia con una condición de riesgo.

El alimentador al Switchgear Manejo de Gases, barra N°18, Sala 6, presenta el 98 % de los valores de  $THD_I$  sobre el límite de la norma. De la tabla 6.14, se observa que esta distorsión es provocada principalmente por un alto índice de corrientes armónicas de orden 5 y 7. Esta situación se debe principalmente a la operación de un variador de frecuencia incorporado recientemente para el secado, el que presenta un consumo equivalente al 24 % del consumo total de esta barra (180 kW aprox). Este equipo presenta un consumo con un  $THD_I$  de 33 %, con 29 % de quinta armónica y 9.49 % de séptima (Valores en % de componente fundamental). Es importante notar que este variador además presenta un índice alto de generación de 3<sup>era</sup> armónica (9.23 %, equivalente a las de orden 7), lo que en teoría, por ser de 6 pulsos no debiera ocurrir. Esto se justifica por el gran desbalance que presentan sus corrientes entre fases, que alcanza un máximo medido de 8.5 %. Este funcionamiento defectuoso se ve reflejado en la barra principal N°18 (400 V), donde se registró un desbalance máximo de 6 %, lo que justifica las altas corrientes de frecuencia fundamental por el conductor de neutro. Mayor detalle de las características del consumo de este equipo, obtenido mediante mediciones directamente en su barra de alimentación, como su espectro de inyección de corrientes, se puede ver en el Anexo N°7, Punto A7.1. Se agrega también en este mismo Anexo un gráfico donde se observa claramente la forma de onda de corriente, a la entrada del variador.

Como se menciona en el Capítulo 2, Punto 2.6.1, es común encontrar corrientes en el neutro, incluso de valores altos, cuando se tiene transformadores Dyn1 y altos índices de terceras armónicas. En el caso de la barra N°16, estas altas corrientes por el neutro (hasta 14 amperes medidos), no se pueden asociar a altos índices de armónicas Triplens, ya que las mediciones indican que esta corriente está compuesta en un 61 % por corriente de frecuencia fundamental (50 Hz), por lo que se asocia al desbalance de corriente entre fases de 3,7% que presenta este alimentador.

La sala 7 presenta un alto índice de inyección de corrientes armónicas de orden 11, lo que es consecuencia directa de la operación del variador de frecuencia de 12 pulsos conectado a la barra principal de esta sala (13,2 kV). Mayor detalle acerca del consumo de este variador se puede ver en el Anexo N°7, Punto A8.1.

En el alimentador Flotación de Escoria, barra N°22, Sala 8, el 81 % de sus registros de  $THD_I$ , superan el límite de la norma. Esto se debe fundamentalmente a los variadores asociados al funcionamiento de las bombas GEHO. Situación que se confirma en la Tabla 6.14, donde se puede ver un índice alto de 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas de corriente, típico de los variadores de 6 pulsos. Es importante mencionar que los valores presentados en las tablas anteriores (punto 6.4.2), son

considerando el funcionamiento de las dos bombas GEHO, simultáneamente. Aunque al retirar una bomba esta situación no presenta variaciones importantes, el  $THD_I$  se reduce a 12,6 %. El detalle de los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con una sola bomba se pueden ver en el Anexo N°3, tabla A3.25. En el Anexo N°7, Punto A7.2, se presenta información medida directamente del alimentador del variador.

Posteriormente, en el Punto 6.5.3, se confirma si es que alguno de los índices de distorsión comentados anteriormente se encuentra asociado a alguna condición de resonancia de la red.

## **6.5 Simulaciones del sistema eléctrico Subestación 1A.**

### **6.5.1 Construcción del modelo**

Conocido como el software (PCFLOH), modela los distintos elementos del sistema eléctrico (Capítulo 5, Punto 5.4.1), se procede a recopilar toda la información necesaria para el desarrollo de un modelo completo y acorde a los requisitos del estudio. En el Anexo N°1, Punto A1.3, se detallan las especificaciones técnicas de conductores y transformadores, consideradas en la simulación. En el Anexo N°2, Punto A2.2, se detalla la información de los consumos considerados en cada barra. Como se dijo anteriormente, todos los valores son ingresados en relación a una base común en este caso 100 MVA. Las corrientes armónicas son ingresadas en % de la componente fundamental. Considerando el largo de los conductores, el efecto capacitivo es despreciable.

Se define la barra infinita, al igual que en el caso anterior, mediante la impedancia de cortocircuito a frecuencia fundamental, medido en la barra del lado de alta tensión (110 kV). Obtenida con el programa Digsilent Power Factory v13.1 (con la base del CDEC-SING, cortesía de EMSERVI). Estos valores se pueden ver en el Anexo N°1, Punto A1.1.

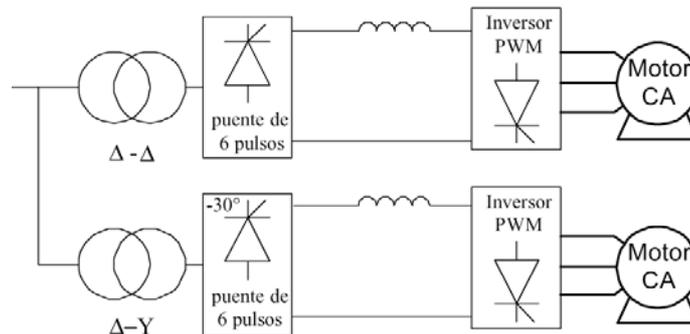
Si bien las condiciones de la simulación no son las peores, éstas representan un caso desfavorable tomando en cuenta que se realizaron las siguientes consideraciones en el desarrollo del modelo:

- El efecto Skin no es considerado. Esto determina una condición desfavorable dado el efecto amortiguador que tiene a frecuencias de resonancia. (ver Capítulo 2, Punto 2.4.2).
- Se considera los mayores valores registrados (medidos), para cada armónica incluida en los modelos de los consumos no-lineales.

La sala 7 presenta un variador de frecuencia de doce pulsos, conectado a la barra mediante un transformador de tres enrollados, conexión Ddy11 (ver, figura A8.1, o Plano A8.2, Anexo N°8).

Esta conexión es muy usada en aplicaciones de mayor potencia (algunos mega watts) y tiene la ventaja de reducir la distorsión armónica mediante un proceso de cancelación en el cual se eliminan o reducen las armónicas de orden 5, 7, 17, 19. Tal como se mencionó en el Capítulo 2, Punto 2.6.1.

La modelación de este equipo se puede realizar de dos maneras. Dado que el programa PCFLOH no permite la modelación directa de un transformador de tres enrollados, una opción es considerar dos transformadores, tal como se muestra en la Figura 6.8, donde cada uno alimenta la mitad de la potencia.



**Figura 6.8:** Sistema de alimentación para variadores de CA. 12 pulsos

La otra opción y la utilizada en este caso, es medir directamente en el primario del transformador de alimentación de este variador, registrar las armónicas individuales de corriente y simular éste como un solo gran consumo no-lineal, incluyendo el espectro de inyección de corrientes medido. Método que se consideró más preciso, dado que se puede incluir en el modelo las armónicas no-características que se generan por la operación “no ideal” del equipo. De las mediciones, se confirma la aparición de armónicas de orden 5 y 7. En el Anexo N°8 se puede ver mayor información acerca de este equipo, como la comparación entre las armónicas medidas y los valores teóricos, forma de onda de corriente y el cálculo teórico de la cancelación de quinta y séptima armónica, dado por el desfase generado por la conexión del transformador.

En la construcción del modelo computacional de este sistema (Subestación 1A), se tuvo especial cuidado con la modelación de los equipos asociados a la Sala 7 (Planta de Acido N°3). Debido a sus características particulares y a su importancia dentro del sistema. Esto se desarrolla con detalle mas adelante en el Punto 6.5.4.

## 6.5.2 Comparación entre el valor teórico y las mediciones.

En esta parte se presentan los valores teóricos o esperados, de distorsión total de corrientes (THD<sub>I</sub>) y tensiones (THD<sub>V</sub>), en las barras principales del sistema eléctrico Subestación 1A, obtenidos mediante simulaciones con PCFLOH. En las siguientes tablas se comparan los índices obtenidos de las mediciones en terreno (mostrados en punto 6.4) y los valores esperados que entrega la simulación computacional.

Barra	Sistema Subestación 1A			
	Entre barras N°	Tensión	THDI Medido (%)	THDI Teórico (%)
<b>Principal Subestación 1A</b>				
General	PCC	110 kV	1,97	2
<b>Sala 6 (Reactor)</b>				
Alimentador Turbo Sopladores	4-5	13,2 kV	2,26	2
Alimentador Gral. Reactor	4-6	13,2 kV	2,93	2,1
Switchgear compresores	6-14	4,16 kV	1,69	6
Switchgear manejo secado y concentrado	6-16	400 V	1,96	2,3
Switchgear manejo de gases	6-18	400 V	16,34	15
<b>Sala 7 (Pta. Acido N°3)</b>				
General	4-7	13,2 kV	5,71	4,9
Secundario TR2	7- 43	4,16 V	2,56	2,5
Secundario TR3	7-46	400 V	3,16	3,7
Secundario TR4	7-48	400 V	5,52	4,6
<b>Sala 8 (Pta. Tratamiento escoria)</b>				
General	4-9	13,2 kV	3,66	5
Molinos	9-20	3,3 kV	4,06	4
Flotación Escoria	9-22	400 V	13,67	13,3
<b>LOCSA 2</b>				
General	4-10	13,2 kV	1,53	1,6

**Tabla 6.15:** Comparación de índices teóricos obtenidos mediante simulación, con los valores de distorsión armónica total de corriente máxima, medidas en alimentadores principales de sistema Subestación 1A. Valores en % de la componente fundamental.

Barra	Sistema Subestación 1A			
	N° barra	Tensión	THDv Medido (%)	THDv Teórico (%)
<b>Principal</b>				
Barra común o PCC	1	110 kV	2,08	1,82
Barra principal subestación 1ª	4	13,2 kV	3,95	3,48
<b>Sala 6 (Reactor)</b>				
Barra Turbo Sopladores	5	13,2 kV	3,34	3,5
Barra Gral. Reactor	6	13,2 kV	3,33	3,48
Switchgear compresores	14	4,16 kV	2,98	3,65
Switchgear manejo secado y concentrado	16	400 V	2,07	3,8
Switchgear manejo de gases	18	400 V	3,31	4,4
<b>Sala 7 (Pta. Acido N°3)</b>				
General	7	13,2 kV	4,04	3,6
Secundario TR2	43	4,16 V	3	3,2
Secundario TR3	46	400 V	1,99	2,8
Secundario TR4	48	400 V	1,65	2,8
<b>Sala 8 (Pta. Tratamiento escoria)</b>				
General	9	13,2 kV	3,51	3,51
Molinos	20	3,3 kV	2,45	4,31
Flotación Escoria	22	400 V	2,99	4,05
<b>LOCSA 2</b>				
General	10	13,2 kV	3,95	3,50

**Tabla 6.16:** Comparación de índices teóricos obtenidos mediante simulación, con los valores de distorsión armónica total de tensión máximas, medidas en alimentadores principales de sistema Subestación 1A. Valores en % de la componente fundamental.

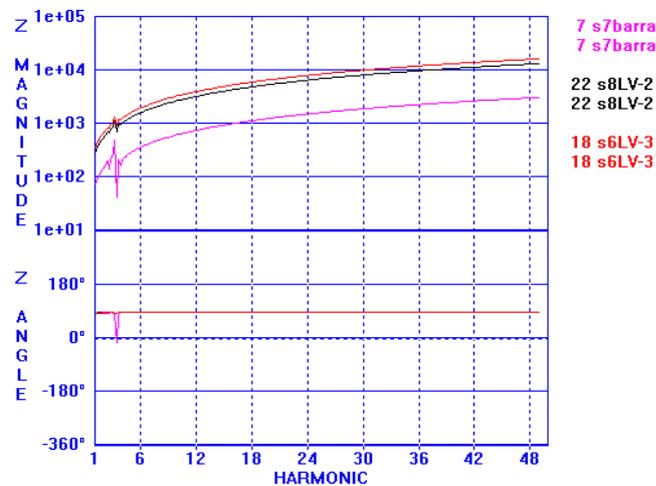
Como se menciona anteriormente, una de las razones por la cual los valores teóricos obtenidos mediante la simulación computacional, no coinciden en forma exacta con las mediciones en terreno, es consecuencia de la aleatoriedad del fenómeno de perturbaciones. En algunos casos se obtiene distorsiones teóricas superiores a las medidas debido a las consideraciones de “peor caso” asumidas en la construcción del modelo.

Es importante tener en cuenta que el modelo desarrollado de este sistema corresponde a un equivalente monofásico, el que considera entre otros, un balance ideal entre fases (Ver Punto 5.4), lo que se comprobó en el Punto 6.4.3, que no se cumple en la Sala 6 (Reactor). Considerando que el desbalance solo se presenta de manera considerable en las barras de baja tensión (400 V) y no se refleja en otras barras del sistema, además de las N°16 y 18, se considera este modelo para los análisis posteriores, ya que si bien no asegura una representación precisa del sistema, permite aclarar algunos aspectos operacionales importantes.

### 6.5.3 Respuesta en frecuencia (Condición actual)

Se simula el sistema y se analiza su comportamiento en frecuencia de las impedancias de barra, principalmente en las barras mostradas anteriormente, donde se presentaron problemas de distorsión (punto 6.4.2), con tal de discriminar si estas distorsiones están asociadas a una condición de resonancia, o si efectivamente se deben a las razones comentadas anteriormente en el Punto 6.4.3.

En la siguiente figura se muestra el gráfico de impedancia vs frecuencia, de las barras 7, 18 y 22, que corresponden a las que presentaron altos índices de armónicas.



**Figura 6.9:** Respuesta en frecuencia de las impedancias de barra. Barras 7, 18 y 22.

Para las barras 18 y 22 (roja y negra respectivamente), se observa que no existe problemas de resonancia de ningún tipo. Menos si se considera que estas barras presentaron altos índices de inyección de 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas. Esto confirma las razones planteadas anteriormente en el punto 6.3.3 para cada uno de los casos.

Considerando que la barra 7 presenta principalmente problemas con la 11<sup>ava</sup> armónica, queda claro mediante la figura anterior que esta situación no se encuentra asociada a una condición de resonancia, sino que se debe a la operación del variador de frecuencia de doce pulsos tal como se menciona en el Punto 6.4.3.

