

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**ANÁLISIS DE ARMÓNICOS**

**EN UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ACEROS**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**LUIS ALBERTO PECHE GONZALES**

**PROMOCIÓN**

**2009-II**

**LIMA-PERÚ**

**2014**

**ANÁLISIS DE ARMÓNICOS**  
**EN UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ACEROS**

**Dedico este trabajo a mis padres Alberto Peche y Lucy Gonzales,  
y a las personas que en todo momento me brindaron su apoyo.**

## **SUMARIO**

La industria de fabricación de aceros, en adelante "Planta de Aceros", se encuentra ubicada al sur del país, y cuenta con una capacidad de producción de 792,000 toneladas anuales de acero líquido y 1,100,00 toneladas métricas anuales de productos terminados. Por otro lado, la subestación eléctrica de la Planta de Aceros se encuentra conformada principalmente por cuatro transformadores de potencia, un compensador estático de potencia reactiva (SVC), filtro de armónicas, hornos eléctricos, etc.

El presente informe mostrará los resultados de las evaluaciones de armónicas realizadas en la Planta de Aceros. Para ello, se realizaron mediciones eléctricas en diversos puntos eléctricos de la subestación Planta de Aceros y adicionalmente en la subestación que suministra de energía eléctrica a la planta mediante una línea de transmisión en 220 kV. Dicha subestación, a la cual denominaremos "SEINDEP", se conecta al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). En consecuencia, el análisis de armónicas en la Planta de Aceros y en la subestación SEINDEP permitirá determinar si la fuente de armónicas, la cual provoca los altos niveles de distorsión armónica de tensión en las barras de 220 kV, proviene del SEIN (barra SEINDEP) o de la carga (barra Planta de Aceros). Cabe precisar que en la actualidad los niveles de distorsión en dichos nodos se encuentran por encima de la tolerancia permitida por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, en adelante "NTCSE".

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA</b>	
1.1 Descripción del Problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes	5
2.2 El Teorema de Fourier y las Armónicas	6
2.3 Simetría de la Forma de Onda	7
2.4 Secuencia de Fases	7
2.5 Índice Armónico	9
2.5.1 Factor de Distorsión Armónica de Tensión y Corriente	9
2.5.2 Distorsión Total de Demanda	10
2.5.3 Factor K	10
2.6 Sistema Eléctrico Bajo Condiciones No Sinusoidales	11
2.6.1 Tensión y Corriente RMS	11
2.6.2 Potencia Activa y Reactiva Real	12
2.6.3 Potencia Aparente	12
2.6.4 Distorsión de Potencia	13
2.6.5 Factor de Potencia Verdadero, "True"	13

2.7	Distorsión Armónica en los Sistemas Eléctricos	14
2.7.1	Fuentes de Armónicos	15
2.7.2	Efectos de Armónicos	34
2.8	Marco Normativo para el Control de Armónicos	49
2.8.1	Control de la Calidad de Producto Según la NTCSE	49

### **CAPITULO III**

#### **SISTEMA ELÉCTRICO DE LA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ACEROS**

3.1	Descripción del Sistema Eléctrico	53
3.2	Consideraciones	55
3.3	Metodología para el Análisis de Armónicos	56

### **CAPITULO IV**

#### **RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS**

4.1	Evaluación N° 1: Análisis de Armónicos en las Subestaciones Planta de Aceros y SEINDEP	57
4.1.1	Puntos de Medición Evaluados	58
4.1.2	Análisis de Indicadores de Calidad Según NTCSE	58
4.1.3	Análisis de Armónicos	69
4.1.4	Análisis de Dispersión Armónica	77
4.1.5	Análisis del Comportamiento Diario de la 5° Armónica	80
4.2	Evaluación N° 2: Análisis de Armónicos en la Subestación Planta de Aceros con el Ingreso y Salida de Operación del Horno Eléctrico N° 1	82
4.2.1	Puntos de Medición Evaluados	82
4.2.2	Análisis de la Tensión	83
4.2.3	Análisis de Armónicos	84
4.2.4	Análisis de Flicker	92
4.3	Evaluación N° 3: Análisis de Armónicos en la Subestación SEINDEP con el Ingreso y Salida de Operación del Horno Eléctrico N° 1 y N° 2	93
4.3.1	Puntos de Medición Evaluados	93
4.3.2	Análisis de la Tensión	94

4.3.3	Análisis de Armónicos	95
4.3.4	Análisis de Flicker	107
4.4	Análisis del Scan de Frecuencia	108
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		114
<b>ANEXO A: COMPORTAMIENTO DE LA 5° ARMÓNICA EN EL SEIN</b>		118
<b>ANEXO B: ESPECTRO DE ARMÓNICAS DE TENSIÓN</b>		123
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		126

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo, Informe de Suficiencia titulado *Análisis de Armónicos en una Industria de Fabricación de Aceros*, se busca determinar si la fuente de armónicos proviene del sistema eléctrico nacional (SEIN) o de la Planta de Aceros.

Dado que el Comité de Operación Económica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (COES-SINAC) prevé que el alto nivel de distorsión armónica de tensión, presentada en la subestación SEINDEP 220 kV, es generada por cargas no lineales pertenecientes a la Planta de Aceros, se determinará mediante el registro de mediciones eléctricas con equipos analizadores de energía y su correspondiente evaluación de armónicas, que la Planta de Aceros no es la responsable del alto nivel de distorsión armónica de tensión en el nodo de 220 kV del SEIN.

La metodología utilizada para el desarrollo del presente trabajo, ha sido en primer lugar, realizar mediciones eléctricas por un período de una semana (7 días) en los puntos eléctricos en donde se prevé la existencia de fuentes de corrientes armónicas. Estos registros nos permitirán caracterizar el comportamiento de las tensiones y corrientes armónicas. En segundo lugar, procesar la información obtenida bajo los lineamientos establecidos por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE). En tercer lugar, evaluar el impacto que provoca la operación de los hornos eléctricos de la Planta de Aceros sobre las tensiones armónicas. En cuarto lugar, analizar las armónicas individuales que resulten fuera de rango según la NTCSE. Finalmente, realizar análisis de frecuencia con la finalidad de determinar posibles resonancias en el sistema eléctrico de la Planta de Aceros, para ello se utilizará el modelo eléctrico del SEIN mediante el software Digsilent Power Factory.

Por otro lado, las limitaciones del presente trabajo, abarca la evaluación de los armónicos en la subestación Planta de Aceros (en el nivel de muy alta tensión y media tensión) y en la subestación SEINDEP 220 kV en condiciones de operación normal.

El equipamiento de la subestación Planta de Aceros se encuentra conformada principalmente por cuatro transformadores de potencia, las cuales a su vez suministran

de energía eléctrica a dos hornos eléctricos (horno eléctrico N° 1 y N° 2), una planta de laminación y una planta de oxígeno praxair.

El presente trabajo se desarrolla en cuatro capítulos:

El Primer Capítulo, Planteamiento de Ingeniería al Problema, se detalla la problemática del tema tratado y se indican los objetivos a conseguir.

El Segundo Capítulo, Marco Teórico, indica los antecedentes del problema planteado, así como una breve introducción de las causas y efectos de los armónicos. Además se indica el marco regulatorio para su control.

El Tercer Capítulo, Sistema Eléctrico de la Industria de Fabricación de Aceros, describe la topología del sistema eléctrico de la Planta de Aceros, las consideraciones y la metodología utilizada para el análisis de armónicos.

El Cuarto Capítulo, Resultados del Análisis de Armónicos, presenta los resultados de las evaluaciones de armónicos realizadas en las subestaciones Planta de Aceros y SEINDEP.

El informe finaliza con las conclusiones y recomendaciones de los temas tratados, se presentan los anexos y finalmente se brinda la bibliografía utilizada.

# **CAPITULO I**

## **PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA**

### **1.1 Descripción del Problema**

En la actualidad, muchas redes de alta tensión del sistema eléctrico nacional presentan problemas de distorsión armónica de tensión, debido principalmente a la proliferación de cargas contaminantes en las zonas residenciales, comerciales e industriales, lo cual lleva a múltiples fallas en el equipamiento eléctrico del cliente y/o de la empresa de distribución eléctrica. Por tal razón, las empresas fiscalizadoras y supervisoras de energía eléctrica del país, buscan mediante mediciones eléctricas y su correspondiente análisis de armónicos en puntos eléctricos en donde se prevé la presencia de cargas contaminantes, determinar el origen de la inyección de corriente armónica, para su posterior control o eliminación.

La Planta de Aceros, requiere para la fundición de la chatarra el uso de hornos eléctricos, los cuales son las principales fuentes de generación armónica en una industria de este tipo. Por tal razón, dicha planta dispone de filtros de armónicos para la mitigación de las corrientes armónicas generadas por los hornos eléctricos. Sin embargo, la distorsión armónica de tensión, en la barra de 220 kV, de las subestaciones Planta de Aceros y SEINDEP, se encuentra por encima de los límites permitidos por la NTCSE. Por consiguiente, se requiere realizar evaluaciones de armónicos para determinar si la distorsión de tensión es causada por las cargas de la Planta de Aceros o por cargas que se encuentran conectadas a las redes del sistema interconectado nacional.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar mediante el análisis de armónicos el impacto que produce la operación de la Planta de Aceros, en el nivel de 220 kV, sobre los siguientes parámetros eléctricos: nivel de tensión RMS, nivel de flicker, tensiones y corrientes armónicas individuales más representativas, y distorsión armónica de tensión (THD<sub>V</sub>).

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos del presente informe son:

- Determinar los niveles de tensión RMS en las subestaciones SEINDEP y Planta de Aceros.
- Determinar los niveles de flicker y armónicas de tensión en las barras de 220 kV de las subestaciones SEINDEP y Planta de Aceros, bajo los lineamientos establecidos por la NTCSE.
- Evaluar los niveles de distorsión armónica de tensión (THD<sub>V</sub>) en las barras de 220 kV de la subestación Planta de Aceros y subestación asociada (SEINDEP).
- Evaluar el impacto que genera la operación de los hornos eléctricos N° 1 y N° 2 de la Planta de Aceros, sobre la 5° armónica de tensión y el flicker, en la barra de 220 kV de la subestación SEINDEP.
- Evaluar el comportamiento de las armónicas de tensión de orden 5, 13 y 15 en las subestaciones SEINDEP y Planta de Aceros.
- Evaluar en los nodos de muy alta tensión y media tensión, la existencia de frecuencias resonantes mediante el análisis del scan de frecuencia.
- Analizar el comportamiento diario de la 5° armónica de tensión, en el nivel de 220 kV, de las subestaciones SEINDEP y Planta de Aceros.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes**

La mayoría de equipos electrónicos modernos presentan un comportamiento no lineal lo cual causa la distorsión en las corrientes, y por consecuencia en las tensiones, tanto de los equipos electrónicos como de la red eléctrica a la cual se conectan.

Asimismo, cargas no lineales convencionales tales como hornos de arco eléctrico, motores eléctricos y transformadores, entre otros, son también generadores de distorsión armónica.

El uso de equipos electrónicos modernos y otras cargas no lineales convencionales en zonas residenciales, comerciales e industriales ha provocado en el sistema eléctrico del país una "contaminación armónica" generalizada.

Actualmente, el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional se ve afectado principalmente por la presencia de la 5° armónica de tensión. Nodos como Marcona 220 kV, Talara 220 kV, Desierto 220 kV, Cantera 220 kV, Chavarría 220 kV, Cajamarca Norte 220 kV, Pomacocha 220 kV, Pachachaca 220 kV presentan niveles de 5° armónica de tensión que superan la tolerancia establecida por la NTCSE (ver Anexo A).

La demanda del país exhibe una tasa de crecimiento alta, por lo tanto el riesgo de tener niveles de disturbio críticos en pocos años es grande. Esto sugiere realizar análisis de armónicos en los puntos eléctricos en donde se prevé la presencia de fuentes de corrientes armónicas con la finalidad de identificar su origen y su posterior mitigación o eliminación.

En este capítulo se presentan algunos conceptos básicos que son necesarios conocer para comprender el problema de los armónicos en sistemas eléctricos.

## 2.2 El Teorema de Fourier y las Armónicas

La serie de Fourier representa una manera efectiva de estudiar el análisis de distorsión armónica, la cual nos permite examinar la forma de onda distorsionada a través de la descomposición.

Generalmente, una forma de onda periódica puede expresarse como una suma infinita de funciones sinusoidales que incluya senos y cosenos, tal como se muestra a continuación:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(hw_0t) + B_h \sin(hw_0t)] \quad \dots(2.1)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(hw_0t + \varphi_h) \quad \dots(2.2)$$

Donde:

$f(t)$ : Es una función periódica de frecuencia  $f_0$ , frecuencia angular  $w_0 = 2\pi f_0$  y período  $T = 1/f_0 = 2\pi/w_0$ .

$C_1 = \sin(w_0t + \varphi_1)$ : Representa la componente fundamental.

$C_h = \sin(hw_0t + \varphi_h)$ : Representa la armónica  $h$  de amplitud  $C_h$ , frecuencia  $hf_0$  y fase  $\varphi_h$ .

Los coeficientes de la serie de Fourier están conformados por:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(w_0t) \quad \dots(2.3)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(hw_0t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hx) dx \quad \dots(2.4)$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(hw_0t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(hx) dx \quad \dots(2.5)$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad \dots(2.6)$$

$$\varphi_h = \tan^{-1} \left( \frac{A_h}{B_h} \right) \quad \dots(2.7)$$

### 2.3 Simetría de la Forma de Onda

- La simetría impar se caracteriza por  $f(-t) = -f(t)$  y resulta en una expansión de la serie de Fourier que contiene solo términos senos.
- La simetría par se caracteriza por  $f(-t) = f(t)$  y resulta en una expansión de la serie de Fourier que contiene solo términos cosenos.
- Formas de onda con simetría de media onda,  $f(t \pm T/2) = -f(t)$ , tienen componentes DC cero y resultan en la cancelación de armónicos de orden par.

### 2.4 Secuencia de Fases

En un sistema trifásico balanceado, las componentes armónicas individuales son de secuencia positiva, negativa o cero, las cuales pueden observarse mediante la representación de la serie de Fourier de las tensiones de fase.

$$\begin{aligned} v_a(t) = & V_1 \cos(\omega_0 t) + V_2 \cos(2\omega_0 t) \\ & + V_3 \cos(3\omega_0 t) + V_4 \cos(4\omega_0 t) \\ & + V_5 \cos(5\omega_0 t) + V_6 \cos(6\omega_0 t) + \dots \end{aligned} \quad \dots(2.8)$$

$$\begin{aligned} v_b(t) = & V_1 \cos(\omega_0 t - 120) + V_2 \cos(2\omega_0 t - 240) \\ & + V_3 \cos(3\omega_0 t - 360) + V_4 \cos(4\omega_0 t - 480) \\ & + V_5 \cos(5\omega_0 t - 600) + V_6 \cos(6\omega_0 t - 720) + \dots \\ = & V_1 \cos(\omega_0 t - 120) + V_2 \cos(2\omega_0 t + 120) \\ & + V_3 \cos(3\omega_0 t) + V_4 \cos(4\omega_0 t - 120) \\ & + V_5 \cos(5\omega_0 t + 120) + V_6 \cos(6\omega_0 t) + \dots \end{aligned} \quad \dots(2.9)$$

$$\begin{aligned}
v_c(t) &= V_1 \cos(\omega_0 t + 120) + V_2 \cos(2\omega_0 t + 240) \\
&\quad + V_3 \cos(3\omega_0 t + 360) + V_4 \cos(4\omega_0 t + 480) \\
&\quad + V_5 \cos(5\omega_0 t + 600) + V_6 \cos(6\omega_0 t + 720) + \dots \\
&= V_1 \cos(\omega_0 t + 120) + V_2 \cos(2\omega_0 t - 120) \\
&\quad + V_3 \cos(3\omega_0 t) + V_4 \cos(4\omega_0 t + 120) \\
&\quad + V_5 \cos(5\omega_0 t - 120) + V_6 \cos(6\omega_0 t) + \dots \quad \dots(2.10)
\end{aligned}$$

La tensión por fase RMS es:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms}^2} \quad \dots(2.11)$$

Asumiendo un punto inicial de conexión, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
v_{ab}(t) &= v_a(t) - v_b(t) \\
&= \sqrt{3} [V_1 \cos(\omega_0 t + 30) + V_2 \cos(2\omega_0 t - 30) \\
&\quad + V_4 \cos(4\omega_0 t + 30) + V_5 \cos(5\omega_0 t - 30) + \dots] \quad \dots(2.12)
\end{aligned}$$

De lo anterior, se observa que los armónicos triples desaparecen en la tensión de línea. La tensión de línea RMS es entonces:

$$V_{LL,rms} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{3 \sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms}^2}, \quad h \neq 3n \text{ (múltiplos de 3)} \quad \dots(2.13)$$

En la siguiente tabla se presenta la configuración de secuencia de fase armónica en un sistema trifásico balanceado.

**Tabla N°2.1** Secuencia de Fase Armónico.

<b>Orden (h)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Secuencia</b>	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
<b>Orden (h)</b>	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<b>Secuencia</b>	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
<b>Orden (h)</b>	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
<b>Secuencia</b>	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

<b>Orden (h)</b>	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
<b>Secuencia</b>	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

## 2.5 Índice Armónico

En la actualidad, tanto las compañías eléctricas como los usuarios, les representa una preocupación creciente la proliferación de los equipos perturbadores (cargas no lineales). Por consiguiente, se venen la necesidad de establecer índices armónicos con el propósito de controlar el contenido armónico en el sistema eléctrico.

En el análisis de armónicos existen varios índices importantes, los cuales son usados para describir el efecto de las armónicas. A continuación se presentan los siguientes índices.

### 2.5.1 Factor de Distorsión Armónica de Tensión y Corriente

El factor de distorsión de tensión, también conocido como distorsión armónica total de tensión  $THD_v$ , se define como:

$$THD_v = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{1rms}}\right)^2 - 1} \quad \dots(2.14)$$

Cabe mencionar que para sistemas eléctricos de baja y media tensión el  $THD_v$  no debe sobrepasar el 8% y para sistemas de alta y muy alta tensión el  $THD_v$  debe ser menor al 3% según los lineamientos establecidos en la NTCSE.

Por otro lado, el factor de distorsión de corriente, más conocido como distorsión armónica total de corriente  $THD_i$ , se define como:

$$THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1rms}}\right)^2 - 1} \quad \dots(2.15)$$

Donde  $V_1$  e  $I_1$  representan la tensión y corriente pico RMS fundamental respectivamente.

### 2.5.2 Distorsión Total de Demanda

Se define de la siguiente manera:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad \dots(2.16)$$

Donde  $I_L$  es la máxima corriente de carga a la frecuencia fundamental en el punto de acoplamiento común (PCC), calculado como la corriente promedio de la máxima demanda durante los doce meses previos.

### 2.5.3 Factor K

El factor K indica la capacidad de un transformador para alimentar cargas no sinusoidales sin sobrecalentarse. El factor K está dado por la siguiente expresión:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 \cdot h^2 \quad \dots(2.17)$$

Donde  $I_h$  es el valor efectivo de la corriente armónica h, en p.u. del valor efectivo de la corriente total.

En el caso en que los datos de las corrientes armónicas se tengan en porcentaje o en por unidad (p.u.) de la componente fundamental, el factor K se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$K = \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \left[ 1 + \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2 \right] = \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \left[ 1 + \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2 \right] \quad \dots(2.18)$$

Donde:

$I_1$ : Es el valor efectivo de la corriente RMS fundamental.

$I$  : Es el valor efectivo de la corriente RMS total.

$I_h$ : Es el valor efectivo de la corriente armónica  $h$ , en p.u. de la corriente fundamental.

## 2.6 Sistema Eléctrico Bajo Condiciones No Sinusoidales

### 2.6.1 Tensión y Corriente RMS

Una onda periódica distorsionada de corriente o tensión, expandida en una serie de Fourier es expresada de la siguiente forma:

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(hw_0t + \theta_h) \quad \dots(2.19)$$

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(hw_0t + \theta_h) \quad \dots(2.20)$$

Donde:

$I_h$  : Es la corriente pico de orden armónico "h".

$V_h$ : Es la tensión pico de orden armónico "h".

$\theta_h$  : Es la fase de la corriente de orden armónico "h".

$\theta_h$ : Es la fase de la tensión de orden armónico "h".

$w_0$  : Es la frecuencia angular fundamental,  $w_0 = 2\pi f_0$ .

$f_0$  : Es la frecuencia fundamental.

Por otro lado, la tensión y corriente RMS pueden ser expresados en términos de  $THD_v$ , tal y como se observa a continuación:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms}^2} = V_{1,rms} \sqrt{1 + THD_v^2} \quad \dots(2.21)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h,rms}^2} = I_{1,rms} \sqrt{1 + THD_i^2} \quad \dots(2.22)$$

### 2.6.2 Potencia Activa y Reactiva Real

Las siguientes expresiones se aplican para la potencia activa y reactiva.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad \dots(2.23a)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \phi_h) \quad \dots(2.23b)$$

$$= \sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms} I_{h,rms} \cos(\theta_h - \phi_h) \quad \dots(2.23c)$$

La potencia reactiva se define como:

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \phi_h) \quad \dots(2.24a)$$

$$= \sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms} I_{h,rms} \sin(\theta_h - \phi_h) \quad \dots(2.24b)$$

### 2.6.3 Potencia Aparente

Basados en las formulas de la tensión y corriente RMS, la potencia aparente se define como:

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad \dots(2.25a)$$

$$= \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms}^2 I_{h,rms}^2} \quad \dots(2.25b)$$

$$=V_{1\text{rms}} I_{1\text{rms}} \sqrt{1+\text{THD}_v^2} \sqrt{1+\text{THD}_i^2} \quad \dots(2.25c)$$

$$=S_1 \sqrt{1+\text{THD}_v^2} \sqrt{1+\text{THD}_i^2} \quad \dots(2.25d)$$

Donde  $S_1$  es la potencia aparente a la frecuencia fundamental.

#### 2.6.4 Distorsión de Potencia

La distorsión de potencia aparece cuando los armónicos están presentes. Por consiguiente, la potencia aparente no solo está compuesta por la potencia activa y potencia reactiva, sino también por la distorsión de potencia, la cual se define como:

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad \dots(2.26)$$

#### 2.6.5 Factor de Potencia Verdadero, "True"

Con el propósito de examinar el impacto de las armónicas en el factor de potencia, es necesario considerar el verdadero factor de potencia ( $f_{p_{true}}$ ) que se define como:

$$f_{p_{true}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\text{THD}_v^2} \sqrt{1+\text{THD}_i^2}} = f_{p_{desp}} \cdot f_{p_{dist}} \quad \dots(2.27)$$

$$f_{p_{desp}} = \frac{P}{S_1} \quad \dots(2.28)$$

$$f_{p_{dist}} = \frac{1}{\sqrt{1+\text{THD}_v^2} \sqrt{1+\text{THD}_i^2}} = \frac{V_{1\text{rms}}}{V_{\text{rms}}} \cdot \frac{I_{1\text{rms}}}{I_{\text{rms}}} = \frac{S_1}{S} \quad \dots(2.29)$$

Donde:

$f_{p_{true}}$  : Es el factor de potencia verdadero.

$f_{p_{desp}}$  : Es el factor de potencia de desplazamiento.

$f_{p_{dist}}$  : Es el factor de potencia de distorsión.

En muchas instancias la potencia armónica es menor comparado con la fundamental, y la distorsión de la tensión es menor que el 10%. Por lo tanto la siguiente simplificación es importante y es generalmente válida.

$$f_{p_{\text{true}}} = \frac{P_1}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \text{THD}_i^2}} = \frac{f_{p_{\text{desp}}}}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}} = f_{p_{\text{desp}}} \cdot f_{p_{\text{dist}}} \quad \dots (2.30)$$

De la ecuación anterior, se observa que el factor de potencia de cargas no lineales se encuentra limitada por el  $\text{THD}_i$ . En la siguiente tabla se muestra algunos ejemplos de factor de potencia verdadero.

**Tabla N° 2.2** Valores de  $f_{p_{\text{true}}}$ . medidos en cargas residenciales

Tipo de Carga	Potencia Nominal (W)	$\text{THD}_i$ (%)	$f_{p_{\text{desp}}}$	$f_{p_{\text{dist}}}$	$f_{p_{\text{true}}}$
Ventilador	120	2.13	0.66	1.00	0.66
Horno microondas	1 520	26.92	0.92	0.97	0.89
Micro computador	100	108.18	0.99	0.68	0.68
Televisión	50	118.35	0.96	0.65	0.62
2 Lámparas fluorescentes	102	35.53	0.94	0.90	0.85
4 Lámparas compactas PL	100	140.59	0.95	0.58	0.55

## 2.7 Distorsión Armónica en los Sistemas Eléctricos

En sistemas eléctricos con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son las impares, como la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y la séptima (420 Hz). Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales, se han generado algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corriente y tensión en el sistema eléctrico. Entre éstos se puede citar: el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores; corrientes excesivas en el neutro; fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito (en caso exista la presencia de condensadores) y, en general, se ha deteriorado la calidad en el suministro de energía eléctrica.

La distorsión de corriente y tensión puede llegar a causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos (especialmente los menos robustos) que han sido diseñados para operar bajo condiciones normales (poca o nula distorsión). Además, se presenta un incremento en los costos de operación como resultado de algunos factores ligados a la generación de armónicos.

A continuación se presentará una descripción de las causas y efectos más comunes provocados por los armónicos en los sistemas eléctricos.

### **2.7.1 Fuentes de Armónicos**

Las cargas no lineales producen corrientes no sinusoidales (es decir alto contenido de armónicos) a pesar de que se alimentan de una tensión sinusoidal pura. La distorsión de la corriente provoca la distorsión de la tensión cuando fluye por las impedancias de la red eléctrica.

Las fuentes de armónicos pueden ser clasificados como:

- Tipos tradicionales (clásico)
  - Transformadores.
  - Máquinas rotantes.
  - Hornos de arco.
  
- Tipos modernos (Electrónica de Potencia)
  - Lámparas fluorescentes.
  - Controles electrónicos.
  - Fuentes conmutadas.
  - Equipos electrónicos modernos de oficina.
  - Dispositivos controlados (tiristores):
    - ✓ Rectificadores.
    - ✓ Inversores.
    - ✓ Compensadores estáticos.
    - ✓ Ciclo-conversores.
    - ✓ Transmisión HVDC.

## A) Transformadores

Los transformadores fueron históricamente la primera fuente de armónicos en un sistema de potencia. La relación entre la tensión y corriente primario mostrada en la Fig. N° 2.1 describe como la curva de magnetización presenta un comportamiento no lineal en la región de saturación, lo cual causa la distorsión en la corriente de magnetización. Ver Fig. N° 2.2.

El mecanismo de la generación de armónicos se ilustra en la Fig. 2.3. Donde, para cada instante de tiempo, la forma de la corriente de magnetización distorsionada puede ser reconstruida para hallar los valores posteriores de la curva de magnetización de la forma de onda. Los transformadores son diseñados para que la corriente de magnetización no exceda el rango de 1% a 2% de la corriente nominal. Por lo tanto, el punto de operación nominal se encuentra localizado debajo del codo de la curva de magnetización; es decir, dentro de la región lineal. En consecuencia, si un número grande de transformadores operan en un sistema de potencia, ellos no son fuentes significativas de armónicas en condiciones de operación debajo de lo normal. Esta condición puede cambiar, por ejemplo, con un incremento ligero en la tensión. Dentro de la región de saturación, incluso un pequeño aumento de la tensión por encima del valor nominal resulta en un gran aumento de la corriente magnetizante.

Las armónicas debido a la corriente de magnetización se elevan a sus niveles máximos en las horas de madrugada, ya que el sistema tiene muy poca carga y el nivel de tensión es alto.

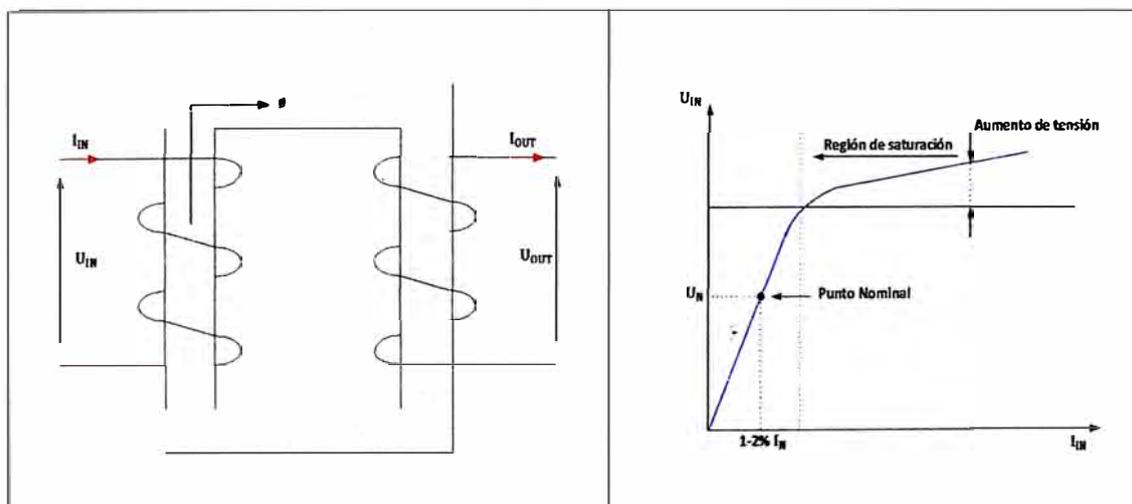
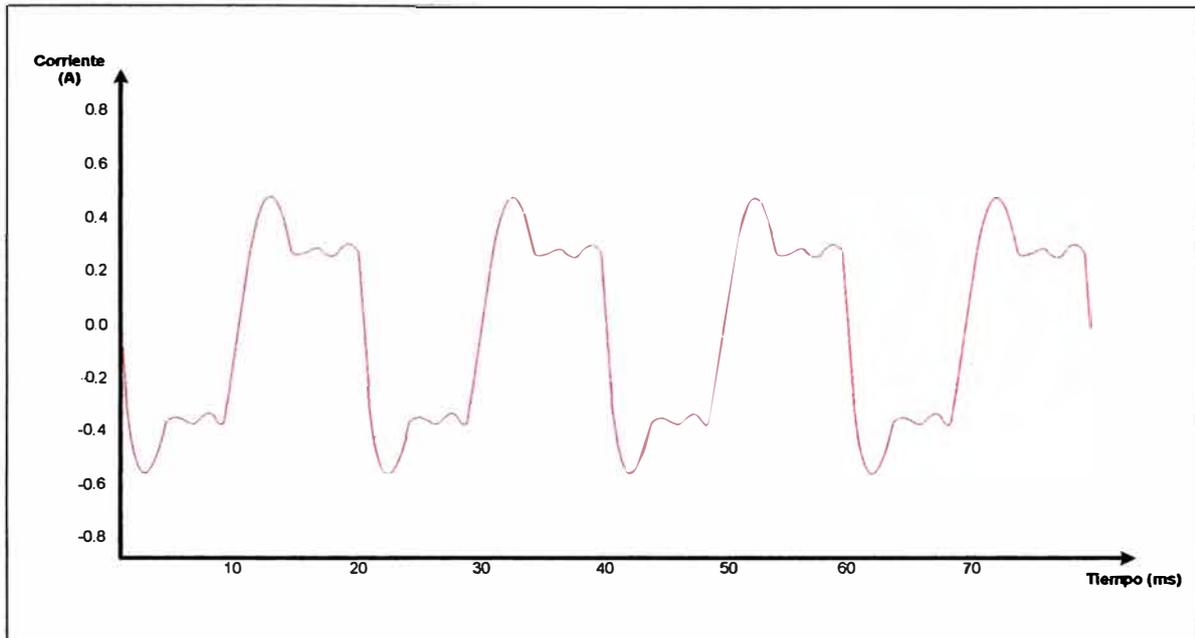
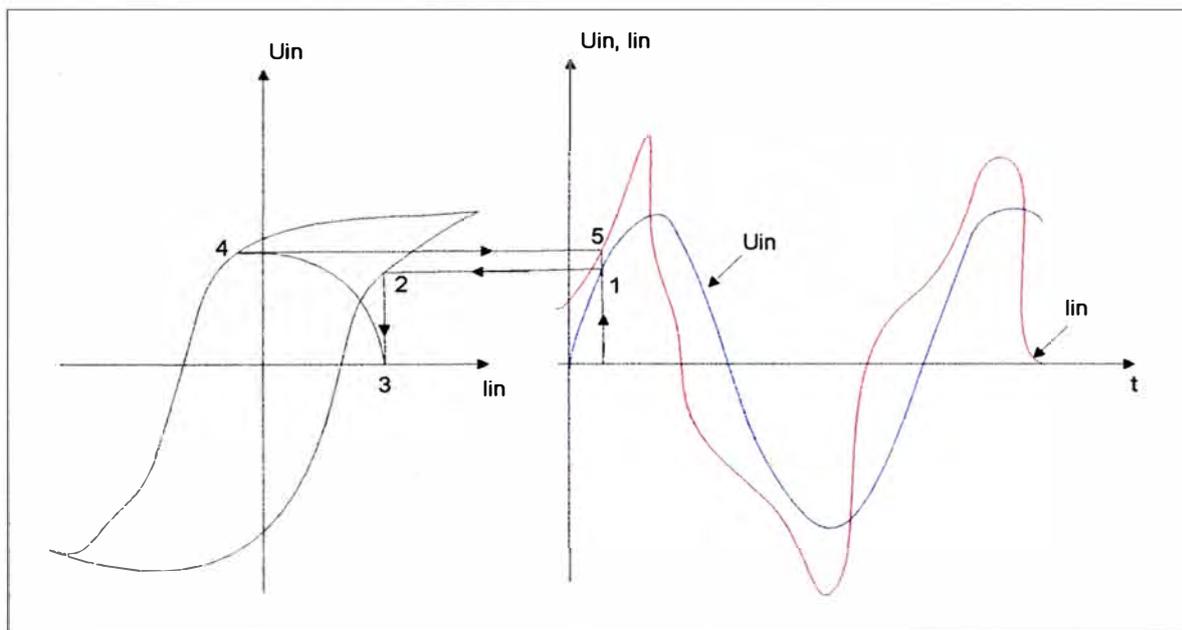


Fig. N° 2.1 Curva de magnetización del transformador.



**Fig. N° 2.2** Ejemplo de una corriente de magnetización distorsionada.



**Fig. N° 2.3** Generación de armónicos en la corriente de magnetización del transformador.

## B) Motores y Generadores

Similar a los transformadores, los motores pueden también generar corrientes armónicas en el orden de producir un campo magnético. Su contribución, sin embargo, es muy poca ya que la característica de magnetización del motor debido a la presencia de una brecha de aire, es mucho más lineal comparada con la característica de magnetización del transformador.

El paso del bobinado del motor puede también ser una causa de corrientes armónicas. Bobinados de motores típicos tienen de 5 a 7 ranuras por polo, lo que se traduce en la generación de la quinta o séptima armónica. A pesar del hecho de que son incomparablemente más pequeños que los armónicos altos en equipos convertidores, su presencia es notable en el caso de motores muy grandes.

Armónicos de muy poca magnitud también ocurren en generadores de tensión. Una distribución espacial del bobinado del estator podría garantizar una forma de onda sinusoidal purapero no es aconsejable por razones prácticas y económicas. Las tensiones inducidas son por lo tanto un poco distorsionadas, y por lo general la tercera armónica es la dominante.

### **C) Hornos de Arco**

El horno de arco es quizás una de las cargas más difíciles en un sistema de potencia, dado que su naturaleza es no lineal y altamente aleatoria. Este tipo de cargas ocasionan lo siguiente:

- Fluctuaciones de tensión.
- Armónicos.
- Desbalance entre fases.
- Su operación demanda bajo factor de potencia.

Al contrario de otras cargas no lineales, a base de elementos de electrónica de potencia, los hornos de arco son mucho menos predecibles en su operación. Por lo general, cada instalación con horno de arco requiere de medidas de campo para tratar de caracterizar su funcionamiento. Debido a la complejidad en la operación del horno, hasta el momento no se cuenta con un modelo que pueda simular su funcionamiento dinámico.

#### **a) Características de un Horno de Arco**

Los hornos de arco son aparatos trifásicos que operan a 60 Hz y conectados a un transformador reductor. Una instalación típica de horno de arco se muestra en la Fig. N° 2.4. El transformador del horno por lo general se encuentra conectado en estrella delta con el fin de eliminar los armónicos, múltiplos de 3, provenientes del horno. Se pueden

adicionar reactores en serie con el primario, su función es limitar los cambios bruscos de corriente durante la operación del horno. Los requerimientos más importantes para el transformador de arco son:

- Altas corrientes en el secundario.
- Baja tensión en el secundario.
- Amplio rango de regulación de tensión (Taps).
- Alta impedancia de cortocircuito.
- Capacidad de sobrecarga del 20 % durante el proceso inicial de fundición.

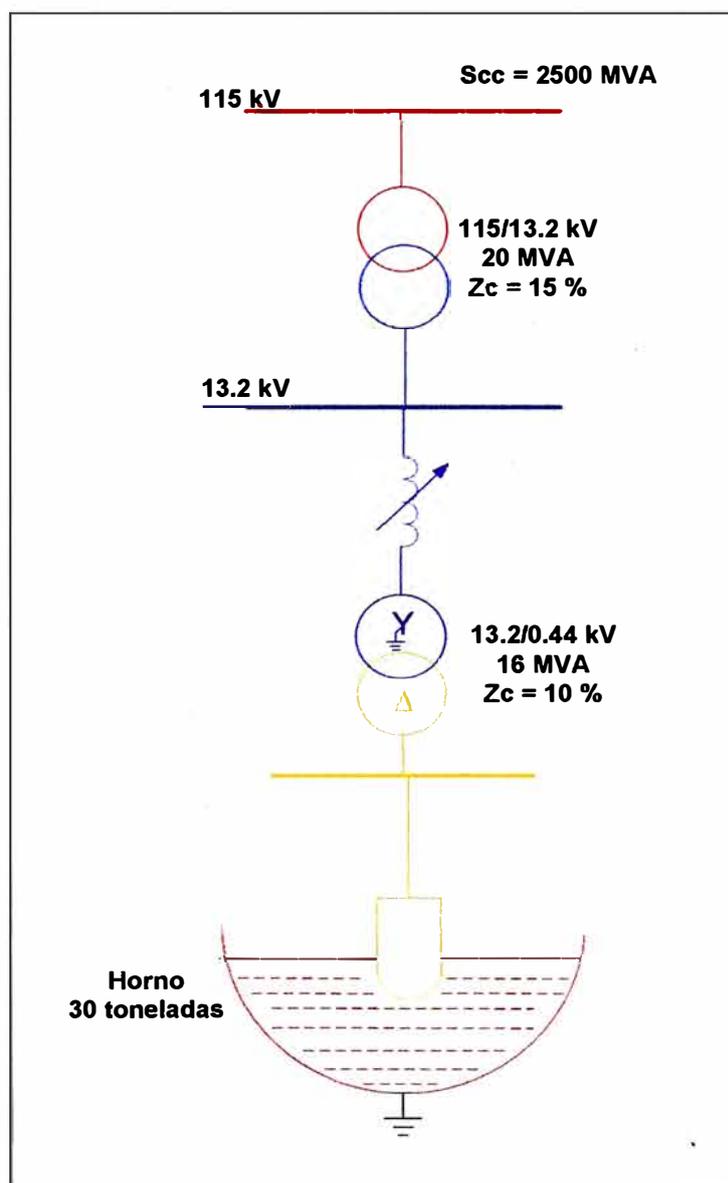


Fig. N° 2.4 Instalación típica de un horno de arco.

Sobre los electrodos se ejerce una acción de control, levantándolos o bajándolos, para ayudar a mantener los requerimientos de potencia en el arco y estabilidad del mismo. Los electrodos son de carbón o grafito, y deben soportar corrientes que pueden exceder los 60 kA.

Generalmente el horno es energizado y desenergizado frecuentemente durante su operación, ocasionando condiciones especialmente duras a los interruptores que operan el horno.

El ciclo de trabajo del horno dura entre 2 a 3 horas en el cual se distinguen básicamente dos etapas: fundición y refinado.

- **Etapas de Fundición:** Para poder iniciar el arco eléctrico se debe producir un cebado, los electrodos del horno son bajados y puestos en contacto con la chatarra provocando un cortocircuito a tierra, ya que el horno está conectado a tierra. Los electrodos son posteriormente levantados, estableciéndose un arco que dura hasta que el proceso de fundición termine. Durante esta etapa el horno es recargado de una a tres veces, el arco voltaico es muy inestable y su longitud varía bastante debido al movimiento de la chatarra, por lo que se debe ejercer un control del arco con los brazos porta electrodos.

Al comienzo de la etapa se producen las mayores fluctuaciones de potencia activa y reactiva, fácilmente se puede pasar de una condición de cortocircuito trifásico a una de circuito abierto, es posible que sea necesario reiniciar varias veces el arco. También se presentan fuertes desbalances entre fases, en donde una fase puede estar en cortocircuito y otra en circuito abierto.

Las grandes variaciones de potencia reactiva ocasionan severas fluctuaciones de tensión en la red, por ello, el horno debe ser conectado en un punto con alto nivel de cortocircuito, que por lo general sólo es posible en sistemas de alta tensión. Para ayudar a mantener la estabilidad del arco durante esta etapa, el consumo de potencia activa es del mismo orden de la reactiva, a un factor de potencia de 0.7.

- **Etapas de Refinado:** Su duración depende de la cantidad del acero que se quiera obtener, durante esta etapa el consumo de potencia activa es menor y el factor de potencia alcanza valores de hasta 0.9. Ésta es una fase mucho más estable, donde

las fluctuaciones de potencia activa y reactiva son muchos menores y se deben fundamentalmente al burbujeo del material fundido.

### b) Factor de Potencia del Horno de Arco

Durante la etapa de fundición, el consumo de potencia activa y reactiva es del mismo orden a un bajo factor de potencia. El bajo factor de potencia permite un mayor aprovechamiento del horno reduciendo costos de operación, y se logra un arco mucho más estable.

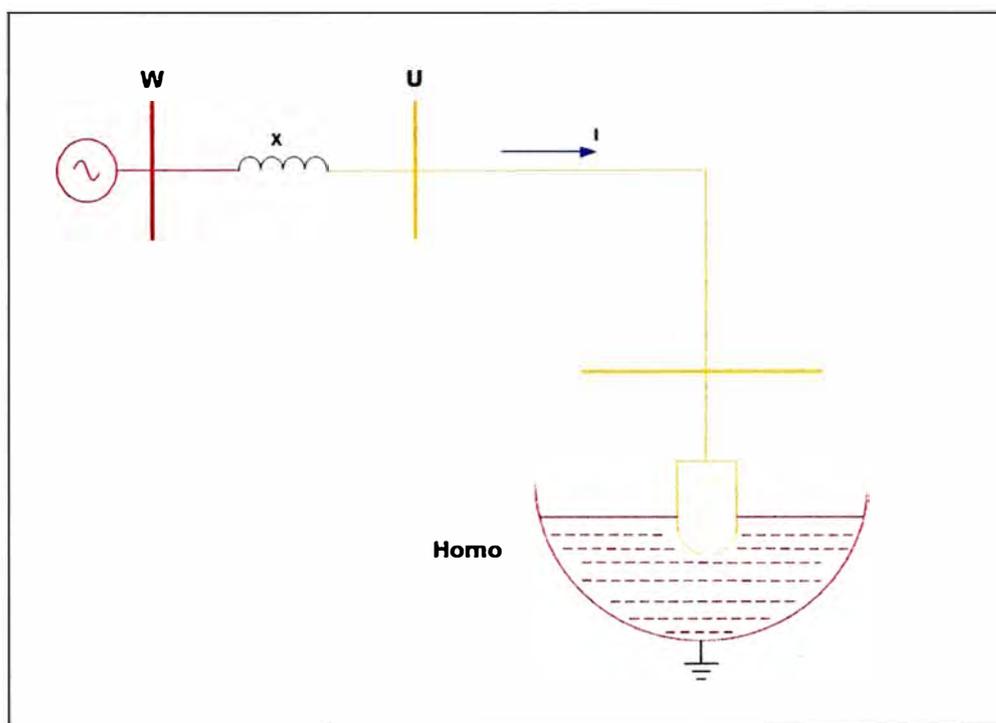


Fig. N° 2.5 Simplificación del circuito del horno de arco.

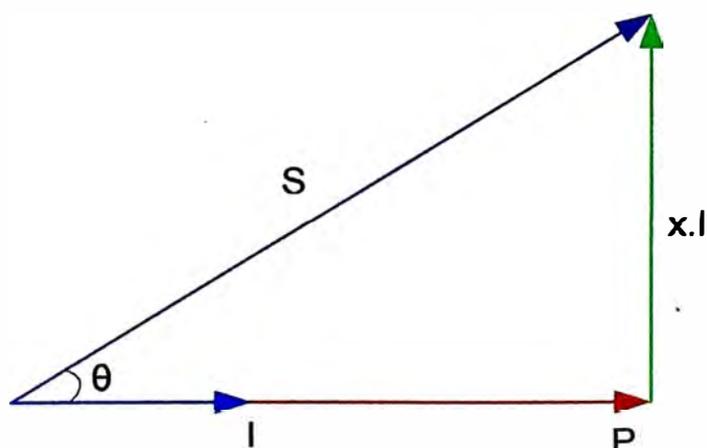


Fig. N° 2.6 Triangulo de potencias

Si despreciamos las componentes resistivas en el circuito del horno, la ecuación de la potencia quedaría de la siguiente forma:

$$P=V_f \cdot I \cdot \cos\theta \quad \dots(2.31)$$

$$U=V_f \cdot \cos\theta \quad \dots(2.32)$$

$$x \cdot I=V_f \cdot \cos\theta \quad \dots(2.33)$$

De donde inmediatamente se obtiene:

$$P=\frac{V_f^2}{2x} \operatorname{sen}2\theta \quad \dots(2.34)$$

La potencia transmitida al horno es máxima cuando  $\theta=45^\circ$ , que corresponde a un factor de potencia de 0.707. El factor de desplazamiento entre  $U - I$  es casi cero debido a la naturaleza puramente resistiva del arco. Para una potencia nominal dada durante la etapa de fundición, el factor de potencia deseado se consigue seleccionando la tensión apropiada en el secundario. Por ello, los transformadores usados en hornos de arco cuentan con un amplio margen de regulación de tensión en el secundario.

El factor de potencia juega un papel importante en la reignición del arco a cada cruce por cero de la corriente, para una operación estable se requiere un bajo factor de potencia. En el momento que el arco se extingue la corriente se hace cero, si se tiene un bajo factor de potencia, una tensión alta se establece entre el electrodo y la carga reiniciándose fácilmente el arco.

### c) Compensación en Hornos de Arco

El consumo de potencia reactiva de un horno es:

$$Q=3 \cdot x \cdot I^2 \quad \dots(2.35)$$

Donde:

$x$  : Reactancia por fase incluyendo la de dispersión del transformador.

Durante la etapa de fundición se presentan las mayores variaciones de potencia reactiva. De una demanda máxima de reactivos, que ocurre durante un cortocircuito, se puede pasar a una demanda mínima, cuando se tiene la condición de circuito abierto; el rango de variación de potencia reactiva se encuentra entre:

$$Q=Q_{st}(1\pm 0.7) \quad \dots(2.36)$$

Donde:

$Q_{st}$  : Potencia reactiva de plena carga en estado estacionario en la etapa de fundición.

La utilización de condensadores fijos es la alternativa más usada, aunque su instalación puede ocasionar serios problemas tales como:

- Sobretensiones en el momento de operar el banco.
- Sobrecompensar el sistema en los momentos de baja demanda de reactivos, esto puede elevar la tensión a niveles no permitidos.
- Puede amplificar los armónicos producidos por el horno si entra en resonancia con el sistema a una frecuencia armónica.

Una alternativa para eliminar algunas condiciones de sobrecompensación es la de conmutar el banco en conjunto con el transformador, pero esto puede traer graves problemas al interruptor y a la instalación misma.

Los condensadores síncronos solucionan el problema de resonancia y ayudan a disminuir las fluctuaciones de tensión, ya que con un rápido control a la corriente de campo se regula la tensión en la red. La mejor solución de compensación reactiva en una instalación de horno de arco es un esquema de compensación estática, que incluya tanto compensación capacitiva como inductiva. La compensación capacitiva se hace a través de pasos rápidamente conmutados con tiristores; la compensación inductiva se hace a través de un reactor controlado por tiristores (todo el sistema se denomina SVC).

Por razones de espacio y de medio ambiente (al lado del secundario del transformador el ambiente es hostil, con altas temperaturas y gases enrarecidos) la compensación se instala en el lado primario. Bancos de condensadores se recomienda

instalar en un esquema de filtro, el reactor de sintonía serie sirve además para limitar la corriente inrush en el momento de energizar el banco.

Una adecuada compensación que rápidamente se ajuste a las variaciones de potencia reactiva estabiliza la tensión en el horno, aumentando la eficiencia, y reduciendo los costos de producción.

#### **d) Armónicos Producidos por Hornos de Arco**

La no linealidad del comportamiento de los arcos eléctricos, y la variabilidad de los valores de los parámetros del horno, resulta en una generación de armónicos cuya magnitud y orden no se pueden predeterminar fácilmente.

El espectro de un horno de arco es continuo, los armónico predominantes son el 3, 5, 7, 9, 11, ..... decrecientes en magnitud a medida que aumentan en orden, incluso, el horno de arco puede producir niveles DC y armónicos pares. La mayor dificultad en la predicción del espectro armónico es su carácter estocástico, especialmente en la etapa de fundición, en la cual se incrementa la producción de armónicos.

En la tabla N° 2.3 se presentan algunos valores que son el resultado de muchas mediciones en instalaciones de horno de arco.

**Tabla N° 2.3 Armónicos de tensión en un horno de arco**

<b>Orden Armónico</b>	<b>Caso Más Desfavorable (% Fundamental)</b>	<b>Caso Típico (% Fundamental)</b>
2	17.0	5.0
3	29.0	20.0
4	7.5	3.0
5	10.0	10.0
6	3.5	1.5
7	8.0	6.0
8	2.5	1.0
9	5.0	3.0

### **e) Desbalances de Carga**

Los mayores desbalances se presentan cuando una o dos fases están en cortocircuito y la otra se encuentra en circuito abierto. En instalaciones viejas, los conductores estaban dispuestos en un mismo plano, esto ocasiona desbalances en las reactancias ya que las inductancias mutuas no son iguales; pequeñas diferencias entre las reactancias de fase cobran una importancia relevante en los desbalances de tensión debido a las altas corrientes que se manejan en el horno. Los desbalances conllevan a que la tensión aplicada a los electrodos no sea la misma, desarrollándose potencias diferentes en cada uno de ellos. El horno de arco es una carga no balanceada para el sistema de potencia.

### **f) Fluctuaciones de Tensión**

Las fluctuaciones de tensión son debidas principalmente al consumo variable de potencia reactiva, la severidad de estas fluctuaciones es mayor entre más débil sea la red; la fortaleza del sistema se mide en términos de su capacidad de cortocircuito en el punto de acople común con la red.

Investigaciones sobre hornos de arco han mostrado que la potencia de cortocircuito subtransitoria del sistema de potencia (en el PCC) debe ser por lo menos de 80 a 100 veces la potencia nominal del horno para que los disturbios producidos por el horno sean tolerables. Para un horno con compensación, este requisito puede ser reducido a la mitad, es decir 40 veces la potencia nominal del horno.

### **g) Flicker**

Es un cambio perceptible en la luminosidad de lámparas incandescentes, producido por un cambio repentino en la tensión de alimentación.

Los hornos de arco son una fuente de fluctuaciones tipo flicker en el rango de 0.5 a 30 Hz, aunque este tipo de carga es la que provoca mayores problemas de flicker, existen otras cargas o condiciones que lo pueden ocasionar, tales como:

- Cortocircuitos.
- Operación de pararrayos.

- Transitorios debido a maniobras.
- Arranque de grandes motores.
- Motores con cargas variables (compresoras, bombas), que ocasionan fluctuaciones cíclicas.
- Soldadores eléctricos.
- Hornos de inducción.

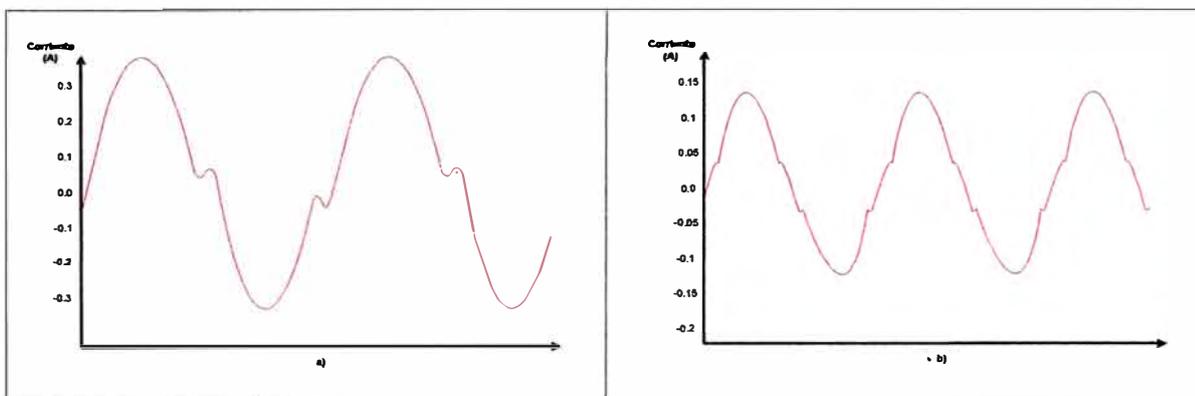
El uso de una adecuada compensación reactiva en hornos de arco puede disminuir o eliminar los problemas de flicker, pero contrario a lo que se podría creer, el uso por si solo de compensación capacitiva paralela no ayuda a disminuir las fluctuaciones de tensión, incluso puede incrementarlas.

#### D) Lámparas Fluorescentes

Las lámparas fluorescentes se prenden y apagan cada medio ciclo, pero el parpadeo es apenas perceptible a 50 o 60 Hz. El encendido ocurre a veces tras el cruce de la tensión por cero. Una vez encendida, la lámpara presenta características de resistencia negativa.

Las formas de onda de corriente son ligeramente distorsionadas, puntiagudas y presentan un segundo pico característico. La armónica dominante es el tercero, en el orden del 15 % a 20 % de la fundamental.

En la Fig. N° 2.7 se presenta la forma de onda típica de un fluorescente.



**Fig. N° 2.7** Forma de onda de corriente de fluorescente a) Con balasto magnético  $THD_i=18.5\%$  b) Con balasto electrónico  $THD_i=11.6\%$

Actualmente abundan fluorescentes con balastos electrónicos que presentan una menor distorsión armónica total de corriente (THD<sub>i</sub>) ante un fluorescente con balasto magnético de la misma potencia.

## **E) Equipos Electrónicos de Potencia**

### **a) Fuentes de Alimentación Conmutada**

La mayor parte de los dispositivos electrónicos modernos se alimentan mediante fuentes de alimentación de modo conmutado con rectificadores monofásicos. La principal diferencia respecto a las unidades más antiguas se encuentra en la ausencia de transformadores y rectificadores tradicionales: ellos se sustituyen por rectificación controlada directa del suministro para cargar un condensador de reserva de la cual se deriva la corriente continua hacia la carga con la finalidad de obtener en la salida la corriente y tensión requerida.

En ese sentido, la ventaja principal es que el tamaño, costo y peso se han reducido y la unidad de potencia puede ser simulada prácticamente con algún factor de forma. La desventaja es que ahora, en lugar de tomar corriente continua de la fuente, la unidad toma pulsos de corriente que contienen grandes cantidades de tercera y de orden superior de componentes armónicas. En la Fig. N° 2.8 y N°2.9 se muestra la forma de onda y el espectro de una corriente típica para la mayoría de los equipos eléctricos y electrónicos usados actualmente (corriente de un rectificador monofásico con un filtro capacitivo en lado dc).

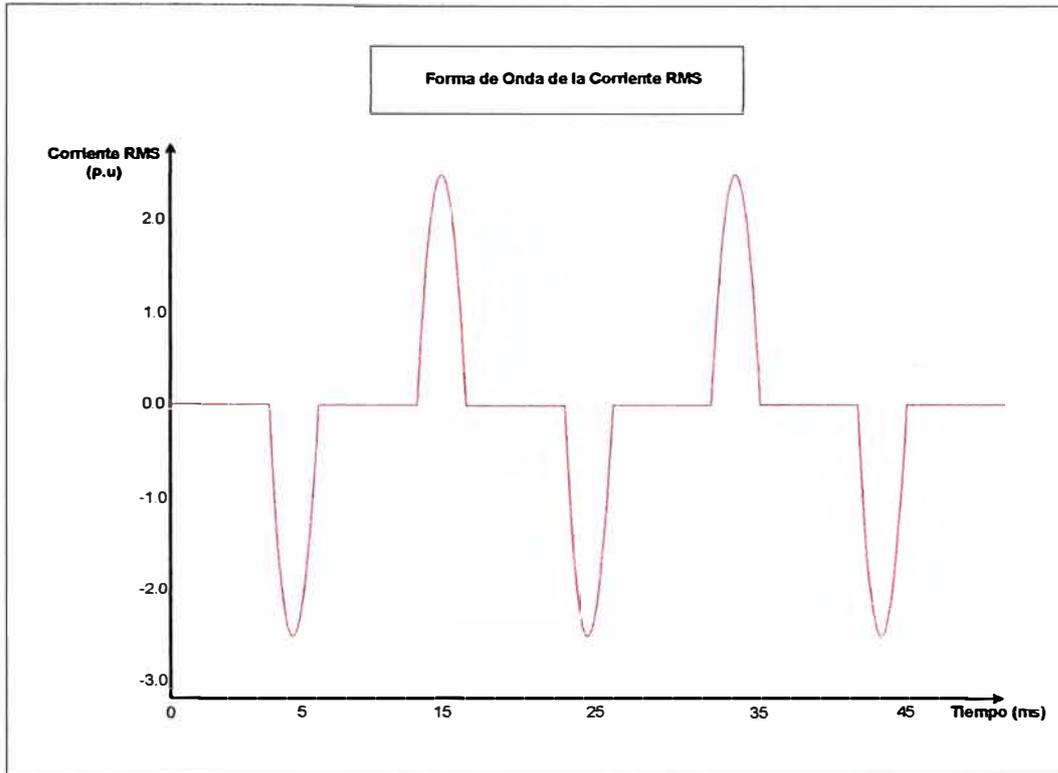


Fig. N° 2.8 Forma de onda de una corriente RMS distorsionada

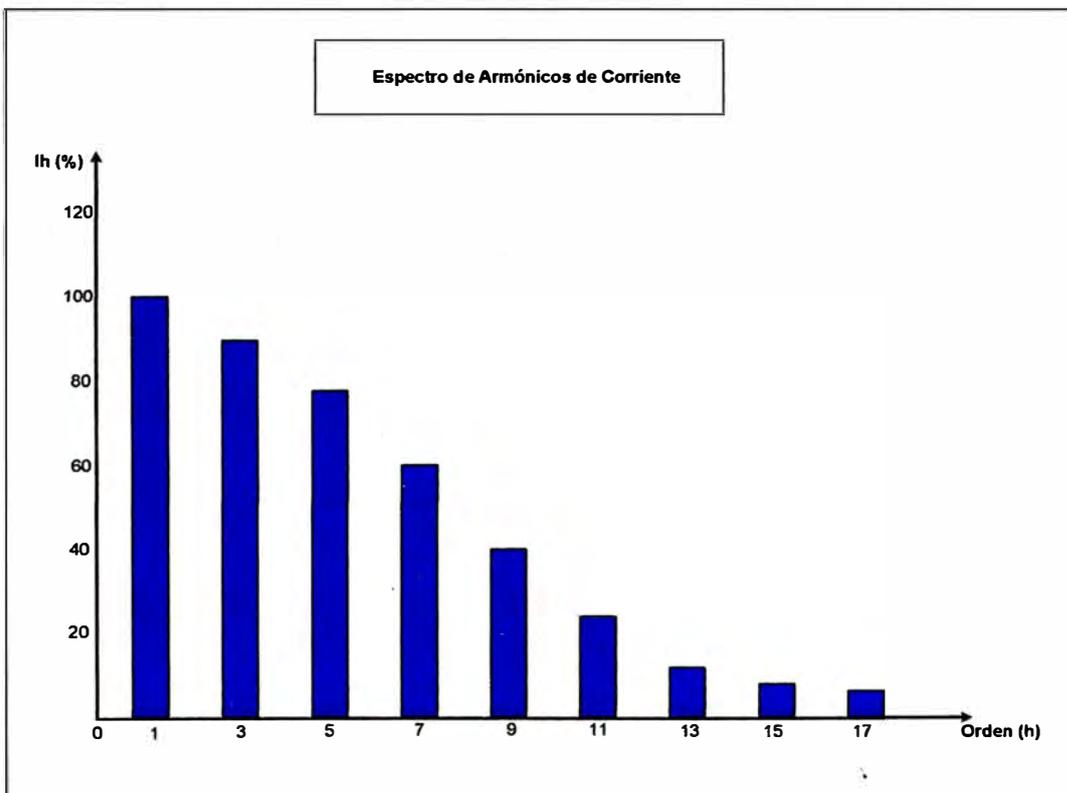


Fig. N° 2.9 Espectro armónico de corriente

## b) Convertidores de Potencia Trifásicos

Todo equipo que contiene convertidores estáticos, como los controladores de velocidad variable, unidades UPS y convertidores a.c./d.c. en general, se basan en puentes trifásicos, también conocidos como puentes de seis pulsos porque hay seis pulsos de tensión por ciclo (uno por cada medio ciclo por fase) en la salida d.c.

Estos puentes producen en las redes de suministro corrientes armónicas del orden  $6n \pm 1$ . En la teoría, la magnitud de cada armónico debe ser igual al recíproco del número armónico, por consiguiente habría 20 % del orden 5 y 9 % del orden 11, etc.

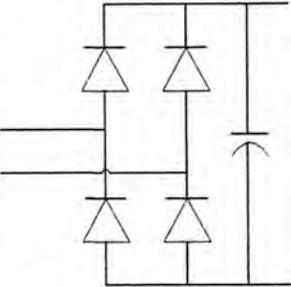
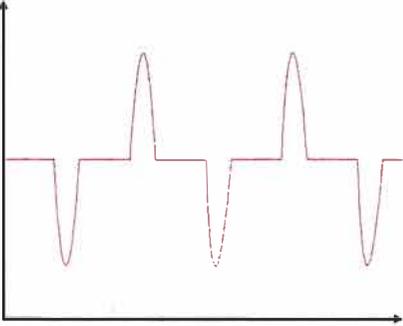
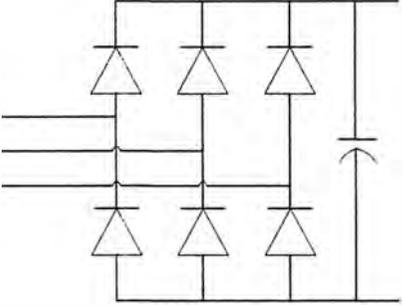
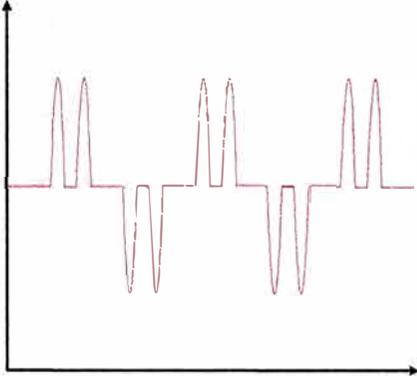
La magnitud de los armónicos es significativamente reducida con el uso de un convertidor de 12 pulsos. El espectro de armónicos de estos dos convertidores se muestra en la tabla N° 2.4.

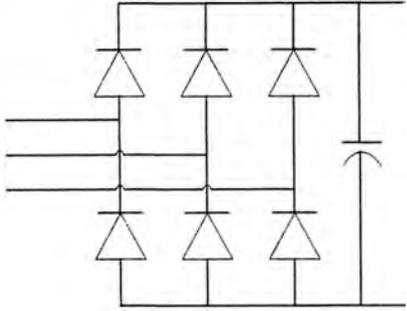
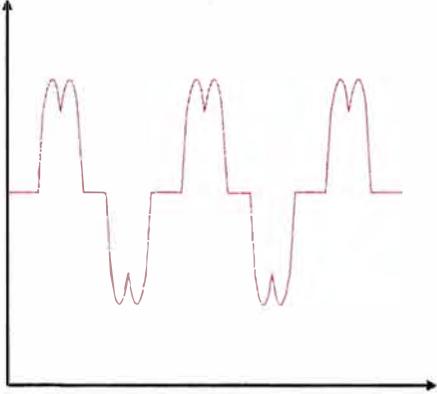
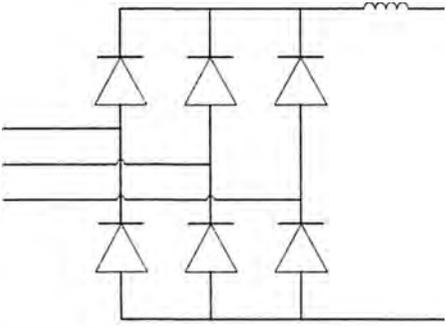
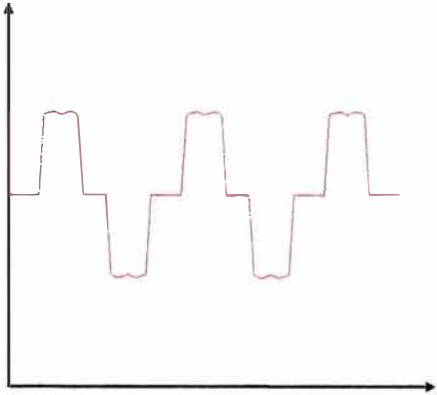
**Tabla N° 2.4** Ejemplo de corrientes armónicas en p.u.

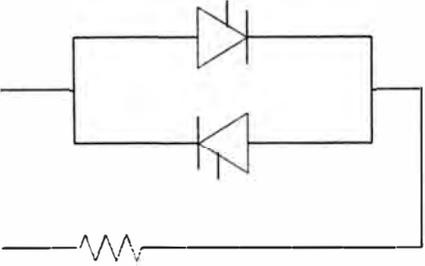
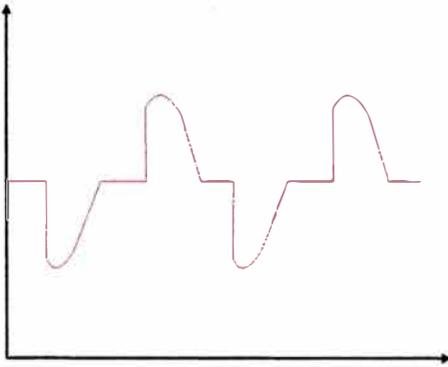
<b>Orden Armónico</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>19</b>	<b>23</b>	<b>25</b>
6 pulsos	6	0.132	0.073	0.057	0.035	0.027	0.02	0.016
12 pulsos	0.0192	0.0132	0.073	0.057	0.0035	0.0027	0.02	0.016

En la tabla N° 2.5 se muestra, como ejemplo, formas de ondas de corrientes para diferentes configuraciones de convertidores.

**Tabla N° 2.5** Formas de ondas de corrientes para varios tipos de convertidores

Tipo de Convertidor	Forma de Onda de la Corriente	Comentarios
 <p>The diagram shows a single-phase full-bridge rectifier circuit. It consists of four diodes arranged in a bridge configuration. The AC input is connected to the two left terminals. The DC output is taken from the two right terminals. A filter capacitor is connected in parallel with the DC output terminals.</p>	 <p>The waveform shows a periodic current signal. It consists of a series of positive and negative pulses. The positive pulses occur during the positive half-cycles of the AC input, and the negative pulses occur during the negative half-cycles. The pulses are separated by intervals where the current is zero, indicating a discontinuous conduction mode.</p>	<p>Rectificador monofásico  <math>THD_i=80\%</math></p>
 <p>The diagram shows a three-phase full-bridge rectifier circuit. It consists of six diodes arranged in a bridge configuration. The AC input is connected to the three left terminals. The DC output is taken from the two right terminals. A filter capacitor is connected in parallel with the DC output terminals.</p>	 <p>The waveform shows a periodic current signal with six pulses per cycle. The positive pulses occur during the positive half-cycles of the AC input, and the negative pulses occur during the negative half-cycles. The pulses are separated by intervals where the current is zero, indicating a discontinuous conduction mode.</p>	<p>Rectificador de 6 pulsos con capacitor en el lado DC  <math>THD_i=80\%</math></p>

Tipo de Convertidor	Forma de Onda de la Corriente	Comentarios
		<p>Rectificador de 6 pulsos con capacitor en el lado DC y reactor &gt; 3% en la entrada AC  <math>THD_i=40\%</math></p>
		<p>Rectificador de 6 pulsos con reactor en el lado DC  <math>THD_i=28\%</math></p>

Tipo de Convertidor	Forma de Onda de la Corriente	Comentarios
 <p>The diagram shows a single-phase AC power controller circuit. It consists of two thyristors connected in an anti-parallel configuration. The load is a resistor connected in series with the thyristors. The input is an AC source.</p>	 <p>The graph shows the current waveform through the load. The current is zero during the initial part of each AC cycle (the delay angle) and then follows a half-wave rectified sine wave pattern. The amplitude of the current is controlled by the firing angle.</p>	<p>Controlador de potencia AC (carga resistiva) THD<sub>i</sub> varía con el control del ángulo</p>

### c) Magnitudes de Corrientes Armónicas

Las magnitudes de las corrientes armónicas comúnmente usadas en las cargas no lineales se muestran en la tabla N° 2.6 y N° 2.7. Cabe mencionar que estos valores deben considerarse solo como ejemplos, ya que sufren cambios sustanciales.

**Tabla N° 2.6** Magnitudes de corrientes armónicas para cargas monofásicas

<b>Orden Armónico</b>	<b>Soldador (%)</b>	<b>Computadora (%)</b>	<b>Lámpara Fluorescente (%)</b>
1	100	100	100
3	29.6	75	12.3
5	8.8	47.3	13.8
7	2.0	22.9	3.0
9	2.3	9.0	1.1
11	2.3	3.3	0.7
13	1.1	3.0	0.5
15	0.4	2.1	
17	0.9	1.9	

**Tabla N° 2.7** Magnitudes de corrientes armónicas para cargas trifásicas

<b>Orden Armónico</b>	<b>Horno de Inducción (%)</b>	<b>DC-ASD (%)</b>	<b>Horno de Arco DC (%)</b>	<b>ASD-PWM (%)</b>
1	100	100	100	100
5	20.9	37.1	18.9	25
7	12.7	1.1	10.3	11
11	7.8	8.6	5.4	7.5
13	7.2	2.5	3.9	5.0
17	4.3	4.7	1.8	4.4
19	4.9	2.3	1.3	3.2
23	2.6	3.1	0.6	2.6
25	3.6	2.1	0.5	2.0
29	1.7	2.2	0.5	1.7
31	2.7	1.9	0.5	1.3

<b>Orden Armónico</b>	<b>Horno de Inducción (%)</b>	<b>DC-ASD (%)</b>	<b>Horno de Arco DC (%)</b>	<b>ASD-PWM (%)</b>
35	1.2	1.7	0.4	1.0
37	2.0	1.8	0.4	0.8
41	0.8	1.4	0.3	0.6
43	1.4	1.6	0.3	0.5
47	0.5	1.1	0.2	0.4
49	1.0	1.3	0.2	0.3

### **2.7.2 Efectos de Armónicos**

Los armónicos provocan incrementos en las pérdidas y disminución de la vida útil de los equipos. Asimismo, los armónicos múltiplos de tres resultan en el neutro llevando una corriente que puede ser igual o superior a las corrientes de fase incluso si las cargas están balanceadas. Esto conlleva a la reducción de la potencia o sobredimensionamiento en el conductor del neutro.

Por otra parte, la resonancia causada por los armónicos podría dañar el equipo. Los armónicos provocan interferencia en relés de protección, dispositivos de medición, circuitos de comunicación y control, y equipos electrónicos del cliente. Los equipos sensibles experimentan una mala operación o falla en sus componentes.

#### **A) Conductores Eléctricos**

El flujo de corrientes armónicas en una red produce pérdidas adicionales en las líneas y cables debido al incremento del valor RMS de la corriente y el efecto piel.

El incremento en el desgaste del dieléctrico acorta la vida útil del cable, incrementa el número de fallas y además el costo de reparaciones. Como consecuencia del flujo de corrientes armónicas por los cables, se genera un incremento de temperatura en los mismos. Las causas de las pérdidas adicionales incluyen:

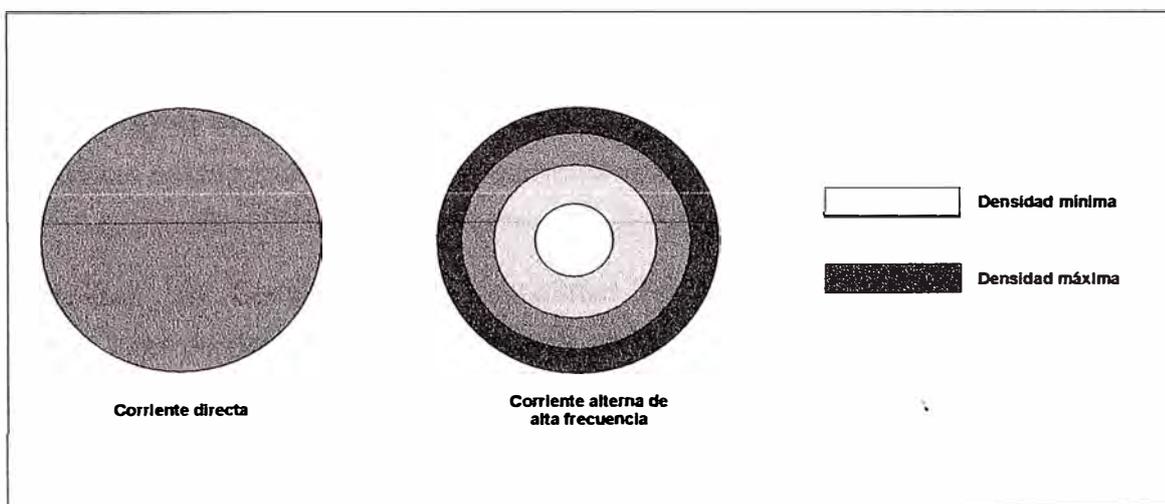
- Un incremento en la resistencia aparente del conductor con la frecuencia, debido al efecto piel.

- Un aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.
- Un incremento de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento con la frecuencia, si el cable es sometido a distorsiones de tensión no despreciables.
- El fenómeno relacionado con la proximidad de envolventes, de pantallas (conductores revestidos) puestas a tierra en ambos extremos, entre otros.

Para las líneas, los armónicos podrían ocasionar el efecto corona y niveles de excitación. El efecto corona y los niveles de excitación son función de la tensión pico a pico el cual depende de la relación entre los armónicos y la fundamental.

### a) Efecto Piel

El efecto piel es el fenómeno donde las corrientes alternas de alta frecuencia tienden a fluir cerca de la superficie más externa de un conductor. Esto se debe al hecho de que las concatenaciones de flujo no son de densidad constante a través del conductor, sino que tienden a decrecer cerca de la superficie más exterior, disminuyendo la inductancia e incrementando el flujo de corriente. El resultado neto del efecto peculiar es que el área transversal efectiva del conductor es reducida a medida que la frecuencia es incrementada. Mientras mayor es la frecuencia, menor es el área transversal y mayor es la resistencia AC. Cuando una corriente de carga armónica esta fluyendo en un conductor, la resistencia ante corriente alterna equivalente ( $R_{ac}$ ) para el conductor es elevada, aumentando las pérdidas en el cobre  $I^2 R_{ac}$ . Ver Fig. N° 2.10.



**Fig. N° 2.10** Efecto piel en conductores

## B) Transformadores

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 o 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni disminuir su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas en conductores, pérdidas en el núcleo (por histéresis y por corrientes de remolino) y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes del hierro. De manera individual, el efecto de las armónicas en estas pérdidas se explica a continuación:

- **Pérdidas en el Núcleo:** Son producidas por el flujo de excitación en el núcleo. La forma de onda de tensión en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga y por lo tanto, el flujo magnético en el núcleo también es de forma senoidal. Siendo el flujo independiente de la corriente de carga, estas pérdidas no aumentan para corrientes de carga no senoidales. La componente de corriente responsable de producir el flujo magnético se conoce como la corriente de magnetización, y ésta si contiene armónicas, pero de magnitud despreciable cuando se comparan con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos. Las pérdidas del núcleo aumentan con la frecuencia y a frecuencia nominal tienen su valor de diseño. Las pérdidas del núcleo se componen de pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes de remolino (corrientes de Eddy).
- **Pérdidas en el Cobre:** Si la corriente de carga contiene componentes armónicas, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto piel.
- **Pérdidas por Corrientes de Remolino:** También conocidas como "corrientes de Eddy", son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se pueden aumentar excesivamente si las corrientes de carga no son senoidales causando un incremento excesivo de temperatura. Las pérdidas por corrientes de remolino se pueden expresar como:

$$P_e = P_{e,R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad \dots(2.37)$$

Donde:

$h$  : Es el orden armónico.

$I_h$  : Es la corriente de la armónica  $h$ , en amperios.

$I_R$  : Es corriente fundamental.

$P_{e,R}$  : Es la pérdida de Eddy a corriente y frecuencia nominal.

- **Pérdidas Adicionales:** Aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador y, dependiendo del tipo de transformador, contribuirán o no en aumentar la temperatura del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia, tal y como se muestra a continuación:

$$P_{AD} = P_{AD,R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h \quad \dots(2.38)$$

Donde:

$P_{AD,R}$  : Son las pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal.

Algunas cargas no lineales presentan una componente de corriente directa en la corriente de carga. Si este es el caso, esta componente aumentará las pérdidas de núcleo ligeramente, pero incrementarán substancialmente la corriente de magnetización y el nivel de sonido audible, por lo que este tipo de cargas se debe evitar.

En el caso de transformadores conectados en  $\Delta$ -Y que suministran cargas no lineales que contengan armónicas múltiplos de 3 (armónicas triplen), estas armónicas circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, circulando adentro de la delta, pero no aparecerán en las líneas que alimentan a la delta (caso balanceado), produciendo sobrecalentamiento de los devanados y del núcleo.

Con el constante aumento de cargas no lineales, se han llevado a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que suministran

energía a este tipo de cargas. Además, en el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente utilizar un transformador con un factor K mayor a 1, en lugar de sobredimensionar el transformador. Los transformadores con factor K son aprobados por UL (Underwriter's Laboratory) para su operación bajo condiciones de carga no senoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Entre las modificaciones de este tipo de transformadores con respecto a los transformadores normales están:

- El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas "triples" circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.
- Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado y utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

### **C) Motores de Inducción**

Las armónicas producen los siguientes efectos en las máquinas de corriente alterna: un aumento en sus pérdidas y la disminución en el torque generado.

#### **a) Pérdidas en los Motores de Inducción**

Si la tensión que se alimenta a un motor de inducción contiene componentes armónicas, entonces se incrementarán sus pérdidas  $I^2R$  en el rotor y estator, pérdidas de núcleo (corrientes de Eddy y pérdidas por histéresis) y pérdidas adicionales, en tanto que las pérdidas por fricción y ventilación no son afectadas por las armónicas. En forma más detallada, tenemos el siguiente análisis de las pérdidas.

- **Pérdidas  $I^2R$  en el Estator:** Según el Standard IEEE 112 – 1991, las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia a corriente directa de la máquina, corregida a la temperatura especificada. Al operar la máquina de inducción con tensión con contenido armónico estas pérdidas no solo aumentan por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas  $I^2R$ .

- **Pérdidas  $I^2R$  en el Rotor:** Estas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.
- **Pérdidas de Núcleo:** Estas pérdidas son función de la densidad de flujo en la máquina. Estas aumentan con excitación de tensión no senoidal puesto que se tienen densidades de flujo pico más elevadas, sin embargo su aumento es aún menor que el de las pérdidas mencionadas anteriormente e incluso son más difíciles de cuantificar.
- **Pérdidas Adicionales:** Son muy difíciles de cuantificar aún bajo condiciones de tensión senoidal. Al aplicar tensión no senoidal, éstas aumentan en forma particular para cada máquina.