#### 6.5.4 Sala eléctrica N°7 (Planta de Acido N°3)

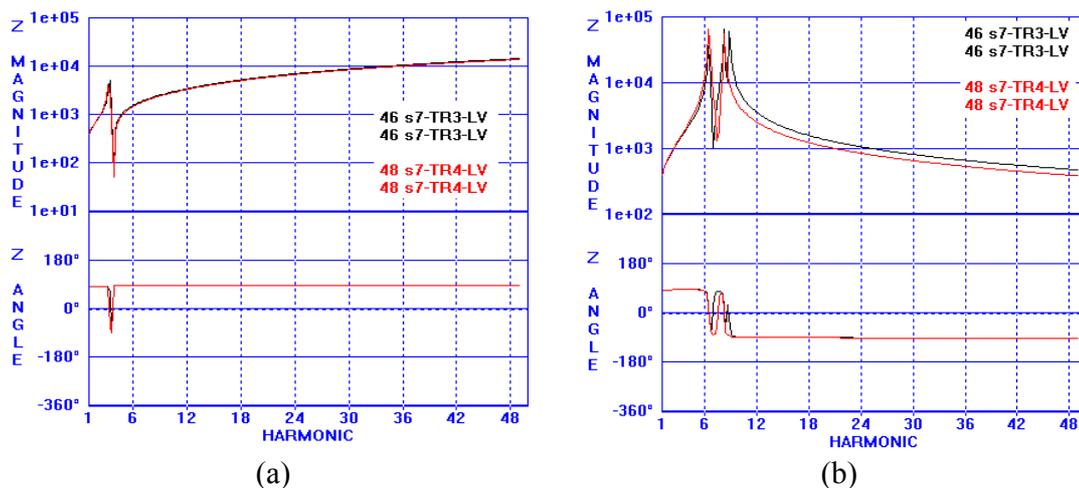
Se consideró importante desarrollar un análisis más detallado de esta planta, por ser un sistema más complejo, dada la presencia de consumos no-lineales de alta potencia, transformadores con características especiales y equipos para el control de armónicas. A esto se incluye el hecho de que actualmente se lleva a cabo la construcción de una nueva planta de ácido en el complejo, la cual basa su diseño en la configuración de la Planta de Ácido N°3. Considerando que esta última fue construida hace unos años por una empresa extranjera (fue comprada con llave en mano), la falta de información, y cierta incertidumbre que aún existe sobre algunos aspectos de su diseño, hicieron que la construcción del modelo computacional de este sistema resultara un poco más difícil que para el resto de la red.

En el plano adjuntado al final del Anexo N°8, se puede ver el diagrama unilineal del sistema eléctrico de esta planta, se observa que éste además de presentar un variador de frecuencia de 12 pulsos con un transformador de tres enrollados, tal como se mencionó anteriormente, presenta una serie de bancos de condensadores, que tienen la particularidad de incluir reactores (inductancia) conectados en serie con el banco. Estos reactores en serie son muy usados principalmente por dos razones:

- Para reducir el efecto transiente de corrientes de Inrush que se producen en la conexión y desconexión de bancos de condensadores o de algunas de sus etapas, en caso de tener más de una.
- Para controlar la frecuencia natural entre el banco de condensadores y la impedancia del sistema, con tal de evitar resonancias.

Los bancos usados en esta sala están configurados como bancos desintonizados, o anti-resonantes, cuya función principal no es la de filtrar armónicos, sino que junto con reducir los efectos transientes de la conexión y desconexión de estos, el principal objetivo de su configuración es la de evitar resonancias en torno a armónicas características del sistema, llevando la frecuencia de resonancia del banco a frecuencias bajas. (Ver Punto 6.6).

La importancia del uso de esta configuración, para compensar reactivos, queda demostrada en la siguiente figura 6.10, donde se grafica la respuesta en frecuencia de la impedancia, vista desde las barras N° 46 y 48 del unilineal (Figura 5.2), equivalente a las barras de 400 V (secundarios TR3 y TR4, Plano A8.1, anexo N°8).



**Figura 6.10:** Gráficos impedancia vs frecuencia. Efecto del uso de bancos anti-resonantes. (a) Con reactores. (b) Sin reactores

En el gráfico (a) se muestra la respuesta en frecuencia de la impedancia, considerando la configuración actual del sistema, la que incluye los reactores y una configuración anti-resonante del banco. En la figura (b), se observa el efecto de no considerar los reactores. En este último caso se observa claramente un efecto resonante, principalmente en torno a la 7<sup>ma</sup> armónica lo que se traduce en una amplificación de la distorsión total de tensión en las barras de la Sala 7 y en el resto del sistema debido a la amplificación exagerada de las corrientes armónicas.

En el Anexo N°8, se desarrolla un análisis detallado de este sistema, se calculan las magnitudes de los reactores (mH), frecuencias de sintonía de los bancos, se muestran las distorsiones de tensión y corrientes obtenidas para los distintos casos analizados, donde se confirma la importancia de esta configuración.

### 6.5.5 Análisis de sensibilidad

Se analiza la variación de la distorsión ante diferentes configuraciones del sistema. Es conveniente especificar si alguna situación, como el retiro de líneas u otros elementos del sistema, es o no recomendable en lo referente a perturbaciones armónicas. Para esto se simula las diferentes situaciones y se comparan los resultados de distorsión obtenidos con los del caso base o condición actual del sistema. Se presentan los dos casos siguientes.

- **Caso 1**

La barra principal de este sistema presenta dos transformadores de bajada (de 110 kV a 13,2kV). Considerando que la capacidad del transformador lo permite y que el otro se encontraba en

reparaciones, la configuración del sistema al momento de realizar las mediciones incluía uno solo de estos transformadores (caso base). Se analiza el efecto que tiene sobre el sistema la incorporación del segundo transformador, se compara la distorsión esperada con la obtenida inicialmente. En el Punto A6.2.1 (Anexo N°6), se detallan los valores esperados obtenidos mediante simulación, y se comparan con los del caso base.

Se observa que la distorsión en barras del sistema se ve reducida en algunas barras hasta un 30 % del valor inicial. Si bien el cambio en la mayoría de las barras no es tan grande, en relación a la distorsión armónica, la red se ve aliviada con esta configuración, por lo que es más recomendable.

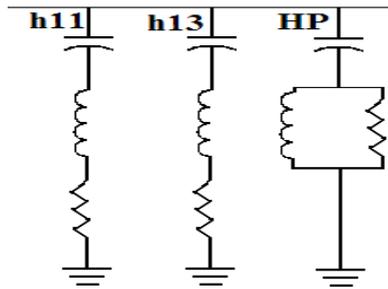
- **Caso 2**

Se analiza el efecto que tendrá sobre el sistema la incorporación de la nueva Planta de Ácido. Para ello, esta planta es modelada igual que la Planta de Ácido N°3 (sala 7), esto se considera una buena aproximación, ya que el diseño de la nueva planta está basado en el de la planta N°3, y presenta muy pocas variaciones. Tomando en cuenta que la incorporación de esta planta significa un aumento en aproximadamente 7 MW en el consumo total del sistema, es necesario realizar la simulación considerando en servicio los dos transformadores principales (barra N°1). Se observa que la distorsión en barras del sistema aumenta, principalmente debido a un incremento de la 11<sup>ava</sup> armónica, tanto en la corriente como en la tensión, alcanzando valores superiores a la norma para la corriente y muy cercano para la tensión. Esto se debe a que se duplica el consumo relacionado con el variador de frecuencia de doce pulsos (4 MW c/u aprox.), el cual no presenta ningún tipo de filtro aparte del transformador de tres enrollados (atenuación de 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas). En el Punto A6.2.1 (Anexo N°6), se detallan los valores obtenidos de la simulación y se grafica la corriente y tensión en el PCC, donde se confirma el predominio de la 11<sup>ava</sup> armónica.

### **6.5.6 Filtros y compensación de potencia reactiva para el sistema Subestación 1A.**

El consumo asociado a la Sala eléctrica N°7 correspondiente a la Planta de Ácido N°3, presenta una alta inyección de 11<sup>ava</sup> armónica, lo que se refleja en el PCC, superando los índices establecidos por la norma chilena. Como se planteó anteriormente, esto se debe principalmente al funcionamiento del variador de frecuencia asociado al funcionamiento del Soplador principal. Este tipo de equipos, en teoría, inyecta armónicas características de orden 11, 13, 23, 25, pero en realidad puede presentar armónicas no-características de magnitud no despreciable como la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas, como se comprueba en la práctica. Considerando el inminente aumento de estas armónicas debido a la incorporación de la nueva planta de ácido, tal como se demostró en el Punto 6.5.5 anterior, es necesario plantearse algún método de control.

Tomando en cuenta que la fuente de distorsión es conocida y que las frecuencias armónicas inyectadas están bien definidas, se plantea una solución muy usada en estos casos, que corresponde a la instalación en la barra de conexión del variador, de un banco de filtros sintonizados simple con la siguiente configuración.



**Figura 6.11:** Filtro para convertidor estático de 12 pulsos.

En la figura anterior se observa que la solución planteada está configurada por un filtro de 11<sup>ava</sup> armónica, uno de 13<sup>ava</sup>, y un filtro pasa altos (High Pass). Se debe considerar además que la potencia reactiva aportada por los filtros sintonizados, a frecuencia fundamental, es equivalente a la de un banco de condensadores, por lo que esta solución además estaría ayudando a incrementar el factor de potencia.

El consumo de la Planta de Tratamiento de Escoria (PTE, Sala 8), presenta un comportamiento capacitivo, inyectando reactivos a la barra principal del sistema, debido al funcionamiento del motor síncrono del Molino de Bolas, para el chancado. También presenta altos índices de corrientes armónicas en la barra N°22 (400 V), debido a los Convertidores Estáticos usados para el funcionamiento de las bombas GEHO. Tomando en cuenta la importancia de estos equipos para los procesos de la PTE, se descarta la posibilidad de eliminar o reducir la carga de las bombas. Considerando que estos equipos inyectan armónicas de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19,...etc., para atenuar las perturbaciones debiera ser suficiente incorporar filtros sintonizados simples para las armónicas 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup>, y su funcionamiento debiera ir asociado directamente a la operación de las bombas.

En la barra N°18 de la Sala 6 (Reactor y Secado), se presenta un problema de alta distorsión armónica junto con un notable desbalance de la red, sobretodo tomando en cuenta que no existe la presencia de un consumo monofásico importante. Considerando que el mayor responsable de lo anterior es el variador de frecuencia instalado recientemente para el Secado, debido a su funcionamiento deficiente (alto desbalance) y alta inyección de corrientes armónicas (THD<sub>I</sub> igual a 30 %), se recomienda estudiar la posibilidad de retirar este equipo. Para estudiar la instalación de algún equipo de compensación de reactivos o filtro de armónicas para este sistema, se recomienda realizar un estudio trifásico de armónicas, con tal de poder incluir los efectos del desbalance que presenta la red en este punto.

## **6.6 Comentarios Generales acerca de las soluciones planteadas para el sistema eléctrico de Altonorte.**

En los Puntos 6.3.4, 6.3.5, y 6.5.6 anteriores, se plantearon algunas de las posibles opciones, que resultan más lógicas, para solucionar tanto problemas de distorsión armónica, como de bajo factor de potencia encontrado en ambos Subsistemas en estudio. Esto no quiere decir que sean las únicas opciones y cabe aclarar que cualquier solución adoptada requiere de un diseño de ingeniería más detallado, las soluciones calculadas y simuladas anteriormente buscan representar de manera aproximada el efecto que estas tendrían sobre el sistema, pero su cálculo es idealizado. En los siguientes Puntos se muestran algunos aspectos importantes que se recomienda tener en cuenta a la hora de diseñar o elegir algún equipo de este tipo.

### **6.6.1 Bancos de condensadores**

Cuando se está considerando la incorporación de un banco de condensadores en un sistema con distorsión armónica, hay que tener en cuenta algunos factores importantes que pueden influenciar en la elección del equipo adecuado.

En presencia de corrientes armónicas los bancos se pueden sobrecargar debido a que estos generan un camino de baja impedancia para las componentes de alta frecuencia, por lo que es recomendable siempre incluir reactores en serie con el banco, esto no solo ayuda a cambiar la impedancia del banco, sino que también a controlar los efectos transientes de corrientes y tensiones que se producen en el momento de energización del banco, sobretodo si se tiene más de uno conectado a la misma barra. Cuando se energiza un banco de condensadores cercano a otro ya conectado, se produce una corriente de Inrush cuya magnitud y frecuencia queda determinada por el tamaño de los bancos y la reactancia inductiva entre ellos, pudiendo alcanzar peaks de corriente hasta 120 veces la nominal y de frecuencias superiores a los 8kHz. Usualmente por abaratar costos, se usan reactores limitadores pequeños (algunos uH). Si bien esta solución ayuda a evitar los efectos mencionados anteriormente, puede interactuar con el sistema provocando resonancias paralelo y empeorando el nivel de distorsión, pudiendo ser muy perjudicial para los equipos. [32]

Económicamente hablando la opción que seguiría a la planteada anteriormente, es la de considerar un reactor en serie que permita una configuración anti-resonante del banco. Esto permite evitar que el banco entre en resonancia con el sistema a alguna armónica característica, generalmente sintonizando la frecuencia natural del banco a frecuencias bajas (entre la segunda y tercera armónica); con esto para las frecuencias superiores tendría una respuesta lineal inductiva. Estos reactores son significativamente mayores que los reactores limitadores anteriores (de algunos mH), lo que significa mayor espacio, peso, y lógicamente mayor costo asociado. Cabe destacar que la función principal de estos bancos es la de evitar resonancias, y no de filtrar armónicas. Si se tiene el caso de una red con gran proporción de consumos no-lineales, como es común en sistemas industriales, esta solución puede no ser suficiente para reducir la distorsión

armónica y se hace necesario buscar otras opciones como filtros sintonizados para eliminar las armónicas que específicamente estén dando problemas. Esta solución a su vez requiere equipos de mayor costo y tamaño que la anterior.

### 6.6.2 Filtros

Para la elección de filtros de armónicas también hay que considerar, entre otros, algunos aspectos importantes como los mencionados a continuación:

Los filtros pasivos sintonizados a una cierta frecuencia, usualmente generan una resonancia paralelo a frecuencias menores de la frecuencia de sintonía. Considerando esto, si se instala un filtro para eliminar la 7<sup>ma</sup> armónica, se hace necesario incluir también uno para la quinta porque sino se puede provocar un aumento en la distorsión dado por la amplificación de la 5<sup>ta</sup> armónica. Situación que se confirma, por ejemplo, en la Figura 6.10, donde se observa un peak en la impedancia, a una frecuencia menor que la de sintonía del banco.