## **b) Par Electromagnético**

Las armónicas de secuencia positiva producen un par en el mismo sentido de la dirección de rotación, en tanto que las de secuencia negativa tienen el efecto opuesto. En caso de que se tenga conectado el neutro, el par producido por las armónicas "triplen" es igual a cero. Dependiendo del contenido armónico de la tensión aplicada, el par promedio de operación puede verse disminuido considerablemente, sin embargo en la mayoría de los casos el efecto producido por las armónicas de secuencia negativa se cancela con el efecto de las secuencia positiva, por lo que su efecto neto en el par promedio puede despreciarse.

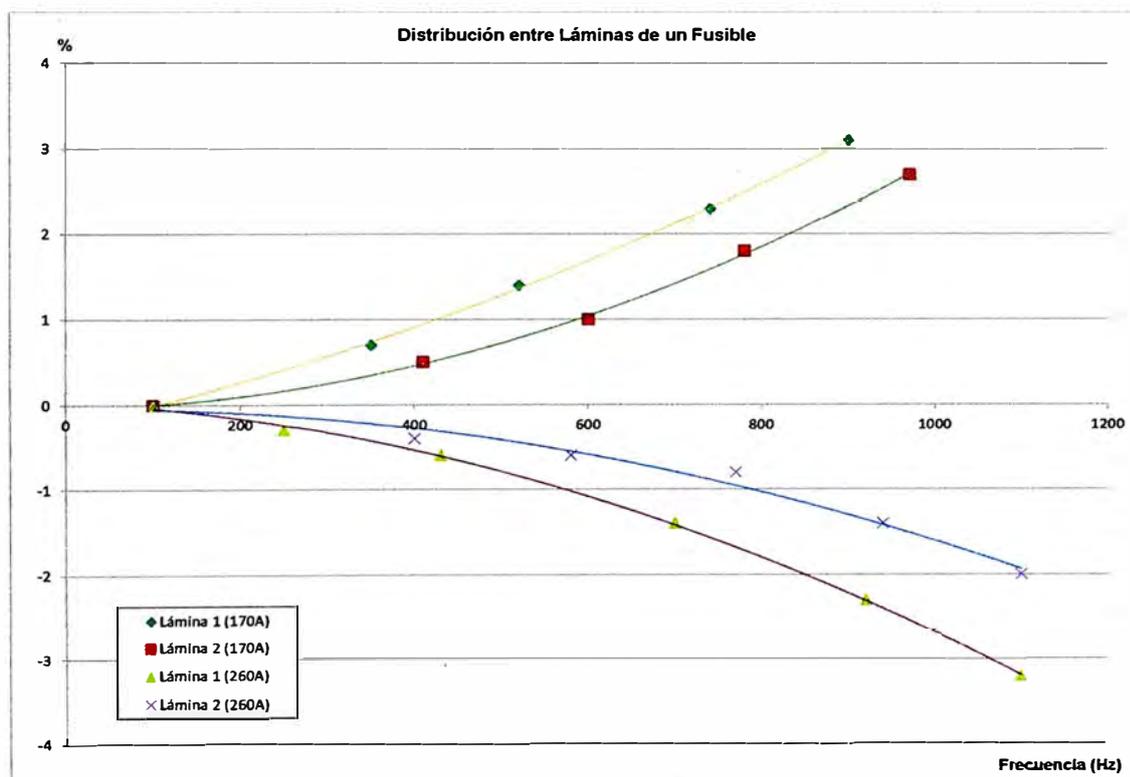
La interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo en el entrehierro de otra armónica resulta en pares pulsantes en los motores, los que pueden afectar la calidad del producto donde las cargas mecánicas de los motores sean sensibles a estas variaciones. Estos pares pulsantes también pueden excitar una frecuencia de resonancia mecánica lo que resultaría en oscilaciones que pueden causar fatiga de la flecha y otras partes mecánicas conectadas. Por lo general la magnitud de estos pares es pequeña y su valor promedio es cero.

## D) Protecciones y Equipos de Maniobra

Sobre los equipos de protección y maniobra (interruptores, seccionadores, fusibles, etc.) se producen un calentamiento adicional sobre cualquier conductor de corriente con contaminación por armónicas. Los fusibles representan un caso especial debido a que su principio de funcionamiento se basa en el calor generado por la corriente que lo atraviesa.

La Fig. N° 2.11 muestra la desigual distribución entre las láminas de un fusible, cuando la frecuencia de la corriente cambia de 50 a 1200 Hz.

En lo que respecta a relés de disco pueden presentar cuplas y sobrealcances o subalcances dependiendo de las armónicas en consideración. Los relés electromecánicos y analógicos clásicos responden a valores eficaces, en cambio los microprocesadores lo hacen a la fundamental. Estos últimos emplean filtros digitales a fin de atraer la fundamental y filtros "anti-aliasing" para dejar de lado las armónicas elevadas.



**Fig. N° 2.11** Distribución entre las láminas de un fusible

Los relés de valor eficaz de pico y de fundamental operan satisfactoriamente siempre y cuando el contenido de armónicas no supere al 15 % o 25 %.

Los equipos de medición de corriente y tensión pueden ser afectados por las modificaciones del ángulo de fase causado por la presencia de armónicas.

## **E) Interferencia en Telecomunicaciones**

Este tipo de interferencia es uno de los primeros problemas identificados y comprendidos, asociados con la presencia de armónicos de alta frecuencia en los sistemas de alimentación. En los años 1920, cuando los rectificadores estáticos se utilizaban en industrias por primera vez, sus cables de alimentación eran frecuentemente ubicados cerca de las redes de teléfono. Generando ruido en los circuitos de telecomunicaciones lo cual causo la molestia de los usuarios. Un alto nivel de ruido obstaculizaba severamente la transmisión, en algunos casos provocaba la pérdida total de la comunicación. Numerosos casos eran registrados, sobre todo en los años 1930 y 1940, cuando al conectar cargas rectificadoras provocaba grandes trastornos en la comunicación telefónica.

Además, en la actualidad, el mejoramiento de la calidad de transmisión requiere de un análisis continuo de las interferencias ocurridas en las líneas telefónicas situadas en las proximidades de los sistemas de potencia; sin embargo, el riesgo de interferencia es pequeño. Existen tres principales factores que causan la interferencia en las líneas de telecomunicación:

- **La Influencia de los Circuitos Eléctricos de Energía:** El efecto de los circuitos de energía sobre los circuitos de telecomunicación depende de la ubicación de las fuentes de armónicos respecto a los circuitos de telecomunicación, y a las amplitudes de las frecuencias de los componentes perturbadores.
- **El Tipo y Nivel de Acoplamiento en Circuitos de Telecomunicación:** El mecanismo de la influencia de factores perturbadores extraños (armónicos de tensión o corriente) en los circuitos de telecomunicación puede ser debido a la inducción electromagnética o electrostática.
- **Sensibilidad de los Circuitos de Telecomunicación:** Son provocados por disturbios externos.

La interferencia se produce como resultado de la coincidencia de estos tres factores. Aunque este tipo de interferencia está todavía presente, representa ahora un problema menor. La distorsión armónica se ha vuelto menos significativa debido a la utilización de nuevas técnicas de hardware y software.

## **F) Barras de Neutros**

Las barras de neutros transportan corrientes de secuencia positiva, negativa y cero, producidas por el desbalance de cargas o por la presencia de armónicas en las cargas. Debido a que éste es el primer punto de unión de los neutros, es aquí donde se cancelan las componentes de secuencia positiva y negativa en el caso balanceado. Las componentes de secuencia cero no se cancelarán sino que se triplicarán sobrecargando a las barras de neutros. Por esta razón las barras que están dimensionadas para soportar la misma corriente de fase que las líneas pueden sobrecargarse fácilmente en presencia de cargas no lineales.

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

## **G) Equipos de Medición**

Los aparatos de medición e instrumento de medición en general son afectados por armónicas, especialmente si ocurren resonancias que afectan la magnitud medida.

Dispositivos con disco de inducción como los medidores de energía, son sensibles a componentes armónicas, pudiendo presentar errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de la armónica presente. En general la distorsión debe ser elevada (>20%) para producir error significativo. Por ejemplo un contador de energía de clase 2 dará un error suplementario de 3% con una tasa del 5% para el armónico de orden 5.

Cuando el medidor es sometido a tensiones y corrientes distorsionadas, estas crean conjugados que hacen que el disco acelere o desacelere, ocasionando errores de medición.

Las dos componentes en el error de medición en un ambiente no sinusoidal son: errores dependientes de la frecuencia y errores debido a la no linealidad. El primero es

debido a la limitada faja de operación en los circuitos convertidores de entrada y del propio instrumento en sí. El segundo es originado de las características no lineales del material del medidor y es dependiente de la forma de onda.

### **G) Equipos Electrónicos Sensibles**

Existen numerosos equipos modernos que son muy sensibles a los cambios producidos en la tensión de alimentación de los mismos. Entre ellos están: las computadoras, los módems, las tarjetas de electrónica compleja (de captación de datos de comunicaciones, etc), las cargas registradoras y muchos otros equipos domésticos de oficina. Estos equipos al estar constituidos por complejas y delicadas configuraciones de elementos de baja potencia, necesitan de una fuente de alimentación muy estable que les provea de una tensión DC de rizado casi nula. Para ello, necesitan de una fuente primaria de AC y de un bloque rectificador con fuente de tensión estabilizada. En algunos casos este bloque de alimentación no posee el grado de invulnerabilidad necesaria para soportar ciertos grados de distorsión de la onda de tensión. Por esta razón los delicados circuitos son sometidos a variaciones notables en el lado DC de sus fuentes, afectando el funcionamiento de los mismos. Esta es la causa del re-arranque de computadoras y de la pérdida de control de las cajas registradoras sometidas a tensiones altamente distorsionadas. Además, los equipos con alto nivel de integración en sus componentes y que estén sometidos a tensiones distorsionadas por armónicas durante prolongados períodos de tiempo, pueden presentar daños irreparables. En su gran parte estos daños provocan la inutilidad total del componente integrado del equipo en cuestión.

En el caso de los equipos que necesitan de un potencial de tierra nulo, si están conectados a conductores de neutro por los que circulan corrientes de armónicas, entonces se verán sometidos a tensiones de neutro a tierra, ciertamente peligrosos, que pueden causarles daños.

Existen además equipos electrónicos que necesitan sensar las magnitudes de fase para tener una noción de tiempo con respecto a los comienzos de los períodos de las corrientes y tensiones de alimentación. Normalmente basan su funcionamiento en la detección del cruce por cero de las magnitudes que chequean. Cuando estas están sometidas a los efectos de distorsión de las cargas no lineales, puede darse el caso que aparezcan cruces por cero de las formas de onda en momentos que no coinciden con el cambio de signo del lóbulo (positivo o negativo) de la onda que se tome de referencia.

Estas detecciones incorrectas pueden dar lugar a operaciones erróneas y en algunos casos al no funcionamiento de los equipos que controlan.

## H) Banco de Condensadores

El principal problema que se puede tener al instalar un banco de condensadores en circuitos que alimenten cargas no lineales es la resonancia tanto serie como paralelo. A medida que aumenta la frecuencia, la reactancia inductiva del circuito equivalente del sistema aumenta, en tanto que la reactancia capacitiva de un banco de condensadores disminuye. Existirá entonces al menos una frecuencia en la que las reactancias sean iguales, provocando la resonancia.

### a) Resonancia

El tratamiento numérico del sistema de potencia para el análisis armónico viene dado por alguna de las siguientes ecuaciones:

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad \dots(2.38)$$

$$I_h = Y_h \cdot V_h \quad \dots(2.39)$$

Donde  $V_h$  es el vector de la componente  $h$  en cada barra que debe ser determinado.  $Z_h$  Es la impedancia armónica del sistema,  $Y_h$  la matriz de admitancia, e  $I_h$  son las corrientes armónicas medidas o estimadas que representan la fuente de contaminación conectada en cada barra.

En la ecuación (2.38),  $Z_h$  puede ser obtenida utilizando un algoritmo de topología para cada armónico que interese o su inversa  $Y_h$  para el caso de la ecuación (2.39), pero se ha mostrado que los efectos en las cargas o en otra parte del sistema deben ser modelados.

Además, en la ecuación (2.38), se observa que la impedancia armónica juega un papel preponderante en la respuesta a los armónicos del sistema, especialmente al efecto de resonancia. La resonancia se define como una amplificación en la respuesta del sistema a una excitación periódica cuando la frecuencia de la fuente de excitación es igual a la frecuencia natural del sistema. El ejemplo clásico del circuito LC, muestra que al ser

excitado por una corriente armónica, las reactancias capacitivas e inductivas vistas por la fuente de corriente serán resonantes a la frecuencia  $f_r=1/(2\pi\sqrt{LC})$ , conocida como frecuencia de resonancia.

En los sistemas de potencia, graves problemas de resonancia pueden ocurrir por la instalación de capacitores para la corrección del factor de desplazamiento o con propósitos de regulación de tensión. Las reactancias inductivas y capacitivas del sistema, que producen la frecuencia de resonancia, a menudo se encuentran muy cerca de las armónicas de orden 5 o 7. Sin embargo, pueden ocurrir problemas en las armónicas de orden 11 o 13, las cuales son menos usuales. Pueden ocurrir con mucha frecuencia, dos tipos de resonancia en el sistema: resonancia serie y resonancia paralela. La resonancia serie es un camino de baja impedancia al flujo de la corriente armónica, y la resonancia paralela es un camino de alta impedancia al flujo de la corriente armónica.

- **Resonancia Serie:** Como se muestra en la Fig. N° 2.12, si el banco de capacitores está en serie con la reactancia del sistema y crea un camino de baja impedancia a la corriente armónica, se está en presencia de una condición de resonancia serie. La resonancia serie puede causar altos niveles de distorsión en la tensión entre la inductancia y el capacitor del circuito debido a la corriente armónica concentrada en el bajo camino de impedancia. Esta resonancia provoca que falle el capacitor o el fusible por el efecto de la sobretensión.

La condición de resonancia serie está dada por:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \dots(2.40)$$

Donde  $h_r$  es el orden del armónico en la cual se presenta el efecto de resonancia.

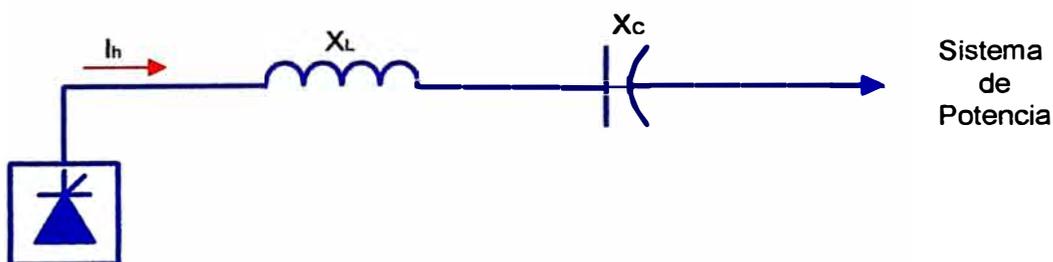


Fig. N° 2.12 Resonancia serie

- **Resonancia Paralelo:** La Fig. N° 2.13 muestra la topología del circuito en la cual puede ocurrir la resonancia paralelo. La resonancia paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva y la capacitiva del sistema, que están en paralelo, tienen una cierta frecuencia que está presente en el sistema, esta combinación en paralelo es vista por la fuente como una impedancia muy grande. Esta frecuencia, para la cual la impedancia es muy grande, es precisamente la frecuencia de resonancia. Esta resonancia produce distorsión en la tensión y amplificación en la corriente de manera significativa. La tensión distorsionada produce el flujo de corriente distorsionada en los ramales adyacentes. Finalmente, estas corrientes amplificadas producen el fallo del equipo.

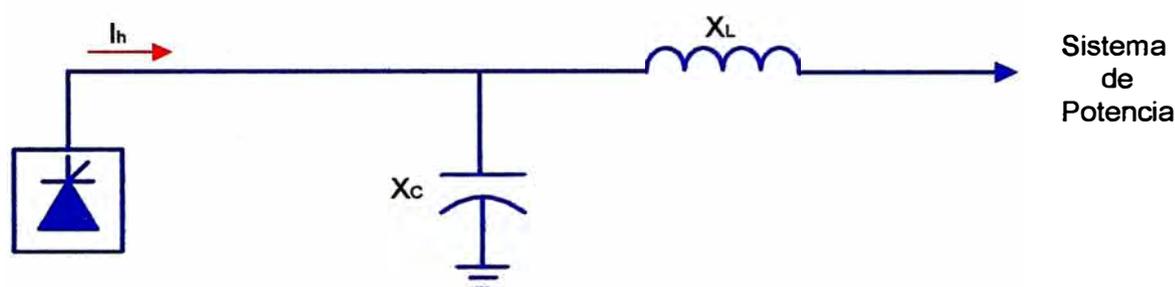


Fig. N° 2.13 Resonancia paralelo

En el circuito de la Fig. N° 2.13, la frecuencia de resonancia se determina por:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_{COND}}} \quad \dots(2.41)$$

Donde  $MVA_{SC}$  es la potencia de cortocircuito en MVA en el punto de conexión de la carga perturbadora y los  $MVAR_{COND}$  es la potencia en MVAR del condensador. Esta es una aproximación muy buena para relaciones  $X/R$  altas.

- **Resonancia en Sistemas Industriales:** La combinación de cargas no lineales, ricas en armónicos, y de bancos de condensadores para mejoramiento del factor de potencia han incrementado las posibilidades de amplificación armónica. Un sistema sin condensadores tiene una capacitancia distribuida muy baja, y por lo tanto, las frecuencias de resonancia son bastante elevadas (del orden de los KHz), muy alejadas de los armónicos excitadores que se puedan presentar. La presencia de

condensadores introduce polos y ceros cercanos a las frecuencias armónicas presentes amplificando el efecto de los armónicos.

Con la utilización de bancos de condensadores en paralelo, cualquier tipo de resonancia puede ocurrir: serie, paralela o distribuida; el resultado será un excesivo flujo de corriente armónica y el apareamiento de sobretensiones intolerables. A continuación se muestran algunas situaciones que pueden llevar a condiciones de resonancia cuando se instalan bancos de condensadores en una planta industrial.

La resonancia serie puede ser ocasionada tanto por armónicos producidos por cargas no lineales del mismo usuario como por excitaciones armónicas provenientes del sistema externo a la planta industrial, esto se muestra en la Fig. N° 2.14. En la resonancia paralela, que además es la condición más común de resonancia en sistemas de potencia industriales, se presenta cuando la inductancia equivalente del sistema externo resuena con un banco de condensadores para mejorar el factor de potencia a una frecuencia armónica producida por una carga de la misma industria, como se muestra en la Fig. N° 2.15.

Durante la resonancia, la impedancia equivalente se incrementa y se establecen altas corrientes circulantes entre el sistema y el condensador, ocasionando peligrosas sobretensiones en éste.

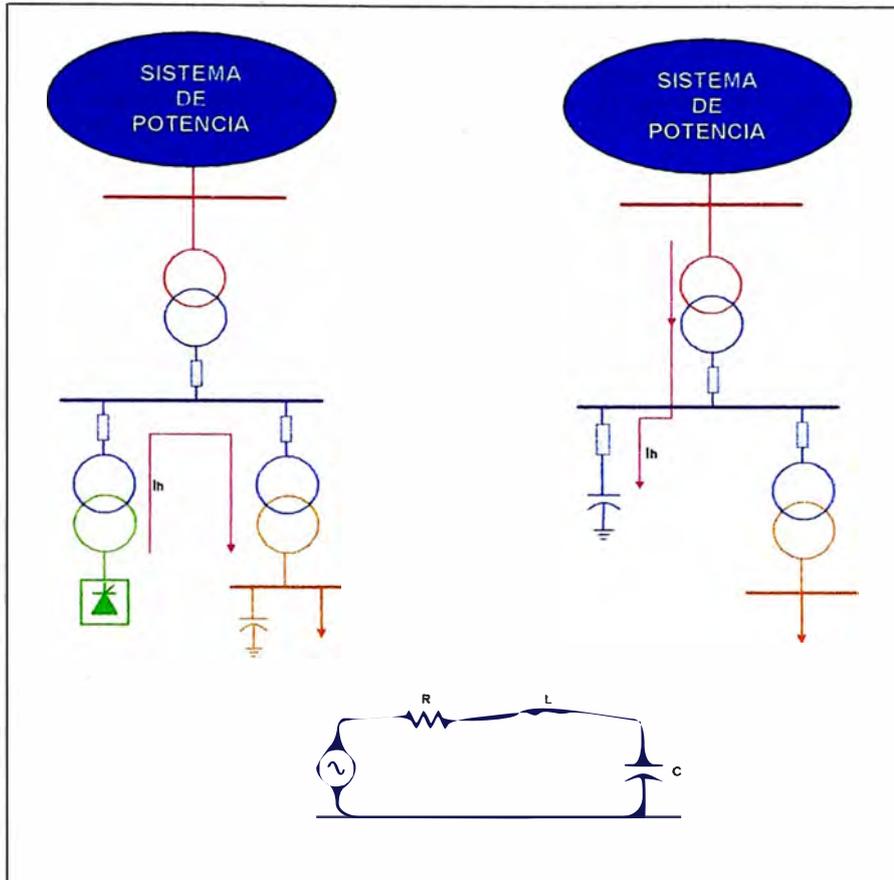


Fig. N° 2.14 Resonancia en sistemas industriales

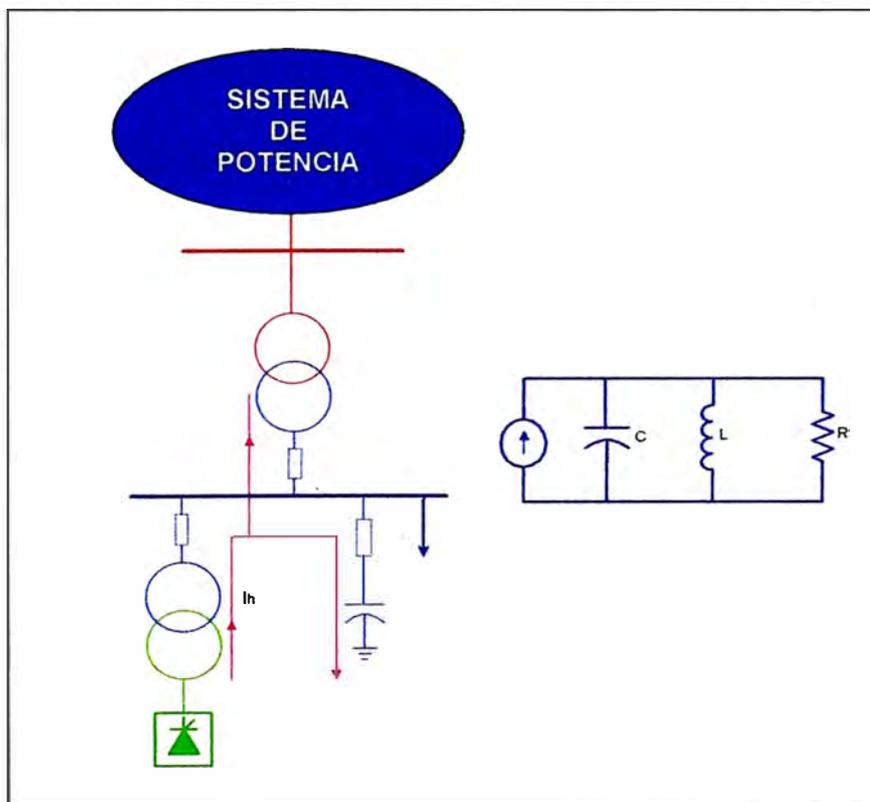


Fig. N° 2.15 Condición de resonancia en sistemas externos

- **Resistencias Durante la Resonancia:** Durante a resonancia los circuitos se comportan como resistencias puras, por ello, la severidad de la resonancia queda determinada por el valor de las resistencias involucradas en el circuito, en la resonancia el factor más importante y decisivo son las resistencias presentes.

En una resonancia serie la única limitadora de la corriente es la pequeña resistencia serie, cuando el circuito resonante serie es un filtro, esta resistencia define la calidad del filtro y por ende la selectividad del mismo. En una resonancia paralela la resistencia paralela limita el valor máximo de la impedancia, y por ende, la máxima distorsión armónica de tensión que se puede presentar.

## **2.8 Marco Normativo para el Control de Armónicas**

En el país, los indicadores de calidad de energía son evaluados en base a la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), la cual establece como uno de sus requisitos estándares para las siguientes variables eléctricas:

- Armónicos de tensión en magnitud (medición de siete días continuos en intervalos de 10 minutos).
- Niveles de tensión (medición de siete días continuos en intervalos de 15 minutos).
- Flicker (medición de siete días continuos en intervalos de 10 minutos).

### **2.8.1 Control de la Calidad de Producto Según NTCSE**

El control de la calidad de los servicios eléctricos aplicable a las empresas involucradas directa o indirectamente en la prestación y uso de este servicio se realiza en los siguientes aspectos:

#### **A) Calidad de Producto**

- ✓ Tensión.
- ✓ Perturbaciones (Flicker y **Tensiones Armónicas**).

La NTCSE define como punto de acoplamiento común (PAC) a la barra en donde existen transacciones de energía entre empresas concesionarias y clientes finales.

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

El indicador de calidad de tensión se refiere a que en un intervalo de medición k, de 15 minutos de duración está dado por la siguiente fórmula:

$$\Delta V_K(\%) = \frac{(V_K - V_N)}{V_N} 100\% \quad \dots(2.42)$$

La tolerancia del nivel de tensión es del  $\pm 5\%$  de la tensión nominal.

- **Perturbaciones:** La NTCSE solo contempla indicadores de calidad para el control del Flicker y Tensiones Armónicas.

### Flicker

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

### Armónicas de Tensión

La forma de evaluar una tensión o una corriente distorsionada es a través del parámetro denominado distorsión armónica total THD (Total Harmonic Distorsión). Según la NTCSE la fórmula de THD es la siguiente:

$$THD_v = \frac{1}{V_N} \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \right) \cdot 100\% \quad \dots(2.43)$$

Donde:

$V_N$  : Tensión nominal.

$V_2, V_3, \dots, V_{40}$  : Armónica de tensión del orden 2 al 40.

**Nota:** El THD se interpreta como: Que proporción de la señal de 60 Hz representa la señal distorsionada.

Las tolerancias establecidas para las tensiones armónicas individuales según la NTCSE son las que se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla N° 2.8** Límite de distorsión individual de tensión

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

Para tensiones menores o iguales a 30 kV el sistema debe cumplir un límite máximo de distorsión de tensión THD de 8%, los límites de tensiones armónicas individuales están dados en la tabla N° 5 de dicha norma y se resumen así:

**Tabla N° 2.9** Límite de distorsión individual de tensión

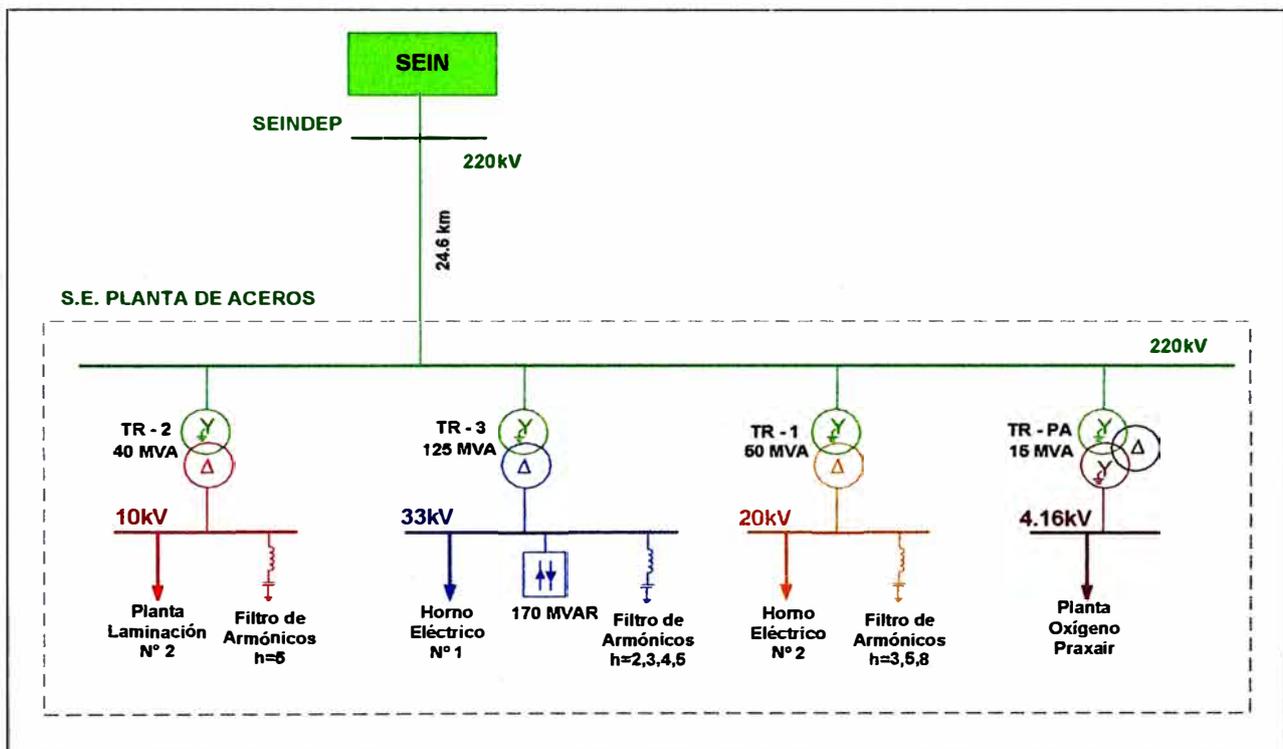
<b>Baja y Media Tensión</b>							
<b>Armónico</b>	<b>%</b>	<b>Armónico</b>	<b>%</b>	<b>Armónico</b>	<b>%</b>	<b>Armónico</b>	<b>%</b>
2	2.0	12	0.2	22	0.2	32	0.2
3	5.0	13	3.0	23	1.5	33	0.2
4	1.0	14	0.2	24	0.2	34	0.2
5	6.0	15	0.3	25	1.5	35	0.557
6	0.5	16	0.2	26	0.2	36	0.2
7	5.0	17	2.0	27	0.2	37	0.538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

## CAPITULO III

### SISTEMA ELÉCTRICO DE LA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ACEROS

#### 3.1 Descripción del Sistema Eléctrico

En la Fig. N° 3.1 se muestra la topología del sistema eléctrico de la Planta de Aceros.



**Fig. N° 3.1** Topología del sistema eléctrico de la Planta de Aceros

El sistema eléctrico de la Planta de Aceros se encuentra conformado por una subestación principal (S.E. Planta de Aceros), la cual se alimenta de la subestación SEINDEP mediante una línea de transmisión en 220 kV y 26.7 km de longitud.

La subestación Planta de Aceros suministra de energía eléctrica a cuatro transformadores de potencia los cuales se describen a continuación:

- **Transformador TR - 2:** Se encarga de suministrar de energía eléctrica a las siguientes áreas:

- Planta de laminación N° 2 (consume aprox. el 50% de la potencia suministrada por TR - 2).
- Planta de humo.
- Planta de agua.
- Planta de fragmentación.
- Planta de reducción.
- Chancadora, aduana, salas, etc.

Las características eléctricas del transformador se muestran en la tabla N° 3.1.

**Tabla N° 3.1** Características eléctricas TR - 2

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Potencia nominal	40 MVA
Relación de transformación	210/10 kV
Impedancia (Zcc)	15.6 %
Grupo de conexión	Ynd11

Cabe precisar que el nivel de 10 kV se encuentra conectado un filtro de 5° armónica de 8.7 MVAR.

- **Transformador TR3:** Suministra de energía eléctrica al horno eléctrico N° 1 cuya demanda aproximada es de 63 MW. En la tabla N° 3.2 se muestra las características eléctricas del transformador.

**Tabla N° 3.2** Características eléctricas TR - 3

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Potencia nominal	125 MVA
Relación de transformación	220/33 kV
Impedancia (Zcc)	12.34 %
Grupo de conexión	Ynd5

Cabe precisar que el nivel de 33 kV se encuentra conectado un SVC de 170 MVAR y filtros de armónicas de orden 2, 3, 4 y 5.

- **Transformador TR1:** Suministra de energía eléctrica al horno eléctrico N° 2 cuya demanda aproximada es de 9 MW. En la tabla N° 3.3 se muestra las características eléctricas del transformador.

**Tabla N° 3.3** Características eléctricas TR - 1

Descripción	Valor
Potencia nominal	50 MVA
Relación de transformación	210/20kV
Impedancia (Zcc)	12.34 %
Grupo de conexión	Ynd5

Cabe precisar que el nivel de 20kV se encuentra conectados filtros de armónicas de orden 3, 5 y 8.

- **Transformador TR - PA:** Suministra de energía eléctrica a la planta de oxígeno praxair cuya demanda es de 8 MW aproximadamente. En la tabla N° 3.4 se muestra las características eléctricas del transformador.

**Tabla N° 3.4** Características eléctricas TR - PA

Descripción	Valor
Potencia nominal	15/15/5 MVA
Relación de transformación	220/4.16/2.47 kV
Impedancia (Scc)	
HV- MV	9.375 %
MV-LV	0.385 %
LV-HV	1.066 %
Grupo de conexión	YN0yn0d5

### 3.2 Consideraciones

En el presente informe se tomaron las siguientes consideraciones:

- Para la evaluación de los indicadores de calidad de los armónicos de tensión y flicker se tomaron las tolerancias establecidas en la NTCSE.

- El análisis de armónicos de la Planta de Aceros comprende tres evaluaciones las cuales presentan mediciones eléctricas con equipos analizadores de potencia. Cabe indicar que cada evaluación ha sido realizada en distintos periodos de medición.
- El registro de mediciones obtenido fueron realizadas en condición de operación normal, a excepción de la evaluación en donde salieron fuera de servicio los hornos eléctricos N° 1 y N° 2 con la finalidad de determinar la influencia de los hornos en la distorsión armónica de tensión en el nivel de 220 kV.
- Se simuló la red eléctrica de la Planta de Aceros, en el software Digsilent, para el análisis del scan de frecuencia de la planta. Cabe resaltar que las cargas en el nivel de baja tensión fueron tomadas como cargas equivalentes.

### **3.3 Metodología para el Análisis Armónico**

La metodología utilizada para el análisis de armónicos consiste en lo siguiente:

- Realizar mediciones eléctricas en los puntos eléctricos en donde se prevé la presencia de fuentes de armónicos y/o en los puntos eléctricos en donde se desea determinar el nivel de distorsión ocasionado por fuentes de armónicos cercanos.
- Determinar los indicadores de calidad bajo los lineamientos establecidos en la NTCSE.
- Analizar el comportamiento de la distorsión armónica de tensión en los puntos eléctricos evaluados.
- Analizar los armónicos individuales de tensión que resulten fuera de rango.
- Analizar la dispersión armónica de los armónicos de tensión que resulten fuera de rango.
- Analizar el comportamiento de la distorsión de tensión frente a la demanda.
- Analizar el comportamiento diario de la distorsión de tensión.
- Analizar el comportamiento del flicker frente a la demanda.
- Análisis del scan de frecuencia en el nivel de 220 kV.

## CAPITULO IV RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

### 4.1 Evaluación N° 1: Análisis de Armónicos en las Subestaciones Planta de Aceros y SEINDEP

El objetivo del presente análisis es mostrar los resultados de la evaluación de armónicos en las subestaciones Planta de Aceros y SEINDEP. En la Fig. N° 4.1 se muestra la ubicación gráfica de los puntos eléctricos evaluados.

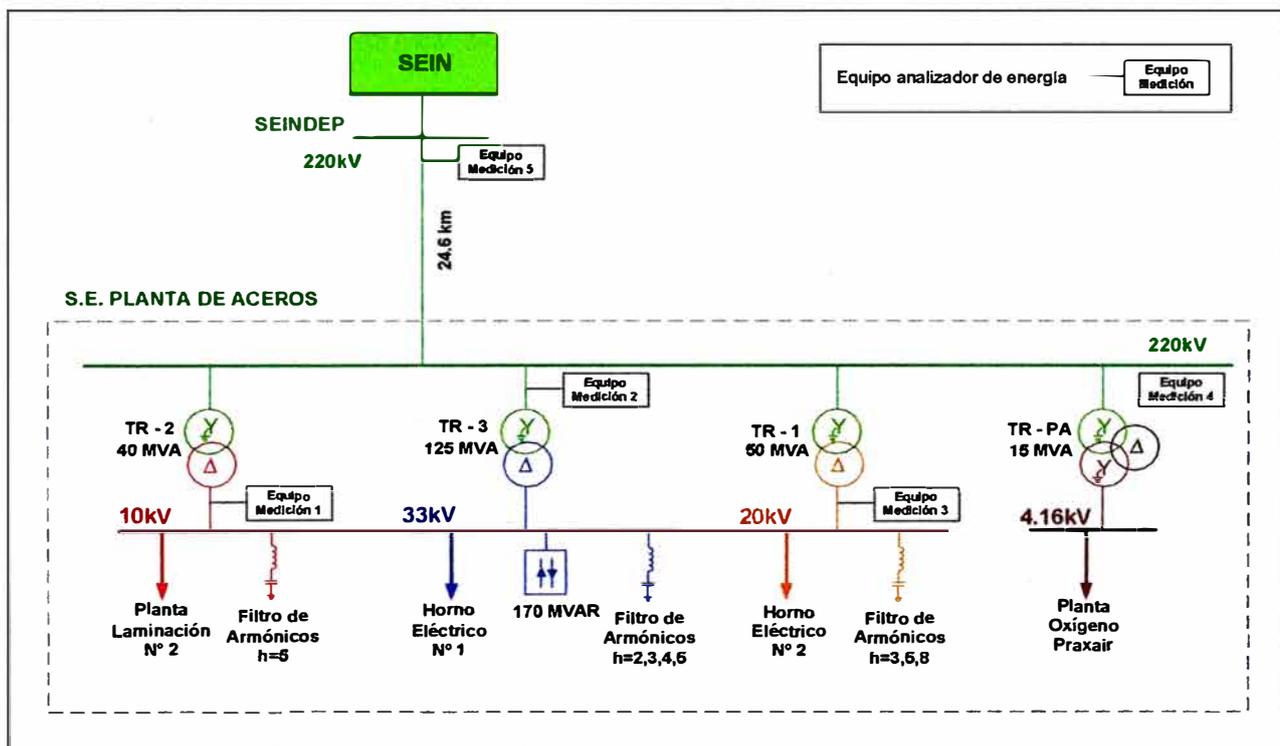


Fig. N° 4.1 Topología del sistema eléctrico de la planta de Aceros.

Los registros fueron obtenidos a través de equipos analizadores de energía los cuales fueron programados para que registren variables eléctricas por un período de 7 días continuos acorde a la normatividad vigente (NTCSE).

#### 4.1.1 Puntos de Medición Evaluados

La medición de armónicos fue realizada en los siguientes puntos eléctricos:

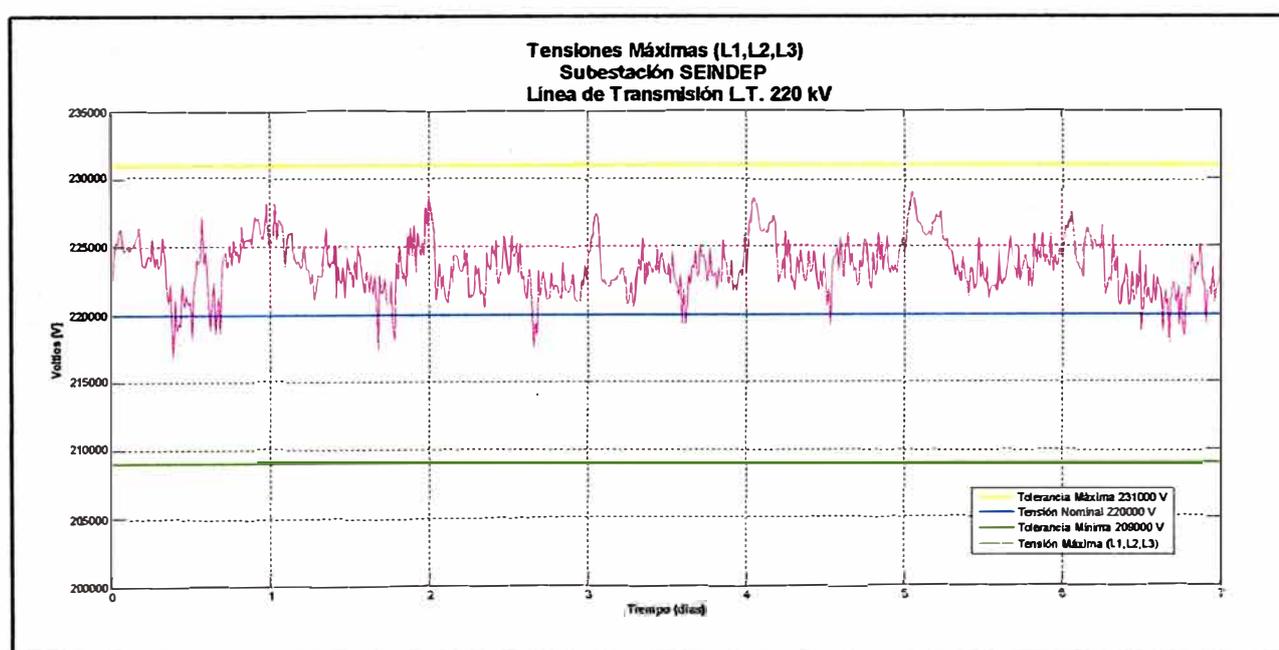
**Tabla N° 4.1** Puntos de medición.

Subestación	Punto Eléctrico		Tensión Nominal	Equipo Medición
	Línea o Transformador	Código		
SEINDEP	Línea Transmisión	L.T. 220 kV	220 kV	Equipo Medición 5
Planta de Aceros	Transformador	TR – PA	220 kV	Equipo Medición 4
Planta de Aceros	Transformador	TR – 3	220 kV	Equipo Medición 2
Planta de Aceros	Transformador	TR – 1	20 kV	Equipo Medición 3
Planta de Aceros	Transformador	TR – 2	10 kV	Equipo Medición 1

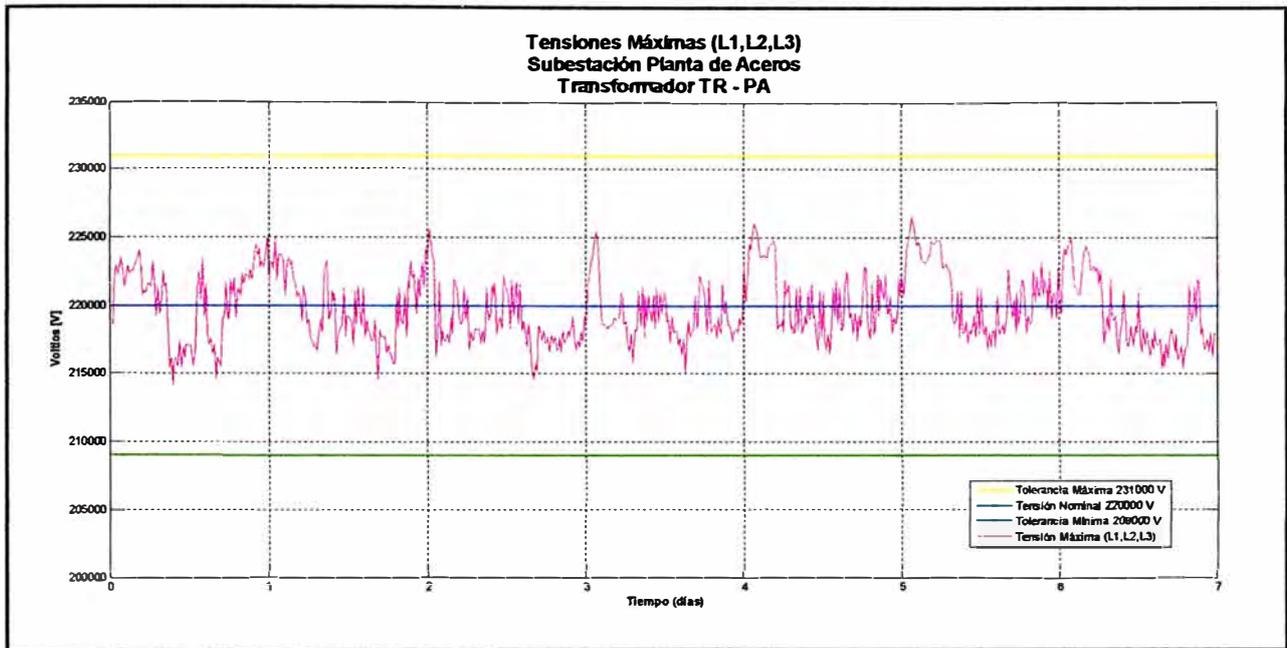
#### 4.1.2 Análisis de Indicadores de Calidad Según NTCSE

##### A) Mediciones de Tensión

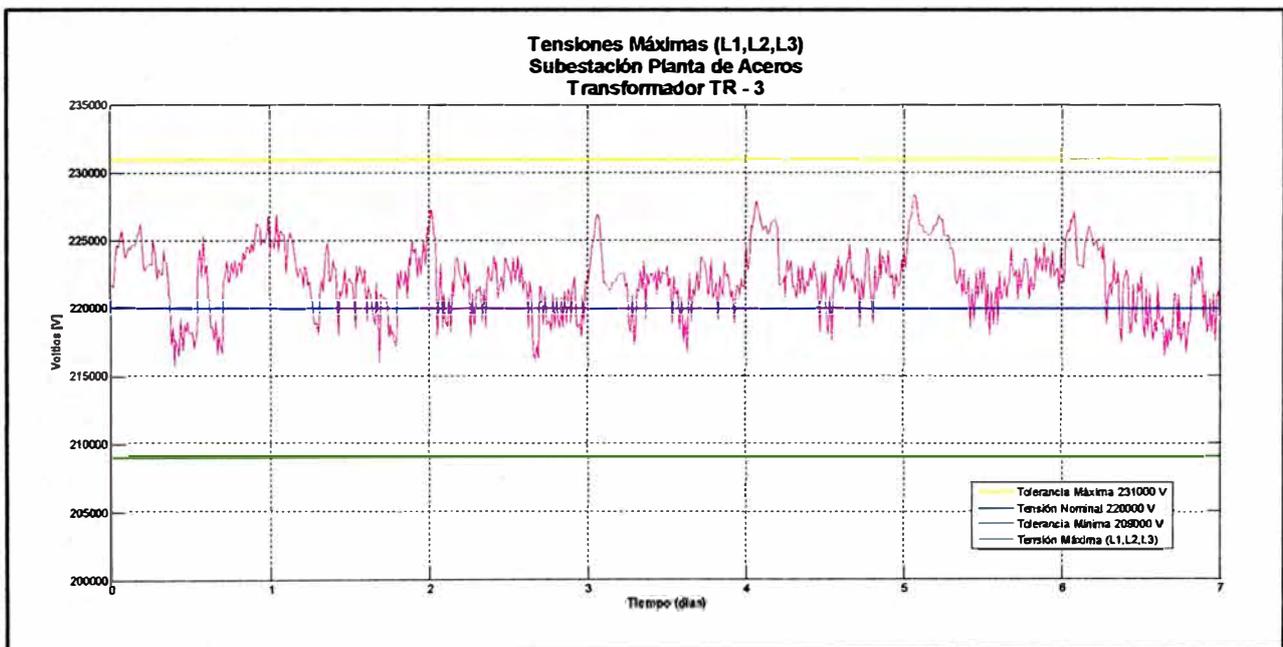
En las siguientes figuras se muestra el comportamiento de la tensión RMS correspondiente a cada punto eléctrico evaluado.



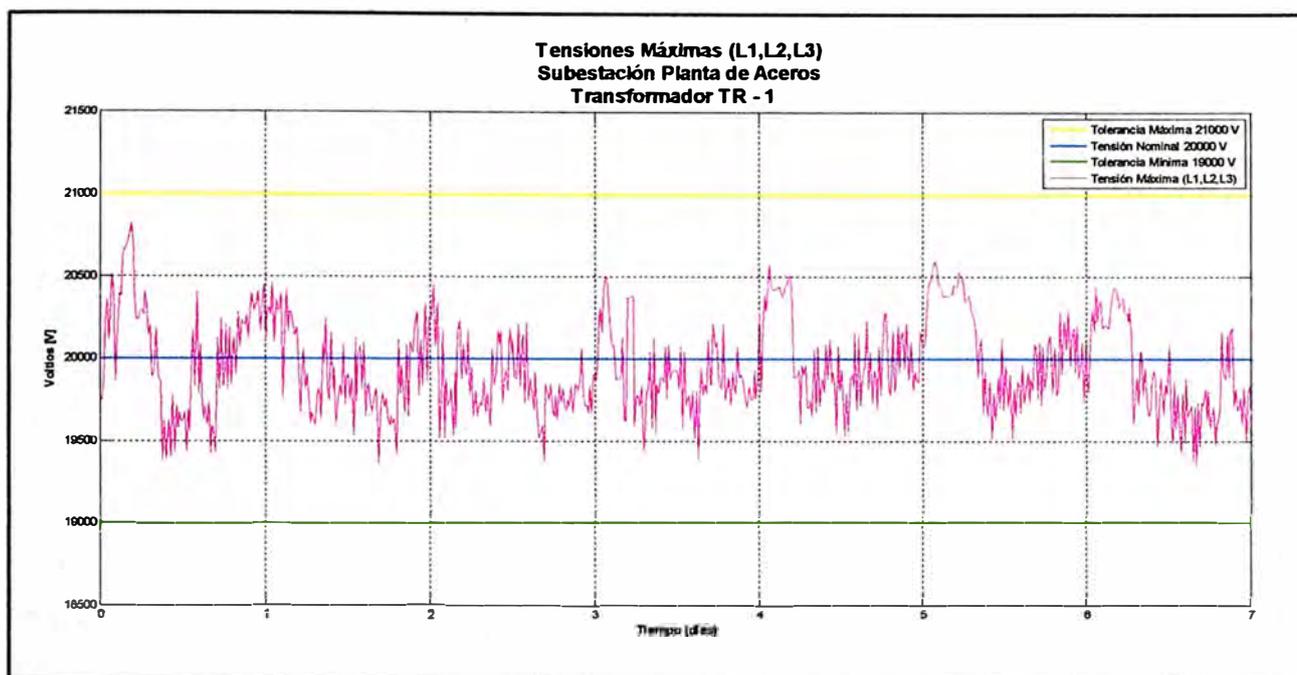
**Fig. N° 4.2** Comportamiento de la tensión RMS en L.T. 220 kV.



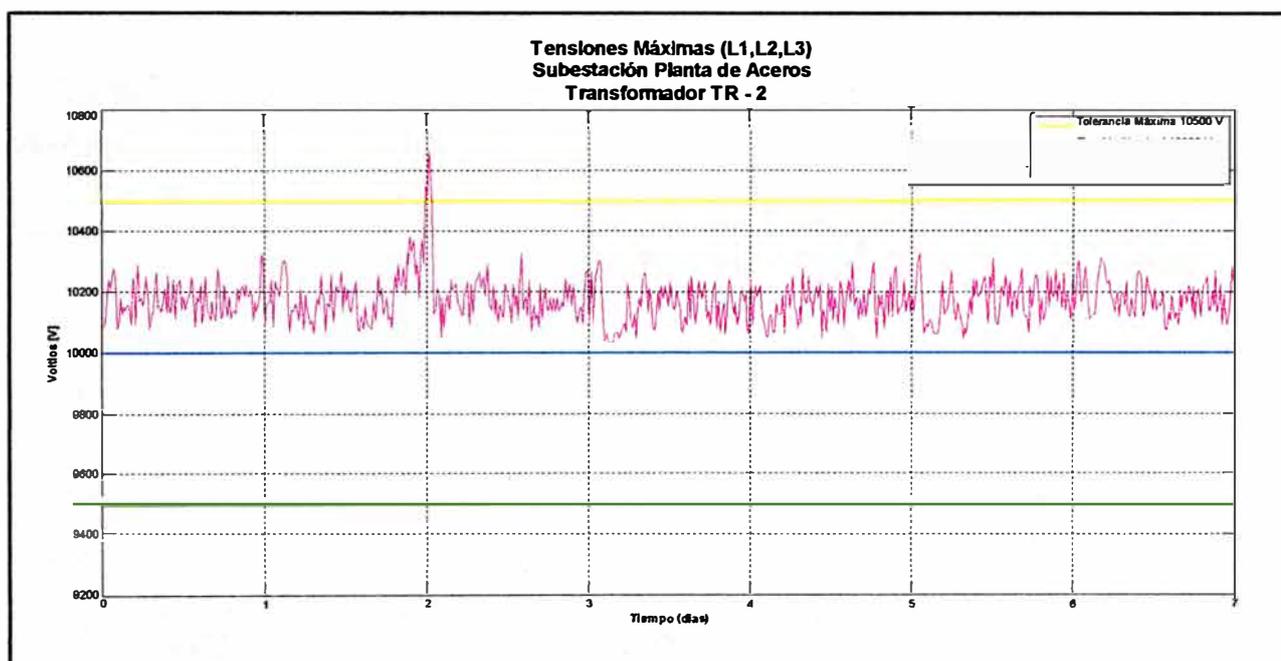
**Fig. N° 4.3** Comportamiento de la tensión RMS en TR - PA.



**Fig. N° 4.4** Comportamiento de la tensión RMS en TR - 3.



**Fig. N° 4.5** Comportamiento de la tensión RMS en TR - 1.



**Fig. N° 4.6** Comportamiento de la tensión RMS en TR - 2.

En la tabla N° 4.2 se muestra los resultados de la evaluación de la tensión RMS.

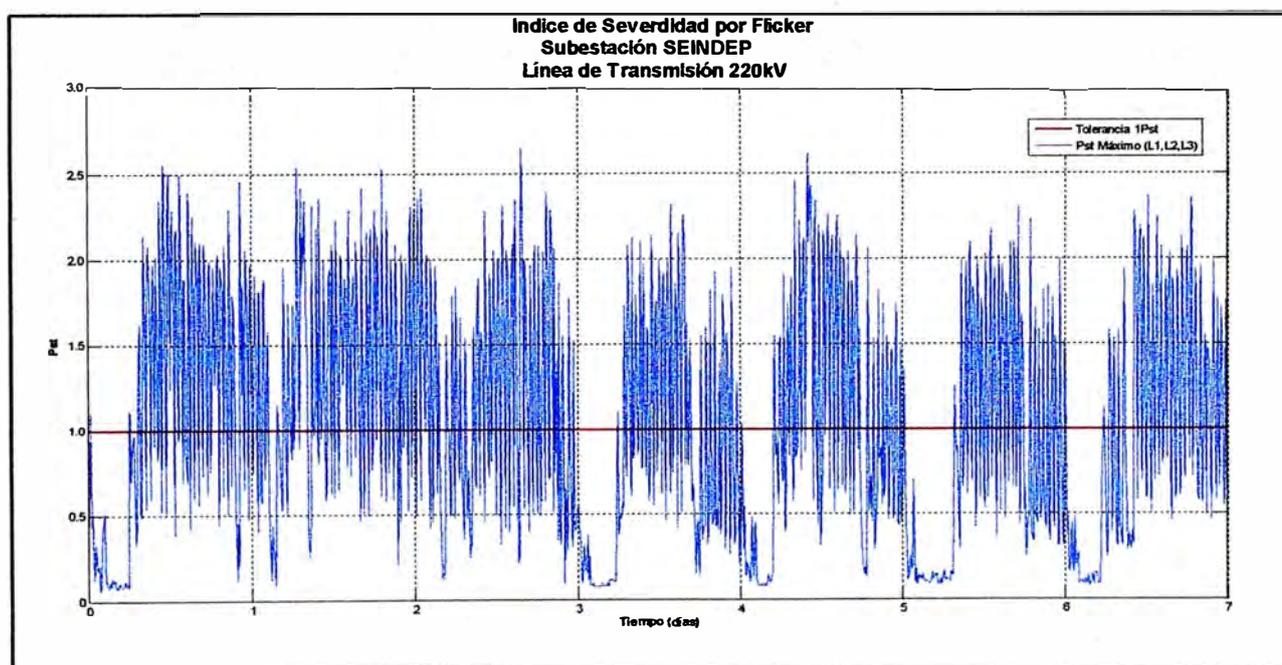
**Tabla N° 4.2 Niveles de Tensión RMS.**

Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Intervalos Registrados (Muestra)	Intervalos Fuera de Rango	
				Cantidad	%
SEINDEP	L.T. 220 kV	220 kV	672	0	0.0%
Planta de Aceros	TR – PA	220 kV	672	0	0.0%
Planta de Aceros	TR – 3	220 kV	672	0	0.0%
Planta de Aceros	TR – 1	20 kV	672	0	0.0%
Planta de Aceros	TR – 2	10 kV	672	4	0.6%

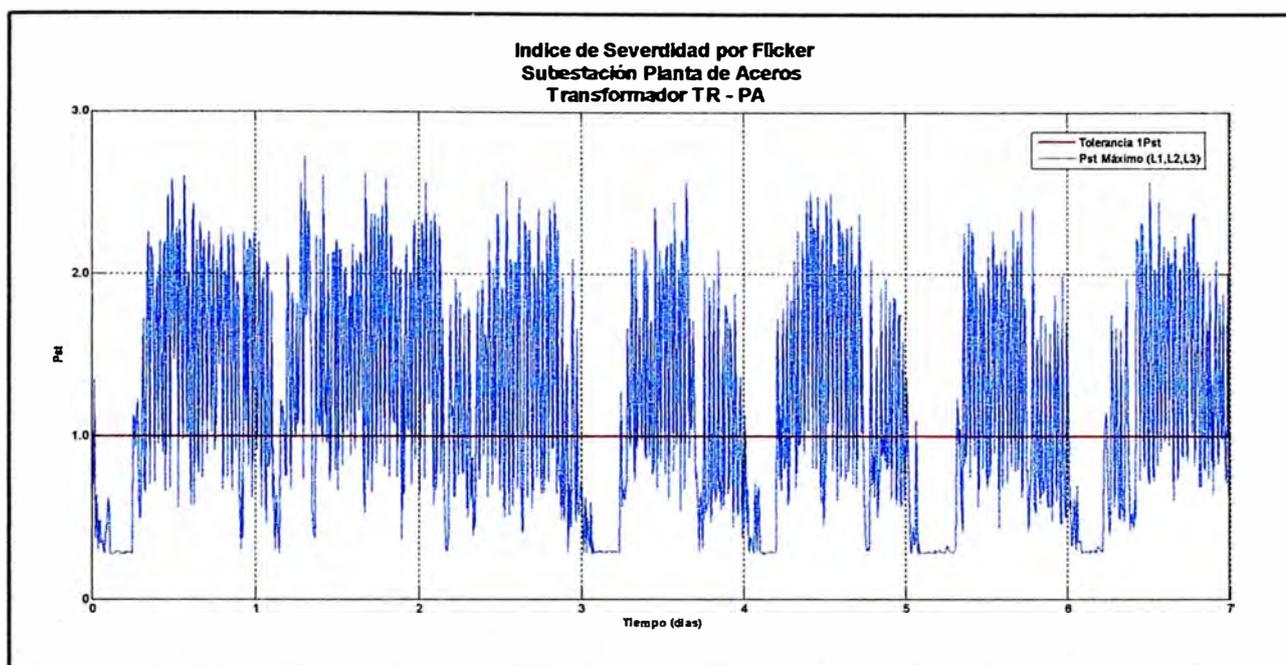
De la tabla anterior, se puede observar que los intervalos de tensión RMS fuera de rango no superan el 5% de la muestra; por consiguiente, se considera la tensión RMS de buena calidad según la NTCSE.

## B) Mediciones de Flicker

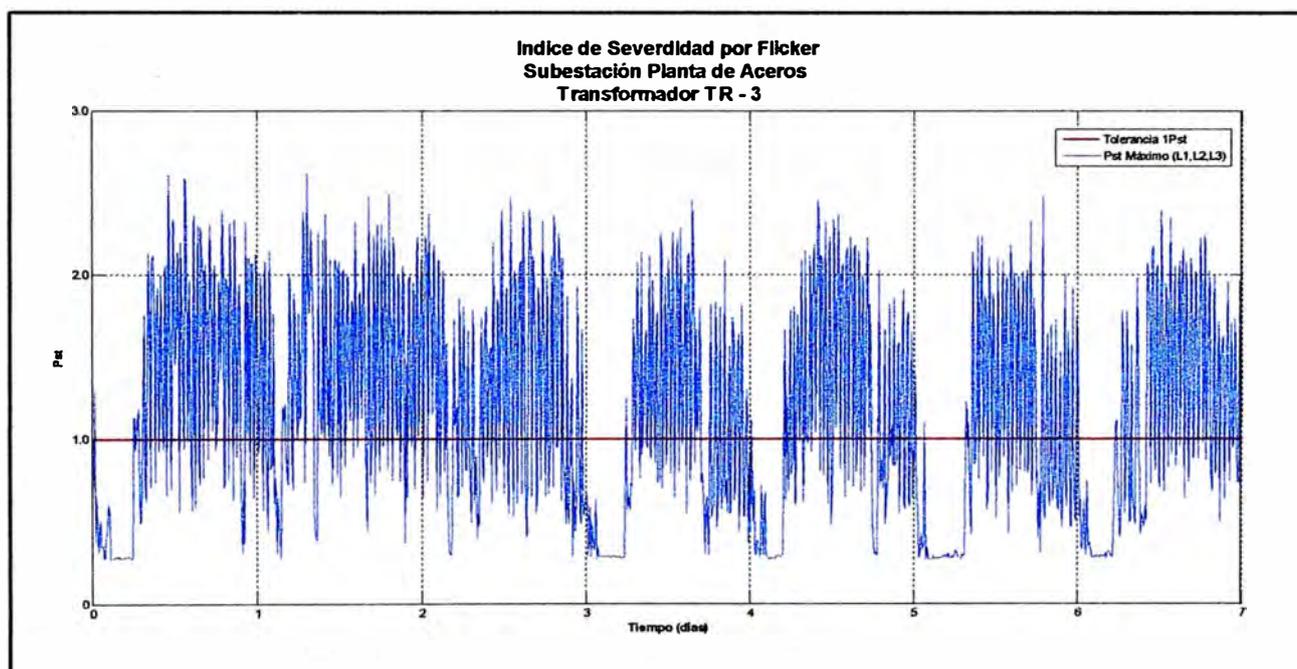
En las siguientes figuras se muestra el comportamiento del flicker correspondiente a cada punto eléctrico evaluado.



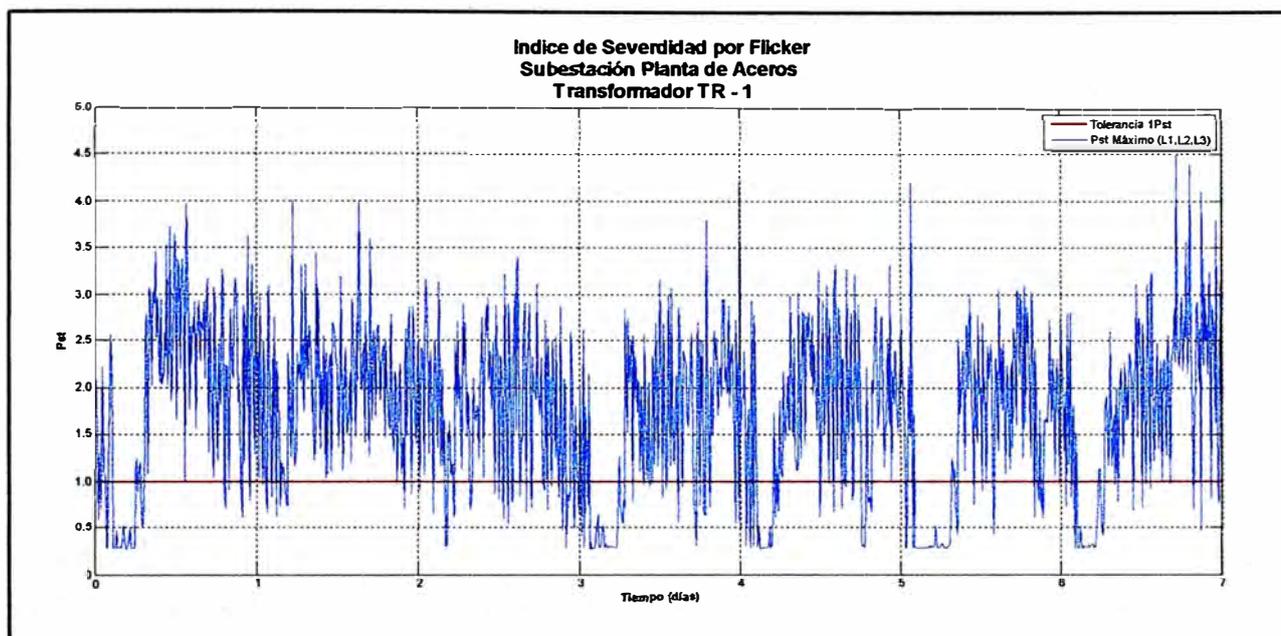
**Fig. N° 4.7 Comportamiento del Flicker en L.T. 220 kV.**



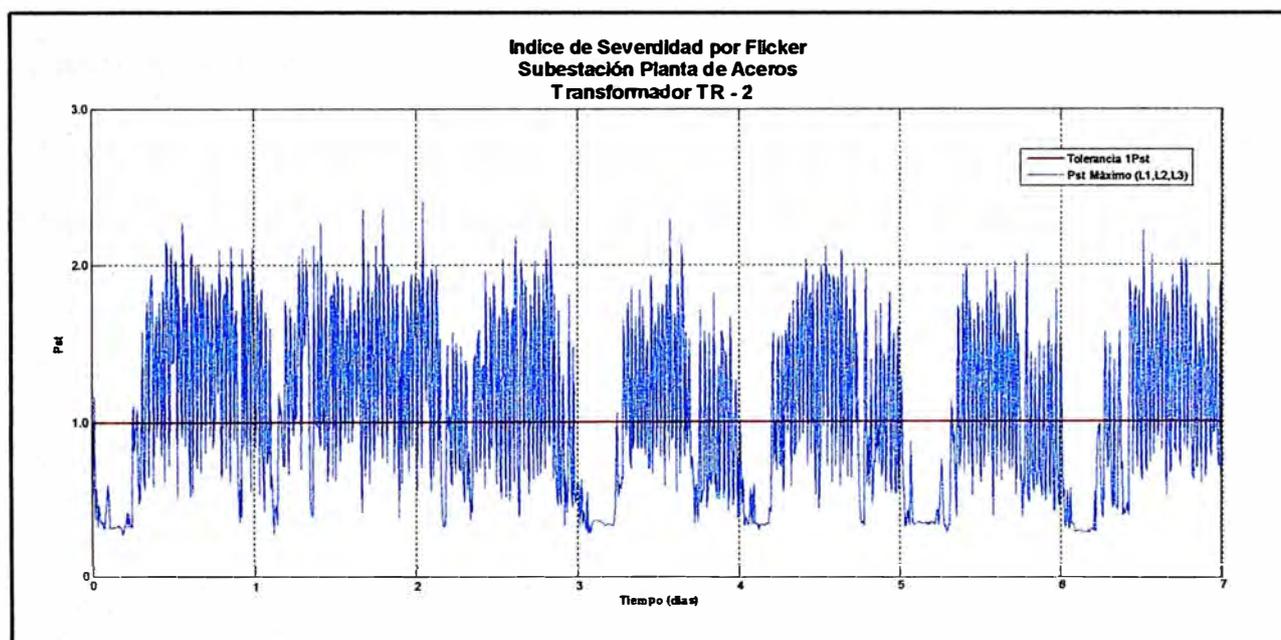
**Fig. N° 4.8** Comportamiento del Flicker en TR - PA.



**Fig. N° 4.9** Comportamiento del Flicker en TR - 3.



**Fig. N° 4.10** Comportamiento del Flickeren TR - 1.



**Fig. N° 4.11** Comportamiento del Flickeren TR - 2.

En la tabla N° 4.3 se muestra los resultados de la evaluación del Flicker.

Tabla N° 4.3 Niveles de Flicker.

Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Intervalos Registrados (Muestra)	Intervalos Fuera de Rango	
				Cantidad	%
SEINDEP	L.T. 220 kV	220 kV	1 008	460	45.63%
Planta de Aceros	TR – PA	220 kV	1 008	498	49.40%
Planta de Aceros	TR – 3	220 kV	1 008	494	49.01%
Planta de Aceros	TR – 1	20 kV	1 008	756	75.00%
Planta de Aceros	TR – 2	10 kV	1 008	452	44.84%

De la tabla anterior, se observa que los niveles de Flicker fuera de rango (niveles con  $P_{st} > 1$ ) superan el 5% de la muestra; por consiguiente, se considera que los niveles de Flicker en las subestaciones Planta de Aceros y SEINDEP son de mala calidad según lo establecido por la NTCSE.

### C) Mediciones de Armónicas de Tensión

A continuación, en las siguientes figuras se presenta el comportamiento de las tensiones armónicas más representativas correspondiente a cada punto eléctrico evaluado.

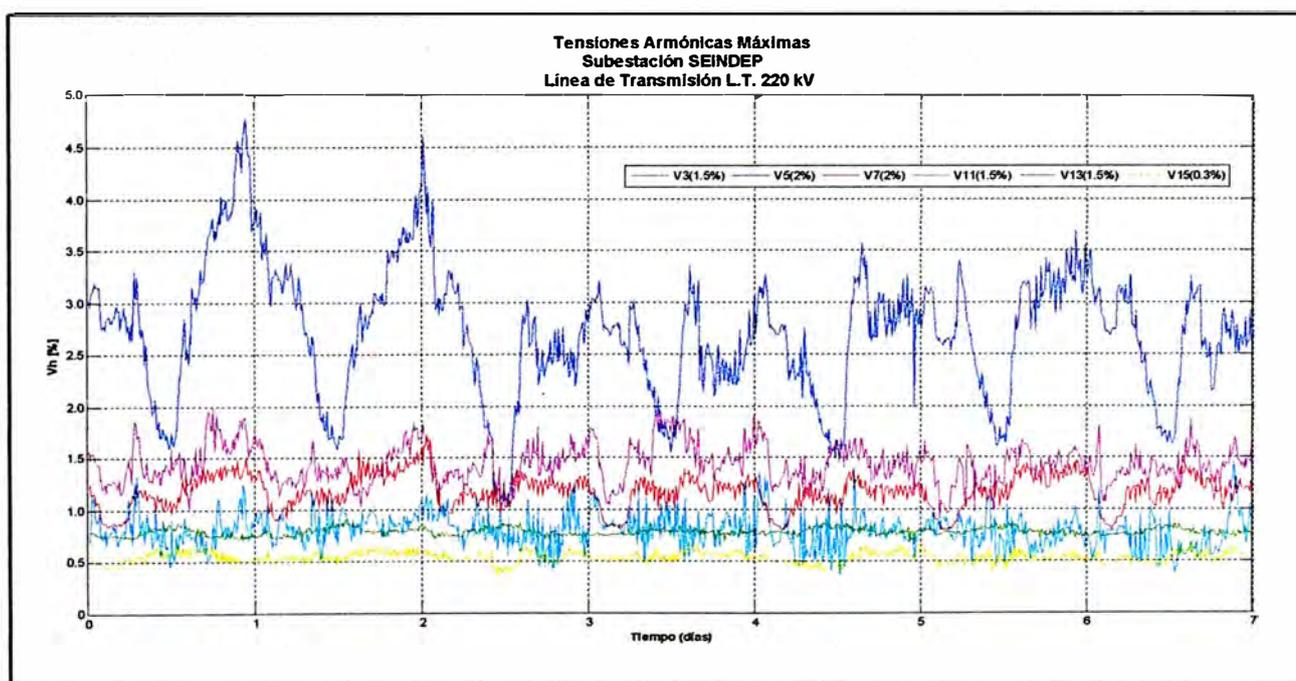
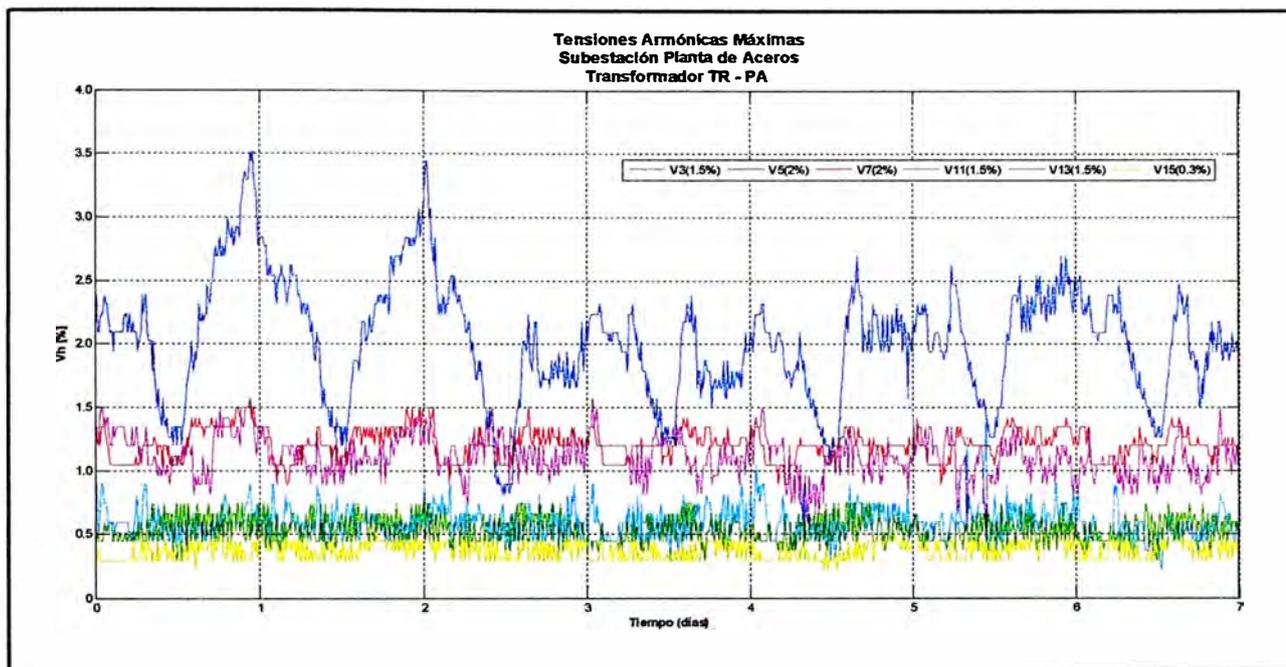
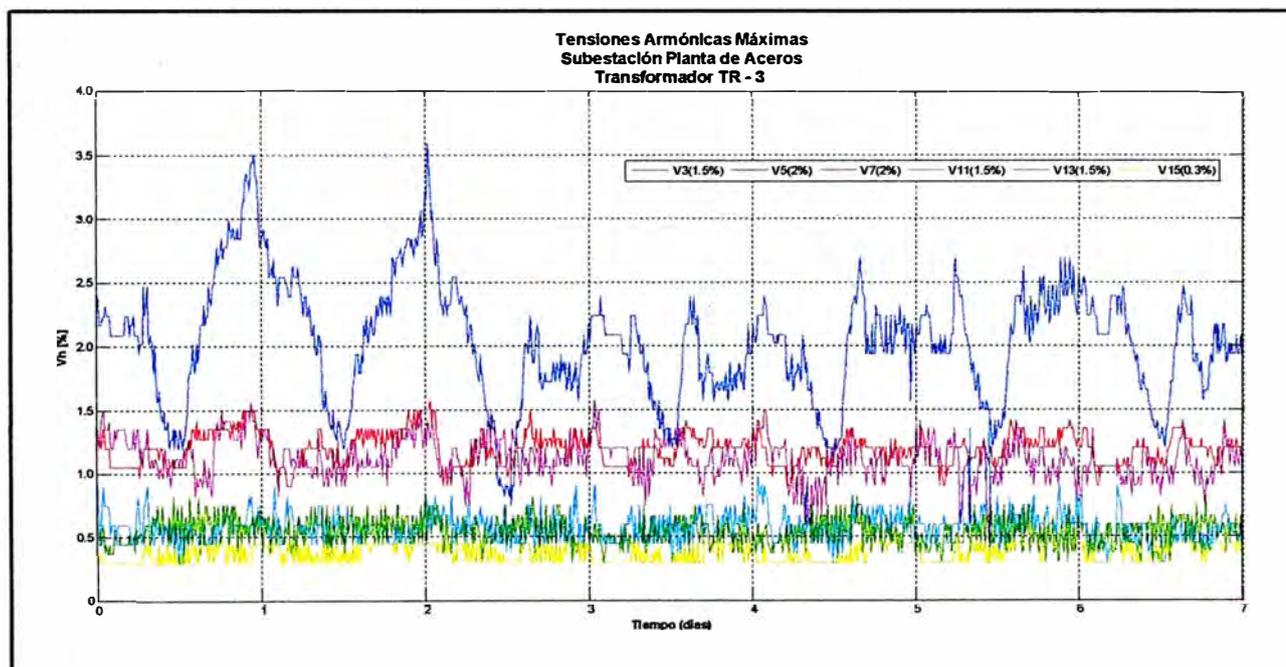


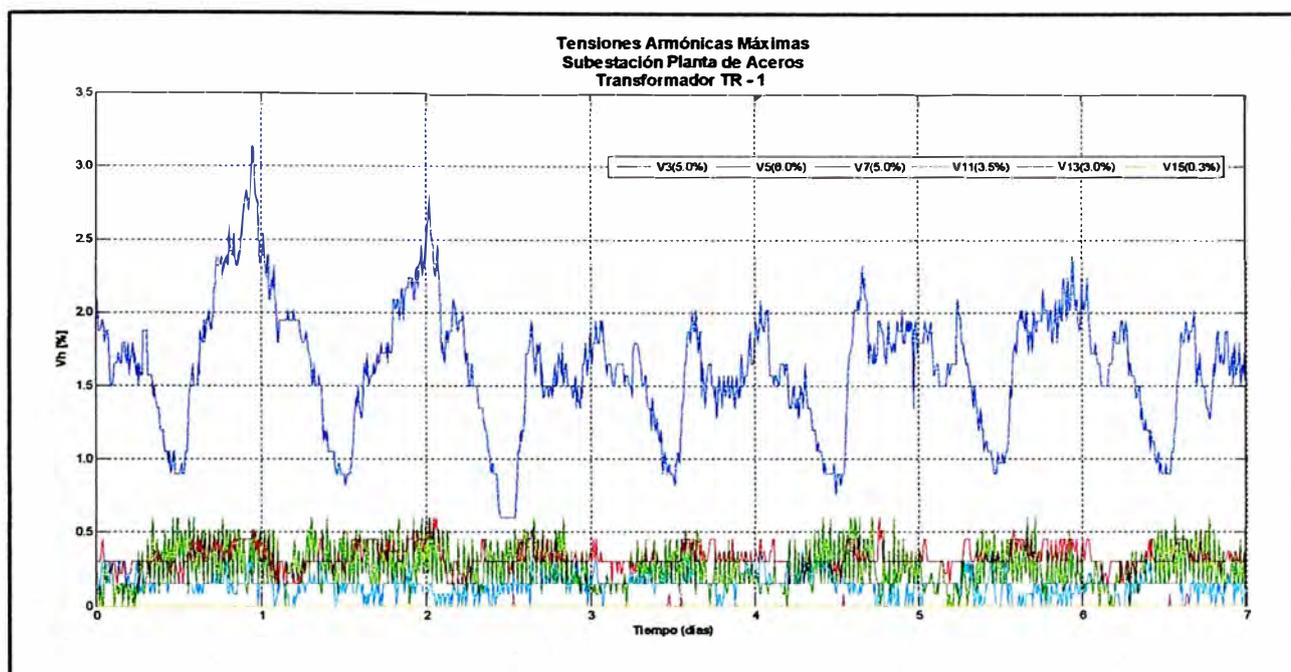
Fig. N° 4.12 Comportamiento de las armónicas individuales en L.T. 220 kV.