Usualmente mientras mayor el orden de la armónica que se quiere eliminar, menor los kVAR que se necesitan para el filtro. Una práctica recomendada por la literatura en caso de filtros múltiples, es distribuir los kVAR de la siguiente manera: si se usan Q kVAR para el filtro de 5<sup>ta</sup> armónica; se recomienda Q/2 para el de 7<sup>ma</sup>, Q/4 para el de 11<sup>ava</sup>, y Q/8 para el de 13<sup>ava</sup>. [19]

Generalmente los filtros experimentan sobretensiones que hay que tener en cuenta en la elección de los condensadores (situación que se confirmó con las simulaciones). Sintonizar el filtro ligeramente bajo la frecuencia que se quiere eliminar, por ejemplo sintonizarlo a la 4,7<sup>ma</sup> armónica en ves de la 5<sup>ta</sup>, ayuda a reducir la tensión y no degrada significativamente la acción del filtro. [18]

Se debe escoger un reactor que permita desprestigiar los efectos parásitos de conductores y elementos de unión, desde el lugar físico de ubicación del filtro a la barra de alimentación. El valor real de la frecuencia de resonancia queda definido por la longitud del conductor asociado al filtro. Para evitar complicaciones se recomienda elegir de manera adecuada los parámetros y configuración de los filtros.

El factor de calidad de los filtros puede ser modificado incluyendo resistencias en serie con el banco, transformándolo así en un filtro disipativo. Dado el efecto amortiguador que tiene, esto ayuda también a reducir los efectos transientes de sobretensiones o distorsiones elevadas, durante un proceso de naturaleza transitoria, como por ejemplo en la partida de una máquina o la conexión de un transformador.

## 7 Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos y tomando en cuenta los objetivos planteados, a continuación se muestran las conclusiones finales del presente trabajo teórico experimental.

Comparando los índices de distorsión medidos directamente en las distintas barras del sistema eléctrico de la Planta, con los límites establecidos por la Norma Chilena respectiva, fue posible determinar el estado actual de distorsión de la red, identificar las zonas con mayores problemas y las principales fuentes responsables de esto. Si bien la norma es aplicable al Punto de Común Acoplamiento (PCC), se considera como un buen parámetro de referencia para apoyar el análisis referente al estado de las demás barras del sistema.

Una vez aclarada la configuración actual del sistema, fue posible desarrollar un modelo computacional, que representara satisfactoriamente el comportamiento del sistema eléctrico, en lo referente a la distorsión armónica. Se confirma la efectividad del modelo contrastando los resultados obtenidos mediante las simulaciones, con los registrados en las mediciones en terreno. Con esto se logra una herramienta poderosa para evaluar y predecir en base al comportamiento en frecuencia, la distorsión en barras del sistema, ante diferentes configuraciones o la incorporación de algún equipo.

Se comprueba que uno de los efectos más perjudiciales para el nivel de distorsión, es el relacionado con las resonancias armónicas, que se produce mediante la interacción de la reactancia capacitiva de los bancos de condensadores con la reactancia inductiva del sistema, que a ciertas frecuencias, provoca una amplificación desmesurada de la distorsión. Se comprueba que actualmente los altos niveles de perturbación encontrados en algunos sectores de la planta, no corresponden a la presencia de resonancias armónicas, sino que a la operación de algunos equipos, en su mayoría variadores de frecuencia que inyectan corrientes armónicas al sistema.

Resulta interesante dividir el análisis en dos Subsistemas independientes, debido a las características particulares de cada uno. Del primer Subsistema (Subestación 1), es posible apreciar de forma clara el efecto que tiene en los sistemas eléctricos de este tipo, la incorporación de bancos de condensadores para la compensación de potencia reactiva. Observando como cambia la respuesta de la impedancia en función de la frecuencia y como se incrementan las distorsiones en las barras del sistema, como consecuencia de la resonancia paralelo. En el segundo Subsistema, se comprueba la importancia del funcionamiento de los bancos de condensadores de configuración anti-resonante, la función del transformador de tres enrollados para la atenuación de la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas, y el impacto que tiene sobre el sistema el variador de frecuencia de 12 pulsos de la Sala 7, que se ve reflejado en un alto índice de corrientes de 11<sup>ava</sup> armónicas por el PCC.

Se confirma que para el caso de estudio del Subsistema 1A, se contradice la hipótesis de que el sistema es balanceado, encontrándose un desbalance máximo entre fases de 6%, en barras de la Sala 6. Si bien este desbalance no se refleja en el resto del sistema, no se puede asegurar una buena representatividad del sistema, mediante un modelo monofásico.

Se confirma desde el punto de vista técnico, la conveniencia de retirar la antigua Planta de Ácido N°2 (Sala 5). Ya que significaría una reducción importante de la distorsión armónica del Subsistema 1 y además un incremento considerable en el factor de potencia.

Mediante el desarrollo de un análisis mas detallado de la Planta de Ácido N°3, apoyado en simulaciones e información teórica, se logra aclarar algunos aspectos de diseño y operacionales de importancia, con respecto a los equipos de esta planta, que antes no estaban claros.

Se analiza el impacto que tendrá la nueva Planta de Ácido sobre el sistema Subestación 1A, en lo referente a la distorsión armónica. Debido a que se predice un incremento en la distorsión, dado principalmente por la presencia elevada de 11<sup>ava</sup> armónicas, consecuencia del funcionamiento de los variadores de frecuencia de doce pulsos, asociados a la actividad del Soplador principal de las Plantas de Ácido. Se llega a la conclusión de que es recomendable considerar la incorporación de filtros de armónicas, se propone una configuración muy usada en estos casos, la cual va asociada directamente al funcionamiento de los variadores.

Desde el punto de vista técnico, se concluye que una solución más focalizada para la compensación de potencia reactiva es más conveniente, ya que además de incrementar el factor de potencia sobre la norma, permitiendo evitar una posible multa, tiene la ventaja de eliminar verdaderamente las consecuencias de operar con bajo factor de potencia.

Se establecen recomendaciones acerca de las soluciones que se consideraron más lógicas desde el punto de vista técnico y apoyado en la literatura, para controlar los distintos problemas de distorsión armónica encontrados. También se incluye una sección donde se mencionan algunos aspectos importantes de tener en cuenta a la hora de elegir y diseñar la mejor alternativa o solución.

## **7.1 Trabajos Futuros**

Considerando, que el presente estudio concreta lo que viene a ser una primera etapa en el diseño de una solución para la distorsión armónica de una red, se recomienda considerar la investigación y desarrollo de los siguientes puntos:

Realizar un estudio técnico y económico detallado, para determinar las mejores alternativas de solución al problema de distorsión armónica.

Analizar la alternativa de filtros de segundo orden para reducir perturbaciones armónicas y compensar el consumo de potencia reactiva del sistema.

Realizar un estudio trifásico de armónicas, principalmente para el sistema asociado a la Subestación 1A.

Realizar un análisis de los efectos transientes de distorsión, sobretensiones y sobrecorrientes que se producen en el sistema con la conexión y desconexión de algunos equipos.

# **Anexos**

## **Anexo N°1**

En este Anexo se entrega información relevante para la simulación del sistema eléctrico del complejo metalúrgico (Altonorte). Se muestra los valores considerados en el cálculo de la impedancia de cortocircuito para la representación correcta de la barra infinita del sistema. Además se entrega información referente a las características técnicas de los conductores y transformadores principales, utilizados en el modelo computacional.

### **A1.1 Representación barra infinita**

Se define la barra infinita, como la barra N°1 en ambos Unilineales (Figura 5.1, y 5.2 respectivamente). En el modelo, esta barra es representada mediante la impedancia de cortocircuito a frecuencia fundamental en este punto, obtenida mediante el programa Digsilent Power Factory v13.1 (con la base del CDEC-SING, cortesía de EMSERVI). Los valores usados en el cálculo son los siguientes:

$$S_{cc} = 457.29 \text{ MVA}$$

$$I_s = 2.4 \text{ kA}$$

$$R = 5.35 \Omega$$

$$X = 25.92 \Omega$$

Con estos datos y considerando la base común de 100 MVA se tiene finalmente una impedancia equivalente para la representación de la barra infinita de:

$$4.4215 + j 21.42 \%$$

Con esto se tiene una representación cuya parte resistiva permanece invariable ante la frecuencia y que representa las pérdidas en transformadores y líneas desde el sistema eléctrico hacia el SING. La reactancia crece proporcional a la frecuencia, tal como se menciona en el Capítulo 5, Punto 5.4.1.

### **A1.2 Características técnicas de transformadores y conductores del sistema eléctrico Subestación 1.**

En esta parte se entrega información referente a las características técnicas de los conductores y transformadores principales (Tablas A1.1 y A1.2 respectivamente), utilizados en el modelo computacional del sistema eléctrico Subestación 1. Los datos de impedancia de los conductores fueron obtenidos de la base de datos del software para simulación de sistemas eléctricos ETAP 5.5.6 (cortesía EMSERVI). Los números de las barras que aparecen en las tablas corresponden a las barras que se muestran en el unilineal correspondiente al circuito, Capítulo 5, figura 5.1.

RUTA DE CONDUCTOR		CONDUCTOR								
DESDE barra	HASTA barra	Kv	N° DE COND.	AWG (MCM)	mm <sup>2</sup>	LARGO (m)	R [Ohm/km]	X [Ohm/km]	R0 [Ohm/km]	X0 [Ohm/km]
2	4	13,2	2cxf	250	126,7	65	0,0910	0,0772	0,5730	0,3798
3	4	13,2	2cxf	250	126,7	90	0,0910	0,0772	0,5730	0,3798
4	5	13,2	2cxf	2/0	67,4	936	0,2172	0,0867	0,6840	0,2133
4	6	13,2	2cxf	4/0	107,2	450	0,1149	0,0800	0,3618	0,1967
4	11	13,2	1cxf	250	126,7	43	0,1819	0,1544	0,5730	0,3798
4	12	13,2	2cxf	2	33,6	170	0,4339	0,0962	1,3666	0,2365
4	22	13,2	2x3cxf	1	42,4	100	0,3098	0,0614	0,9757	0,1510
4	27	13,2	3x1c	2/0	67,4	15	0,1448	0,0578	0,4560	0,1422
12	19	13,2	3x1c	500	253,4	30	0,0307	0,0304	0,0491	0,0774
4	25	13,2	1cxf	1	42,4	320	0,6195	0,1842	1,9514	0,4531
26	35	0,4	2cxf	350	177,3	300	0,0727	0,0461	0,1163	0,1174

**Tabla A1.1:** Datos técnico de conductores, sistema eléctrico Subestación 1

TRAFO	RUTA		Potencia	Razón	Tipo	Z % (b.p)	Ztierra (Ohm)	X/R	TAPS
	DESDE barra AT	HASTA barra BT							
NS:18119	1	2	12,5 MVA	115 / 13,2 kV	Dyn1	7,2	38	18,6	~1,25%
NS:15925	1	3	12,5 MVA	115 / 13,2 kV	Dyn1	7,2	38	18,6	~1,25%
NS:17955	6	7	7500 kVA	13,2 / 6 kV	Dyn1	5,7		14,23	
NS:18224	6	8	2500 kVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn1	5,4		10,67	
NS:15920	12	18	1500 kVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn1	6,8		7,098	
NS:17534	19	20	1500 kVA	13,2 / 0,4 kV	Dy1	7,3		7,098	
NS:15919	25	26	1500 kVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn1	7,2		7,098	
001-0908	27	28	3 MVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn1	6		10,67	
NS:---	22	23	2000 kVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn1	5,4		7,098	

**Tabla A1.2:** Datos técnico de transformadores, sistema eléctrico Subestación 1

### A1.3 Características técnicas de transformadores y conductores del sistema eléctrico Subestación 1A.

En esta parte se entrega información referente a las características técnicas de los conductores y transformadores principales (Tablas A1.3 y A1.4 respectivamente), utilizados en el modelo computacional del sistema eléctrico Subestación 1A. Los datos de impedancia de los conductores fueron obtenidos de la base de datos del software para simulación de sistemas eléctricos ETAP 5.5.6 (cortesía EMSERVI). Los números de las barras que aparecen en las tablas corresponden a las barras que se muestran en el unilineal correspondiente al circuito, Capítulo 5, Figura 5.2.

RUTA DE CABLE		CABLE					R [Ohm/km]	X [Ohm/km]	R0 [Ohm/km]	X0 [Ohm/km]
DESDE barra	HASTA barra	kV	N° DE COND.	AWG (MCM)	mm <sup>2</sup>	LARGO (m)				
2	4	13,2	4(3x1c)	500	253,4	25	0,023	0,024325	0,07245	0,05984
3	4	13,2	4(3x1c)	500	253,4	35	0,023	0,024325	0,07245	0,05984
4	5	13,2	2(3x1c)	500	253,4	700	0,046	0,04865	0,1449	0,11968
4	6	13,2	3x1c	2/0	67,4	20	0,1447	0,0578	0,456	0,14218
4	7	13,2	3x1c	2/0	67,4	600	0,1447	0,0578	0,456	0,14218
4	8	13,2	3x1c	2/0	67,4	20	0,1447	0,0578	0,456	0,14218
4	9	13,2	2(3x1c)	500	253,4	650	0,046	0,04865	0,1449	0,11968
4	10	13,2	3x1c	2/0	67,4	950	0,1447	0,0578	0,456	0,14218

**Tabla A1.3:** Datos técnico de conductores, sistema eléctrico Subestación 1A.

TRAFO	RUTA		Potencia	Razón	Tipo	Z % (b.p)	X/R
	DESDE barra AT	HASTA barra BT					
001-0901	1	2	30 MVA	110 / 13.2 kV	Dyn1	9	23,7
001-0902	1	3	30 MVA	110 / 13.2 kV	Dyn1	9	23,7
001-0903	6	14	7 MVA	13,2 / 4,16 kV	Dyn1	6	13,55
001-0904	6	16	3 MVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn1	6	10,67
001-0905	6	18	2 MVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn1	5,5	7,098
001-0906	9	20	6,5 MVA	13,2 / 3,3 kV	Dyn1	6	13,55
001-0907	9	22	3 MVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn1	6	10,67
TR2	7	43	2 MVA	13,2 / 4,16 kV	Dyn-5	6	7,098
TR3	7	46	2 MVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn-5	6	7,098
TR4	7	48	2 MVA	13,2 / 0,4 kV	Dyn-5	6	7,098

**Tabla A1.4:** Datos técnico de transformadores, sistema eléctrico Subestación 1A.

## Anexo N°2

En este Anexo se incluye tablas con la información de todos los consumos asociados a cada una de las barras principales, pertenecientes a los dos subsistemas en estudio.

### A2.1 Sistema Subestación 1.

En la siguiente tabla se muestran los consumos medidos en los alimentadores principales, en nivel de tensión de 13,2 kV, del Sistema Subestación 1. Esto entrega una idea del consumo total asociado a cada sala eléctrica.

Alimentador	Consumo (kW)	Factor de Potencia
Sala 2A (S2A)	500	0,92
POL	5000	1
Sala 5 (S5)	4000	0,78
CDF	1900	0,99
Sala 4 (S4)	400	0,88
Sala 2 (S2)	1000	0,85
Molibdeno	700	0,86
<b>Sala 1 (Total)</b>	<b>13500</b>	<b>0,93</b>

**Tabla A2.1:** Consumos promedios registrados en alimentadores principales, mes de Octubre 2007.

La siguiente tabla muestra con mayor detalle como se distribuye el consumo entre las barras principales del sistema Subestación 1. El número asociado a cada barra corresponde a los mismos utilizados en el unilineal correspondiente a este sistema eléctrico (Capítulo 5, Figura 5.1).