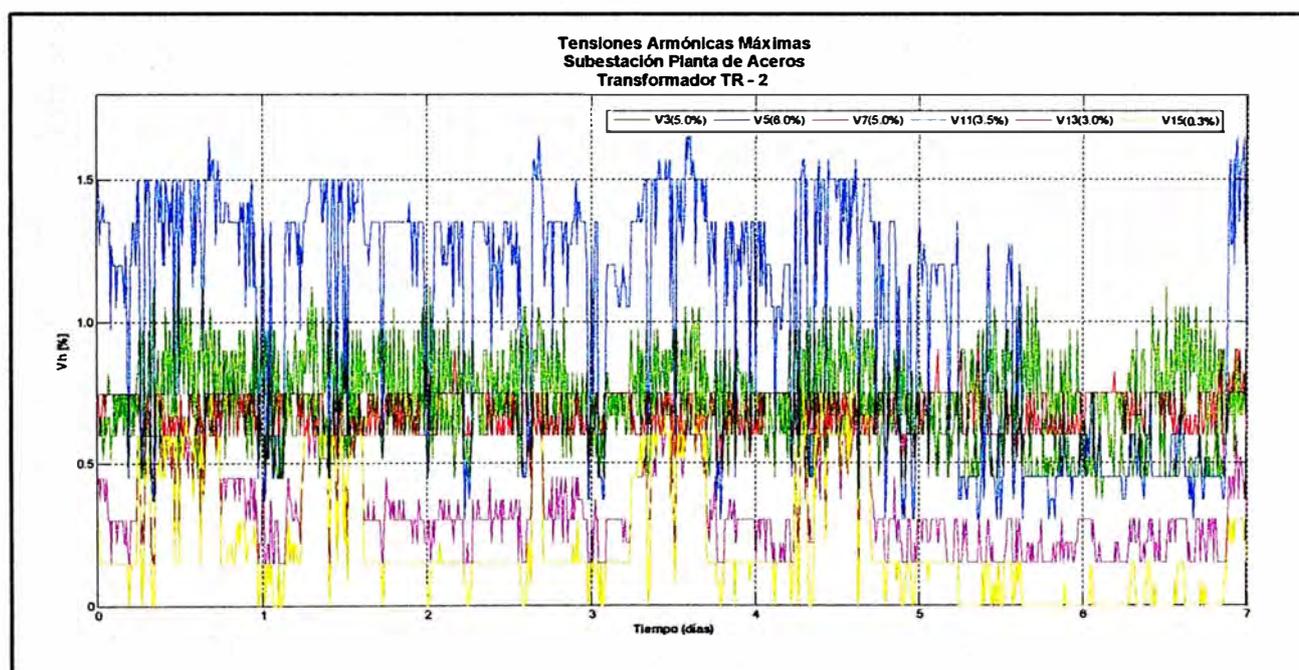
**Fig. N° 4.13** Comportamiento de las armónicas individuales en TR - PA.



**Fig. N° 4.14** Comportamiento de las armónicas individuales en TR - 3.



**Fig. N° 4.15** Comportamiento de las armónicas individuales en TR - 1.



**Fig. N° 4.16** Comportamiento de las armónicas individuales en TR - 2.

La evaluación de las tensiones armónicas se dividirá en dos niveles de tensión, en muy alta tensión (MAT) y media tensión (MT), dado que la NTCSE estipula tolerancias para las armónicas de tensión según el nivel de tensión. En la tabla N° 4.4 se muestra los resultados de la evaluación de las tensiones armónicas individuales de cada punto eléctrico evaluado. En el Anexo B se muestran los espectros de armónicos de tensión de los puntos eléctricos evaluados.

**Tabla N° 4.4**Intervalos fuera de rango por tensiones armónicas individuales en MAT.

Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Intervalos Registrados (Muestra)	Cantidad de Intervalos Fuera de Rango			
				h=5	h=13	h=15	THDv
SEINDEP	L.T. 220 kV	220 kV	1 008	849	340	1 008	760
Planta de Aceros	TR – PA	220 kV	1 008	565	0	640	305
Planta de Aceros	TR – 3	220 kV	1 008	572	0	621	278

**Tabla N° 4.5**Intervalos fuera de rango por tensiones armónicas individuales en MAT (%).

Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Intervalos Registrados (Muestra)	Cantidad de Intervalos Fuera de Rango (%)			
				h=5	h=13	h=15	THDv
SEINDEP	L.T. 220 kV	220 kV	1 008	84.23%	33.73%	100.00%	75.40%
Planta de Aceros	TR – PA	220 kV	1 008	56.05%	0.00%	63.49%	30.26%
Planta de Aceros	TR – 3	220 kV	1 008	56.75%	0.00%	61.61%	27.58%

De la tabla N° 4.4 y N° 4.5, se observa que existen niveles de tensiones armónicas de orden 5, 13 y 15, en la subestación SEINDEP, por encima de la tolerancia estipulada por la NTCSE. Asimismo, las tensiones armónicas de orden 5 y 15 se encuentran fuera de rango en la subestación Planta de Aceros.

Por otro lado, los niveles de distorsión armónica de tensión (THD<sub>v</sub>), en las subestaciones SEINDEP y Planta de Aceros, se encuentran por encima de la tolerancia permitida según la NTCSE (THD<sub>v</sub> < 3%).

**Tabla N° 4.6** Intervalos fuera de rango por tensiones armónicas individuales en MT.

Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Intervalos Registrados (Muestra)	Cantidad de Intervalos Fuera de Rango					
				h=15	h=17	h=21	h=27	h=29	THDv
Planta de Aceros	TR – 1	20 kV	1 008	0	0	0	0	0	0
Planta de Aceros	TR – 2	10kV	1 008	234	220	379	371	235	0

**Tabla N° 4.7** Intervalos fuera de rango por tensiones armónicas individuales en MT (%).

Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Intervalos Registrados (Muestra)	Cantidad de Intervalos Fuera de Rango (%)					
				h=15	h=17	h=21	h=27	h=29	THDv
Planta de Aceros	TR – 1	20 kV	1 008	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Planta de Aceros	TR – 2	10 kV	1 008	23.21%	21.83%	37.60%	36.81%	23.31%	0.00%

De la tabla N° 4.6 y N° 4.7, se observa que existen niveles de tensiones armónicas de orden 15, 17, 21, 27 y 29, en el TR - 2, por encima de la tolerancia estipulada por la NTCSE. Por otro lado, las tensiones armónicas en TR - 1 se encuentran dentro de la tolerancia permitida por la NTCSE.

Los niveles de distorsión armónica de tensión (THD<sub>v</sub>), en el nivel de media tensión, se encuentran dentro de los límites permitidos por la NTCSE (THD<sub>v</sub> < 3%).

### 4.1.3 Análisis de Armónicos

#### A) Armónicos de Tensión

A continuación se muestran los valores de los armónicos de tensión que superaron las tolerancias según la NTCSE. Los datos para cada armónica, corresponden a valores mínimos, promedios y máximos de los registros obtenidos en 7 días.

#### 5° Armónica de Tensión

**Tabla N° 4.8** Valores registrados de 5° Armónica de tensión.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Voltios			%			Tolerancia (%)
		Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
L.T. 220 kV	220 kV	10,768	5,945	2,178	4.83%	2.66%	0.98%	2.00%
TR – PA	220 kV	7,894	4,452	1,644	3.59%	2.02%	0.75%	2.00%
TR – 3	220 kV	7,894	4,463	1,644	3.59%	2.03%	0.75%	2.00%
TR – 1	20 kV	658	325	120	3.29%	1.63%	0.60%	6.00%
TR – 2	10kV	90	64	30	0.89%	0.63%	0.30%	6.00%

13° Armónica de Tensión

Tabla N° 4.9 Valores registrados de 13° Armónica de tensión.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Voltios			%			Tolerancia (%)
		Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
L.T. 220 kV	220 kV	4,893	3,155	1,996	2.19%	1.41%	0.89%	1.50%
TR – PA	220 kV	3,618	2,466	987	1.64%	1.12%	0.45%	1.50%
TR – 3	220 kV	3,618	2,468	987	1.64%	1.12%	0.45%	1.50%
TR – 1	20 kV	30	0	0	0.15%	0.00%	0.00%	3.00%
TR – 2	10 kV	75	34	15	0.74%	0.34%	0.15%	3.00%

15° Armónica de Tensión

Tabla N° 4.10 Valores registrados de 15° Armónica de tensión.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Voltios			%			Tolerancia (%)
		Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
L.T. 220 kV	220 kV	1,488	1,175	808	0.67%	0.53%	0.36%	0.30%
TR – PA	220 kV	1,315	826	328	0.60%	0.38%	0.15%	0.30%
TR – 3	220 kV	1,315	830	657	0.60%	0.38%	0.30%	0.30%
TR – 1	20 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.30%
TR – 2	10 kV	74	21	0	0.73%	0.21%	0.00%	0.30%

17° Armónica de Tensión

Tabla N° 4.11 Valores registrados de 17° Armónica de tensión.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Voltios			%			Tolerancia (%)
		Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
L.T. 220 kV	220 kV	898	612	325	0.40%	0.27%	0.15%	1.00%
TR – PA	220 kV	658	342	0	0.30%	0.16%	0.00%	1.00%
TR – 3	220 kV	658	334	0	0.30%	0.15%	0.00%	1.00%
TR – 1	20 kV	30	6	0	0.15%	0.03%	0.00%	2.00%
TR – 2	10 kV	373	105	0	3.69%	1.04%	0.00%	2.00%

21° Armónica de Tensión

Tabla N° 4.12 Valores registrados de 21° Armónica de tensión.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Voltios			%			Tolerancia (%)
		Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
L.T. 220 kV	220 kV	158	68	19	0.07%	0.03%	0.01%	0.20%
TR – PA	220 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
TR – 3	220 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
TR – 1	20 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
TR – 2	10 kV	75	22	0	0.74%	0.22%	0.00%	0.20%

27° Armónica de Tensión

Tabla N° 4.13 Valores registrados de 27° Armónica de tensión.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Voltios			%			Tolerancia (%)
		Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
L.T. 220 kV	220 kV	62	43	11	0.03%	0.02%	0.00%	0.20%
TR – PA	220 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
TR – 3	220 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
TR – 1	20 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
TR – 2	10 kV	90	16	0	0.89%	0.16%	0.00%	0.20%

29° Armónica de Tensión

Tabla N° 4.14 Valores registrados de 29° Armónica de tensión.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Voltios			%			Tolerancia (%)
		Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
L.T. 220 kV	220 kV	50	20	5	0.02%	0.01%	0.00%	0.20%
TR – PA	220 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
TR – 3	220 kV	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
TR – 1	20 kV	30	0	0	0.15%	0.00%	0.00%	0.60%
TR – 2	10 kV	194	37	0	1.92%	0.37%	0.00%	0.60%

## B) Armónicos de Corriente

A continuación se muestran los valores de los armónicos de corriente. Los datos para cada armónica, corresponden a valores mínimos, promedios y máximos de los registros obtenidos en 7 días.

### 5° Armónica de Corriente

**Tabla N° 4.15** Valores registrados de 5° Armónica de corriente.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Amperios		
		Máximo	Promedio	Mínimo
L.T. 220 kV	220 kV	16	9	3
TR – PA	220 kV	0.3	0.1	0
TR – 3	220 kV	15	8	3
TR – 1	20 kV	9	1	0
TR – 2	10 kV	92	47	14

### 13° Armónica de Corriente

**Tabla N° 4.16** Valores registrados de 13° Armónica de corriente.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Amperios		
		Máximo	Promedio	Mínimo
L.T. 220 kV	220 kV	1.0	1.0	0.0
TR – PA	220 kV	0.1	0.0	0.0
TR – 3	220 kV	1.0	0.0	0.0
TR – 1	20 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 2	10 kV	10.0	4.0	0.0

15° Armónica de Corriente**Tabla N° 4.17** Valores registrados de 15° Armónica de corriente.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Amperios		
		Máximo	Promedio	Mínimo
L.T. 220 kV	220 kV	0.4	0.2	0.1
TR – PA	220 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 3	220 kV	1.0	0.2	0.0
TR – 1	20 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 2	10 kV	2.3	0.4	0.0

17° Armónica de Corriente**Tabla N° 4.18** Valores registrados de 17° Armónica de corriente.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Amperios		
		Máximo	Promedio	Mínimo
L.T. 220 kV	220 kV	1.6	0.5	0.2
TR – PA	220 kV	0.1	0.0	0.0
TR – 3	220 kV	1.0	0.3	0.0
TR – 1	20 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 2	10 kV	33.0	9.0	0.0

21° Armónica de Corriente**Tabla N° 4.19** Valores registrados de 21° Armónica de corriente.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Amperios		
		Máximo	Promedio	Mínimo
L.T. 220 kV	220 kV	0.3	0.2	0.1
TR – PA	220 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 3	220 kV	0.8	0.1	0.0
TR – 1	20 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 2	10 kV	1.6	0.4	0.0

27° Armónica de Corriente**Tabla N° 4.20** Valores registrados de 27° Armónica de corriente.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Amperios		
		Máximo	Promedio	Mínimo
L.T. 220 kV	220 kV	0.3	0.1	0.1
TR – PA	220 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 3	220 kV	0.5	0.1	0.0
TR – 1	20 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 2	10 kV	1.9	0.4	0.0

29° Armónica de Corriente**Tabla N° 4.21** Valores registrados de 29° Armónica de corriente.

Punto de Medición	Tensión Nominal	Amperios		
		Máximo	Promedio	Mínimo
L.T. 220 kV	220 kV	0.8	0.2	0.1
TR – PA	220 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 3	220 kV	0.5	0.1	0.0
TR – 1	20 kV	0.0	0.0	0.0
TR – 2	10 kV	11.0	2.0	0.0

De los resultados anteriores, se puede indicar lo siguiente:

- Según los resultados mostrados en la tabla N° 4.8, la 5° armónica de tensión supera las tolerancias de la NTCSE en el nivel de 220 kV. En el nivel de media tensión no existen niveles de 5° armónica de tensión que superen las tolerancias de la NTCSE. Asimismo, se observa que los valores registrados de 5° armónica de tensión son mayores en L.T. 220 kV, lo cual puede ser corroborado en la Fig. N° 4.17.
- Según los resultados mostrados en la tabla N° 4.9, se observa que la armónica de tensión de orden 13, en el punto eléctrico L.T. 220 kV, supera la tolerancia estipuladas por la NTCSE. También se observa que existe dicha armónica de tensión en TR – PA y TR – 3 pero que no superan la tolerancia, dado que su valor promedio es de 1.12%; es decir, menor a 1.5% (tolerancia de la NTCSE).
- En la tabla N° 4.10 se observa que la 15° armónica de tensión, en valor promedio, es mayor en la subestación SEINDEP. Asimismo, en la tabla N° 4.17 se observa que la corriente armónica en L.T. 220 kV y en el TR – 3 es menor a un amperio, lo cual demuestra que existe un flujo de corriente muy pequeño en dichos puntos eléctricos.
- Para el caso del punto eléctrico TR – 2, se observa que las armónicas de orden 15, 17, 21, 27 y 29 superan las tolerancias establecidas en la NTCSE, tal como se aprecia en las tablas N° 4.10a la N° 4.14. Asimismo, se observa que dichas armónicas no se reflejan en el lado de 220 kV, por consiguiente, dichas armónicas son amortiguadas por las impedancias y niveles de cortocircuito del sistema eléctrico a excepción de la armónica de orden 15.
- El THD de tensión se encuentra fuera de la tolerancia en el nivel de 220 kV (Barra SEIN, TR – PA y TR – 3). Por otro lado, en el nivel de media tensión (TR – 1 y TR – 2) el THD de tensión no supera la tolerancia establecida en la NTCSE, tal como se muestra en la tabla N° 4.22:

Tabla N° 4.22

Distorsión Armónica de Tensión (%)					
Punto de Medición	Tensión Operación	Máximo	Promedio	Mínimo	Tolerancia NTCSE
Línea transmisión 220 kV	220 kV	5.5	3.4	2.1	3.0%
Transformador TR – PA	220 kV	4.7	3.1	2.1	3.0%
Transformador TR – 3	220 kV	4.6	3.0	2.0	3.0%
Transformador TR – 1	20 kV	3.6	1.9	0.9	8.0%
Transformador TR – 2	10 kV	4.9	2.5	1.1	8.0%

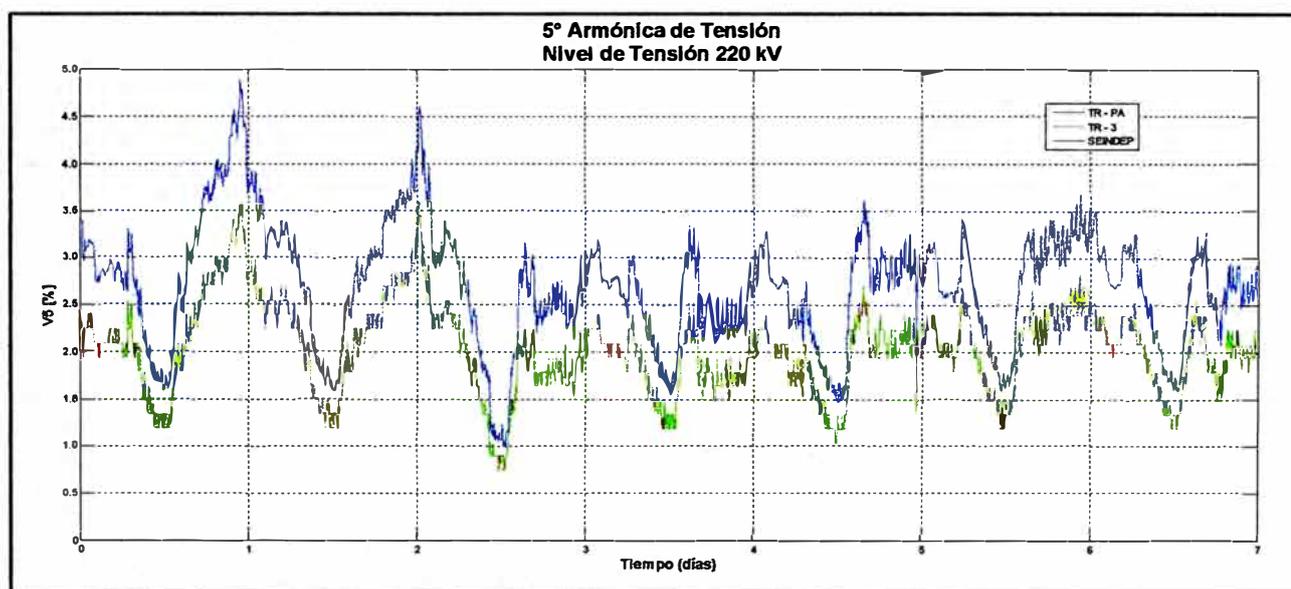


Fig. N° 4.17

#### 4.1.4 Análisis de Dispersión Armónica

En los siguientes gráficos se muestra la dispersión de las armónicas que se encuentran fuera de rango según la NTCSE en el nivel de 220 kV.

### Dispersión de 5° Armónica

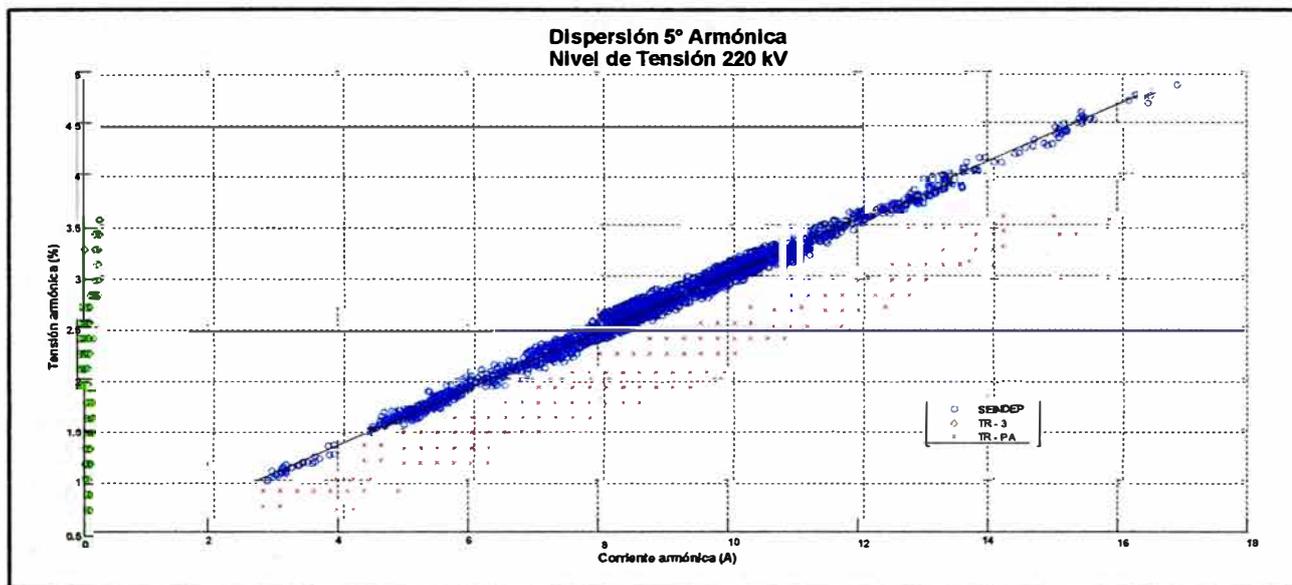


Fig. N° 4.18

### Dispersión de 13° Armónica

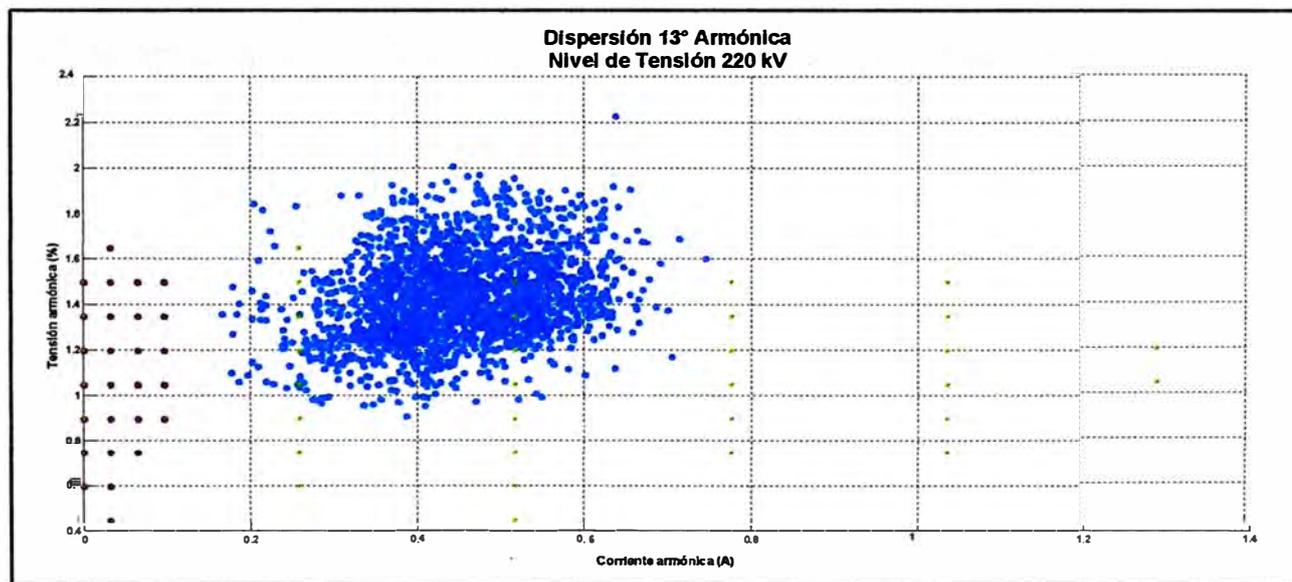
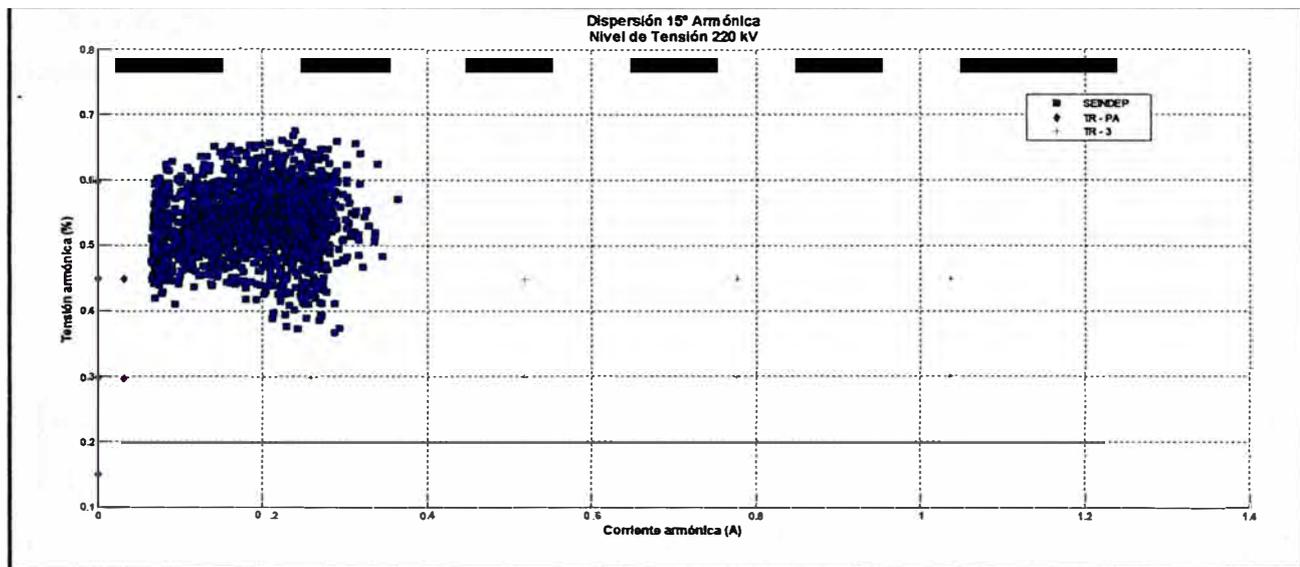


Fig. N° 4.19

### Dispersión de 15° Armónica



**Fig. N° 4.20**

De los resultados anteriores, se puede indicar lo siguiente:

- De la Fig. N° 4.18, se observa que existe una fuente de corriente de 5° armónica en la Barra SEIN y en el transformador TR – 3, dado que existe una tendencia lineal entre los armónicos de tensión y corriente (impedancia constante) tanto en la Barra SEIN 220 kV como en la barra Planta de Aceros 220 kV.
- De las Fig. N° 4.19 y N° 4.20, se observa que las armónicas de orden 13 y 15 son generadas por cargas aledañas a la Planta de Aceros, ya que no existe una correspondencia lineal entre los armónicos de tensión y corriente.

#### 4.1.5 Análisis del Comportamiento Diario de la 5ª Armónica

En los gráficos N° 4.21 y N° 4.22 se muestra el comportamiento diarios de la 5ta armónica de tensión en las barras de Planta de Aceros y SEINDEP respectivamente.

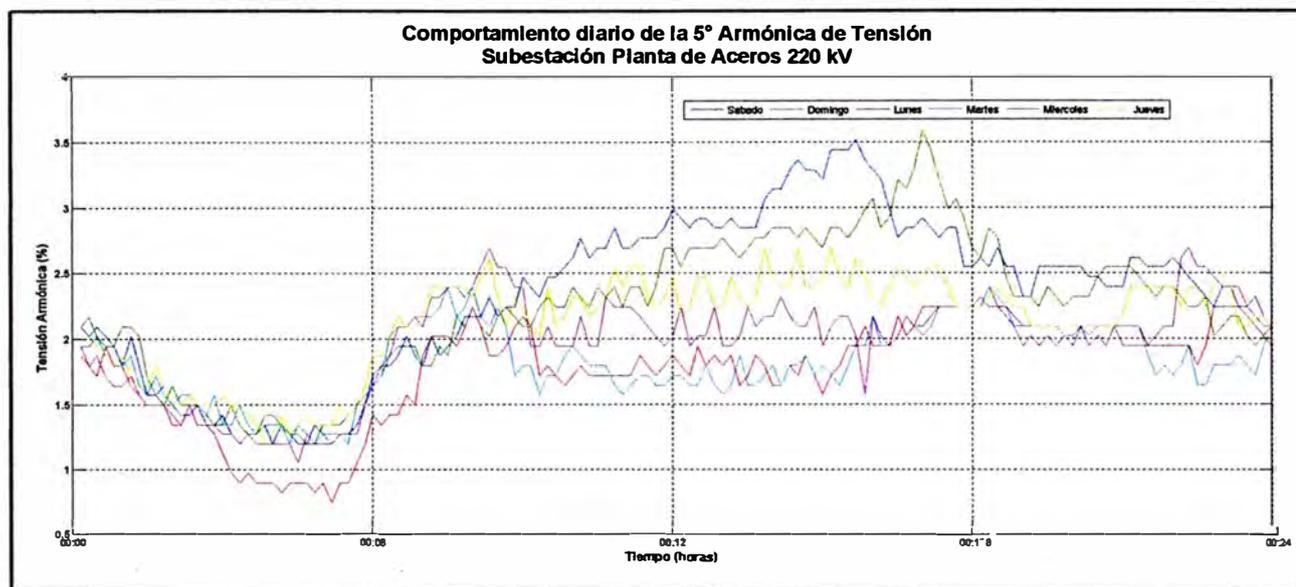


Fig. N° 4.21

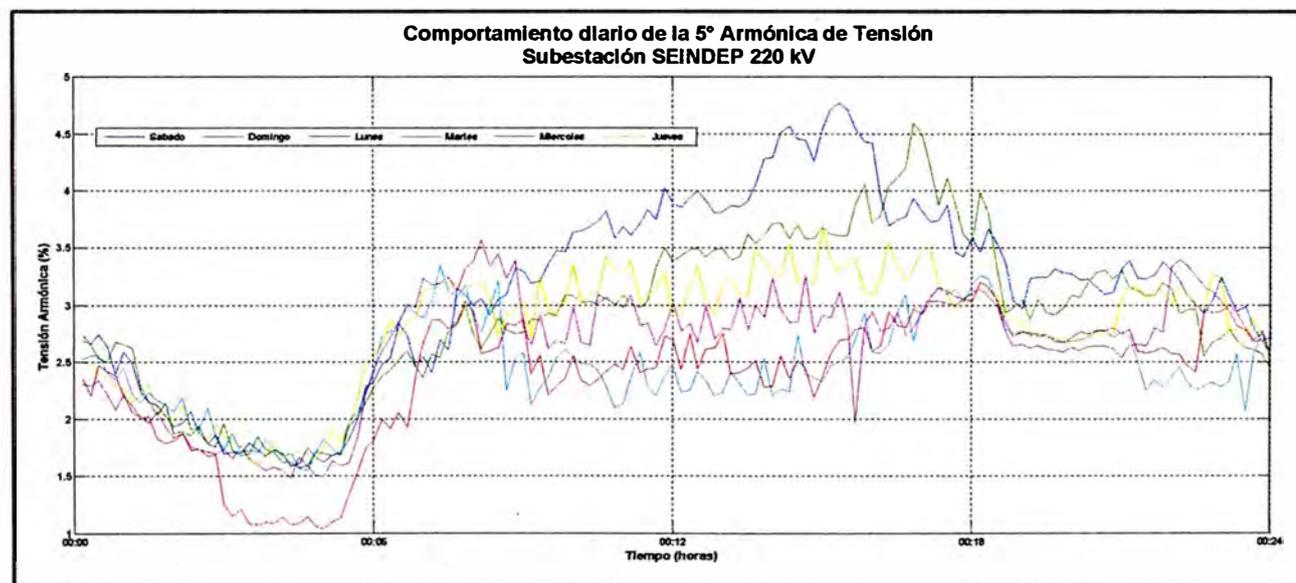


Fig. N° 4.22

Según la característica diaria, se observa que hay un comportamiento diario similar de la 5ta armónica, lo cual obedece a un patrón diario que se repite regularmente. Al tener este tipo de comportamiento, es probable que parte de las armónicas de tensión sean el resultado de la inyección armónica originada por las cargas vecinas del sistema y en

especial de las cargas residenciales que agrupadas tienen representatividad en el SEIN. Una carga residencial sigue el patrón de consumo similar al que tiene la 5ta armónica, que lo más probable sea un reflejo de lo que está sucediendo en 220kV y no solo en la barra de la Planta de Aceros sino a nivel de todo el SEIN. Además, se observa que de madrugada la distorsión armónica disminuye y es mayor los días sábado y domingo.

## 4.2 Evaluación N° 2 - Análisis de Armónicos en la Subestación Planta de Aceros con el Ingreso y Salida de Operación del Horno Eléctrico N° 1

El objetivo del presente análisis es mostrar el impacto que ocasiona la operación del horno eléctrico N° 1, sobre el nivel de distorsión armónica, en el nivel de 220 kV de la Planta de Aceros. En la Fig. N° 4.23 se muestra la ubicación gráfica del punto eléctrico medido.

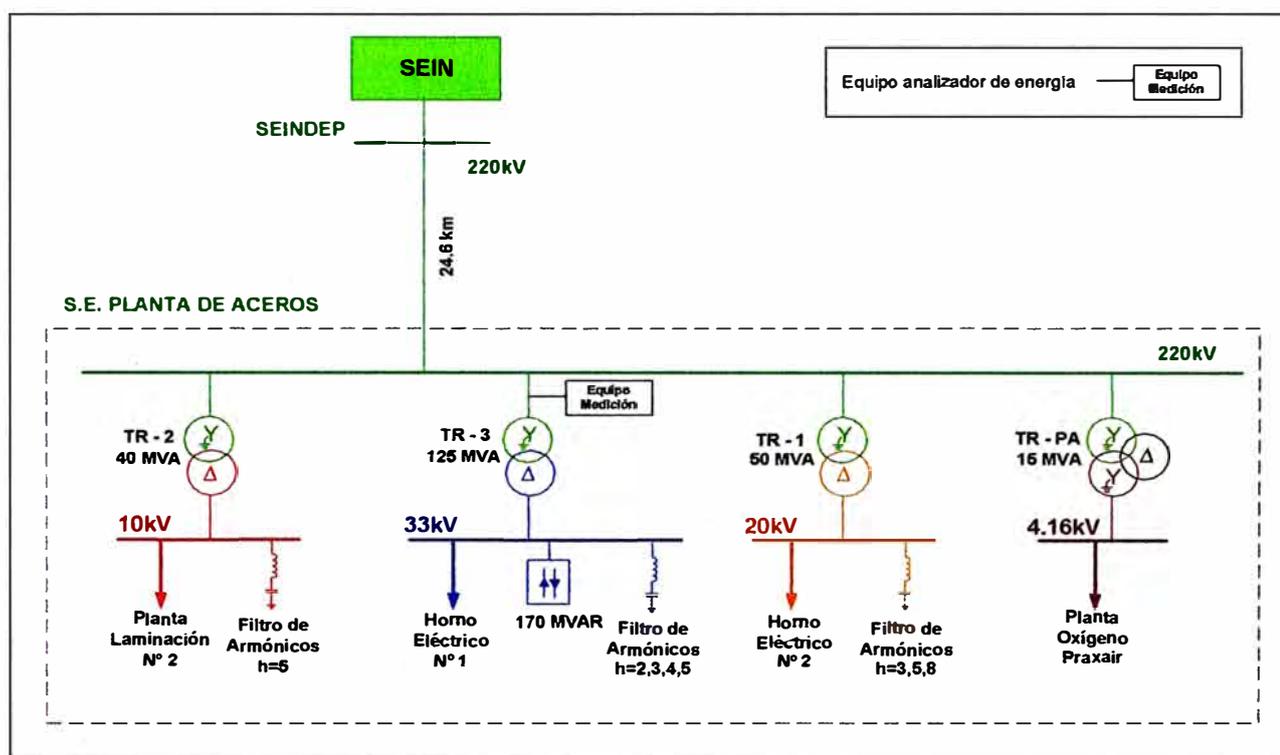


Fig. N° 4.23 Topología del sistema eléctrico de la Planta de Aceros.

### 4.2.1 Punto de Medición Evaluado

La medición fue realizada en el siguiente punto eléctrico:

Tabla N° 4.23 Ubicación del punto eléctrico.

Ítem	Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal
1	Planta de Aceros	Transformador TR – 3	220 kV

#### 4.2.2 Análisis de la Tensión

En las tablas N° 24 y N° 25, se muestra la tensión registrada en el punto eléctrico TR – 3 de la subestación Planta de Aceros en el nivel de 220kV.

**Tabla N° 4.24 Tensión RMS**

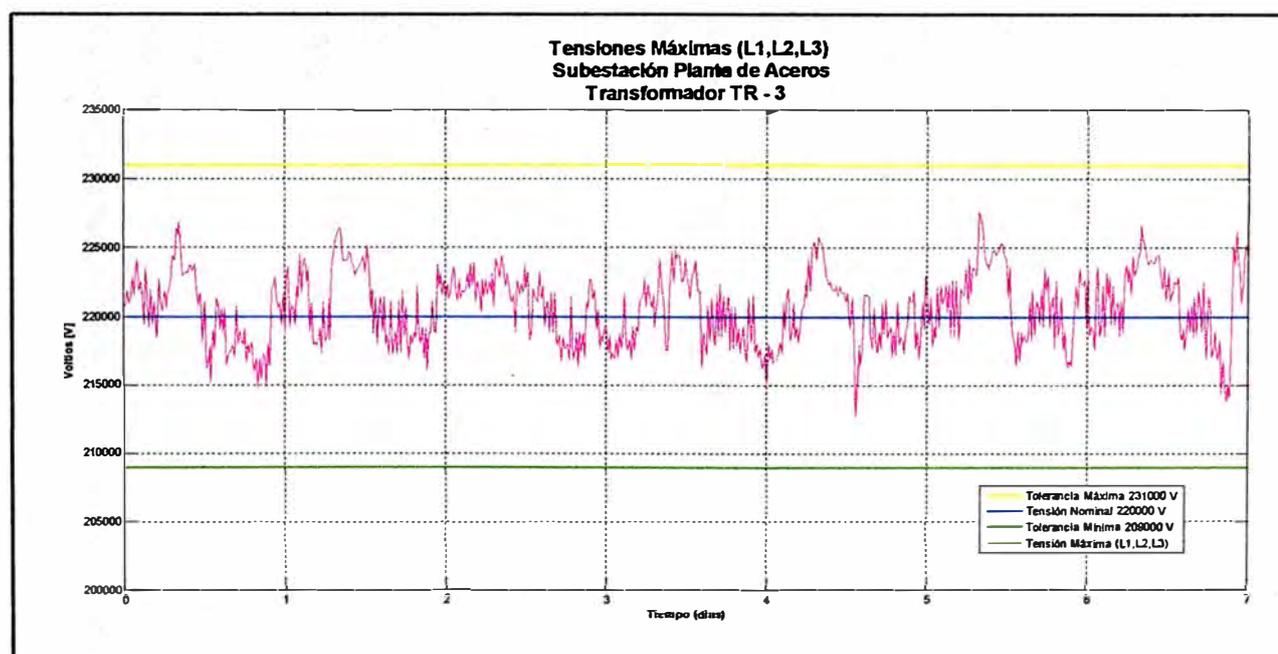
Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Máximo	Promedio	Mínimo
Planta de Aceros	TR – 3	220 kV	227 kV	220 kV	213 kV

**Tabla N° 4.25 Tensión RMS en P.U.**

Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Máximo	Promedio	Mínimo
Planta de Aceros	TR – 3	220 kV	1.03	1.00	0.97

De las tablas anteriores, se observa que los niveles de tensión se encuentran dentro del  $\pm 5\%$  de la tensión nominal.

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de la tensión durante todo el período de medición.



**Fig. N° 4.24 Perfil de tensión RMS.**

### 4.2.3 Análisis de Armónicos

Las tensiones armónicas individuales de orden 5 y 15 se encuentran constantemente fuera de rango según la NTCSE. Por lo tanto, se analizará el efecto que causa la salida de operación del horno eléctrico N° 1 en dichos armónicos. En las tablas N° 4.26 y N° 4.27 se muestra el cuadro comparativo con el ingreso y salida de operación del horno eléctrico N° 1.

**Tabla N° 4.26 Tensión armónica (voltios)**

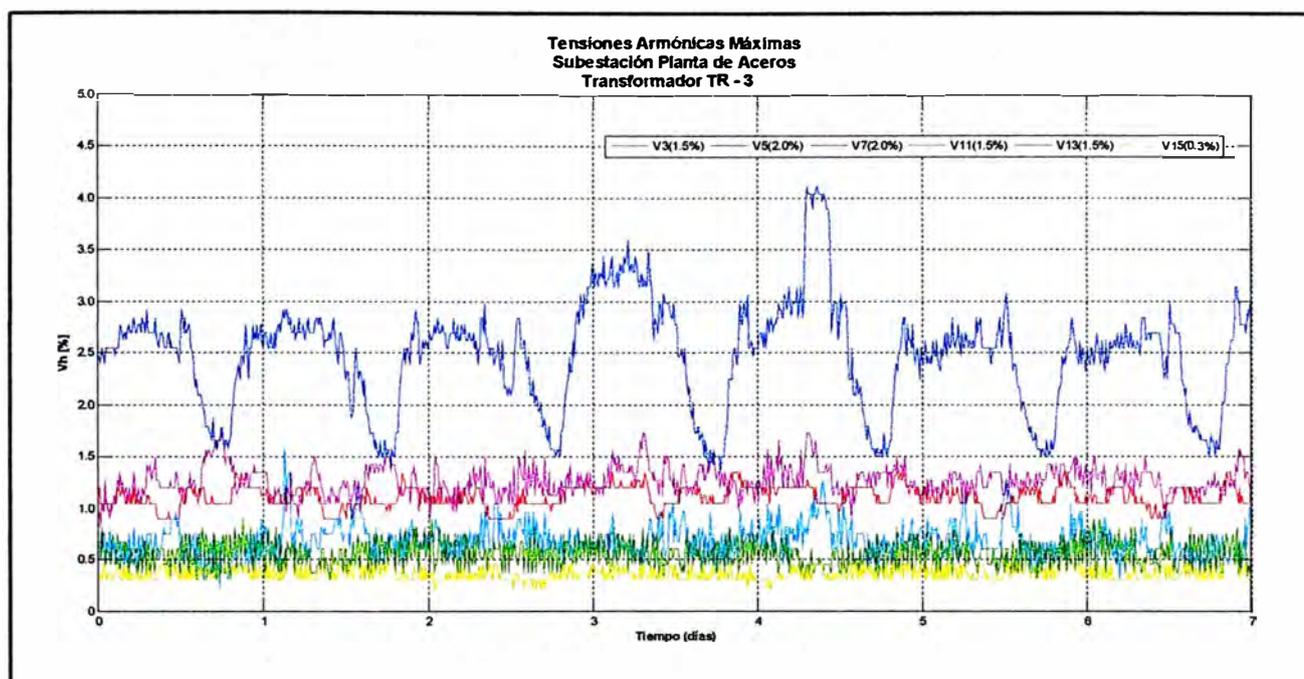
Orden Armónico	Sin Hornos			Con Hornos		
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
5	6,248	6,248	6,248	8,228	5,478	2,970
15	990	990	990	990	770	330

**Tabla N° 4.27 Tensión armónica (%)**

Orden Armónico	Sin Hornos			Con Hornos			Tolerancia NTCSE
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
5	2.84%	2.84%	2.84%	3.74%	2.49%	1.35%	2.00%
15	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.35%	0.15%	0.30%

De las tablas anteriores, se puede observar que las tensiones armónicas individuales, en promedio, disminuyen con la parada del horno eléctrico N° 1.

En la Fig. 4.25 se muestra los perfiles de las tensiones armónicas individuales más representativas.



**Fig. N° 4.25** Armónicas individuales de tensión.

En la tabla N° 4.28 se muestra las corrientes armónicas individuales de orden 5 y 15.

**Tabla N° 4.28** Corriente armónica (A)

Orden Armónico	Sin Hornos			Con Hornos		
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
5	11.65	10.56	9.06	15.80	10.32	4.92
15	0.00	0.00	0.00	1.29	0.29	0.00

De la tabla anterior se observa que las corrientes armónicas de orden 15, en promedio, se incrementan con la operación de los hornos eléctricos.

### A) Espectro de Armónicos

En la tabla N° 4.29 se muestra, en promedio, el espectro de armónicos de tensión y corriente con el ingreso y salida de operación del horno eléctrico N° 1.

**Tabla N° 4.29** Espectro de Vh e Ih con horno eléctrico N° 1

Orden Armónico (h)	Tensión (V)	Corriente (A)	Tensión (%)	Corriente (%)
1	128,031	140.3	100.0%	100.0%

Orden Armónico (h)	Tensión (V)	Corriente (A)	Tensión (%)	Corriente (%)
2	566	6.1	0.4%	4.3%
3	685	3.2	0.5%	2.3%
4	178	1.7	0.1%	1.2%
5	3,354	10.3	2.6%	7.3%
6	62	0.8	0.0%	0.6%
7	1,373	1.9	1.1%	1.4%
8	17	0.5	0.0%	0.4%
9	1,082	0.5	0.8%	0.3%
10	72	0.4	0.1%	0.3%
11	630	0.9	0.5%	0.6%
12	60	0.3	0.0%	0.2%
13	1,426	0.5	1.1%	0.3%
14	190	0.2	0.1%	0.2%
15	442	0.2	0.3%	0.2%

Tabla N° 4.30 Espectro de Vh e Ih sin homo eléctrico N° 1

Orden Armónico (h)	Tensión (V)	Corriente (A)	Tensión (%)	Corriente (%)
1	129,372	4.2	100.0%	100.0%
2	229	0.3	0.2%	6.3%
3	659	0.7	0.5%	16.9%
4	11	0.0	0.0%	0.2%
5	3,357	10.1	2.6%	239.0%
6	0	0.0	0.0%	0.2%
7	1,195	2.8	0.9%	66.4%
8	0	0.0	0.0%	0.0%
9	1,139	0.0	0.9%	0.0%
10	28	0.0	0.0%	0.0%
11	693	0.7	0.5%	15.8%
12	0	0.0	0.0%	0.0%
13	1,597	0.0	1.2%	0.4%

Orden Armónico (h)	Tensión (V)	Corriente (A)	Tensión (%)	Corriente (%)
14	0	0.0	0.0%	0.0%
15	480	0.0	0.4%	0.0%

En las tablas N° 4.29 y N° 4.30, se observa que las armónicas de tensión del orden 5 y 15 se encuentran por encima del límite permitido según la NTCSE.

En las siguientes figuras se muestra el espectro de la tensión y corriente armónica.

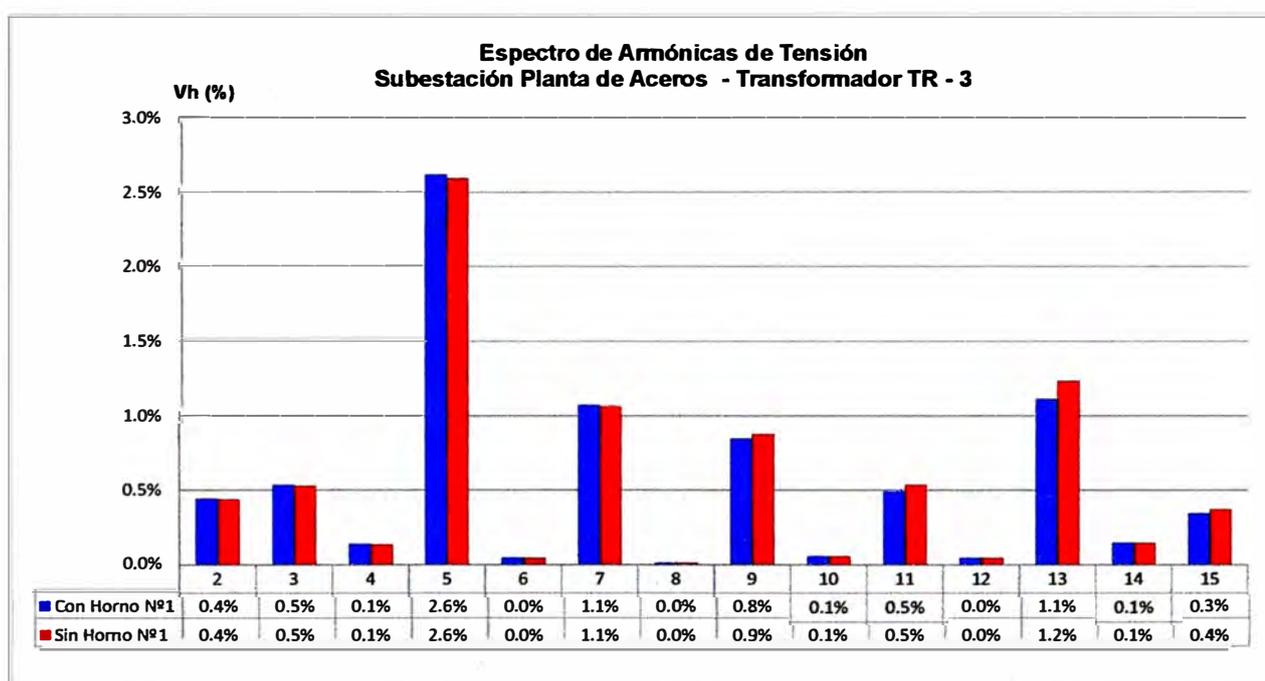
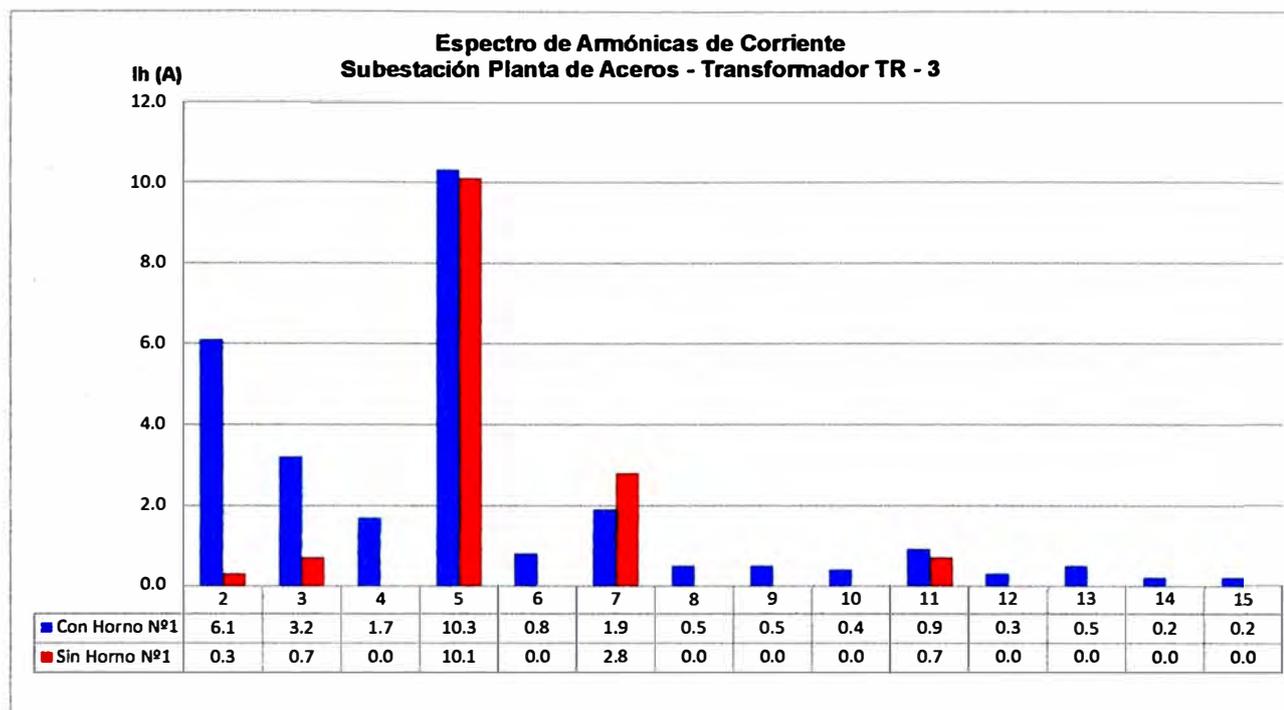


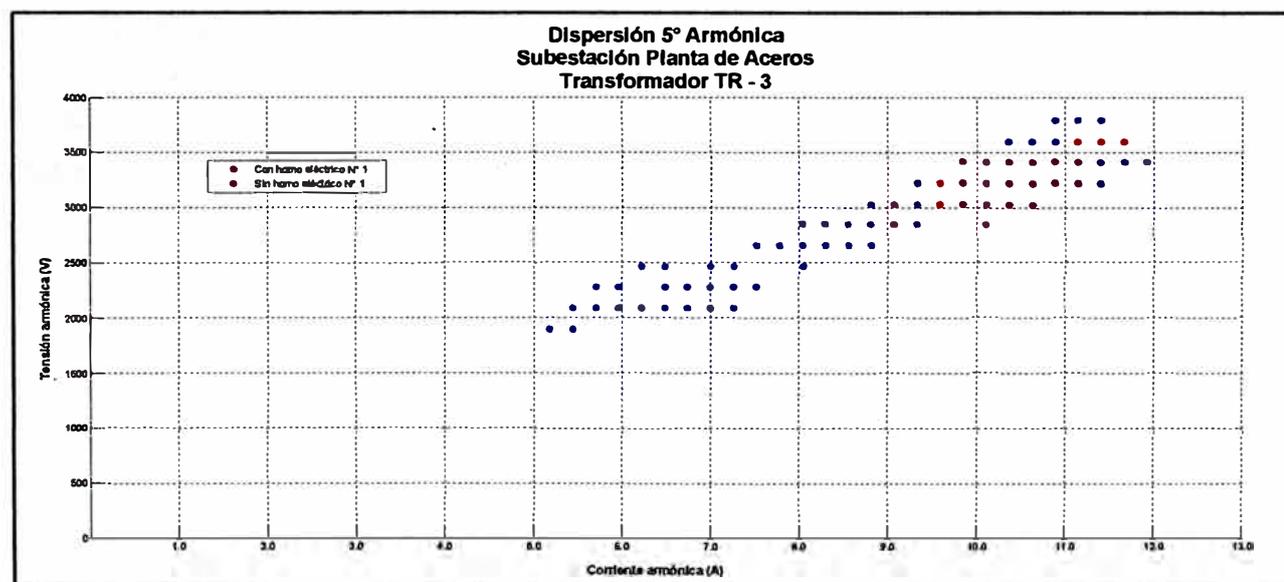
Fig. N° 4.26 Espectro de tensión.



**Fig. N° 4.27** Espectro de corriente.

## B) Análisis de 5° Armónica

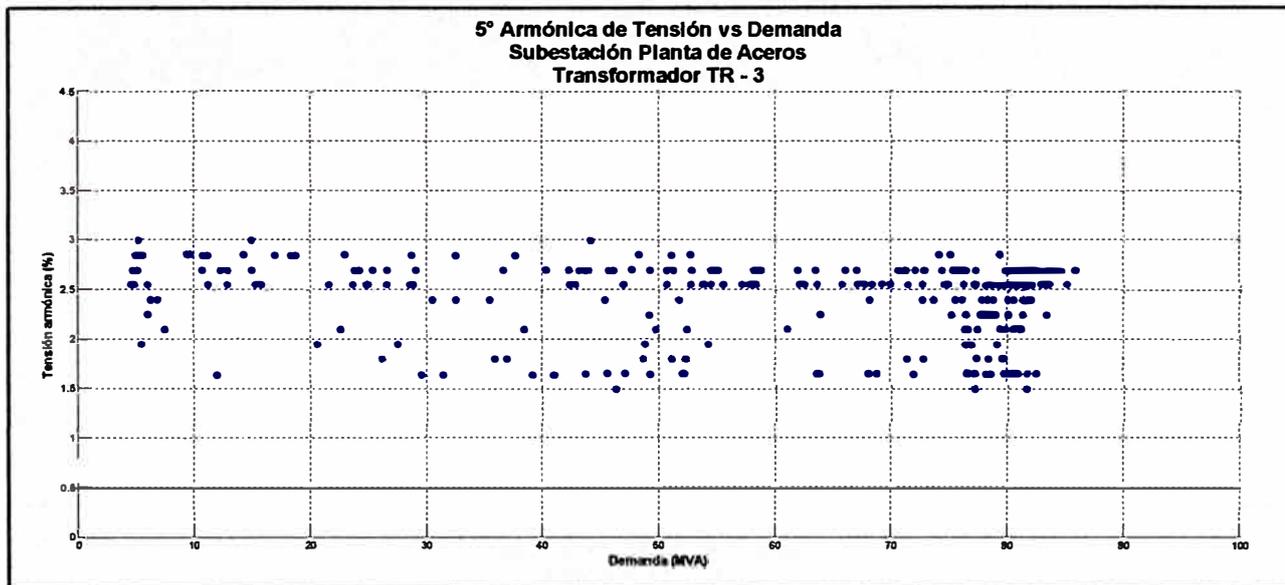
En la Fig. N° 4.28, se muestra el comportamiento de la 5ta armónica con el ingreso y salida de operación del horno eléctrico N° 1.



**Fig. N° 4.28** Dispersión 5° armónica.

En la figura anterior se observa que la correlación entre la tensión y corriente armónica presenta una tendencia lineal con el ingreso y salida de operación del horno

eléctrico N° 1, lo cual indica que la fuente de armónica existe aún con la ausencia del horno eléctrico N° 1. En la Fig. N° 4.29 se muestra el comportamiento de la tensión armónica de orden 5 con el incremento de la demanda.

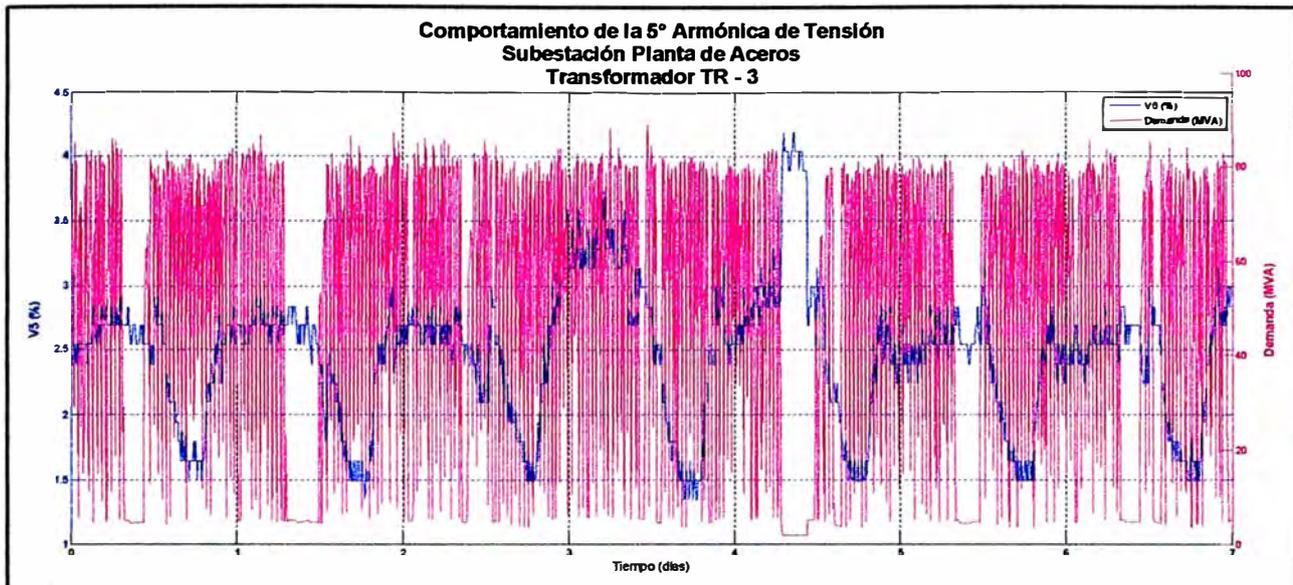


**Fig. N° 4.29**

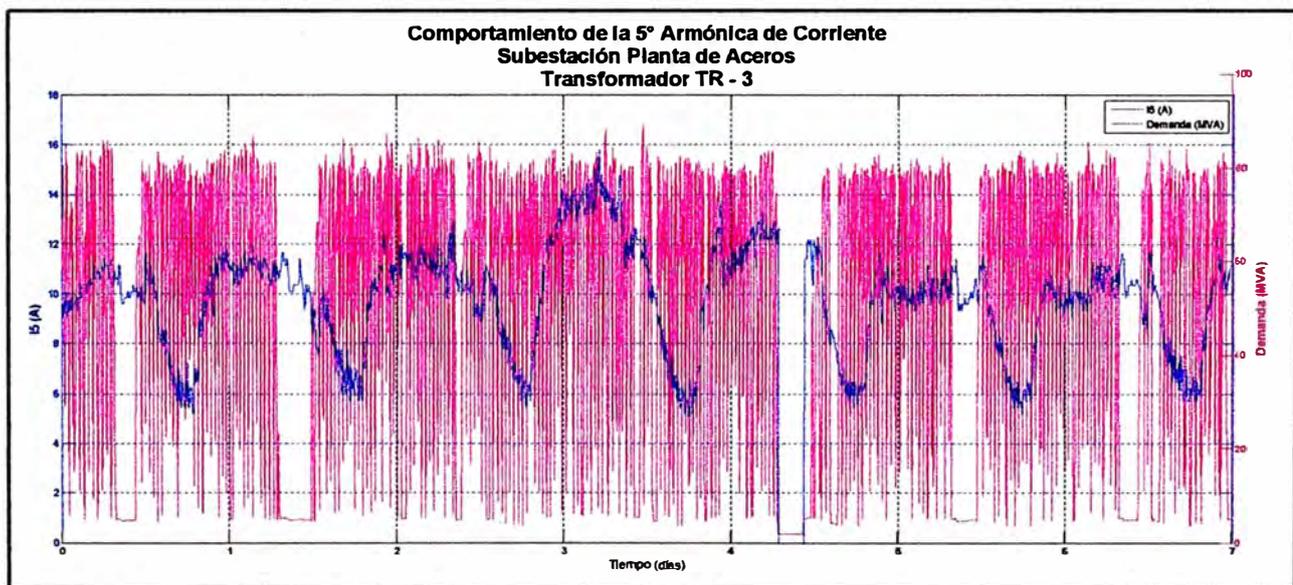
De la figura anterior se observa que la máxima tensión armónica se presenta cuando la demanda es mucho menor a la demanda máxima en el transformador TR - 3.

#### Comportamiento de la Demanda

En los siguientes gráficos se muestra la tensión y corriente armónica de orden 5 frente a la demanda presentada en el transformador TR - 3.



**Fig. N° 4.30** Comportamiento de 5° armónica de tensión.

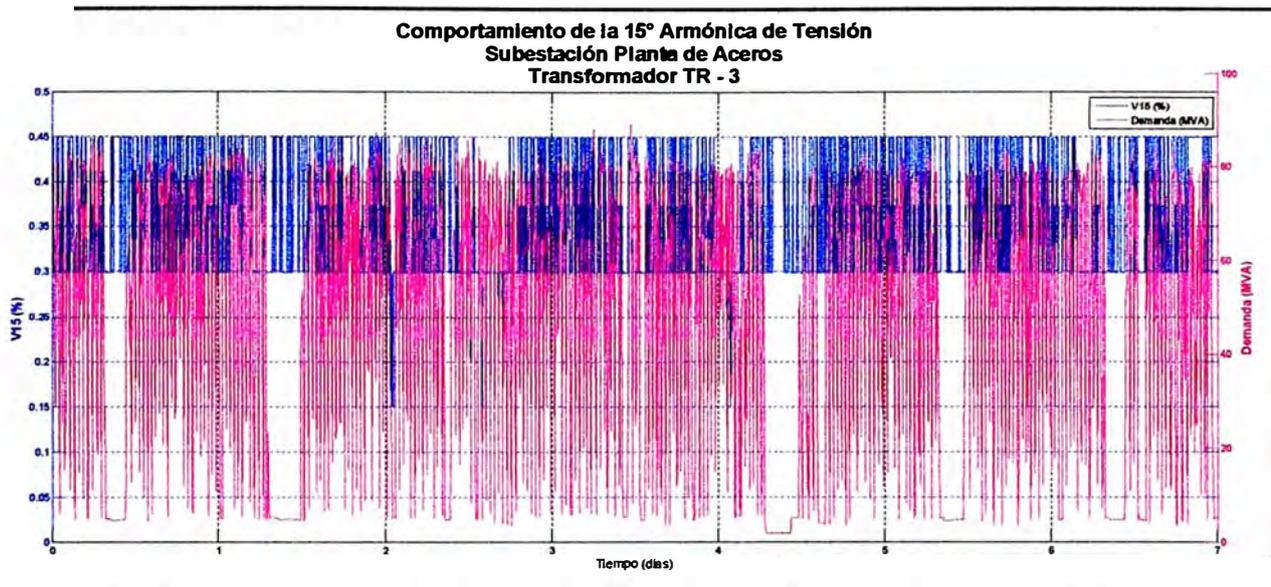


**Fig. N° 4.31** Comportamiento de 5° armónica de corriente.

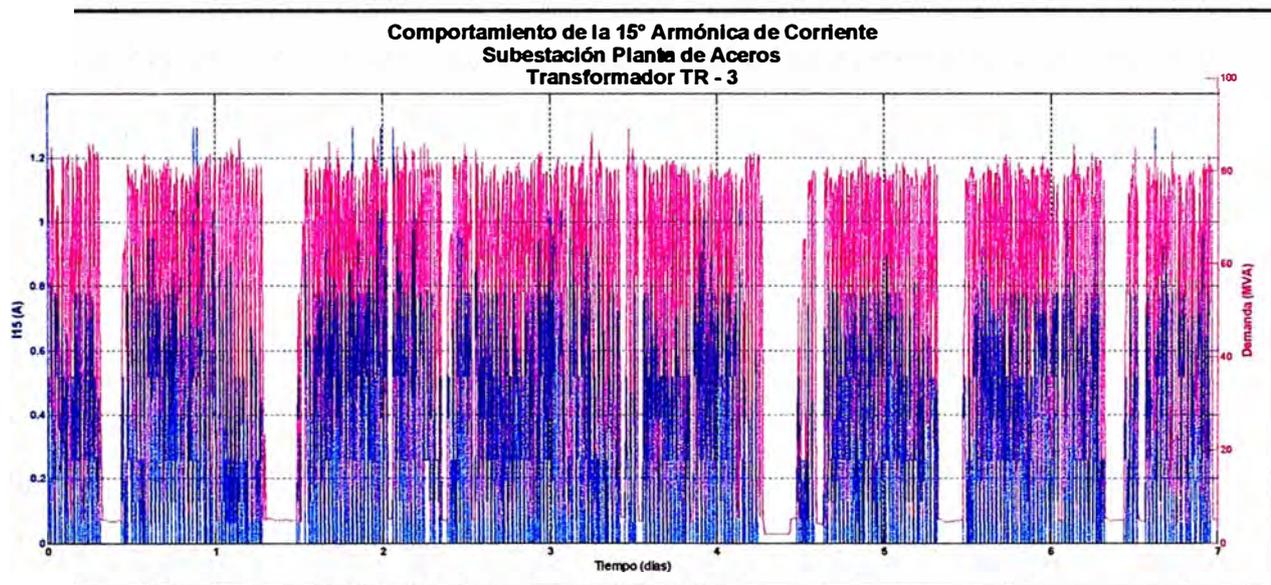
De las Fig. N° 4.30 y N° 4.31, se observa que el nivel de armónicos de tensión y corriente se mantiene alto, aún sin la operación del horno eléctrico N° 1.

### C) Análisis de 15° Armónica

En las Fig. N° 4.32 y N° 4.33, se muestra la tensión y corriente armónica de orden 15 frente a la demanda presentada en el transformador TR - 3.



**Fig. N° 4.32** Comportamiento de 15° armónica de tensión.



**Fig. N° 4.33** Comportamiento de 15° armónica de corriente.

De las figuras anteriores se observa que el nivel de armónicos de tensión se mantiene alto, aún sin la operación del horno eléctrico N° 1, mientras que el nivel de armónicos de corriente se incrementa con la operación del horno eléctrico N° 1.

#### 4.2.4 Análisis del Flicker

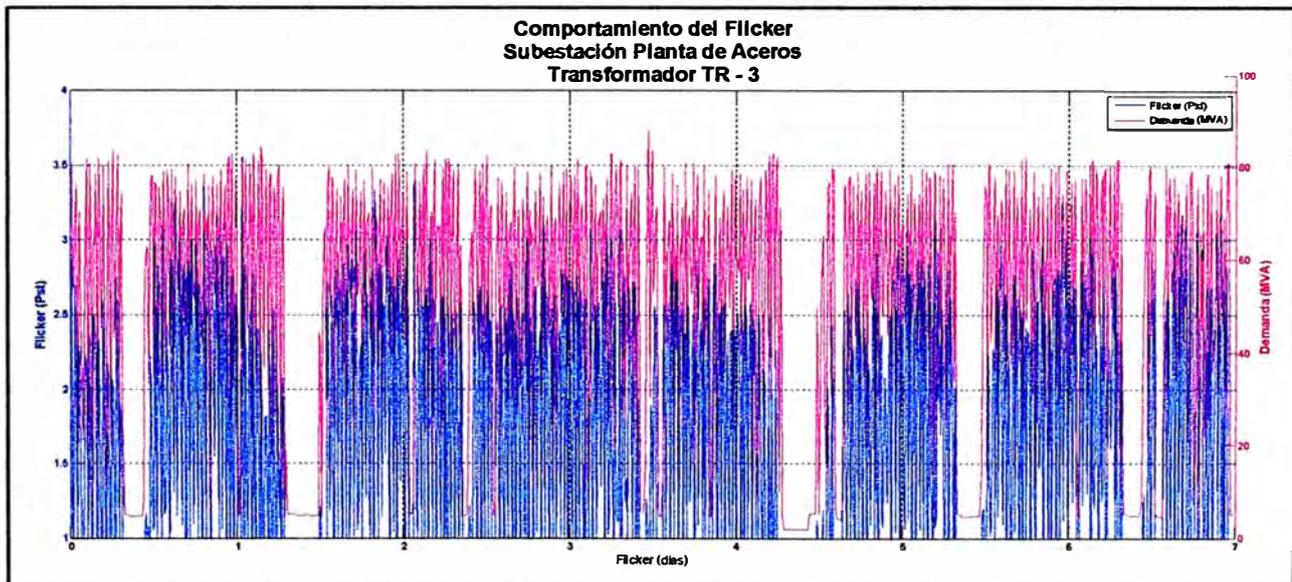
En la siguiente tabla se muestra los niveles de Flicker (Pst) en el nivel de 220kV de la Planta de Aceros correspondiente al punto eléctrico del transformador TR - 3.

**Tabla N° 4.31**

Punto Eléctrico	Sin Hornos			Con Hornos		
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
TR - 3	0.67	0.30	0.28	22.04	3.46	0.27

En la tabla N° 4.31 se observa que los niveles de Flicker se incrementan con la operación del horno eléctrico N° 1; lo cual indicaría que dicha carga es la responsable del incremento de los niveles de Flicker.

En la Fig. N° 4.34 se muestra el comportamiento del flicker frente a la demanda del punto eléctrico evaluado.



**Fig. N° 4.34** Comportamiento del flicker.

De la figura anterior se observa que los niveles de flicker presentan el mismo comportamiento que la demanda del transformador TR - 3 de la Planta de Aceros. Por consiguiente, el horno eléctrico N° 1 es el responsable del incremento en el nivel del Flicker.

### 4.3 Evaluación N° 3 - Análisis de Armónicos en la Subestación SEINDEP con el Ingreso y Salida de Operación del Horno Eléctrico N° 1 y N° 2.

El objetivo del presente análisis es mostrar el impacto que ocasiona la operación del horno eléctrico N° 1 y N° 2, sobre el nivel de distorsión armónica, en el nivel de 220 kV de la subestación SEINDEP. En la Fig. N° 4.35 se muestra la ubicación gráfica del punto eléctrico medido.

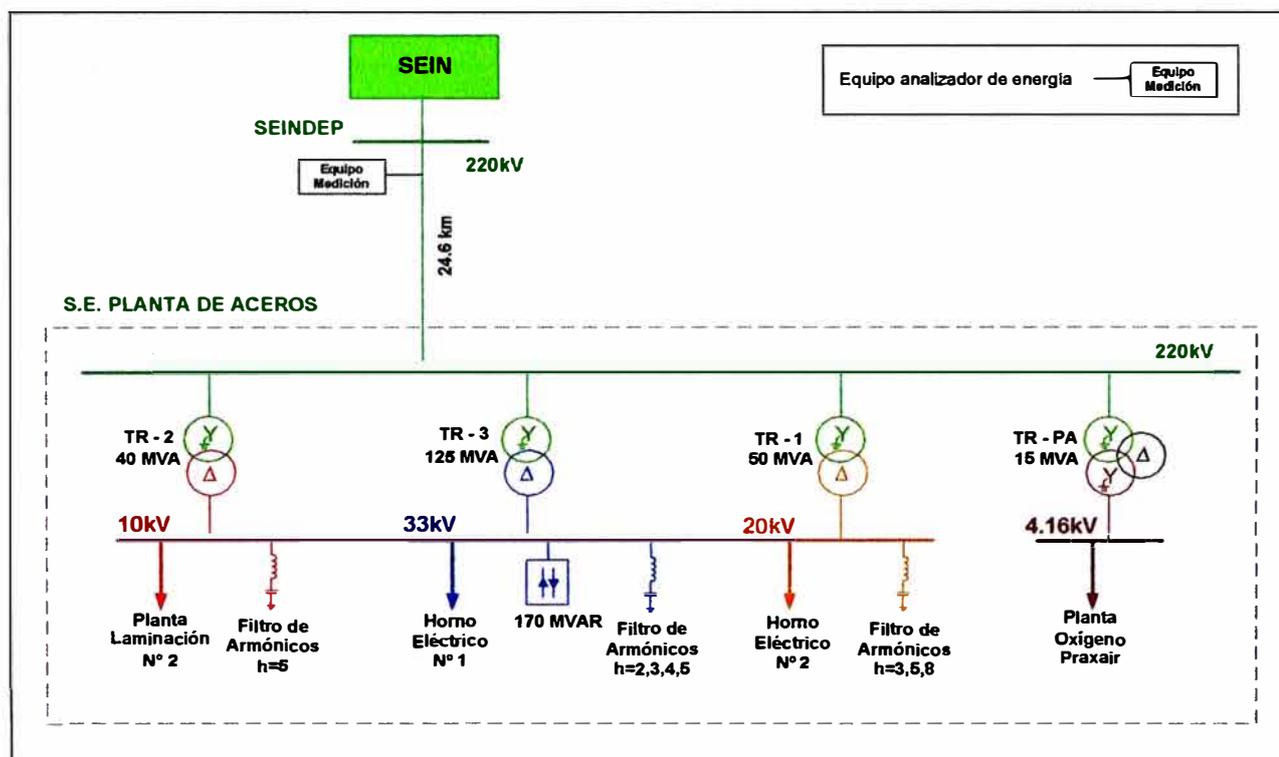


Fig. N° 4.35 Topología del sistema eléctrico de la Planta de Aceros.

#### 4.3.1 Punto de Medición Evaluado

La medición fue realizada en el siguiente punto eléctrico:

Tabla N° 4.32 Ubicación del punto eléctrico.

Ítem	Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal
1	SEINDEP	Línea de Transmisión L.T. 220 kV	220 kV

### 4.3.2 Análisis de la Tensión

En las tablas N° 4.33 y N° 4.34 se muestra la tensión registrada en la L.T. 220 kV de la subestación SEINDEP durante todo el período de medición (este período incluye la operación normal y la parada de los hornos).

**Tabla N° 4.33 Tensión RMS**

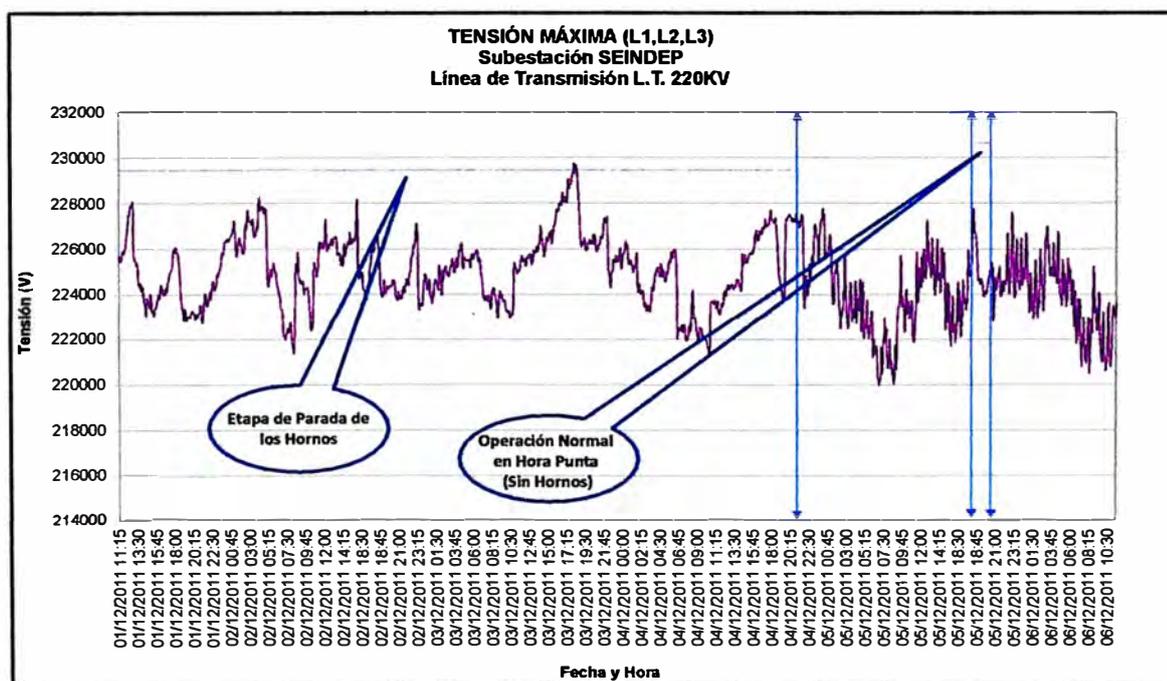
Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Máximo	Promedio	Mínimo
SEINDEP	L.T. 220 kV	220 kV	230kV	225kV	220kV

**Tabla N° 4.34 Tensión RMS en P.U.**

Subestación	Punto Eléctrico	Tensión Nominal	Máximo	Promedio	Mínimo
SEINDEP	L.T. 220 kV	220 kV	1.04	1.02	1.00

De las tablas anteriores, se observa que los niveles de tensión se encuentran dentro del  $\pm 5\%$  de la tensión nominal.

En la Fig. N° 4.36 se muestra el comportamiento de la tensión en la etapa de parada de los hornos y en operación normal.



**Fig. N° 4.36 Perfil de tensión RMS.**

### 4.3.3 Análisis de Armónicos

Las tensiones armónicas individuales de orden 5, 13 y 15 se encuentran constantemente en falta según la NTCSE. Por lo tanto, se analizará el efecto que causa la salida de operación de los hornos eléctricos N° 1 y N° 2 en dichos armónicos. En las tablas N° 4.35 y N° 4.36 se muestra el cuadro comparativo con el ingreso y salida de operación de los hornos eléctricos.

**Tabla N° 4.35 Tensión armónica (voltios)**

Orden Armónico	Sin Hornos			Con Hornos		
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
5	10,758	6,381	3,144	7,448	5,397	2,684
13	4,522	3,109	2,070	4,003	3,166	2,268
15	1,504	1,135	893	1,410	1,141	832

**Tabla N° 4.36 Tensión armónica (%)**

Orden Armónico	Sin Hornos			Con Hornos			Tolerancia NTCSE
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	
5	4.9%	2.9%	1.4%	3.4%	2.5%	1.2%	2.0%
13	2.1%	1.4%	0.9%	1.8%	1.4%	1.0%	1.5%
15	0.7%	0.5%	0.4%	0.6%	0.5%	0.4%	0.3%

De las tablas anteriores, se puede observar que las tensiones armónicas individuales de orden 13 y 15, en promedio, no presentan variaciones con la parada de los hornos eléctricos. Por otro lado, las armónicas de orden 5 son mayores sin la operación de los hornos eléctricos N° 1 y N° 2.

En la tabla N° 4.37 se muestra la cantidad de intervalos registrados durante todo el período de medición en la subestación SEINDEP.

**Tabla N° 4.37**

Subestación	SEINDEP
Nivel de Tensión	220 kV
Punto de Medición	Línea de Transmisión L.T. 220 kV
Cantidad de intervalos Medidos	721

En la tabla N° 4.38 se muestra la cantidad de intervalos, por armónicas individuales de tensión, que se encuentran fuera de rango según la NTCSE.

**Tabla N° 4.38**

	Cantidad de Intervalos Fuera de Rango			
	Sin hornos	(%)	Con hornos	(%)
V5	461	64%	163	23%
V13	146	20%	93	13%
V15	508	70%	213	30%

De la tabla anterior se observa que existe mayor cantidad de intervalos fuera de rango durante la parada de los hornos eléctricos.

En la tabla N° 4.39 se muestra las corrientes armónicas individuales de orden 5, 13 y 15.

**Tabla N° 4.39 Corriente armónica (A)**

Orden Armónico	Sin Hornos			Con Hornos		
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
5	16.7	4.9	0.9	11.4	8.2	3.9
13	0.4	0.2	0.1	0.7	0.4	0.2
15	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1

De la tabla anterior se observa que las corrientes armónicas, en promedio, se incrementan con la operación de los hornos eléctricos.