Barra	Sistema Subestación 1			Cos $\phi$	N° de EICA
	N° de barra	Tensión	Potencia Activa [kW]		
<b>Sala 2A</b>					
General		13,2 kV			
Convertidores	28	400 V	500	0,92	17
<b>LOCSA</b>					
General	5	13,2 kV	5000	1	
<b>Sala 5 (Pta Acido N°2)</b>					
General		13,2 kV	4000	0,78	
	7	6 kV	3300	0,75	19
	8	380 V	700	0,9	
<b>Convertidor de frecuencia</b>					
General	11	13,2 kV	1900	0,99	23
<b>Sala 4</b>					
General		13,2 kV			
copec	35	400 V	400	0,88	24
<b>Sala 2</b>					
General		13,2 kV			
alimentadores Ingersol Rand	18	400 V	700	0,88	25
refino y moldeo	20	400 V	400	0,83	26
<b>Molibdeno</b>					
General		13,2 kV			
	23	400 V	700	0,86	

**Tabla A2.2:** Consumos promedios y N° de EICA, registrados en barras principales, sistema Subestación 1.

**Donde:**

**N° de barra:** Número de la barra en el Unilineal del sistema. (Capítulo 5, Figura 5.1)

**EICA:** Espectro de inyección de corrientes armónicas.

El detalle del **EICA** correspondiente a cada caso se puede ver en el Anexo N°3, Punto A3.1. Cabe señalar que en el software PCFLOH utilizado sólo basta con incorporar además de la potencia y factor de potencia, la información de las corrientes individuales de cada armónica, correspondientes a los respectivos consumos no-lineales.

## **A2.2 Sistema Subestación 1A.**

En la siguiente tabla se muestran los consumos medidos en los alimentadores principales, en nivel de tensión de 13,2 kV, del Sistema Subestación 1A. Esto entrega una idea del consumo total asociado a cada sala eléctrica.

<b>Alimentador</b>	<b>Consumo (kW)</b>	<b>Factor de Potencia</b>
<b>Sala 6 (Turbo Sopladores)</b>	6300	0,92
<b>Sala 6 (Reactor y Secado)</b>	5000	0,85
<b>POL (Pta. Oxígeno 2)</b>	3700	0,92
<b>Sala 7 (Pta. Acido N°3)</b>	6900	0,96
<b>Sala 8 (Pta. Escoria)</b>	3600	1
<b>Sala 1A (Total)</b>	25000	0,93

**Tabla A2.3:** Consumos promedios registrados en alimentadores principales, mes de Octubre 2007.

La siguiente tabla muestra con mayor detalle como se distribuye el consumo entre las barras principales del sistema Subestación 1A. El número asociado a cada barra corresponde a los mismos utilizados en el unilineal correspondiente a este sistema eléctrico (Capítulo 5, Figura 5.2).

<b>Sistema Subestación 1A</b>					
<b>Barra</b>	<b>barras</b>	<b>Tensión</b>	<b>Potencia Activa (MW)</b>	<b>Cos <math>\phi</math></b>	<b>N° de EICA</b>
<b>Sala 6 (Reactor)</b>					
Alimentador Turbo Sopladores	5	13,2 kV	6,3	0,92	15
Alimentador Gral. Reactor	6	13,2 kV	5	0,85	
Switchgear compresores	14	4,16 kV	1,7	0,92	16
Switchgear manejo secado y concentrado	16	400 V	2	0,8	17
Switchgear manejo de gases	18	400 V	1,3	0,9	18
<b>Sala 7 (Pta. Acido N°3)</b>					
General	7	13,2 kV	6,9	0,96	
VDF	7	13,2 kV	4	0,98	22
Secundario TR2	43	4,16 kV	1	0,88	21
Secundario TR3	46	400 V	0,9	0,8	23
Secundario TR4	48	400 V	1	0,8	24
<b>Sala 8 (Pta. Tratamiento escoria)</b>					
General	9	13,2 kV	3,9	1	
Molinos	20	3,3 kV	3	0,97 cap	19
Flotación Escoria	22	400 V	0,9	0,84	20
<b>LOCSA 2</b>					
General	10	13,2 kV	3,7	0,92	

**Tabla A2.4:** Consumos promedios y N° de EICA, registrados en barras principales, sistema Subestación 1A.

Donde:

**N° de barra:** Número de la barra en el Unilineal del sistema. (Capítulo 5, Figura 5.2)

**EICA:** Espectro de inyección de corrientes armónicas.

El detalle del **EICA** correspondiente a cada caso se puede ver en el Anexo N°3, Punto A3.2. Cabe señalar que en el software PCFLOH utilizado, sólo basta con incorporar además de la potencia y factor de potencia, la información de las corrientes individuales de cada armónica, correspondientes a los respectivos consumos no-lineales.

## Anexo N°3

En este Anexo 3 se presentan las armónicas individuales de corriente, tensión y sus respectivos ángulos de desfase, medidos en las barras principales del sistema Subestación 1. Se señala el número de EICA (Espectro de Inyección de Corrientes Armónicas) asignado al registro utilizado para la representación de los consumos no-lineales, indicados en la Tabla A2.2, en caso de que corresponda. Cabe destacar que sólo se toman en cuenta las armónicas de mayor importancia o magnitud y que se consideraron los mayores valores medidos de éstos (condición de “peor caso”). Los números asignados a las barras corresponden a los mismos utilizados en el unilineal correspondiente, Capítulo 5, Figura 5.1.

### A3.1 Armónicas individuales, sistema eléctrico Subestación 1.

- Alimentador LOCSA, medición en barra N°5, general 13,2 kV.

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	5,07
2	0,56	1,90	3,49
3	0,34	0,41	18,93
4	0,20	0,71	41,03
5	0,55	1,89	-7,44
7	0,88	0,63	-82,64
11	0,25	0,63	108,35
13	0,21	0,34	70,59
17	0,11	0,16	55,82
19	0,07	0,33	-41,12

**Tabla A3.1:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador general LOCSA

- Alimentador general CDF, medición en barra N°11, 13,2kV.  
EICA N°23

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-5,74
2	0,87	1,99	137,00
3	1,01	0,56	9,74
4	0,35	0,75	134,00
5	5,53	1,11	-22,10
6	0,28	0,54	65,60
7	1,44	0,71	7,37
11	0,53	0,19	114,00
13	1,23	1,25	-147,00
17	0,20	0,39	46,80
19	0,22	0,38	-19,80
23	0,44	0,44	-13,70
25	0,26	0,16	47,10

**Tabla A3.2:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador general CDF.

- Alimentador general Sala 2, medición en barra N°12, 13.2 kV.

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-27,27
3	0,60	0,15	126,59
5	2,14	1,84	-64,87
7	1,40	0,28	76,39
9	0,09	0,09	-71,93
11	0,79	0,57	67,00
13	0,55	0,41	-43,84
17	0,41	0,32	149,01
19	0,36	0,16	148,02
23	0,14	0,08	113,35
25	0,16	0,09	54,41
27	0,02	0,09	70,78
29	0,10	0,08	86,66
31	0,10	0,08	104,34
35	0,07	0,08	72,63

**Tabla A3.3:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador general Sala 2.

- Alimentador Sala 2, medición barra N°20, alimentador Refino y Moldeo, 400 V  
EICA N°26

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-25,53
2	1,15	0,52	171,94
3	0,87	0,09	77,60
4	0,36	0,21	148,88
5	2,68	1,83	-60,45
7	0,60	0,56	-14,26
11	0,30	0,52	174,56
13	0,79	0,97	-58,09
15	0,14	0,09	13,36
17	0,19	0,37	-5,26
19	0,14	0,23	9,87
23	0,25	0,39	-3,64
25	0,16	0,36	-19,95
27	0,08	0,08	61,53

**Tabla A3.4:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador refino y moldeo, Sala 2.

- Alimentador Sala 2, medición en barra N°18, alimentador Ingersoll Rand, 400 V  
EICA N°25

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-20,09
2	0,48	1,78	66,57
3	1,83	0,32	96,15
4	0,22	0,73	32,59
5	10,77	2,92	141,77
6	0,22	0,50	24,49
7	7,45	1,09	131,84
8	0,18	0,59	72,63
9	0,38	0,09	84,8
11	3,67	1,41	138,47
13	2,45	1,19	162,63
15	0,27	0,14	115,36
17	1,20	0,91	145,27
19	1,03	0,36	144,59
21	0,17	0,14	134,68
23	0,57	0,82	147,28
25	0,60	0,18	126,13

**Tabla A3.5:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador Ingersoll Rand, Sala 2.

- Alimentador general Molibdeno, medición en barra N°4, 13,2 kV.

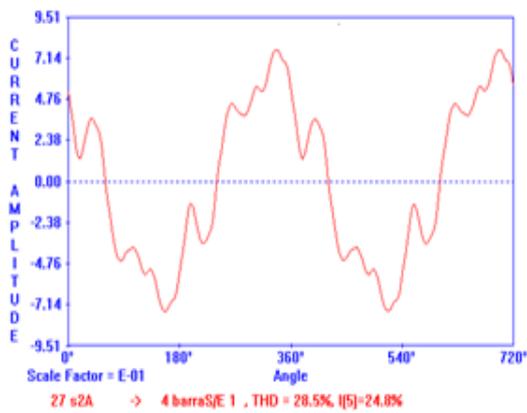
orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-30,06
2	0,66	1,67	13,55
3	1,62	0,38	163,60
4	0,22	0,68	-22,10
5	4,50	1,04	133,90
7	3,43	0,47	137,58
9	0,18	0,16	77,11
11	0,59	0,15	2,32
13	1,33	0,86	-31,54
15	0,11	0,10	-88,97
17	0,44	0,14	106,57
19	0,26	0,34	-63,34
21	0,07	0,18	47,23
23	0,37	0,43	-85,18
25	0,15	0,23	64,80
27	0,04	0,09	69,50

**Tabla A3.6:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador general Molibdeno.

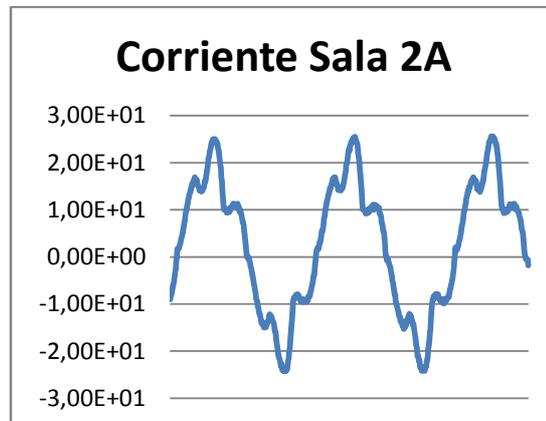
- Alimentador general Sala 2A, medición barra N°4, 13,2 kV.  
**EICA N°17**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-9,6
2	0,62	1,63	166,14
3	3,67	0,23	-40,3
4	0,44	0,66	59,08
5	24,79	1,70	128,69
7	12,8	0,26	171,54
9	0,49	0,09	16,13
11	4,08	0,46	134,2
13	2,8	0,51	-74,25
15	0,13	0,19	100,04
17	1,50	0,36	169,78
19	0,93	0,40	175,61
21	0,13	0,24	134,19
23	0,80	0,50	-51,3
25	0,71	0,36	11,31
27	0,09	0,07	54,4

**Tabla A3.7:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador general Sala 2A.



(a)



(b)

**Figura A3.1:** Gráficos de corriente comparación caso teórico con caso real. (a)Corriente simulada con PCFLOH. (b)Corriente medida con instrumento.

- Barra Sala 2A, solo tensión medidas en barra N°28, 400 V.

orden	U [%]
1	100,00
2	0,56
3	0,19
4	0,30
5	2,42
7	0,93
11	0,69
13	0,49
15	0,06
17	0,17
19	0,22
23	0,16
25	0,21

**Tabla A3.8:** Armónicas individuales de tensión medidas en barra secundario trafo bajada, sala 2A.

- Alimentador general Sala 5, medición en barra N°4, 13,2 kV.

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-38,80
2	0,41	1,60	125,07
3	0,61	0,23	85,90
4	0,42	0,65	117,06
5	2,43	1,60	-88,34
6	0,18	0,50	118,67
7	0,98	0,69	-67,24
8	0,08	0,31	129,93
9	0,06	0,04	119,76
11	0,20	0,86	127,29
13	0,53	0,49	-76,45
17	0,18	0,59	59,47
19	0,17	0,31	142,04
23	0,14	0,31	14,06
25	0,11	0,24	-1,65
27	0,01	0,09	78,68

**Tabla A3.9:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador general Sala 5.

- Alimentador Sala 5, medición en barra N°7, 6000 V.  
**EICA N°19**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-37,80
2	0,16	1,64	102,00
3	0,13	1,01	141,00
5	2,66	1,21	-111,00
7	0,61	1,18	35,60
9	0,04	0,52	6,91
11	0,26	0,37	-66,70
13	0,53	0,80	-55,70
15	0,03	0,34	-117,00
17	0,06	0,37	80,30
19	0,09	0,34	-34,50
23	0,10	0,23	-2,28
25	0,07	0,11	27,90

**Tabla A3.10:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador Sala 5, barra 6000V.

- Alimentador general Sala 4, medición en barra N°4, 13,2 kV  
EICA N°24

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	29,15
2	1,00	2,07	53,49
3	2,37	0,62	-41,03
4	0,37	0,76	18,20
5	2,73	1,15	-80,68
6	0,26	0,57	27,20
7	1,21	0,69	28,14
8	0,21	0,36	18,80
9	0,53	0,19	-37,35
11	1,58	0,16	24,21
13	0,89	0,90	40,92
15	0,21	0,19	71,31
17	0,26	0,15	16,50
19	0,26	0,39	42,42
23	0,16	0,33	20,18
25	0,21	0,15	53,40

**Tabla A3.11:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador general Sala 4.

### A3.2 Armónicas individuales, sistema eléctrico Subestación 1A.

- Alimentador Turbo Sopladores, Sala 6, medición en barra N°5, 13,2 kV.  
EICA N°15

orden	I [%]	U [%]	Fase
1	100,00	100,00	-22,39
2	0,28	1,84	53,52
3	0,26	0,26	-68,77
5	1,79	1,71	-87,41
7	0,54	0,65	-91,21
9	0,05	0,12	7,62
11	0,27	0,58	-90,86
13	0,39	1,29	-111,32
17	0,06	0,26	-105,59
23	0,04	0,54	-64,12
25	0,05	0,31	-93,20
27	0,01	0,03	3,92

**Tabla A3.12:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador Turbo Sopladores, Sala 6, barra 13,2 kV.

- Alimentador General Sala Reactor, Sala 6, medición en barra N°6, 13,2 kV.