## A) Espectro de Armónicos

En la tabla N° 4.29 se muestra, en promedio, el espectro de armónicos de tensión y corriente con el ingreso y salida de operación de los hornos eléctricos N° 1 y N° 2.

**Tabla N° 4.40** Espectro de Vh e Ih con hornos eléctricos

Orden Armónico (h)	Tensión (V)	Corriente (A)	Tensión (%)	Corriente (%)
1	223,408	186.7	100.0%	100.0%
2	148	1.8	0.1%	0.9%
3	1,054	1.2	0.5%	0.6%
4	90	0.4	0.0%	0.2%
5	4,752	7.9	2.1%	4.3%
6	108	0.3	0.0%	0.2%
7	1,739	1.5	0.8%	0.8%
8	52	0.2	0.0%	0.1%
9	1,192	0.3	0.5%	0.1%
10	150	0.2	0.1%	0.1%
11	1,228	0.7	0.5%	0.4%
12	105	0.1	0.0%	0.1%
13	1,975	0.4	0.9%	0.2%
14	100	0.1	0.0%	0.1%
15	765	0.2	0.3%	0.1%

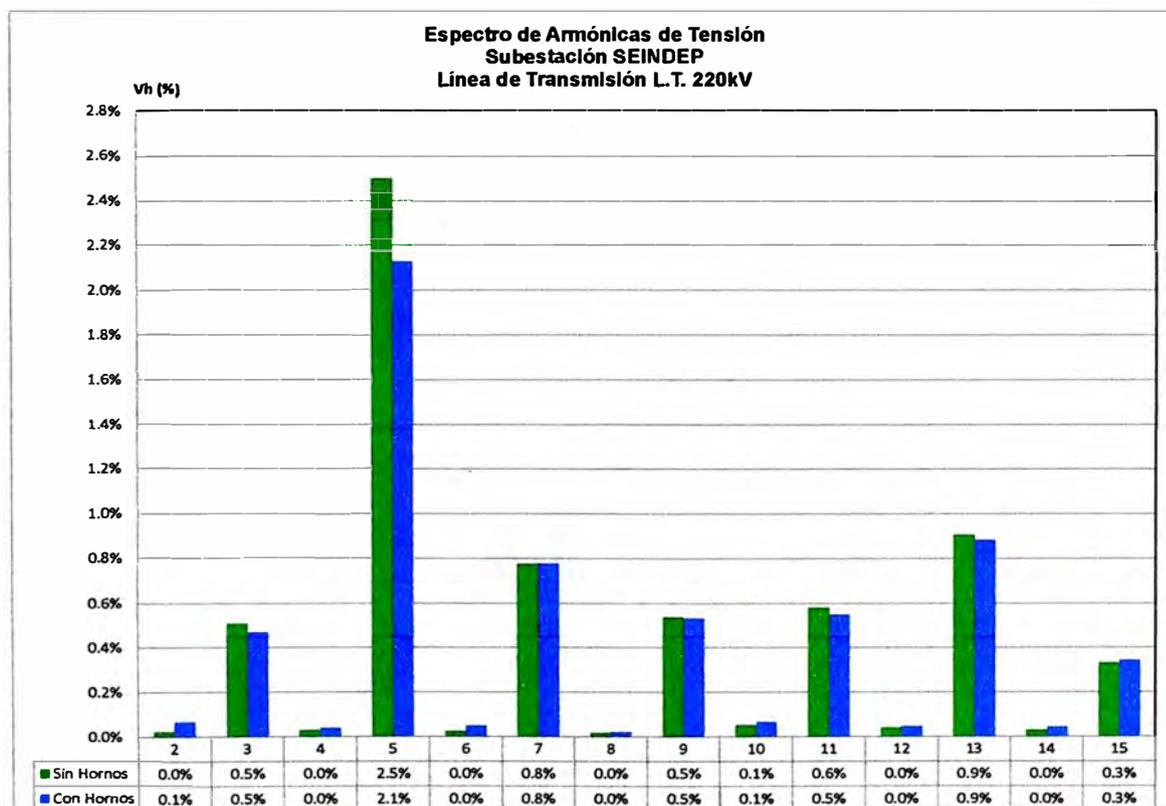
**Tabla N° 4.41** Espectro de Vh e Ih sin hornos eléctricos

Orden Armónico (h)	Tensión (V)	Corriente (A)	Tensión (%)	Corriente (%)
1	224,598	41.2	100.0%	100.0%
2	47	0.2	0.0%	0.5%
3	1,143	0.5	0.5%	1.2%
4	63	0.1	0.5%	0.4%
5	5,609	4.8	2.5%	11.6%
6	56	0.1	0.0%	0.2%

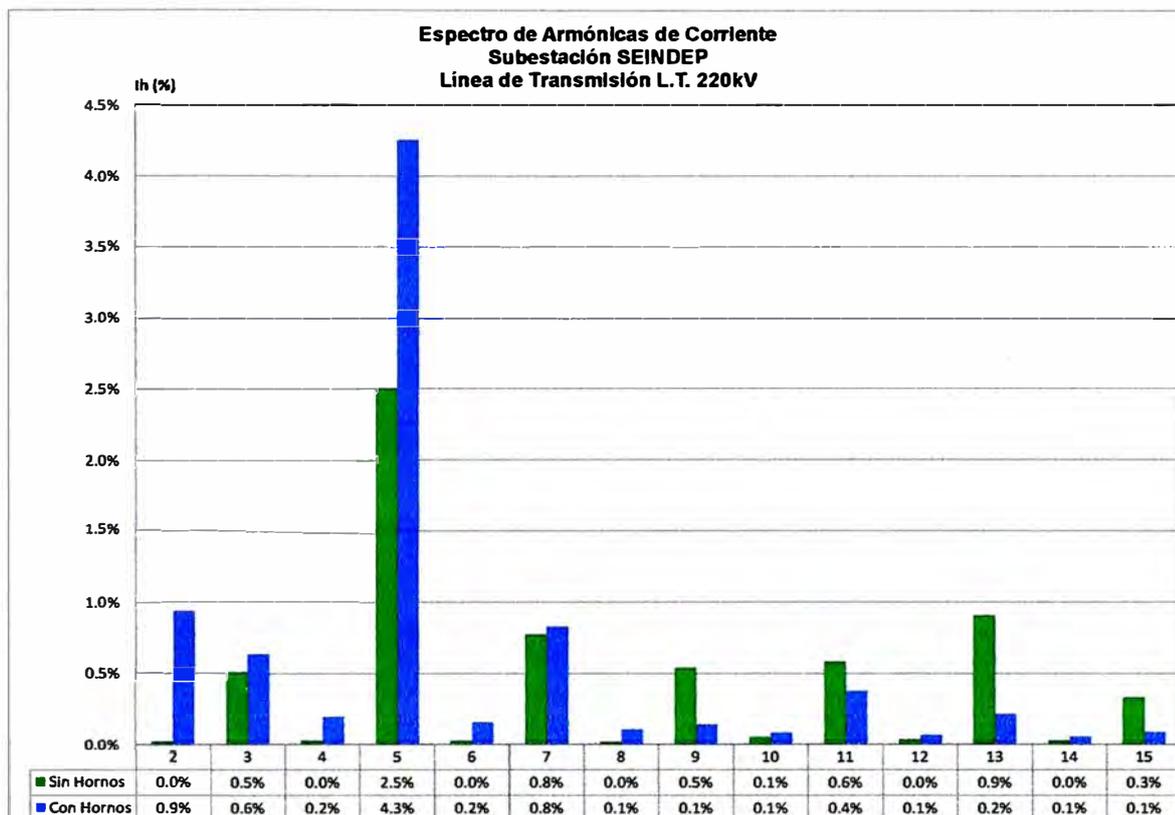
Orden Armónico (h)	Tensión (V)	Corriente (A)	Tensión (%)	Corriente (%)
7	1,739	1.1	0.8%	2.8%
8	40	0.1	0.0%	0.2%
9	1,205	0.1	0.5%	0.2%
10	118	0.1	0.1%	0.2%
11	1,304	0.6	0.6%	1.5%
12	89	0.1	0.0%	0.2%
13	2,036	0.2	0.9%	0.5%
14	66	0.1	0.0%	0.2%
15	743	0.1	0.3%	0.2%

De la tabla anterior, se observa que las armónicas de tensión del orden 5, 13 y 15 se encuentran por encima del límite permitido según la NTCSE.

En las Fig. N° 4.37 y N° 4.38, se muestra el espectro de la tensión y corriente armónica con el ingreso y salida de operación de los hornos eléctricos.



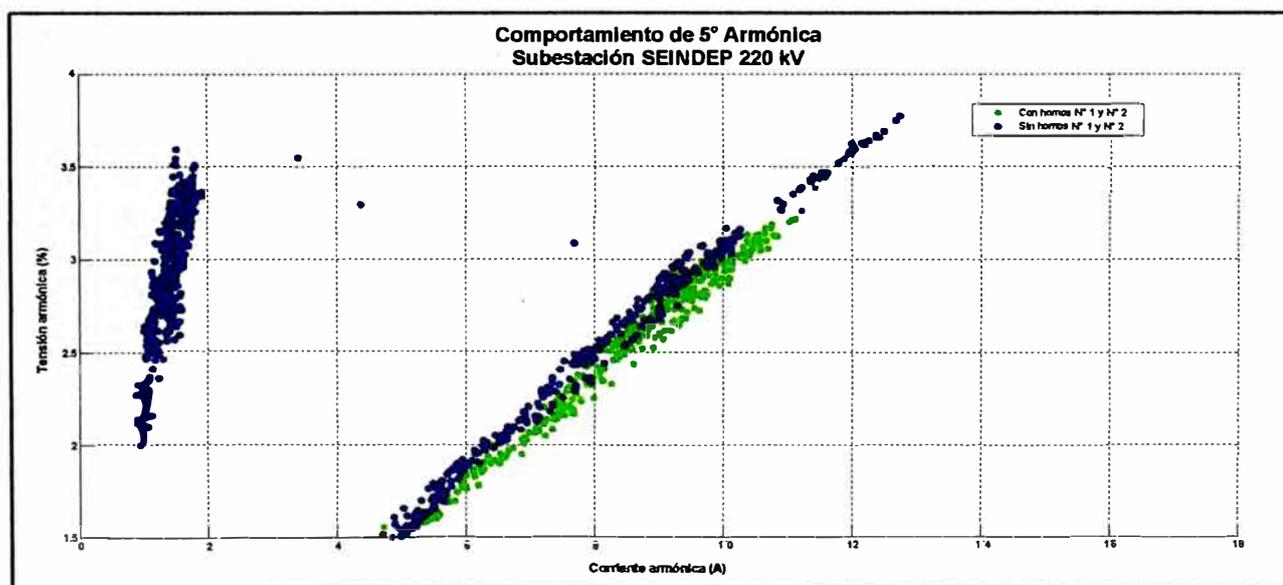
**Fig. N° 4.37** Espectro de tensión.



**Fig. N° 4.38**Espectro de corriente.

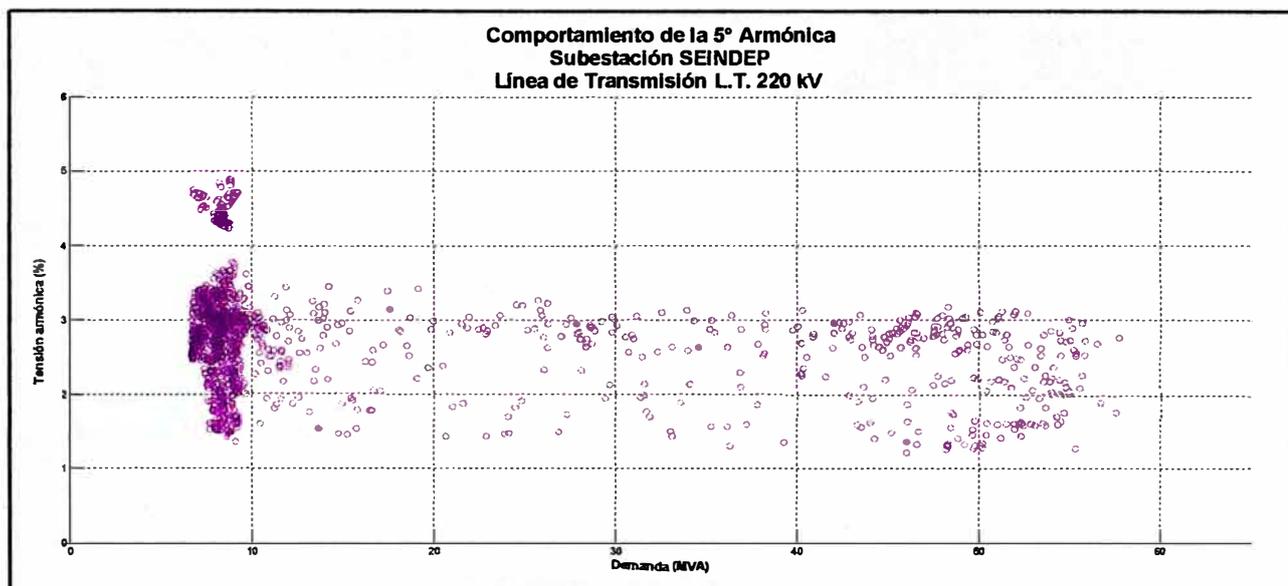
**B) Análisis de 5° Armónica**

En la Fig. N° 4.39 se muestra el comportamiento de la 5ta armónica con el ingreso y salida operación de los hornoseléctricos N° 1 y N° 2.



**Fig. N° 4.39**Dispersión 5° armónica.

De la figura anterior se observa que la correlación entre la tensión y corriente armónica presenta una tendencia lineal con el ingreso y salida de operación de los hornos eléctricos N° 1 y N° 2, lo cual indica que la fuente de armónica existe aún con la ausencia de los hornos eléctricos. En la Fig. N° 4.40 se muestra el comportamiento de la tensión armónica de orden 5 con el incremento de la demanda.



**Fig. N° 4.40**

De la figura anterior se observa que la máxima tensión armónica se presenta cuando la demanda es mucho menor a la demanda máxima en la línea de transmisión L.T. 220 kV.

### Comportamiento de la Demanda

En las siguientes figuras se muestra la tensión y corriente armónica de orden 5 frente a la demanda presentada en la línea de transmisión L.T. 220 kV.

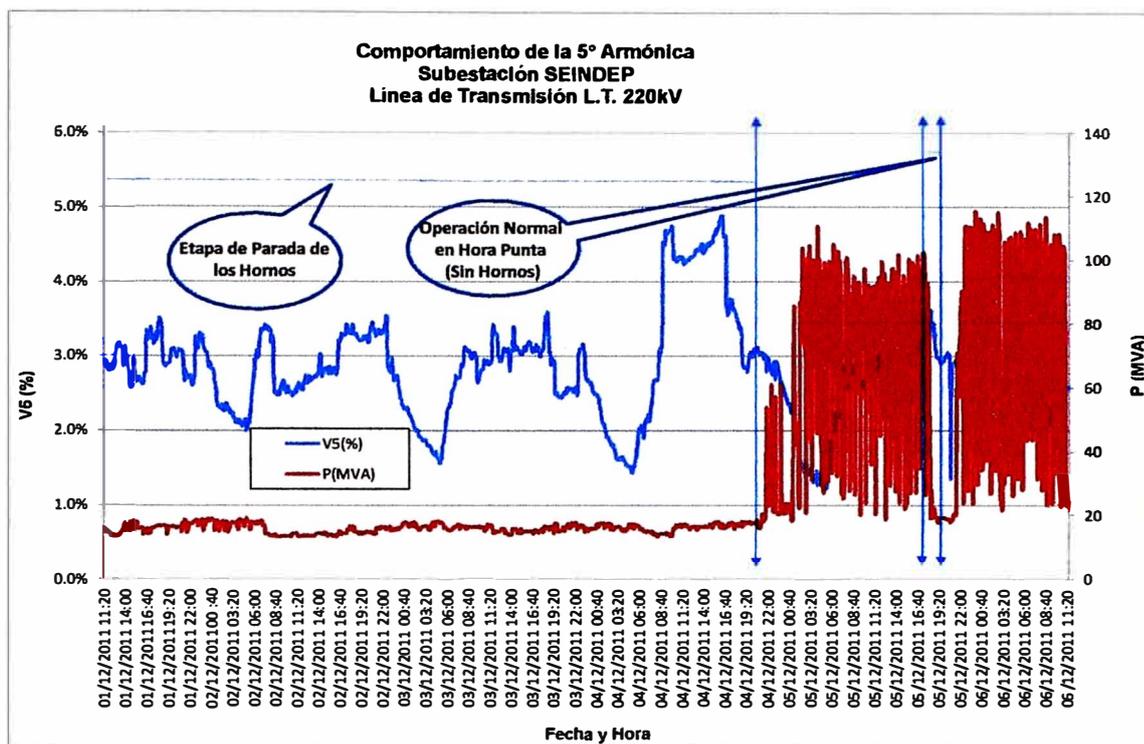


Fig. N° 4.41 Comportamiento de 5° armónica de tensión.

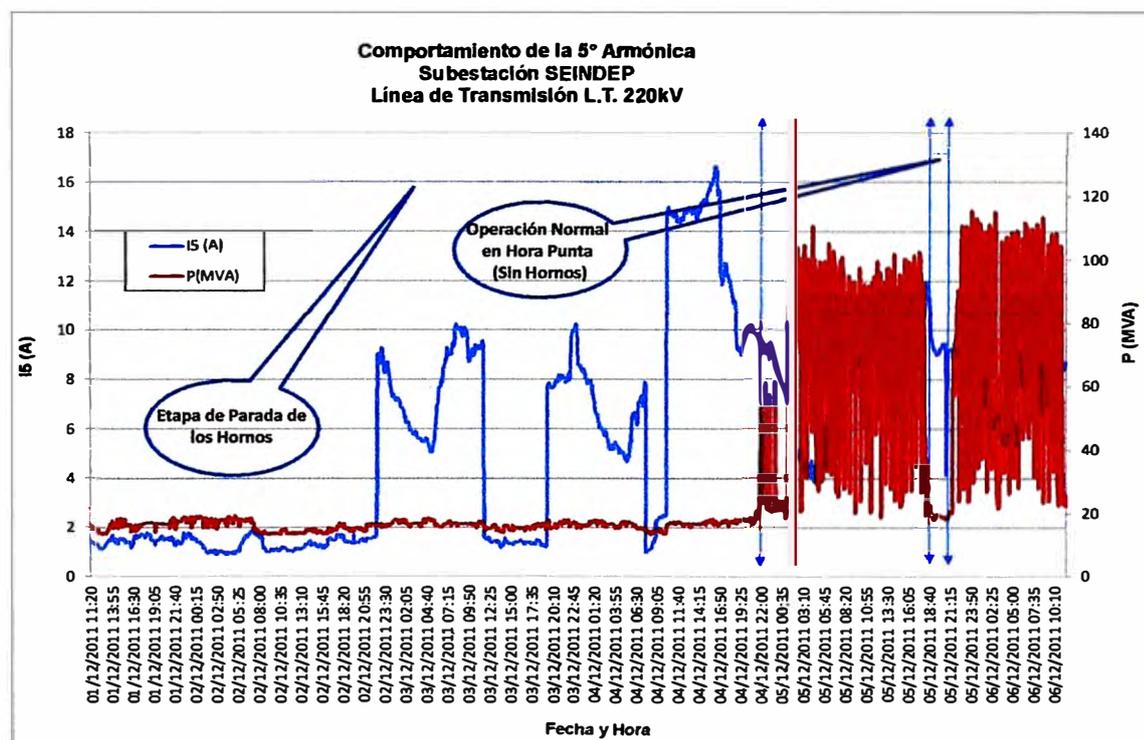
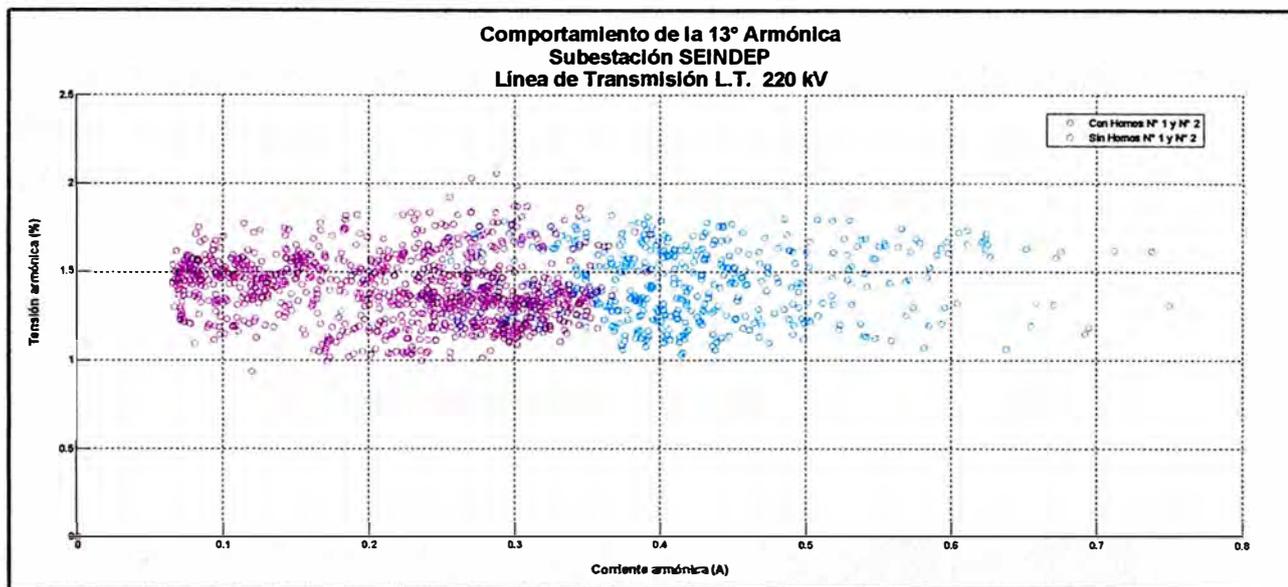


Fig. N° 4.42 Comportamiento de 5° armónica de corriente.

De las Fig N° 4.41 y N° 4.42, se observa que el nivel de armónicos de tensión y corriente se mantiene alto aún sin la operación de los hornos e eléctricos N° 1 y N° 2

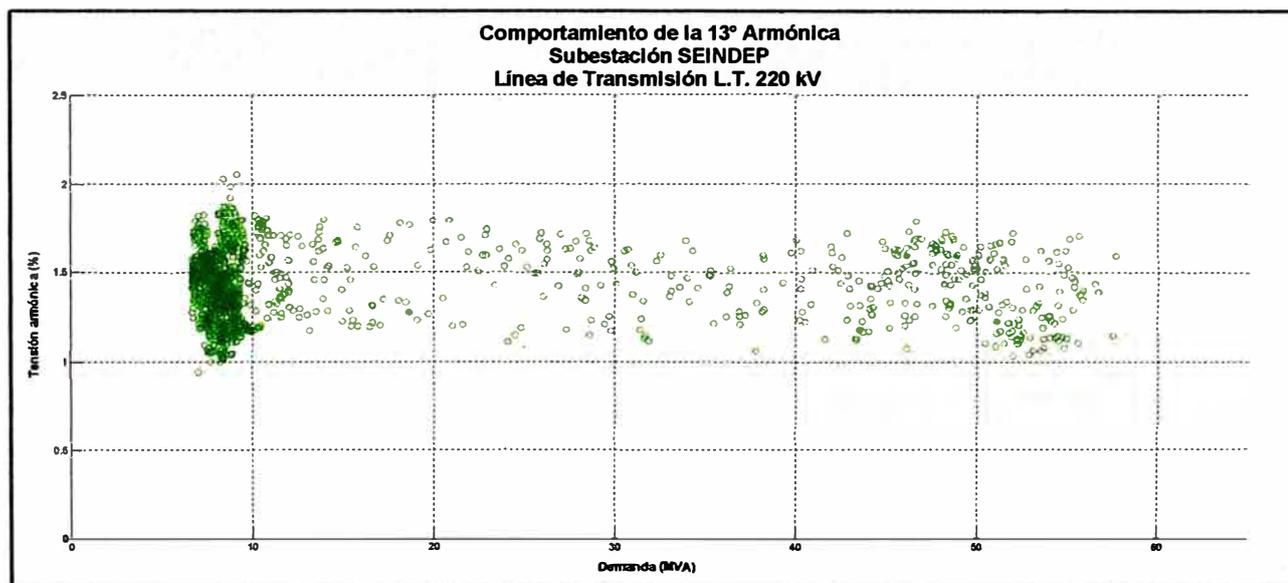
### C) Análisis de 13° Armónica

En la Fig. 4.43 se muestra la correlación entre la tensión y corriente armónica de orden 13 con el ingreso y salida de operación de los hornos eléctricos N° 1 y N° 2.



**Fig. N° 4.43** Dispersión de 13° armónica.

Del gráfico anterior se observa que la correlación entre la tensión y corriente armónica no presenta una tendencia lineal.

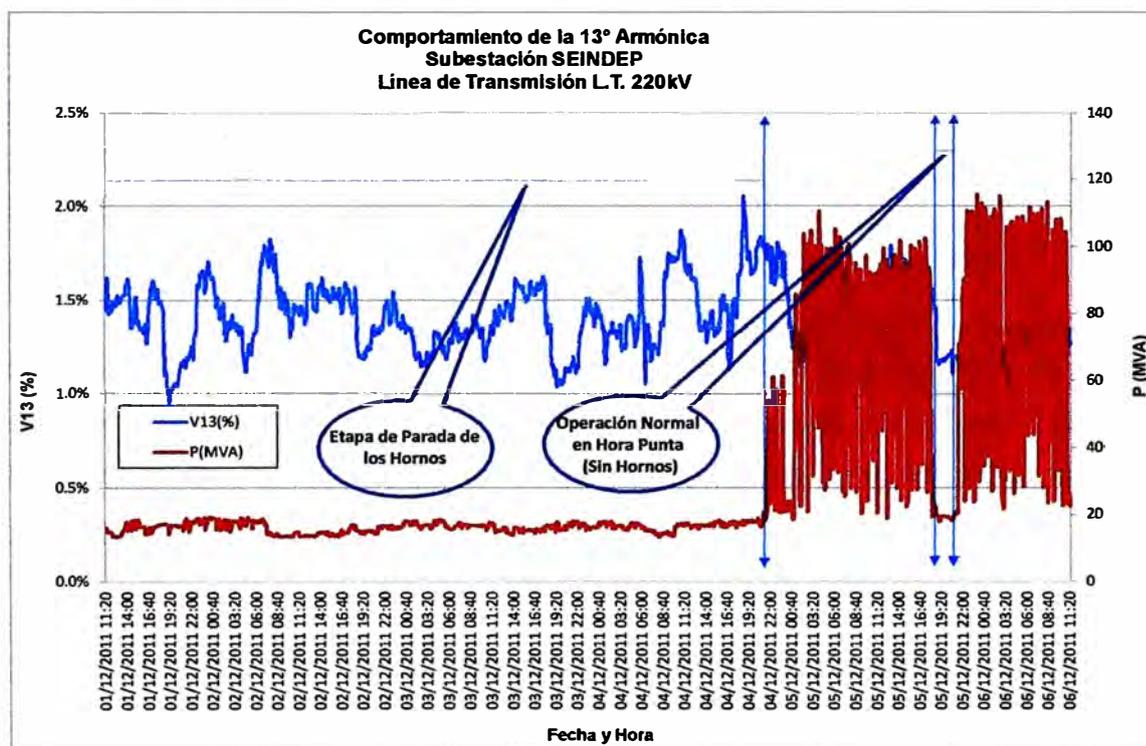


**Fig. N° 4.44** Dispersión de 13° armónica.

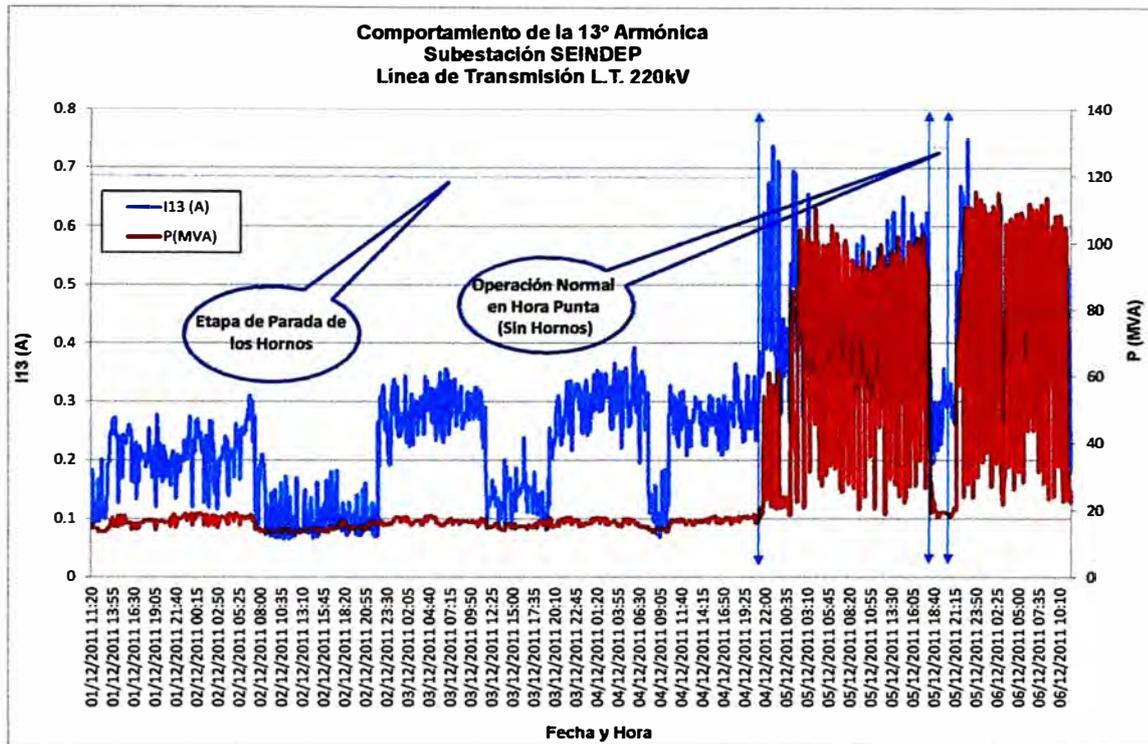
En la Fig. N° 4.44, se observa que la máxima tensión armónica se presenta cuando la demanda es mucho menor a la demanda máxima en la línea de transmisión L.T. 220 kV.

### Comportamiento de la Demanda

En los siguientes gráficos se muestra el comportamiento de la tensión y corriente armónica de orden 13 frente a la demanda presentada en la línea de transmisión L.T. 220 kV.



**Fig. N° 4.45** Comportamiento de 13° armónica de tensión.

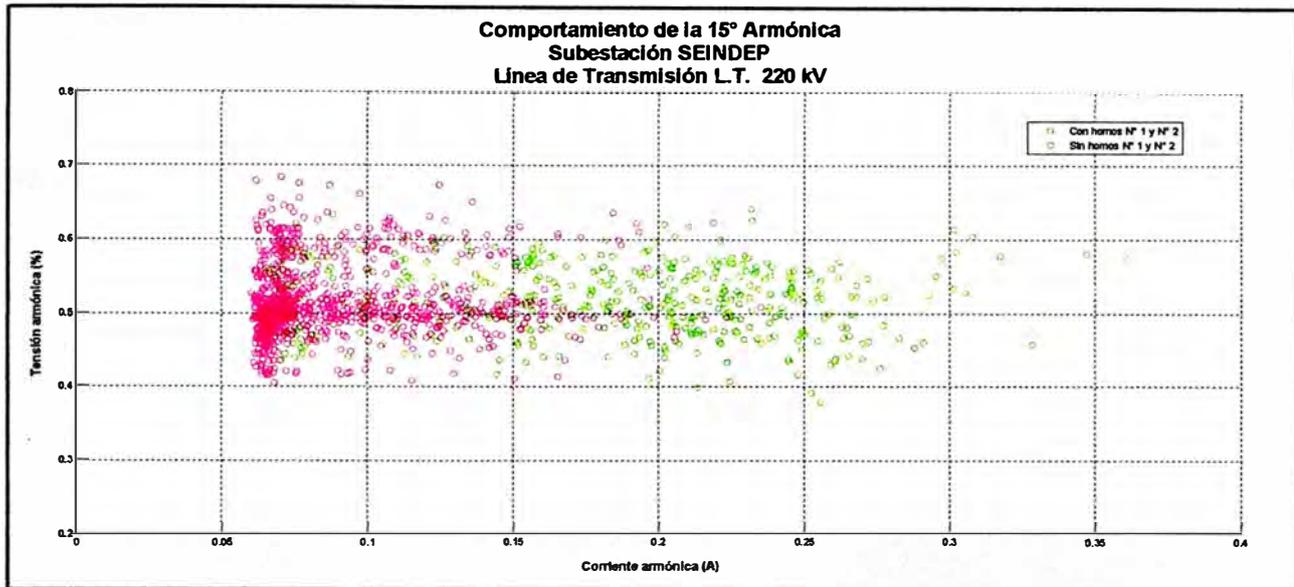


**Fig. N° 4.46** Comportamiento de 13° armónica de corriente.

De las Fig. N° 4.45 y N° 4.46, se observa que el nivel de armónicos de tensión de orden 13 se mantiene alto aún sin la operación de los hornos eléctricos de la Planta de Aceros, mientras que el nivel de armónicos de corriente se incrementa con la operación de los hornos eléctricos.

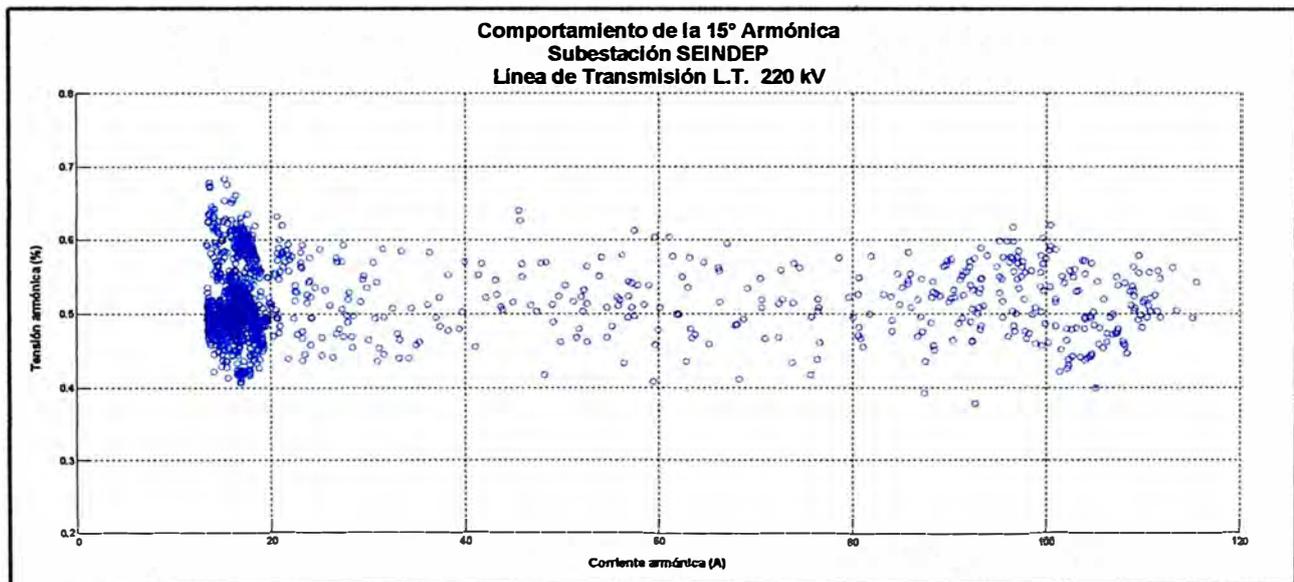
#### **D) Análisis de 15° Armónica**

En la Fig. N° 4.47, se muestra la correlación entre la tensión y corriente armónica de orden 15 con el ingreso y salida de operación de los hornos eléctricos.



**Fig. N° 4.47** Dispersión de 13ª armónica.

En la Fig. N° 4.48, se observa que la correlación entre la tensión y corriente armónica no presentan una tendencia lineal.

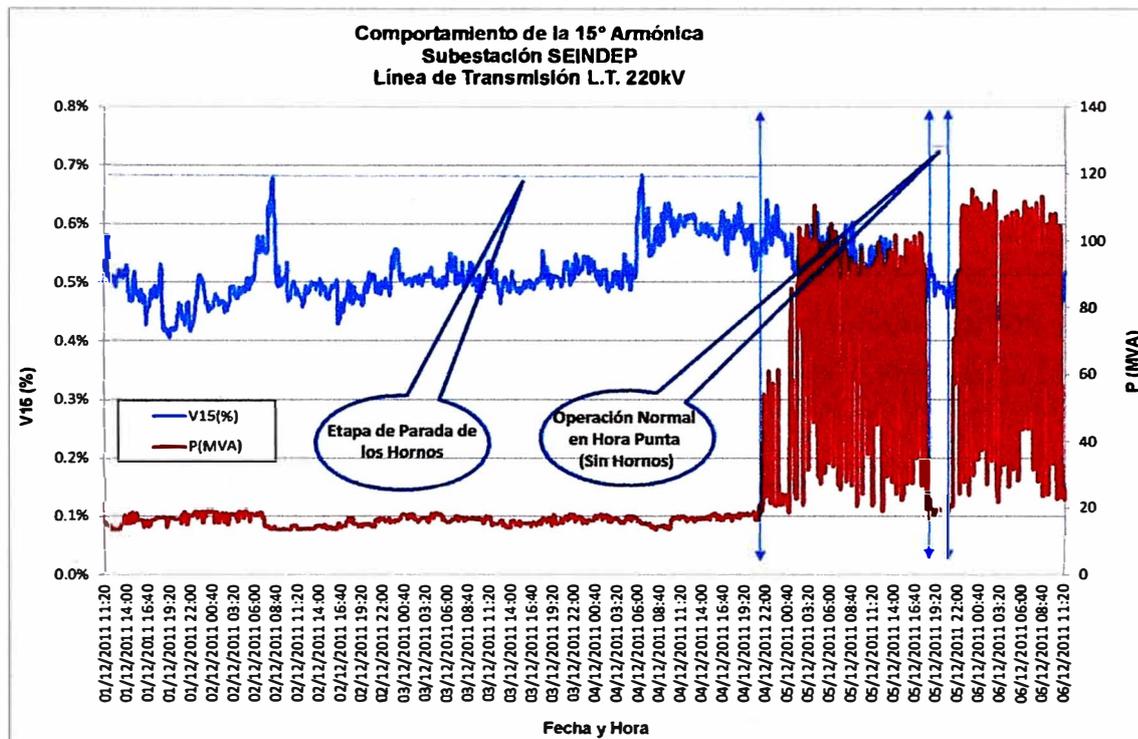


**Fig. N° 4.48**

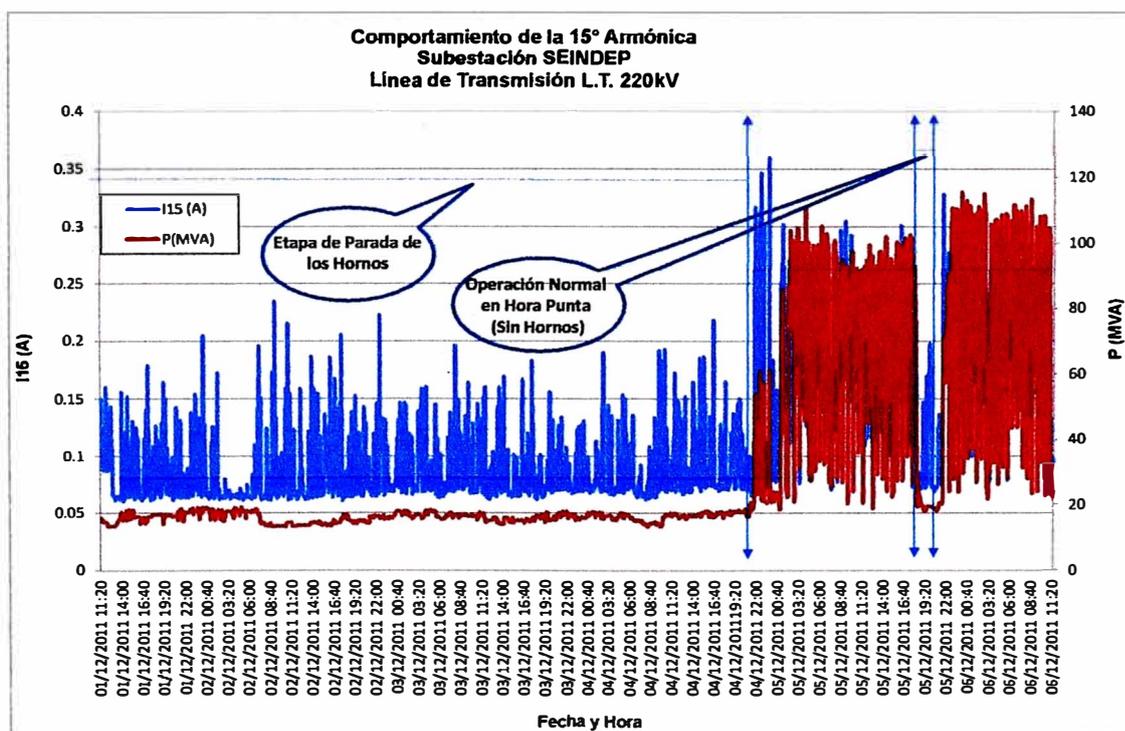
De la figura anterior, se observa que la máxima tensión armónica se presenta cuando la demanda es mucho menor a la demanda máxima de la línea de transmisión L.T. 220 kV.