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	33,41
2	0,63	1,88	34,36
3	0,94	0,37	129,16
5	1,73	1,33	0,63
7	1,89	0,76	153,40
9	0,14	0,17	142,58
11	0,77	1,12	-11,67
13	0,44	1,54	-44,87
17	0,32	0,41	-72,67
19	0,18	0,38	76,68
21	0,05	0,14	117,52
23	0,14	0,28	62,96
25	0,11	0,51	131,53
27	0,03	0,12	61,10
29	0,07	0,15	161,56
31	0,08	0,24	134,13
35	0,09	0,45	1,68

**Tabla A3.13:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en alimentador General Sala 6, barra 13,2 kV.

- Alimentador Switchgear compresores, Sala 6, medición en barra N°14, 4,16 kV.  
**EICA N°14**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-21,91
2	0,65	1,85	52,38
3	0,34	0,34	134,99
4	0,23	0,82	55,64
5	1,33	1,64	-78,52
7	5,88	0,65	-66,81
9	0,09	0,17	-21,26
11	0,32	0,52	-77,70
13	0,41	0,69	-91,17
15	0,06	0,13	-12,95
17	0,07	0,26	-45,40
19	0,05	0,09	107,19
21	0,04	0,09	120,94

23	0,09	0,43	-48,96
25	0,09	0,39	-40,57
35	0,19	0,47	54,56

**Tabla A3.14:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Switchgear compresores, Sala 6, barra 4,16 kV.

- Alimentador Switchgear Manejo Secado y Concentrado, Sala 6, medición en barra N°16, 400 V.

**EICA N°17**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-30,64
2	0,06	0,53	104,30
3	0,47	0,11	40,60
4	0,03	0,25	108,40
5	1,56	1,49	49,20
7	1,51	0,49	35,32
9	0,20	0,07	68,13
11	0,58	0,73	27,45
13	0,46	0,56	-68,38
15	0,10	0,07	49,51
17	0,23	0,22	-31,07
19	0,13	0,09	-25,96
21	0,04	0,04	3,98
23	0,16	0,43	-64,50
25	0,13	0,21	-66,46
29	0,07	0,14	-69,54
31	0,04	0,08	-49,03
35	0,11	0,49	-63,55

**Tabla A3.15:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Switchgear Manejo Secado y Concentrado, Sala 6, barra 400 V.

- Alimentador Switchgear Manejo de Gases, Sala 6, medición en barra N°18, 400V.  
EICA N° 18

orden	I [%]	U [%]	Fase
1	100	100	-16,73
2	0,42	0,49	9,18
3	6,31	0,47	103,07
4	0,16	0,25	78,90
5	12,70	2,67	95,61
6	0,12	0,09	44,50
7	8,84	1,28	110,06
9	1,07	0,22	122,64
11	1,81	1,18	95,74
13	1,67	0,51	140,46
15	0,34	0,17	120,73
17	0,92	0,50	84,33
19	0,53	0,36	128,05
21	0,24	0,16	109,97
23	0,42	0,40	165,48
25	0,37	0,20	32,59
27	0,24	0,16	112,14
29	0,30	0,19	110,24
31	0,20	0,18	66,93
33	0,22	0,14	99,55
35	0,29	0,29	-6,78

**Tabla A3.16:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Switchgear Manejo de Gases, Sala 6, barra 400 V.

- Alimentador General Sala 7 (Pta. de Acido N°3), medición en barra N°7, 13.2 kV.

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-16,42
2	0,76	2,06	100,20
3	0,66	0,43	50,27
4	0,28	0,87	119,65
5	2,58	1,32	-56,58
6	0,18	0,55	125,16
7	1,32	0,51	172,16
8	0,16	0,45	116,69

9	0,17	0,17	99,23
11	4,20	1,46	82,70
13	2,36	0,70	103,00
15	0,12	0,21	-15,65
17	0,48	0,43	-93,67
19	0,28	0,15	-45,59
23	0,58	0,84	107,88
25	0,61	0,55	86,06
27	0,05	0,12	131,55
29	0,20	0,29	118,43
31	0,20	0,27	75,60
35	0,38	1,03	84,08

**Tabla A3.17:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador General Sala 7 (Pta. de Acido N°3), barra 13,2 kV.

- Alimentador Secundario TR2, Sala 7 (Pta. de Acido N°3), medición en barra N°43, 4,16 kV.

**EICA N°21**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-26,33
2	0,53	1,86	9,67
3	0,28	0,32	43,50
5	2,13	0,79	-84,69
7	0,67	0,43	-84,50
11	0,65	0,71	-83,40
13	0,49	1,06	-83,80
17	0,15	0,24	-84,30
19	0,05	0,16	-16,12
21	0,03	0,12	67,23
23	0,15	0,32	-46,16
25	0,13	0,35	-26,30
27	0,03	0,12	70,22
29	0,08	0,12	-7,38
35	0,08	0,28	129,04

**Tabla A3.18:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Secundario TR2, sala 7, barra 4,16 kV.

- Alimentador Secundario TR3, Sala 7 (Pta. de Acido N°3), medición en barra N°46, 400V.

**EICA N°23**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-12,06
2	0,49	0,53	108,85
3	0,47	0,75	165,87
4	0,22	0,25	27,65
5	2,01	1,17	-26,18
6	0,15	0,13	143,90
7	1,51	0,26	21,80
8	0,11	0,16	148,46
9	0,13	0,27	150,83
10	0,10	0,12	163,34
11	1,11	0,80	-77,78
13	1,26	0,95	-93,81
15	0,07	0,18	162,57
17	0,24	0,34	-68,92
19	0,09	0,10	102,57
23	0,26	0,40	-70,45
25	0,15	0,24	-52,82

**Tabla A3.19:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Secundario TR3, sala 7, barra 400 V.

- Alimentador Secundario TR4, Sala 7 (Pta. de Acido N°3), medición en barra N°48, 400 V.

**EICA N°24**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-11,91
2	0,26	0,50	122,38
3	3,20	0,40	88,61
4	0,10	0,21	116,75
5	4,26	0,76	-104,86
6	0,13	0,14	113,77
7	1,11	0,41	159,72
9	0,21	0,07	155,41
11	1,11	0,62	-86,04
13	0,96	0,77	-94,11
15	0,12	0,10	114,64

17	0,25	0,29	-12,90
19	0,10	0,13	157,50
21	0,09	0,07	51,93
23	0,30	0,38	-60,03
25	0,25	0,26	-68,24

**Tabla A3.20:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Secundario TR4, sala 7, barra 400 V.

- Alimentador VDF, Sala 7 (Pta. de Acido N°3), medición en barra N°7, 13,2 kV.  
**EICA N°22**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-8,03
2	0,44	0,3	47,56
3	0,84	0,7	95,69
5	2,10	1,02	-64,24
7	2,56	0,36	12,79
9	0,30	0,04	149,93
11	8,60	1,03	106,57
13	4,42	1,09	142,79
15	0,17	0,04	120,55
17	0,75	0,26	-83,77
19	0,54	0,12	-21,73
21	0,12	0,04	125,76
23	1,20	0,36	135,46
25	1,27	0,27	97,11
27	0,08	0,04	151,26
29	0,33	0,13	118,37

**Tabla A3.21:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en VDF (variador de frecuencia), sala 7, barra 13,2 kV.

- Alimentador General, Sala 8 (Pta. de Tratamiento de Escoria), medición en barra N°9, 13,2 kV.

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	1,60
2	0,27	1,84	-25,79

3	0,21	0,16	-42,37
4	0,13	0,67	-47,49
5	1,09	1,65	56,12
7	2,86	0,44	-104,59
11	0,61	1,25	-140,78
13	0,71	0,87	-90,40
15	0,06	0,07	-56,39
17	1,57	0,29	114,50
19	0,51	0,05	28,46
23	0,13	0,53	-128,12
25	0,11	0,31	-111,81
27	0,02	0,08	22,96
29	0,05	0,09	121,04
31	0,06	0,13	-34,58
35	0,08	0,68	-30,89

**Tabla A3.22:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador General, Sala 8 (Pta. de Tratamiento de Escoria), barra 13,2 kV.

- Alimentador Molinos, Sala 8 (Pta. de Tratamiento de Escoria), medición en barra N°20, 3,3 kV.

**EICA N°19**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	14,70
3	0,37	0,83	-114,00
5	2,31	1,24	-72,40
7	2,18	0,41	-99,50
11	1,03	0,83	-115,00
13	0,71	0,78	-94,90
17	2,05	1,35	98,00
19	0,49	0,26	82,00
23	0,15	0,36	-91,60
25	0,06	0,16	-149,00

**Tabla A3.23:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Molinos, Sala 8 (Pta. de Tratamiento de Escoria), barra 3,3 kV

- Alimentador Flotación, Sala 8 (Pta. de Tratamiento de Escoria), medición en barra N°22, 400 V. (Con dos Bomba GEHO)

**EICA N°20**

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-30,22
2	0,12	0,49	88,45
3	0,53	0,13	44,93
4	0,08	0,18	52,56
5	11,14	2,46	92,38
7	6,87	0,66	101,52
9	0,23	0,07	-2,34
11	1,69	1,12	159,92
13	1,58	0,92	-104,71
15	0,08	0,04	144,59
17	0,61	0,37	75,00
19	0,54	0,23	84,61
21	0,05	0,06	29,87
23	0,45	0,38	171,53
25	0,34	0,31	-102,05
27	0,03	0,04	82,60

**Tabla A3.24:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Flotación, Sala 8 (Pta. de Tratamiento de Escoria), barra 400 V

- Alimentador Flotación, Sala 8 (Pta. de Tratamiento de Escoria), medición en barra N°22, 400 V. (Con una Bomba GEHO).  
 -THD<sub>I</sub> = 12,6%  
 -THD<sub>V</sub> = 2,7 %

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-31,35
2	0,21	0,48	90,16
3	0,56	0,17	58,06
4	0,10	0,19	21,54
5	10,70	2,29	99,46
7	6,70	0,79	121,59
9	0,19	0,06	163,43
11	1,48	0,95	163,00
13	1,45	0,97	18,80
15	0,10	0,08	148,47

17	0,59	0,45	122,42
19	0,57	0,23	148,95
23	0,42	0,34	155,58
25	0,30	0,38	157,65
27	0,05	0,05	135,20

**Tabla A3.25:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Flotación, Sala 8 (Pta. de Tratamiento de Escoria), barra 400 V

## Anexo N°5

### A5.1 Validación del software

Las siguientes tablas contienen todos los datos relevantes para la simulación del sistema industrial mediano de trece barras, presentado en el Capítulo 5, para verificar el buen funcionamiento de PCFLOH. (Punto 5.4.1.1)

Desde	Hasta	R	X
100:UTIL-69	01:69-1	0,00139	0,00296
03:MILL-1	50:GEN-1	0,00122	0,00243
03:MILL-1	05:FDR F	0,00075	0,00063
03:MILL-1	26:FDR G	0,00157	0,00131
03:MILL-1	06:FDR H	0,00109	0,00091

**Tabla A5.1:** Datos de impedancia en p.u. (base 13.8 kV, 10 MVA)

Desde	Hasta	Tensión	Tap	kVA	% R	% X
01:69-1	03:MILL-1	69:13.8	69	15000	0,4698	7,9862
50:GEN1	51:AUX	13.8:0.48	13,45	1500	0,9593	5,6694
05:FDR F	49:RECT	13.8:0.48	13,45	1250	0,7398	4,4388
05:FDR F	39:T3 SEC	13.8:4.16	13,11	1725	0,7442	5,9537
26:FDR G	29:T11 SEC	13.8:0.48	13,45	1500	0,8743	5,6831
06:FDR H	11:T4 SEC	13.8:0.48	13,8	1500	0,8363	5,4360
06:FDR H	19:T7 SEC	13.8:2.4	13,11	3750	0,4568	5,4810

**Tabla A5.2:** Datos de transformadores.

Barra	Vmag (p.u.)	Desfase (grados)	Pgen kW	Qgen kVAR	Pload kW	Qload kVAR
100:UTIL-69	1,000	0,00	7450	540	-	-
01:69-1	0,999	-0,13	-	-	-	-
03:MILL-1	0,994	-2,40	-	-	2240	2000
50:GEN1	0,995	-2,39	2000	1910	-	-
51:AUX	0,995	-3,53	-	-	600	530
05:FDR F	0,994	-2,40	-	-	-	-
49:RECT	0,980	-4,72	-	-	1150	290
39:T3 SEC	0,996	-4,85	-	-	1310	1130
26:FDR G	0,994	-2,40	-	-	-	-
06:FDR H	0,994	-2,40	-	-	-	-
11:T4 SEC	0,979	-3,08	-	-	370	330
19:T7 SEC	1,001	-4,69	-	-	2800	2500
29:T11 SEC	0,981	-4,16	-	-	810	800

Tabla A5.3: Datos de Generación y consumo de energía, y tensiones de barra (obtenidos de flujo de potencia).

Orden de Armónica	% de la fundamental	Angulo relativo
1	100,00	0,00
5	18,24	-55,68
7	11,90	-84,11
11	5,73	-143,56
13	4,01	-175,58
17	1,93	111,39
19	1,39	68,30
23	0,94	-24,61
25	0,86	-67,64
29	0,71	-145,46
31	0,62	176,83
35	0,44	97,40
37	0,38	54,36

Tabla A5.4: Fuente armónica. (Valores en % de componente fundamental)

## A5.2 HIOKI 3196



Algunas especificaciones básicas de este equipo se muestran en la siguiente tabla:

<b>Dimensiones</b>	Aprox. 298W x 215H x 67D mm
<b>Peso</b>	2 kg (sin batería)
<b>Cumple con estándar</b>	IEEE 1159 Standard
<b>Máximo período de registro</b>	1 semana
<b>Frecuencia de muestreo max.</b>	1 seg

Tabla A5.5: Algunas características del HIOKI 3196.

Este equipo puede registrar simultáneamente los siguientes fenómenos:

- Transient Overvoltage (Impulse)
- Voltage Dip
- Voltage Swell
- Flicker
- Instantaneous interruptions
- Harmonics
- Unbalance factor

Dependiendo del rango seleccionado se tiene los siguientes intervalos de precisión, para la medición de tensión y corriente:

### Voltage range

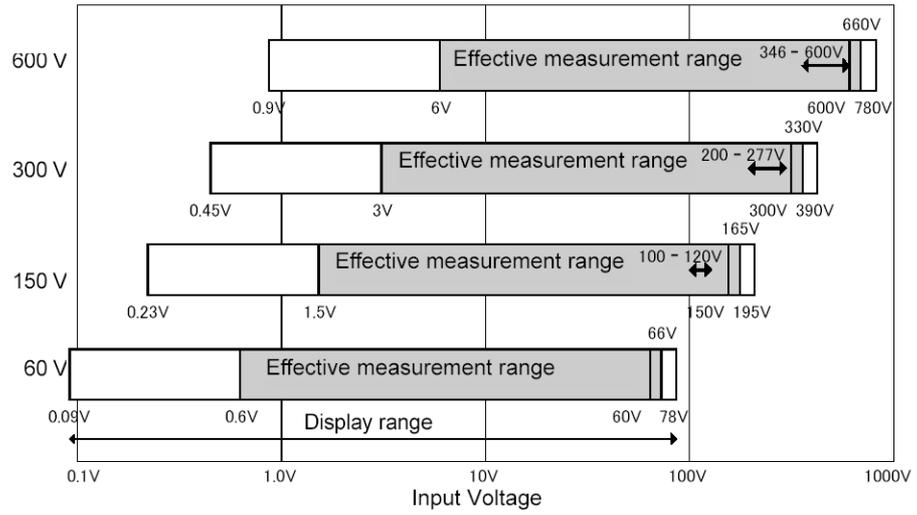


Figura A5.1: Rangos de medición de tensión

### Current range

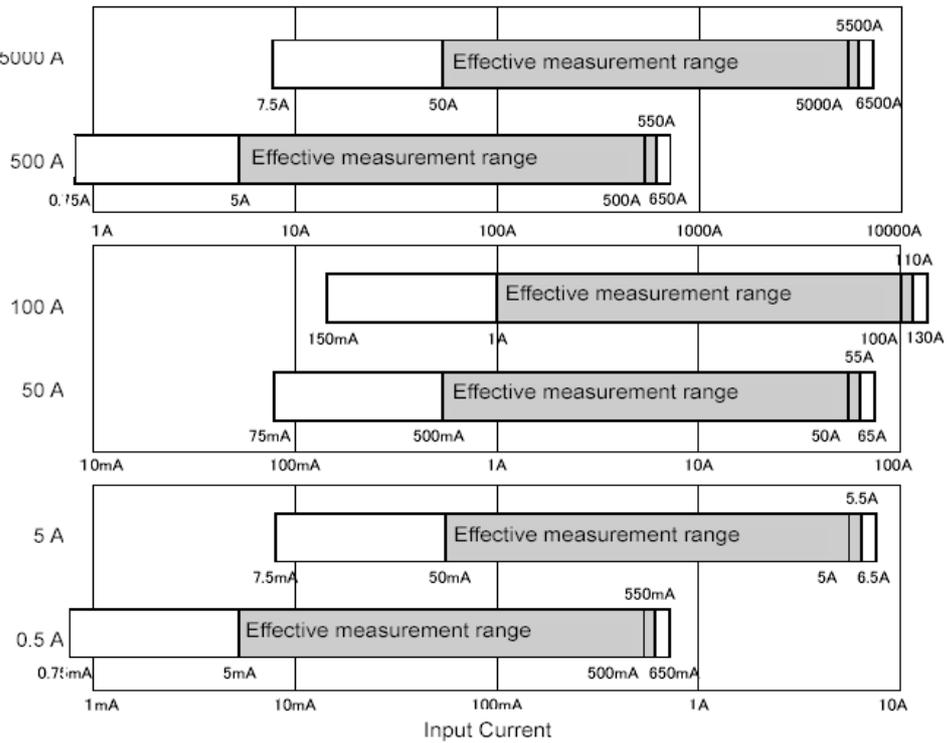


Figura A5.2: Rangos de medición de corrientes.

## Anexo N°6

En el siguiente anexo se muestran algunos gráficos y tablas, resultado de las distintas simulaciones realizadas en los capítulos previos.

### A6.1 Simulaciones Sistema Subestación 1.

#### A6.1.1 Corrección del factor de potencia.

En la siguiente Tabla A6.1.1 se muestran los resultados obtenidos de la simulación realizada en el Capítulo 6, Punto 6.3.4, donde se compara la respuesta en frecuencia del sistema Subestación 1 antes y después de instalar un banco de condensadores estáticos (4 MVAR) para la compensación de potencia reactiva en la barra principal del sistema(13,2 kV).

N° de barra	THDv sin compensación (%)	THDv con compensación (%)
1	1,28	3,49
2	2,15	5,47
3	2,15	5,47
4	2,16	5,48
5	2,16	5,48
6	2,19	5,51
7	2,62	5,98
8	4,22	6,26
11	2,16	5,48
12	2,16	5,49
18	5,31	8,26
19	2,16	5,49
20	2,01	5,37
22	2,16	5,49
23	2,47	6,13
25	2,16	5,49
26	2,4	5,42
27	2,16	5,49
28	3,7	6,78
35	3,99	6,13

**Tabla A6.1.1:** Distorsión total de tensión. Comparación de casos con y sin banco de condensadores. Valores en % de la componente fundamental.

### A6.1.2 Filtros

Se analiza el efecto que tiene sobre el sistema el incorporar un filtro sintonizado a la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas, en la barra principal de la Sala 2A (barra N°28). A continuación se muestran los cálculos de las componentes consideradas en cada caso.

- **Filtro de 5<sup>ta</sup> armónica.**

Se consideró un banco de 100 kVAR

$$Q_c = 100 \text{ kVAR} \quad V_{ff} = 400 \text{ V}$$

$$Q_c = \frac{V^2}{x_c} \rightarrow x_c = \frac{(400)^2}{100 \times 10^3} = 1,6 \rightarrow C = 1989 \text{ uF}$$

Frecuencia de resonancia

$$f_r = 250 \text{ Hz} \rightarrow \omega_r = \frac{1}{\sqrt{C \times L}} = 1570,8$$

Reactancia inductiva.

$$L = 0,204 \text{ mH} \rightarrow x_L = 0,6409 \Omega$$

$$x_L = 4005,53 \text{ [p.u]}$$

- **Filtro de 7<sup>ma</sup> armónica.**

Se consideró un banco de 50 kVAR

$$Q_c = 50 \text{ kVAR} \quad V_{ff} = 400 \text{ V}$$

$$Q_c = \frac{V^2}{x_c} \rightarrow x_c = \frac{(400)^2}{50 \times 10^3} = 3,2 \rightarrow C = 995 \text{ uF}$$

Frecuencia de resonancia

$$f_r = 350 \text{ Hz} \rightarrow \omega_r = \frac{1}{\sqrt{C \times L}} = 2199,11$$

Reactancia inductiva.

$$L = 0,208 \text{ mH} \rightarrow x_L = 0,065345 \Omega$$

$$x_L = 4084,07 \text{ [p.u]}$$

## A6.1.2 Análisis de sensibilidad

- CASO 1

La tabla siguiente muestra como cambia el THD<sub>v</sub> en las barras principales del sistema Subestación 1, al retirar un transformador de la subestación principal (operación con un solo transformador).

N° de barra	Tensión	THD <sub>v</sub> Teórico Actual (%)	THD <sub>v</sub> Caso 1 (%)
1	110 kV	1,28	1,24
4	13,2 kV	2,16	3,12
5	13,2 kV	2,16	3,12
6	13,2 kV	2,19	3,15
12	13,2 kV	2,16	3,13
7	6 kV	2,62	3,34
8	380 V	4,22	4,81
18	400 V	5,31	6,09
20	400 V	2,01	2,68
23	400 V	2,47	3,23
28	400 V	3,7	4,45
35	400 V	3,9	4,66

**Tabla A6.1.2:** Distorsión total de tensión. Comparación de distorsión teórica actual con Caso 1.

- **CASO 2**

La tabla siguiente muestra como cambia el THD<sub>V</sub> en las barras principales del sistema Subestación 1, al sacar de operación la planta de ácido N°2 (Sala 5).

<b>N° de barra</b>	<b>Tensión</b>	<b>THD<sub>v</sub> Actual (%)</b>	<b>THD<sub>v</sub> Caso 1 (%)</b>
1	110 kV	1,28	0,68
4	13,2 kV	2,16	1,28
5	13,2 kV	2,16	1,28
12	13,2 kV	2,16	1,28
18	400 V	5,31	4,69
20	400 V	2,01	1,06
23	400 V	2,47	1,68
28	400 V	3,7	2,75
35	400 V	3,9	2,82

**Tabla A6.1.3:** Distorsión total de tensión. Comparación de distorsión actual con Caso 1.

## **A6.2 Simulaciones Sistema Subestación 1A.**

### **A6.2.1 Análisis de sensibilidad**

- **CASO 1**

La tabla siguiente muestra como cambia el THD<sub>V</sub> en las barras principales del sistema Subestación 1A, al incorporar un segundo transformador de la subestación principal (Punto 6.5.5).

Barra	Sistema Subestación 1A			
	N° barra	Tensión	THDv Teórico Inicial (%)	THDv Teórico Caso 1 (%)
<b>Principal</b>				
Barra común o PCC	1	110 kV	1,82	1,84
Barra principal subestación 1A	4	13,2 kV	3,48	2,65
<b>Sala 6 (Reactor)</b>				
Barra Turbo Sopladores	5	13,2 kV	3,5	2,67
Barra Gral. Reactor	6	13,2 kV	3,48	2,65
Switchgear compresores	14	4,16 kV	3,65	2,83
Switchgear manejo secado y concentrado	16	400 V	3,8	3,02
Switchgear manejo de gases	18	400 V	4,4	3,80
<b>Sala 7 (Pta. Acido N°3)</b>				
General	7	13,2 kV	3,6	2,74
Secundario TR2	43	4,16 V	3,2	2,47
Secundario TR3	46	400 V	2,8	2,16
Secundario TR4	48	400 V	2,8	2,18
<b>Sala 8 (Pta. Tratamiento escoria)</b>				
General	9	13,2 kV	3,51	2,67
Molinos	20	3,3 kV	4,31	3,48
Flotación Escoria	22	400 V	4,05	3,3
<b>LOCSA 2</b>				
General	10	13,2 kV	3,50	2,6

**Tabla A6.2.1:** Distorsión total de tensión. Comparación de distorsión teórica actual con Caso 1.

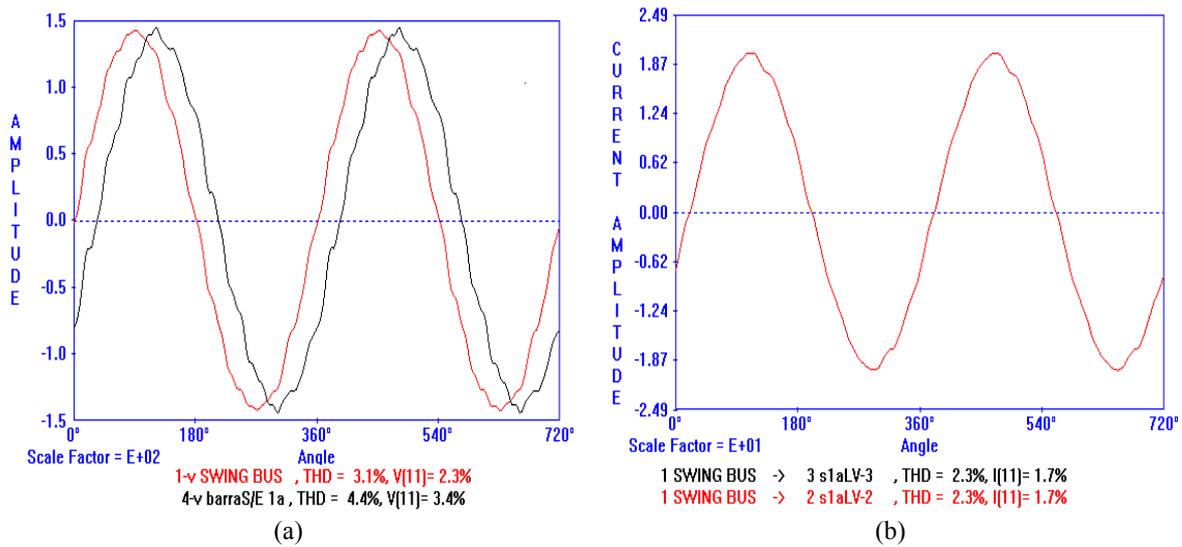
- **CASO 2**

En la siguiente tabla se muestra las distorsiones de tensión obtenidas en barras principales del sistema, al incorporar la nueva Planta de Ácido.

<b>Sistema Subestación 1A</b>				
<b>Barra</b>	<b>N° barra</b>	<b>Tensión</b>	<b>THDv Teórico Inicial (%)</b>	<b>THDv Teórico Caso 2 (%)</b>
<b>Principal</b>				
Barra común o PCC	1	110 kV	1,82	3,05
Barra principal subestación 1A	4	13.2 kV	3,48	4,43
<b>Sala 6 (Reactor)</b>				
Barra Turbo Sopladores	5	13.2 kV	3,5	4,44
Barra Gral. Reactor	6	13.2 kV	3,48	4,43
Switchgear compresores	14	4.16 kV	3,65	4,63
Switchgear manejo secado y concentrado	16	400 V	3,8	4,83
Switchgear manejo de gases	18	400 V	4,4	4,86
<b>Sala 7 (Pta. Acido N°3)</b>				
General	7	13.2 kV	3,6	4,52
Secundario TR2	43	4.16 V	3,2	4,02
Secundario TR3	46	400 V	2,8	3,58
Secundario TR4	48	400 V	2,8	3,50
<b>Sala 8 (Pta. Tratamiento escoria)</b>				
General	9	13.2 kV	3,51	4,44
Molinos	20	3.3 kV	4,31	5,07
Flotación Escoria	22	400 V	4,05	4,64
<b>LOCSA 2</b>				
General	10	13.2 kV	3,50	4,45

**Tabla A6.2.2:** Distorsión total de tensión. Comparación de distorsión actual con Caso2

En la siguiente figura se muestra la tensión y corriente en el PCC, se observa además los índices de distorsión obtenidos para la 11<sup>ava</sup> armónica de tensión y corrientes, que corresponde a la de mayor magnitud obtenida.



**Figura 6.2.1:** Gráficos de tensión y corrientes. (a) Gráfico de tensión e el PCC y en barra N°4(13.2 kV). (b) Gráfico de corrientes en el PCC.

## Anexo N°7

### A7.1 Variador de frecuencia Secado (barra N°18)

En esta parte se entrega información acerca del variador de frecuencia de 6 pulsos incorporado en la Sala eléctrica 6, en barra N°18.

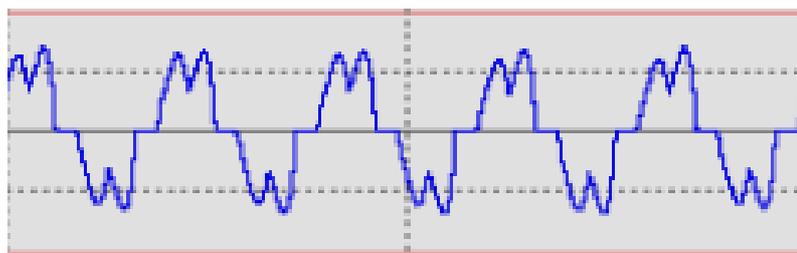
	Urms1 (V)	Irms1 (A)	Psum (W)	Qsum (VAR)	PFsum	Uthd1 (%)	Ithd1 (%)	Iunb (%)
<b>Promedio</b>	398,95	265,99	163461,76	70572,06	0,92	4,13	32,31	7,00
<b>max</b>	401,20	280,90	171700,00	74100,00	0,92	4,39	33,38	8,50
<b>min</b>	397,60	254,70	157500,00	67800,00	0,92	3,99	31,54	5,30

**Tabla A7.1:** Información general de consumo. Variador de frecuencia Secado.

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-11,20
2	0,79	0,49	-47,90
3	9,23	0,54	79,30
4	0,26	0,25	77,10
5	28,95	3,20	90,00
7	9,49	1,03	62,70

9	1,80	0,12	104,00
11	5,66	1,99	88,60
13	2,77	0,88	90,10
15	0,97	0,15	119,00
17	2,10	0,63	55,90
19	1,84	0,40	26,30
21	0,71	0,18	113,00
23	1,12	0,88	41,00
25	1,12	0,44	50,40
27	0,60	0,12	45,40

**Tabla A7.2:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Variador, Sala 6 (Switchgear manejo de gases), barra 400 V.



**Figura A7.1:** Forma de onda corriente de entrada al variador.(medida con instrumento HIOKI)

En la figura anterior se observa la corriente altamente distorsionada, principalmente por 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas, típico de estos equipos de 6 pulsos.

### A7.3 Variador bomba GEHO.

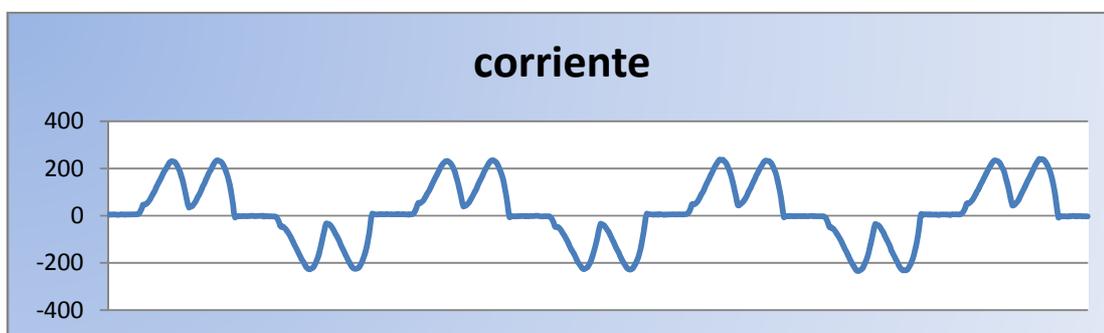
Variador de frecuencia de 6 pulsos asociado al funcionamiento de las bombas GEHO, Sala 8 (Pta. Tratamiento de Escoria).

	<b>Psum (W)</b>	<b>PFsum</b>	<b>Uthd1 (%)</b>	<b>lthd1 (%)</b>
<b>Promedio</b>	78180,00	0,86	2,73	53,15
<b>Max</b>	78200,00	0,86	2,75	53,37
<b>Min</b>	78100,00	0,86	2,70	53,02

**Tabla A7.3:** Información general de consumo. Variador de frecuencia bomba GEHO

	I (%) Medido	I (%) Teórico
<b>5</b>	46,74	17,50
<b>7</b>	22,54	11,00
<b>11</b>	8,70	4,50
<b>13</b>	4,61	2,90
<b>17</b>	3,22	1,50
<b>19</b>	2,52	1,00
<b>23</b>	2,18	0,90
<b>25</b>	1,39	0,80

**Tabla A7.4:** Armónicas individuales de corrientes medidas en Alimentador Variador, Sala8, barra 400 V. Comparación con valores teóricos.



**Figura A7.2:** Forma de onda corriente de entrada al variador. (Medida con instrumento HIOKI)

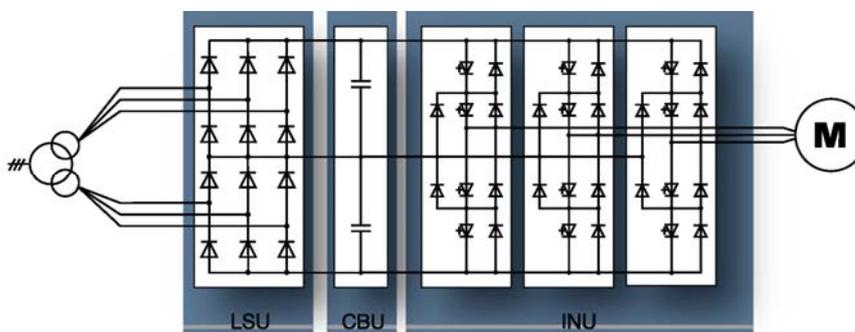
## Anexo N°8

### A8.1 Desarrollo del sistema eléctrico Planta de Acido N°3.

En el presente anexo, se desarrolla un análisis mas detallado de los principales equipos de este sistema. Se muestra información relevante a los equipos asociados al funcionamiento del Soplador principal de esta planta, como son el variador de frecuencia y el transformador de conexión Ddy11. También se analizan las características particulares de los bancos de condensadores. Al final de este anexo se adjunta un plano Unilineal del sistema eléctrico correspondiente a esta planta de ácido (Plano A8.1).

#### A8.1.1 Sistema del Soplador principal.

En el Plano A8.1 unilineal de esta planta (adjunto al final del anexo), se observa que este Soplador, funciona con un variador de frecuencia de 12 pulsos, de 9 MW de potencia y un transformador de tres enrollados, con conexión Ddy11. Un esquema de esta configuración se muestra en la siguiente figura (Ver también Plano A8.2).



**Figura A8.1:** Esquema de conexión, sistema de alimentación del soplador principal sala eléctrica N°7.

Donde:

LSU: Unidad de alimentación de red

CBU: Unidad de bancos de condensadores

INU: Unidad de inversión

En la siguiente tabla se muestra información medida del consumo asociado al Soplador, como la potencia total consumida, factor de potencia y distorsión armónica.

	<b>Psum (W)</b>	<b>PFsum</b>	<b>Uthd1 (%)</b>	<b>lthd1 (%)</b>
<b>Promedio</b>	3359282,61	0,98	1,92	9,93
<b>max</b>	3583000,00	0,98	2,00	10,38
<b>min</b>	3089000,00	0,98	1,84	9,52

**Tabla A8.1:** Información general de consumo. Variador de frecuencia 12 pulsos.

En la siguiente tabla se muestra las armónicas individuales de corriente y tensión medidas en el primario del transformador de alimentación del variador.

orden	I [%]	U [%]	fase
1	100,00	100,00	-8,03
2	0,44	0,03	47,56
3	0,84	0,17	95,69
5	2,10	1,02	-61,24
7	2,56	0,36	12,79
9	0,30	0,04	149,93
11	8,60	1,03	106,57
13	4,42	1,09	142,79
15	0,17	0,04	120,55
17	0,75	0,26	-83,77
19	0,54	0,12	-21,73
21	0,12	0,04	125,76
23	1,20	0,36	135,46
25	1,27	0,27	97,11
27	0,08	0,04	151,26
29	0,33	0,13	118,37

**Tabla A8.2:** Armónicas individuales de tensión y corrientes medidas en Alimentador Variador, Sala 7, barra 13,2 kV.

En la siguiente tabla se comparan los valores medidos con los teóricos o propuestos por la literatura, para este tipo de equipos.

orden	I [%] Medido	I [%] Teórico
5	2,10	2,60
7	2,56	1,60
11	8,28	4,50
13	4,42	2,90
17	0,75	0,20
19	0,54	0,10
23	1,20	0,90
25	1,27	0,80

**Tabla A8.3:** Armónicas individuales de corrientes medidas en Alimentador Variador, Sala 7, barra 13,2 kV. Comparación con valor teórico.

Se observa en la tabla anterior que a pesar de que idealmente no se debieran generar armónicas de orden 5 y 7, la literatura reconoce el hecho de que en realidad esto no ocurre y propone valores para estas armónicas también.[28]

En la siguiente figura se muestra la forma de onda de la corriente medida en el primario del transformador Ddy11. Si se compara con las ondas de corriente medidas para el caso del variador de 6 pulsos del Punto A7.1, o de A7.2 (Anexo N°7), se puede ver que ésta es considerablemente menos distorsionada que las otras.



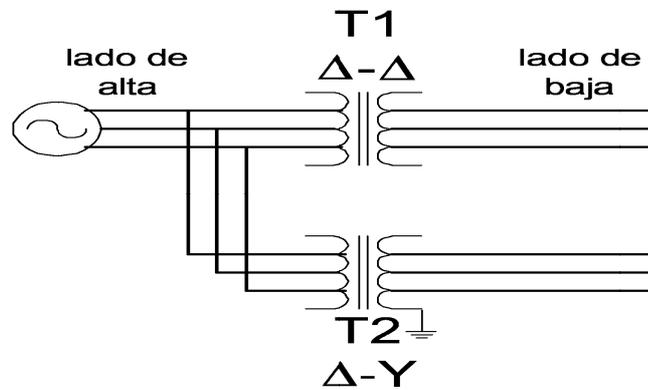
**Figura A8.2:** Forma de onda corriente de entrada al variador. (Medida con instrumento HIOKI)

### A8.1.2 Transformador

Como se menciona anteriormente, este variador de frecuencia se encuentra conectado a la barra principal de la Sala 7 mediante un transformador de tres enrollados, con conexión Ddy11. Esta conexión permite la eliminación de las armónicas de orden 5 y 7, que generalmente son las que generan mayores problemas en los sistemas eléctricos industriales.

Se demuestra este efecto de cancelación de armónicas mediante los siguientes cálculos y consideraciones realizadas:

- Se considera para efectos del cálculo, un equivalente del transformador Ddy11 (tiene el mismo efecto), representado por dos transformadores como muestra la figura A8.3.



**Figura A8.3:** Conexión de dos transformadores para eliminación de armónicas de orden 5 y 7.

- **Cancelación de la quinta armónica**

Debido al desfase de  $330^\circ$  que introduce el transformador T2 (Dy11), las corrientes correspondientes a la 5<sup>ta</sup> armónica están desfasadas en:

$$330 \times 5 = 1650^\circ \quad \text{Con respecto al transformador T1.}$$

Mientras que debido a que la 5<sup>ta</sup> armónica se comporta como componente de secuencia negativa, existen  $-30^\circ$  de desfase, por lo tanto las corrientes en el primario de T2 están desfasadas en:

$$1650 - 30 = 1620^\circ = 180^\circ \quad \text{Con respecto al transformador T1.}$$

Por lo tanto si las magnitudes de las corrientes en los primarios de T1 y T2 son iguales, entonces las 5<sup>tas</sup> armónicas se cancelan y no fluyen a la fuente.

- **Cancelación de la séptima armónica**

Debido al desfase de  $330^\circ$  que introduce el transformador T2 (Dy11), las corrientes correspondientes a la 7<sup>ma</sup> armónica están desfasadas en:

$$330 \times 7 = 2310^\circ \quad \text{Con respecto al transformador T1.}$$

Mientras que debido a que la 7<sup>ma</sup> armónica se comporta como componente de secuencia positiva, existen  $30^\circ$  de desfase, por lo tanto las corrientes en el primario de T2 están desfasadas en:

$$2310 + 30 = 2340^\circ = 180^\circ \quad \text{Con respecto al transformador T1.}$$

Por lo tanto si las magnitudes de las corrientes en los primarios de T1 y T2 son iguales, entonces las 7<sup>mas</sup> armónicas se cancelan y no fluyen a la fuente.

De la Tabla A7.2 se observa la presencia de armónicas de orden 5 y 7, lo que confirma que un funcionamiento real (no idealizado) de estos equipos, resulta en una reducción de estas armónicas y no su cancelación.

Hay que considerar también que esta conexión elimina las armónicas Triplens al presentar una conexión delta en el primario.

### **A8.1.3 Bancos de condensadores.**

En el Plano A8.1 de esta planta (adjunto al final de este anexo) se observa que se tiene tres barras principales, una de 4,16 kV (secundario TR2, barra N°43), que tiene conectado tres bancos de condensadores, cada uno asociado al funcionamiento específico de un motor. Y las otras dos barras de 400 V presentan bancos con varias etapas de 50 kVAR cada una que se van incorporando según la condición de operación del sistema (grado de carga). La primera de estas barras de 400 V (secundario de TR3, barra N°46), tiene 9 etapas, alcanzando un total de 450 kVAR de compensación máxima. La segunda (secundario TR4, barra N°48), tiene un banco que consta de 11 etapas, alcanzando un total de 550 kVAR de compensación máximo. Las características de cada banco se detallan continuación:

- Bancos barra 4.16kV

Cada uno de los bancos de condensadores de esta barra está asociado al funcionamiento de un motor en particular, y solo entran en funcionamiento cuando entra en operación el respectivo motor. Se aprecian dos tipos de bancos de condensadores:

- a) Dos bancos de 175 kVAR, para los motores C1 y C2 respectivamente, de las siguientes características.

$$Q_c = 175 \text{ kVAR} \quad V_{ff} = 4.16 \text{ kV} \quad L = 22.41 \text{ mH}$$

$$Q_c = \frac{V^2}{x_c} \rightarrow x_c = \frac{(4.16 \times 10^3)^2}{175 \times 10^3} = 98.89 \rightarrow C = 32 \text{ uF}$$

Frecuencia de resonancia.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C \times L}} = 1181 \rightarrow f_r = 188 \text{ Hz}$$

Reactancia inductiva.

$$x_L = 7.04 \Omega$$

Por lo tanto estos son bancos de 175 kVAR, con un reactor al 7% ( $\rho = 7\%$ ), y frecuencia de resonancia o sintonía entre la tercera y la cuarta armónica (188 Hz).

- b) Banco de 250 kVAR, conectado para funcionar con el motor C3, de las siguientes características.

$$Q_c = 250 \text{ kVAR} \quad V_{ff} = 4.16 \text{ kV} \quad L = 31.89 \text{ mH}$$

$$Q_c = \frac{V^2}{x_c} \rightarrow x_c = \frac{(4.16 \times 10^3)^2}{250 \times 10^3} = 69.22 \rightarrow C = 46 \text{ uF}$$

Frecuencia de resonancia.

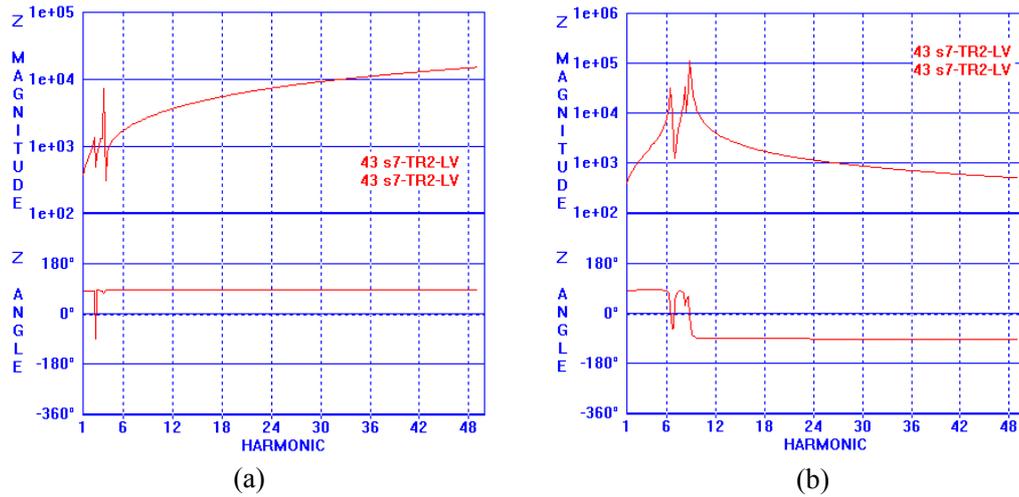
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C \times L}} = 826 \rightarrow f_r = 131.4 \text{ Hz}$$

Reactancia inductiva.

$$x_L = 10.02 \Omega$$

Por lo tanto estos son bancos de 250 kVAR, con un reactor al 14% ( $\rho = 14\%$ ), y frecuencia de resonancia o sintonía entre la segunda y la tercera armónica (131 Hz).

Gráficamente se observa el efecto del uso de estos bancos, en la siguiente figura, donde se grafica el comportamiento de la impedancia en función de la frecuencia en la barra N°43 (secundario TR2), o barra de conexión de estos equipos.



**Figura A8.3:** Impedancia vs frecuencia vista en barra N°43(secundario TR2). (a) Caso con reactor anti-resonante. (b) Caso sin reactor.

De la figura anterior se confirma que gracias a los reactores conectados en serie con el banco, se logra evitar que se produzca una resonancia paralelo en torno a la 7<sup>ma</sup> armónica, lo que aumenta la distorsión considerablemente, esto se confirma mas adelante con las tablas A8.4 y A8.5.

- **Bancos en barras de 400V**

En ambas barras de 400 V los bancos son muy similares, solo se diferencian en el número de etapas que tiene cada uno (la barra N°46 tiene 9 etapas, y la barra N°48 tiene 11). Cada una de estas etapas es un banco de 50 kVAR, con un reactor en serie y cumple con las siguientes características.

$$Q_c = 50 \text{ kVAR} \quad V_{ff} = 400 \text{ V} \quad \rho = 7 \%$$

$$Q_c = \frac{V^2}{x_c} \rightarrow x_c = \frac{(400)^2}{50 \times 10^3} = 3.2 \rightarrow C = 995 \text{ uF}$$

Dado que se tiene reactores al 7 %, lo que significa que la reactancia inductiva es el 7 % de la capacitiva, por lo tanto:

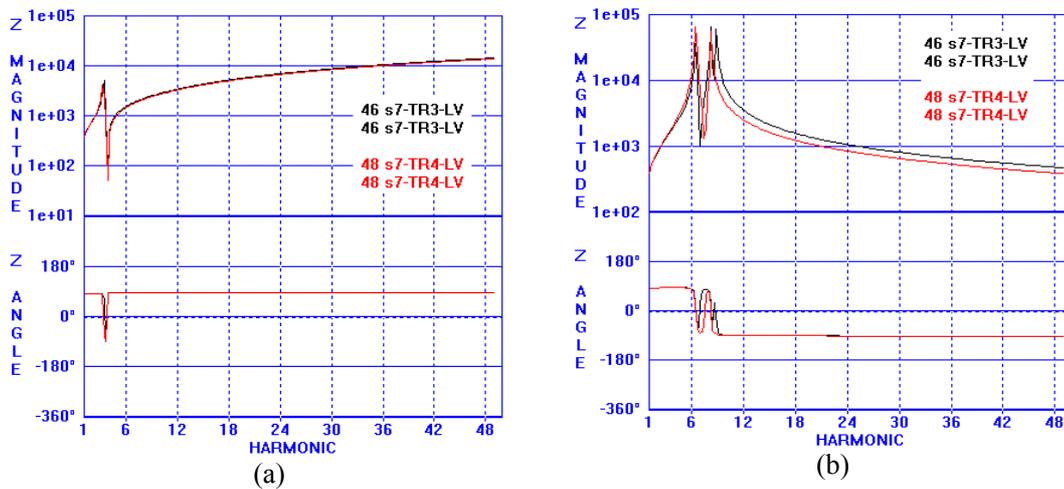
$$x_L = \omega \times L = 0.07 \times x_C = 0.224 \rightarrow L = 0.713 \text{ mH}$$

Frecuencia de resonancia.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C \times L}} = 1187.25 \rightarrow f_r = 189 \text{ Hz}$$

Por lo tanto cada etapa es un banco de 50 kVAR, con un reactor al 7% ( $\rho = 7\%$ ), y frecuencia de resonancia o sintonía entre la tercera y la cuarta armónica (188 Hz). Cabe destacar que la ventaja de estos bancos, es que son capaces de mantener una frecuencia de resonancia del banco, lejos de las armónicas características de la red y sin importar la cantidad de etapas que se tenga, el grado de carga, o ante cambios el sistema. En ese sentido son robustos (no cambian su frecuencia de sintonía con facilidad).

En la siguiente Figura A8.4 se observa la respuesta en frecuencia de la impedancia en barras de 400 V (barra N°46 y 48, secundarios TR3 y TR4 respectivamente).



**Figura A8.4:** Impedancia vs frecuencia vista en barras N° 46 y 48(secundario TR3 y TR4 respectivamente). (a) Caso con reactores anti-resonante. (b) Caso sin reactores.

En la figura anterior es posible verificar la operación de los bancos y el efecto que tienen, llevando la frecuencia de resonancia a los 189 Hz, evitando una resonancia paralelo en torno a la 7<sup>ma</sup> armónica.

Se observa que todos los bancos mencionados anteriormente, quedan sintonizados entre la 3<sup>ra</sup> y 4<sup>ta</sup>, o entre la 2<sup>da</sup> y 3<sup>ra</sup> armónicas, lo que genera un peak de impedancia (resonancia paralelo) a frecuencias bajas. Con esto se evita que la frecuencia de resonancia de los bancos coincida con una armónica característica (usualmente la 5<sup>ta</sup> o 7<sup>ma</sup>).

En las siguientes tablas se muestra como afecta el uso de estos bancos antiresonantes la distorsión total de tensión y corrientes, en las barras mencionadas anteriormente. Se comparan ambos casos, considerando los reactores en serie (configuración antiresonante) y sin considerarlos.

Sistema Subestación 1A					
Barra	Tensión	THD <sub>v</sub> (%)			
Sala 7 (Pta. Acido N°3)		Medido	Sin Reactores	Sin Reactores	Con reactores
Secundario TR2, N°43	4,16 V	3	5,29	8,98	3,2
Secundario TR3, N°46	400 V	1,99	5,89	9,31	2,81
Secundario TR4, N°48	400 V	1,65	6,15	17,03	2,8

**Tabla A8.4:** THD<sub>v</sub>, comparación con los casos, sin reactores y el caso con reactores (banco antiresonante).

Sistema Subestación 1A					
Barra	Tensión	THD <sub>i</sub> (%)			
Sala 7 (Pta. Acido N°3)		Medido	Sin Reactores	Sin Reactores	Con reactores
Secundario TR2, N°43	4,16 V	2,56	14,3	24,7	2,5
Secundario TR3, N°46	400 V	3,16	18,8	29,5	3,7
Secundario TR4, N°48	400 V	5,52	19,9	60,7	4,6

**Tabla A8.5:** THD<sub>i</sub>, comparación con los casos, sin reactores y el caso con reactores (banco antiresonante).

El caso en rojo corresponde a la situación mas desfavorable encontrada, la que corresponde a considerar los bancos de condensadores sin los reactores en serie y además tomando en cuenta los dos transformadores principales de la Subestación 1A (de 110 kV a 13,2 kV). Se observa que al considerar los dos transformadores, si bien no cambia la frecuencia de resonancia del sistema, varía la relación X/R del sistema (aumenta), provocando así una mayor distorsión.

## **Plano A8.1**

## Referencias

- [1] ACEVEDO DONOSO FRANCISCO: "COMPONENTES ARMÓNICAS EN REDES DE DISTRIBUCION ELECTRICAS: CONCEPTOS, NORMA VIGENTE EN CHILE Y ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA". [S.A.]
- [2] ARRILAGA J., D.A. BRADLEY, P.S. BODGER. "POWER SYSTEM HARMONICS" 1985. 336P.
- [3] ALEXANDER KUSKO, MARC T. THOMPSON: "POWER QUALITY IN ELECTRICAL SYSTEMS". 2007. 225P
- [4] A. ALZATE, A. GUTIÉRREZ, L.M. TORRES. : "ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS CON FILTROS ACTIVOS DE POTENCIA", SICEL 2007, NOVIEMBRE 2007, 5P.
- [5] AUGER AYCAGUER H.: "ELECTRONICA DE POTENCIA, GUÍA DE CLASES". 2007. 26P
- [6] AYSÉN ARSOY, S. MARK HALPIN, YILU LIU, PAULO F. RIBEIRO : "MODELING AND SIMULATION OF POWER SYSTEM HARMONICS". 1999.
- [7] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. : "NORMA TÉCNICA DE CONTAMINACIÓN POR INYECCION DE ARMÓNICAS DE TENSIÓN Y CORRIENTE". ARTÍCULO 250 DEL D.S.327/97. (11P)
- [8] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. : "NORMA TÉCNICA: PROCEDIMIENTO DE MEDICIONES Y REGISTRO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE SUMINISTRO (ARTICULO 241° DEL D.S.327/97) (24P)
- [9] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. : "NORMA TÉCNICA DE SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO", MAYO 2005. 131P. (CAPITULO 5)
- [10] DEREK A. PAICE : "POWER ELECTRONIC CONVERTER HARMONICS". 1996. 200P
- [11] DE LA ROSA, FRANCISCO. : "HARMONICS AND POWER SYSTEMS", 2006.
- [12] FIERRO, CRISTIAN. : "INFLUENCIA EN EL DESFASE ANGULAR EN LA DISTORSIÓN Y RESONANCIA ARMÓNICA DE REDES: APLICACIÓN A UN PROCESO MINERO", MEMORIA DE TÍTULO, UNIV DE CHILE. 1993.
- [13] IEEE STD 519-1992: "RECOMMENDED PRACTICES AND REQUIREMENTS FOR HARMONIC CONTROL IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS". JANUARY 1993.
- [14] IEEE STD 1159-1995: "IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY". JUNE 1995.
- [15] JORGE PONTT, CESAR PONTT, JOSÉ RODRÍGUEZ. : "COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA CON FILTROS DE ARMONICAS EN REDES ELECTRICAS INDUSTRIALES". [S.A]

- [16] JORGE PONTT O., CÉSAR PONTT O., LEOPOLDO SILVA B., JOSÉ RODRIGUEZ P.: SEMINARIO “ARMONICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS” UTFSM. JULIO 1996.
- [17] MACK GRADY : “HARMONICS AND HOW THEY RELATE TO POWER FACTOR”. NOVIEMBRE 1993.
- [18] MACK GRADY : “PCFLOH”, MANUAL PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS. MAYO 1999.
- [19] MACK GRADY : “UNDERSTANDING POWER SYSTEM HARMONICS”. JUNIO 2006.
- [20] MCGRANAGHAN MARK. : “OVERVIEW OF THE GUIDE FOR APPLYING HARMONIC LIMITS ON POWER SYSTEMS – IEEE P519A”, 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER ICHQP '98, OCTUBRE 1998.
- [21] MELO CRISTIAN ERNESTO. : “ ANALISIS ARMÓNICO EN RED ELECTRICA DE FFCC TTE-8, CODELCO CHILE, DIVISIÓN EL TENIENTE. MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA. UNIVERSIDAD DE CHILE. 2005. (85p)
- [22] M. HALPIN. : “TEST SYSTEMS FOR HARMONICS MODELING AND SIMULATION”[S.A]
- [23] OBANDO, GONZALO. : “ANÁLISIS DE PERTURBACIONES Y CRITERIOS DE ATENUACIÓN DE ARMÓNICAS EN SISTEMAS : MEDICIONES Y MODELACIÓN DE UN CASO REAL”, MEMORIA DE TÍTULO, UNIV DE CHILE. 1989.
- [24] PUSKARICH A. KEVIN, W. EDWARD REID, PAUL S. HAMER. : “HARMONIC EXPERIENCES WITH A LARGE LOAD-COMMUTATED INVERTER DRIVE”. FEBRERO 2001, 8P
- [25] QUISPE OQUEÑA ENRIQUE, AGUADO QUINTERO JAIR. :”CONCEPTUALIZACIÓN Y MEDICION DE LA POTENCIA REACTIVA INCLUYENDO EL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS DE TENSION Y CORRIENTE”. SICEL' 2001. COLOMBIA. 8P
- [26] ROBERT G. ELLIS. : “HARMONIC ANALYSIS OF INDUSTRIAL POWER SYSTEMS”. IEEE TRANS. IND. APPLICAT., ABRIL 1996, 5P.
- [27] SALVADOR ACEVEDO P. : “CONEXIONES DE TRANSFORMADORES PARA ELIMINAR ARMONICAS”. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ITESM, CAMPUS MONTERREY. (S.A).5P
- [28] STRAFORD RAY P. :”ANALYSIS AND CONTROL OF HARMONIC CURRENT IN SYSTEMS WITH STATIC POWER CONVERTERS”. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APLICATIONS. FEBRERO 1981.
- [29] TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION, "THE MODELING AND SIMULATION OF THE PROPAGATION OF HARMONICS IN ELECTRIC POWER NETWORKS PART I : CONCEPTS, MODELS AND SIMULATION TECHNIQUES," IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 11, No.1, JANUARY 1996, PP. 452-465.
- [30] THOMAS M. BLOOMING, DANIEL J. CARNOVALE: “APPLICATION OF IEEE STD 519-1992 HARMONICS LIMITS”, CONFERENCE RECORD OF THE IEEE IAS PULP AND PAPER CONFERENCE. 2006.

[31]VÁSQUEZ, LUIS ANTONIO. : “ESTUDIOS DE RESONANCIAS ARMÓNICAS EN LOS TERCARIOS DE LOS AUTOTRANSFORMADORES DEL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL PARA LA CONEXIÓN SEGURA DE BANCOS DE CC/EE”, MEMORIA DE TÍTULO, UNIV. DE CHILE. 2001.

[32] “REACTORS AND SHUNT CAPACITORS BANKS”, APPLICATION NOTE.  
WWW.NOKIANCAPACITORS.COM.