## Comportamiento de la Demanda

En los siguientes gráficos se muestra la tensión y corriente armónica de orden 15 frente a la demanda presentada en la línea de transmisión L.T. 220 kV.



**Fig. N° 4.49** Comportamiento de 13ª armónica de tensión.



**Fig N° 4.50** Comportamiento de 13ª armónica de corriente

De las Fig. N° 4.49 y N° 4.50, se observa que el nivel de armónicos de tensión de orden 15 se mantiene alto aún sin la operación de los hornos eléctricos de la Planta de Aceros, mientras que el nivel de armónicos de corriente se incrementa con la operación de los hornos eléctricos.

#### 4.3.4 Análisis del Flicker

En la siguiente tabla se muestra los niveles de Flicker (Pst) en el nivel de 220kV de la subestación SEINDEP correspondiente al punto eléctrico L.T. 220 kV.

Tabla N° 4.42

Punto Eléctrico	Sin Hornos			Con Hornos		
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
L.T. 220 kV	1.3	0.1	0.1	2.8	0.8	0.1

En la tabla N° 4.42 se observa que los niveles de Flicker se incrementan con la operación de los hornos eléctricos; lo cual indicaría que dicha carga es la responsable del incremento de los niveles de Flicker. En la Fig. N° 4.51 se muestra el comportamiento del flicker y la demanda del punto eléctrico evaluado.

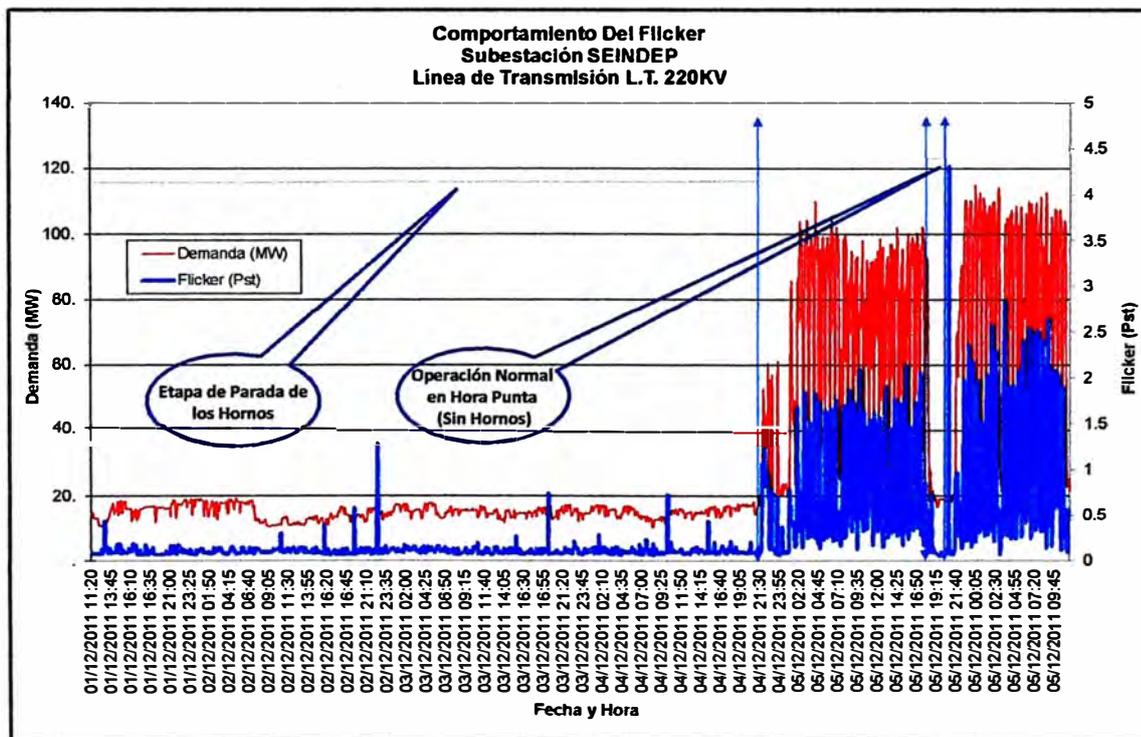


Fig. N° 4.51 Comportamiento del flicker.

De la figura anterior, se observa que los niveles de flicker son directamente proporcionales a la demanda en la línea de transmisión L.T. 220 kV

#### **4.4 Análisis del Scan de Frecuencia**

El scan de frecuencia ha sido obtenido a través del modelo eléctrico del SEIN. Dicho modelo fue realizado en el software DigsilentPower Factory. En la FigN° 4.52 se muestra el modelo eléctrico de la Planta de Aceros.

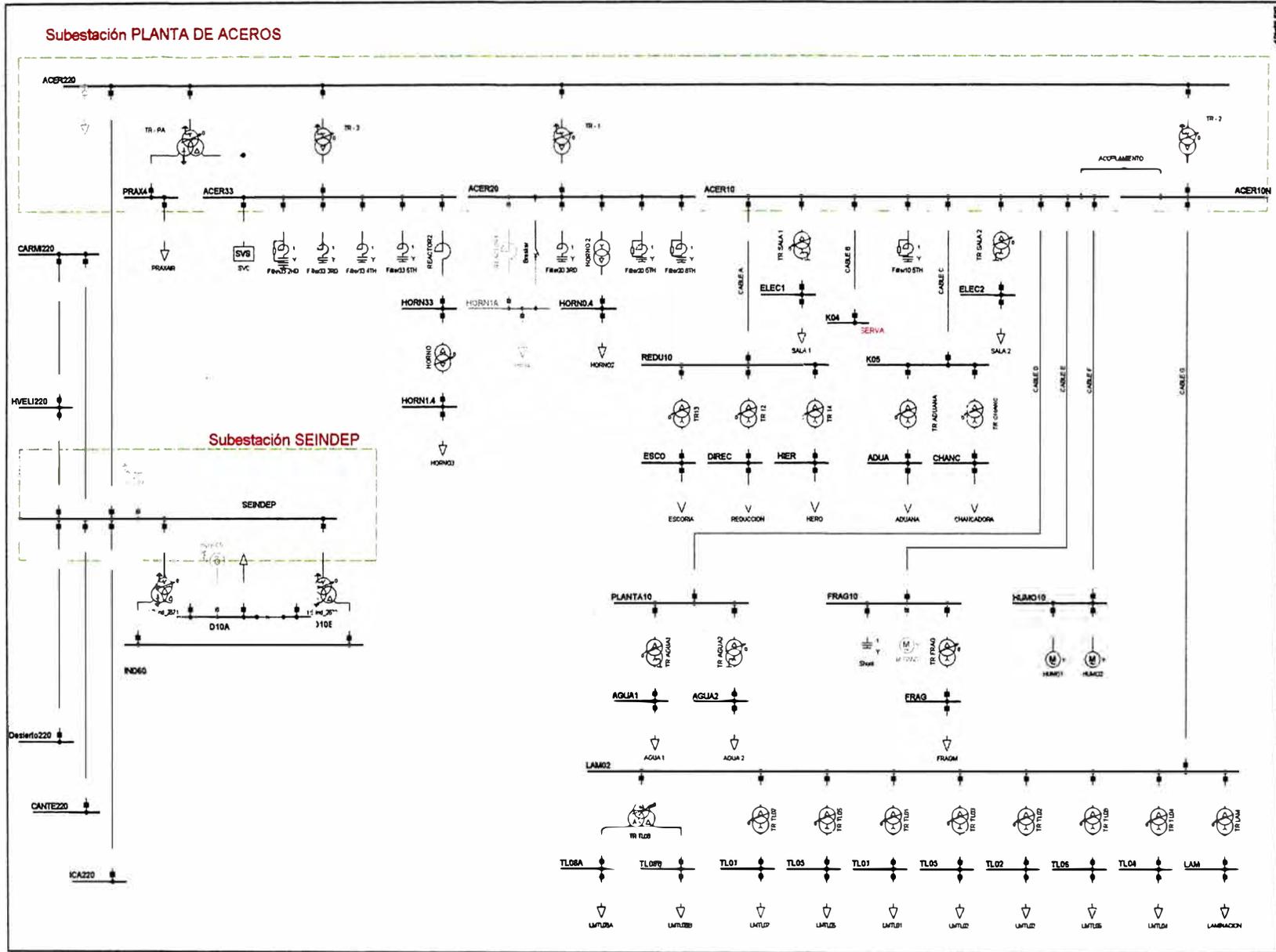


Fig. N° 4.52

En las Fig. N° 4.53 y N° 4.54 se muestra el barrido en frecuencia en las subestaciones de Planta de aceros y SEINDEP en el nivel de 220 kV.

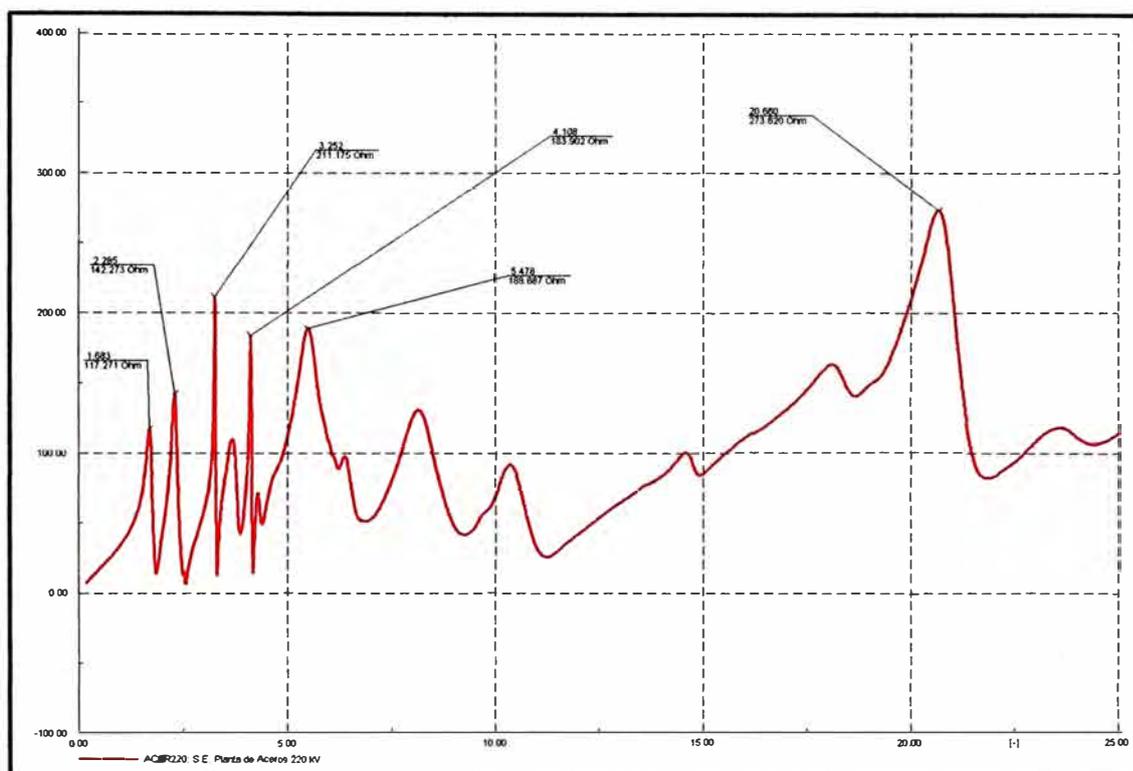


Fig. N° 4.53S.E. Planta de Aceros 220 kV

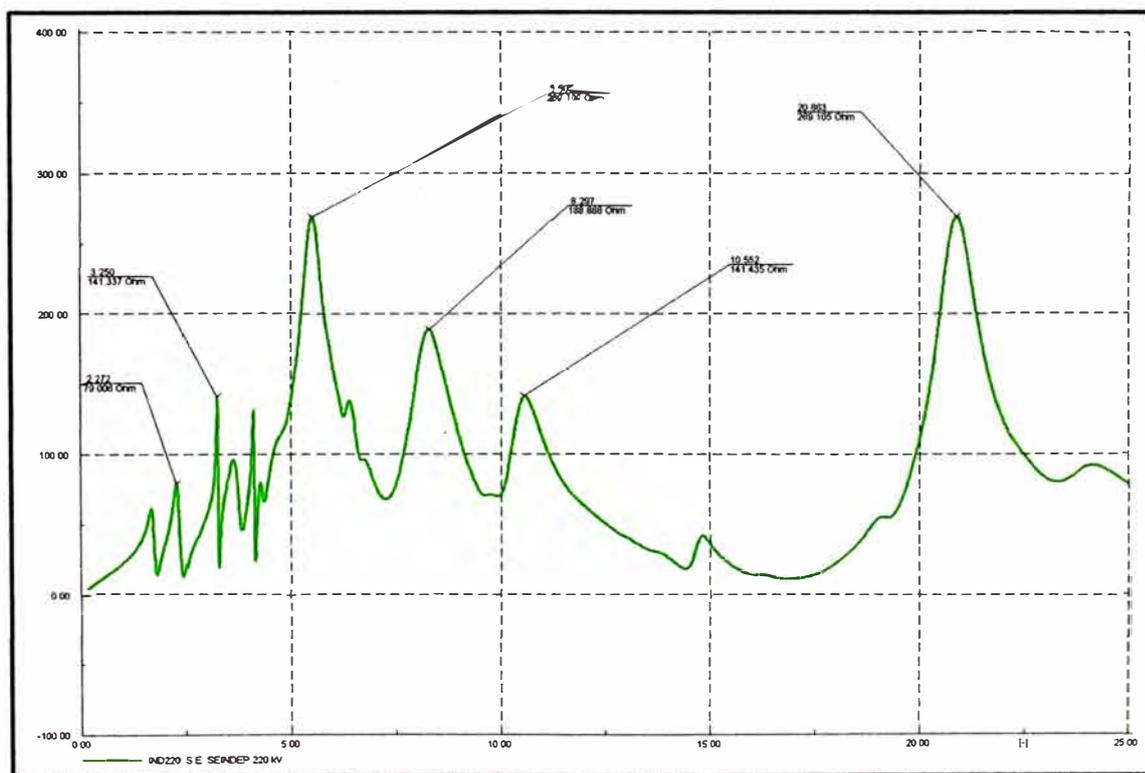


Fig. N° 4.54S.E. SEINDEP 220 kV

De las figuras anteriores se puede observar que los nodos de SEINDEP y Planta de Aceros, en el nivel de 220 kV, presentan múltiples polos, es decir, múltiples frecuencias de resonancia las cuales se encuentran dentro de la banda de la 2°, 3°, 4° y 5° armónica. Estas frecuencias son originadas por la combinación de impedancias de los sistemas eléctricos que conforman el SEIN.

A continuación se mostrara los scan de frecuencia en los nodos de 10kV, 20 kV y 33 kV de la subestación principal de la Planta de Aceros.

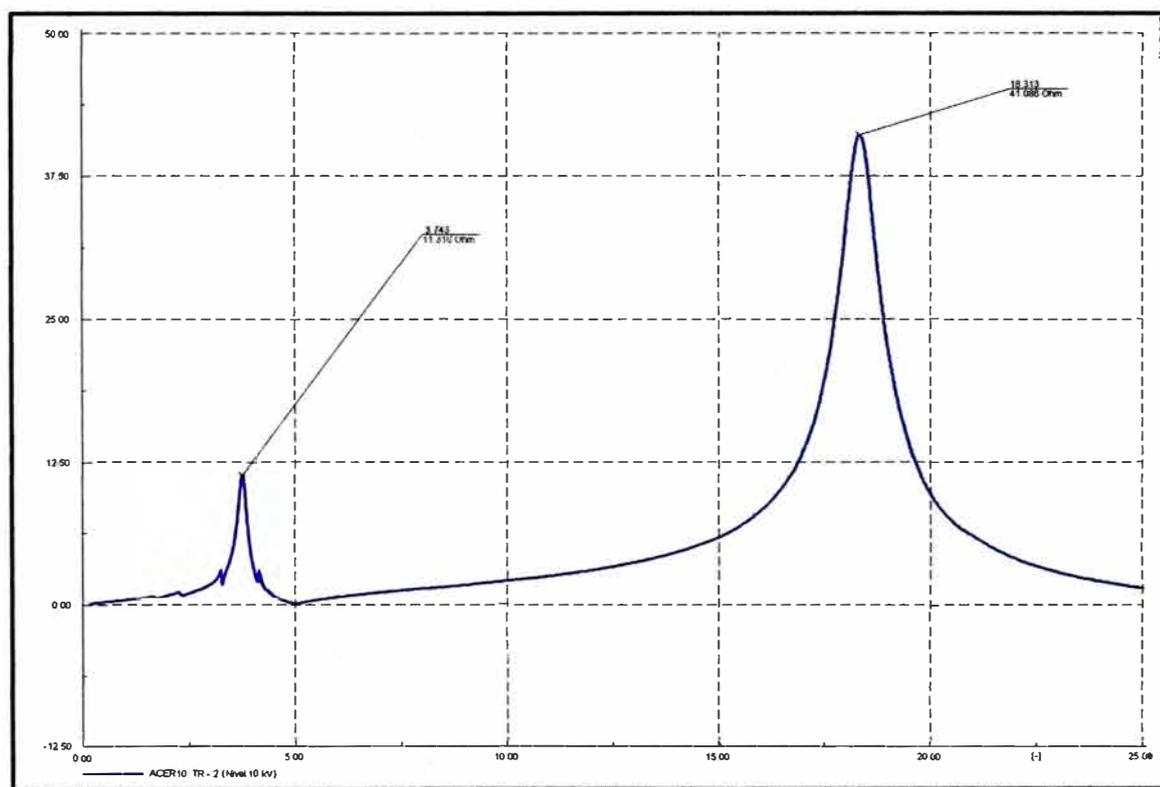


Fig. N° 4.55TR – 2 (Nivel de 10 kV)

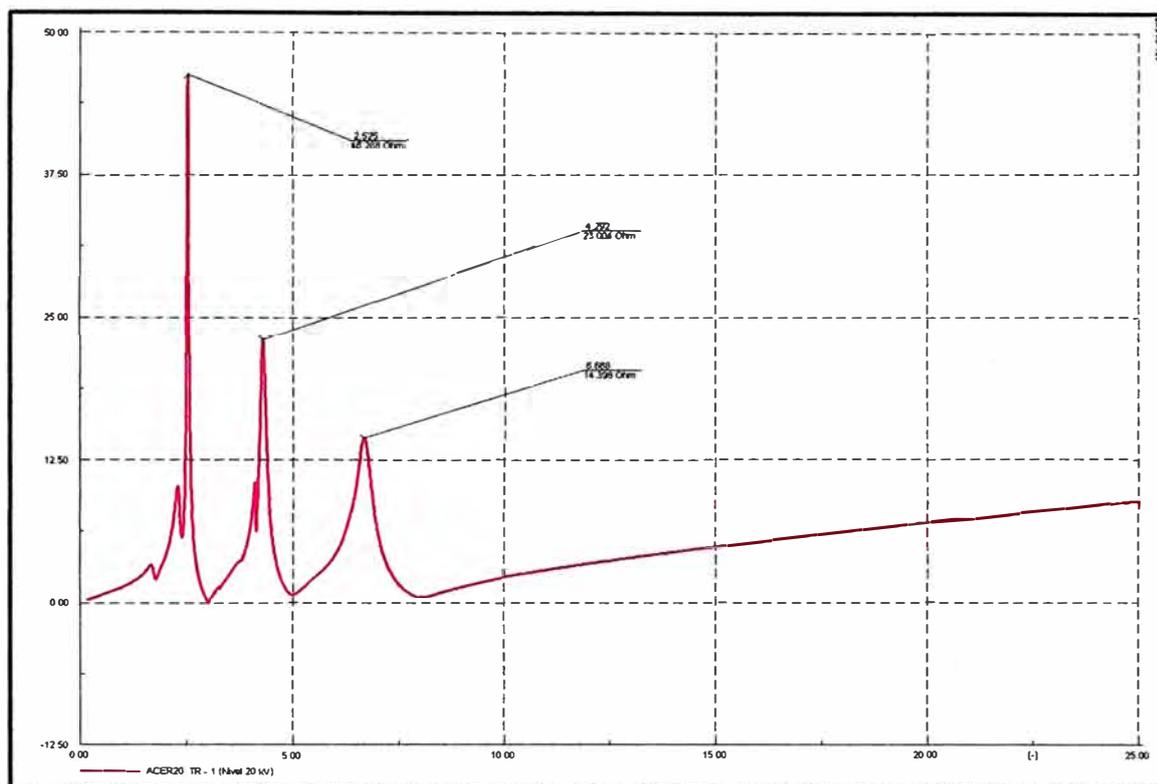


Fig. N° 4.56TR – 1 (Nivel de 20 kV)

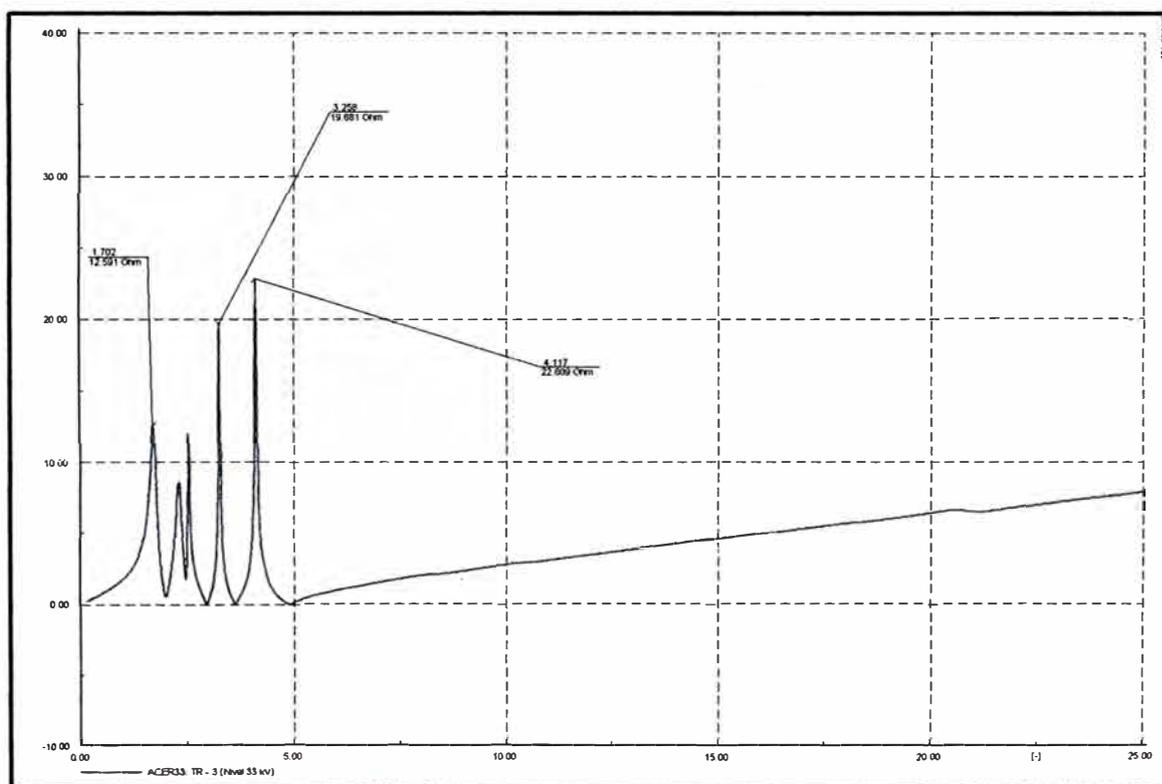


Fig. N° 4.57TR – 3(Nivel de 33kV)

De las figuras anteriores se observa lo siguiente:

- En la Fig. N° 4.55 se observa dos frecuencias de resonancia las cuales se encuentran en la banda de la frecuencia de orden 4 y 18. Estas frecuencias son originadas por la combinación de impedancias (en el nodo de Planta de Aceros 10 kV) de los sistemas eléctricos que conforman el SEIN.
- En la Fig. N° 4.56 se observa una frecuencia de resonancia la cual se encuentra en la banda de la frecuencia de orden 4. Estas frecuencias son originadas por la combinación de impedancias (en el nodo de Planta de Aceros 20 kV) de los sistemas eléctricos que conforman el SEIN.
- En la Fig. N° 4.57 se observa dos frecuencias de resonancia las cuales se encuentran en la banda de la frecuencia de orden 3 y 4. Estas frecuencias son originadas por la combinación de impedancias (en el nodo de Planta de Aceros 33 kV) de los sistemas eléctricos que conforman el SEIN.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los niveles de tensión RMS en todos los puntos medidos de la Planta de Aceros se encuentran dentro de las tolerancias permitidas por la NTCSE ( $\pm 5\%$  de la tensión nominal). Ver Tabla N° 4.2.
2. Los niveles de flicker, en las subestaciones Planta de Aceros y SEINDEP, en el nivel de 220 kV, se encuentran fuera de rango según lo estipulado por la NTCSE. Ver Tabla N° 4.3.
3. Los niveles de armónicos de tensión de orden 5, 13 y 15 superan la tolerancia permitida por la NTCSE en el punto eléctrico L.T. 220 kV de la subestación SEINDEP. Ver Tablas N° 4.4 y N° 4.5.
4. Los niveles de armónicos de tensión de orden 5 y 15 superan la tolerancia permitida por la NTCSE en los puntos de medición TR – PA y TR – 3, los cuales corresponden a la barra de 220 kV de la subestación Planta de Aceros. Ver Tablas N° 4.4 y N° 4.5.
5. Las armónicas de tensión de orden 15, 17, 21, 27 y 29 superan la tolerancia permitida por la NTCSE en el punto de medición TR – 2 en el nivel de 10 kV. Ver Tablas N° 4.6 y N° 4.7.
6. El nivel de distorsión de tensión ( $THD_V$ ) de las subestaciones SEINDEP y Planta de Aceros, en el nivel de 220 kV, se encuentra por encima de la tolerancia permitida por la NTCSE, esto debido principalmente a la contribución de la 5° armónica. Ver Tabla N° 4.22.
7. El ( $THD_V$ ) en los puntos de medición TR – 1 y TR – 2 no supera la tolerancia establecida por la NTCSE. Ver Tabla N° 4.22.
8. La 5° armónica de tensión, en promedio, se incrementa con la parada de los hornos eléctricos N° 1 y N° 2, en el punto de medición L.T. 220 kV de la subestación SEINDEP, lo cual indica que la totalidad de la distorsión de tensión, en 220 kV, no es atribuible (al 100%) a la operación de los hornos eléctricos de la Planta de Aceros. Ver Figuras N° 4.41 y N° 4.42.
9. Las armónicas de tensión de orden 5, en promedio, se incrementan con la parada de los hornos eléctricos en el punto de medición L.T. 220 kV de la subestación SEINDEP debido a que existen fuentes externas y cambio de impedancia (sin hornos) que hacen que la tensión se incremente.

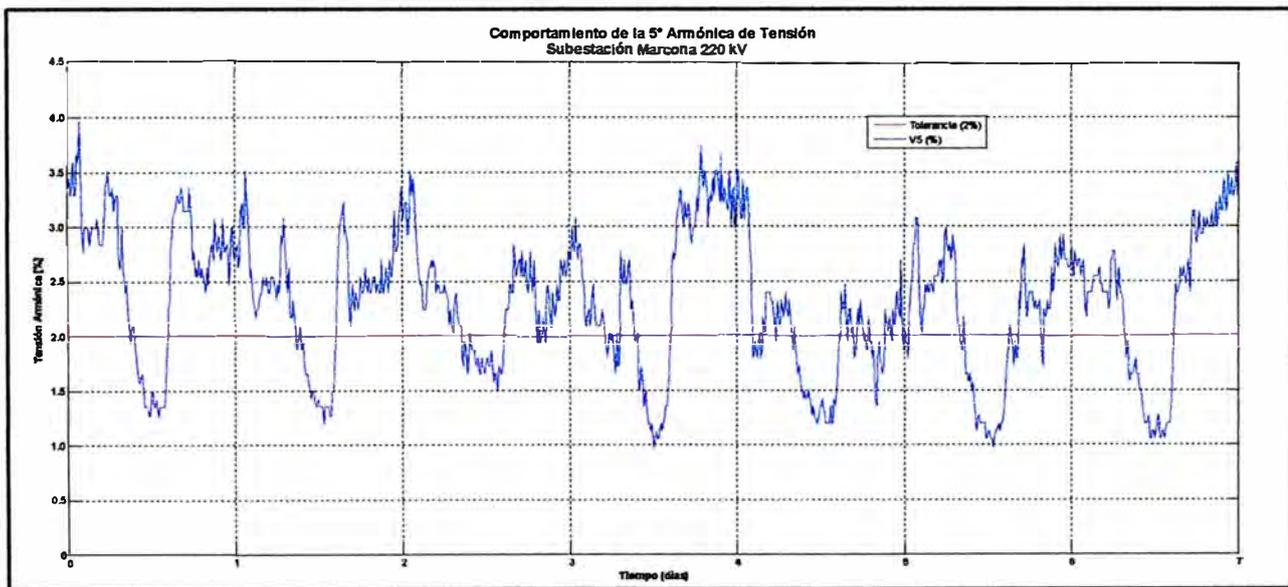
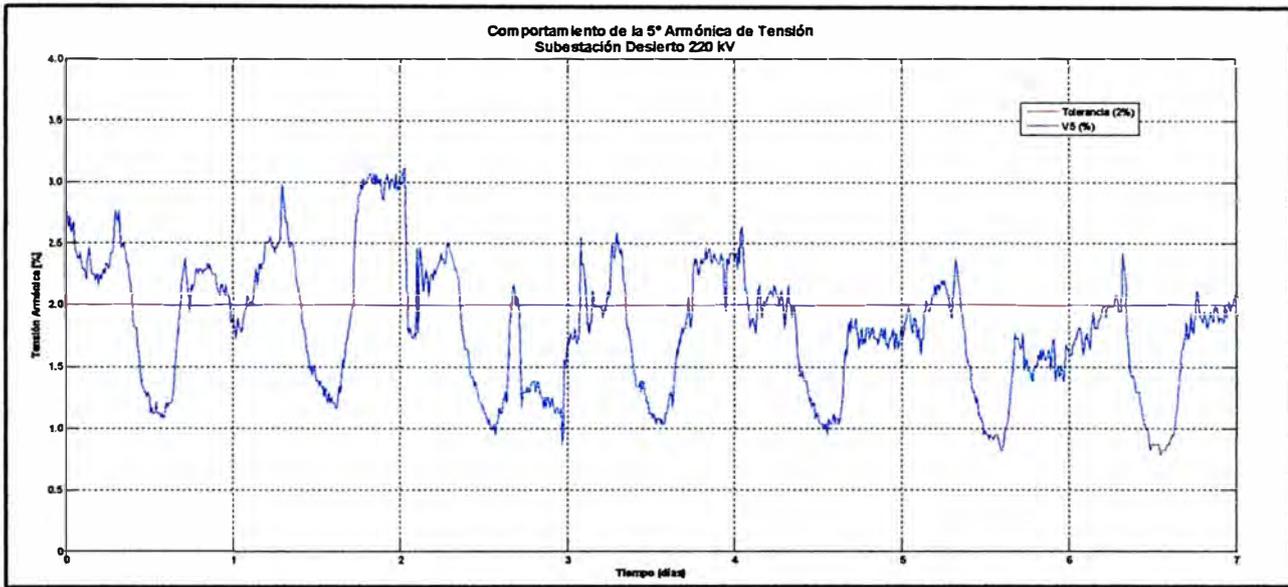
10. El flicker, en el nivel de 220 kV de la subestación SEINDEP, es generado por los hornos eléctricos N° 1 y N° 2, dado que el comportamiento del flicker tiene correspondencia con su demanda registrada. Ver Tabla N° 4.42 Y Figura N° 4.51.
11. Según el comportamiento de la 5° armónica de tensión, se observa que dicha armónica está presente en las barras de 220 kV de las subestaciones de SEINDEP y Planta de Aceros, teniendo mayor nivel en la barra de SEINDEP. También, según los registros se observa que la mayor contribución de corriente armónica se dan en el transformador TR – 3. Las curvas de correlación armónica indican que existe una fuente de corriente armónica (impedancia), ya que existe una correspondencia lineal entre los armónicos de tensión y corriente. Ver Figura N° 4.17.
12. Se debe tener en cuenta que la 5ta armónica de tensión, en el nodo de 220 kV de la subestación SEINDEP, es producto de la corriente armónica por la impedancia (a 300 Hz) equivalente del sistema en dicho nodo, por tal, la inyección de 5° armónica de corriente en la Planta de Aceros formaría parte de la corriente total que existe en dicho nodo, en este sentido se podría precisar que la existencia de 5° armónica de tensión en el nodo de 220 kV no necesariamente es generada totalmente por las cargas de la Planta de Aceros.
13. Según las curvas de correlación armónica y registros obtenidos, se observa que la armónica de orden 13 tiene mayor nivel de distorsión en la barra de 220 kV de la subestación SEINDEP, lo cual origina una mayor cantidad de intervalos fuera de rango en dicha barra. Estos niveles no son reflejados en la barra de la Planta de Aceros, lo cual indicaría que dicha armónica es originada por las cargas colindantes a la Planta de Aceros. Ver Tablas N° 4.9 y N° 16.
14. Existen niveles de tensión de armónica de orden 15 en las barras de 220 kV de las subestaciones de SEINDEP y Planta de Aceros. Asimismo, la correlación armónica no indica la existencia de una única fuente de corriente armónica (en ambos puntos). Ver Tabla N° 4.10.
15. Las armónicas de tensión de orden 13 y 15, en promedio, no presentan variaciones con la parada de los hornos eléctricos en el punto de medición L.T. 220 kV de la subestación SEINDEP. Ver Tabla N° 4.36.
16. El análisis del scan de frecuencia en las barras de 220 kV de las subestaciones de SEINDEP y Planta de Aceros indica que en dichos nodos existe resonancia muy cerca de la armónica de orden 5 lo cual es peligroso, ya que existe la presencia de corriente armónica de orden 5 en las redes y esto provocaría la amplificación de las tensiones armónicas.

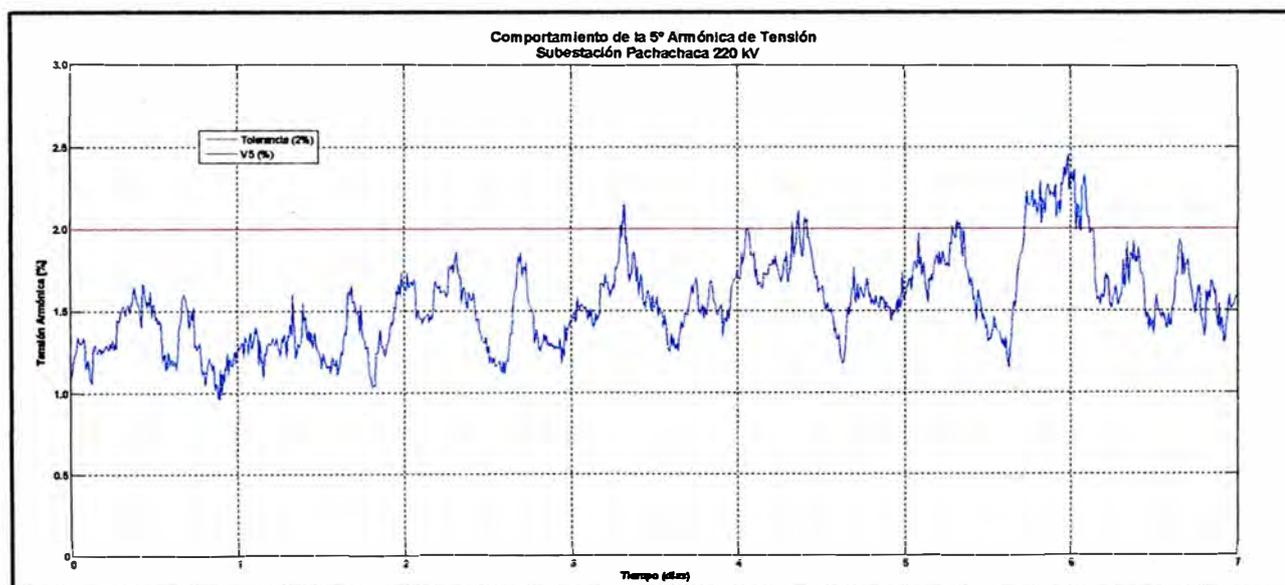
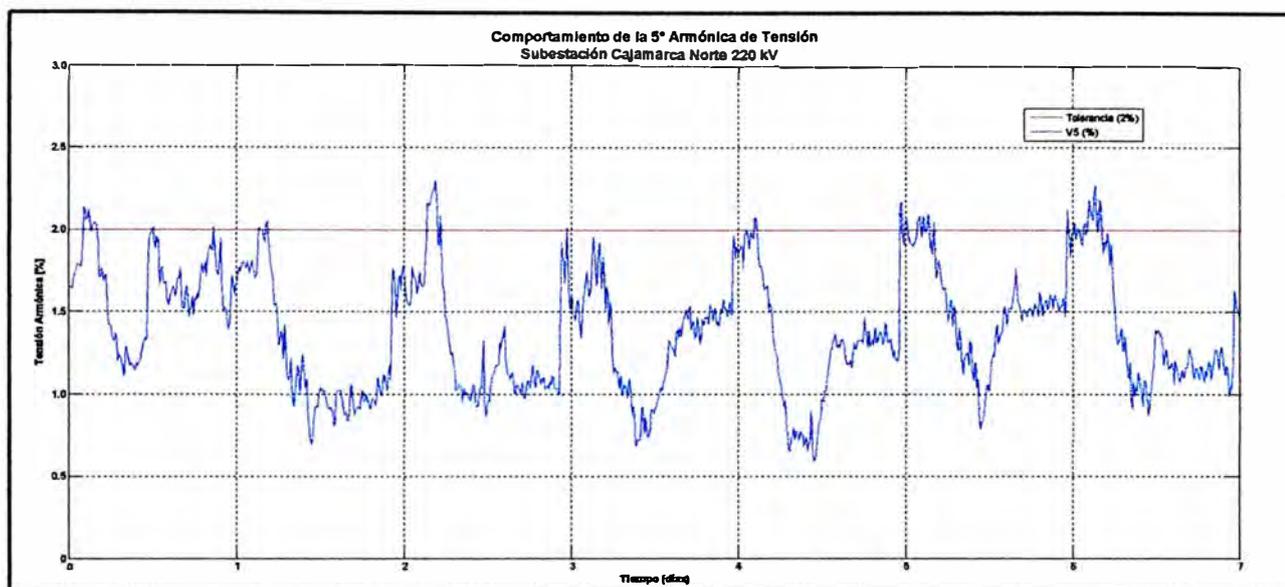
17. Según la característica diaria, se observa que hay un comportamiento diario similar de la 5ta armónica, lo cual obedece a un patrón diario que se repite regularmente. Al tener este tipo de comportamiento, es probable que parte de las armónicas de tensión sean el resultado de la inyección armónica originada por las cargas vecinas del sistema y en especial de las cargas residenciales que agrupadas tienen representatividad en el SEIN. Ver Figuras N° 4.21 y N° 4.22.

## **RECOMENDACIONES**

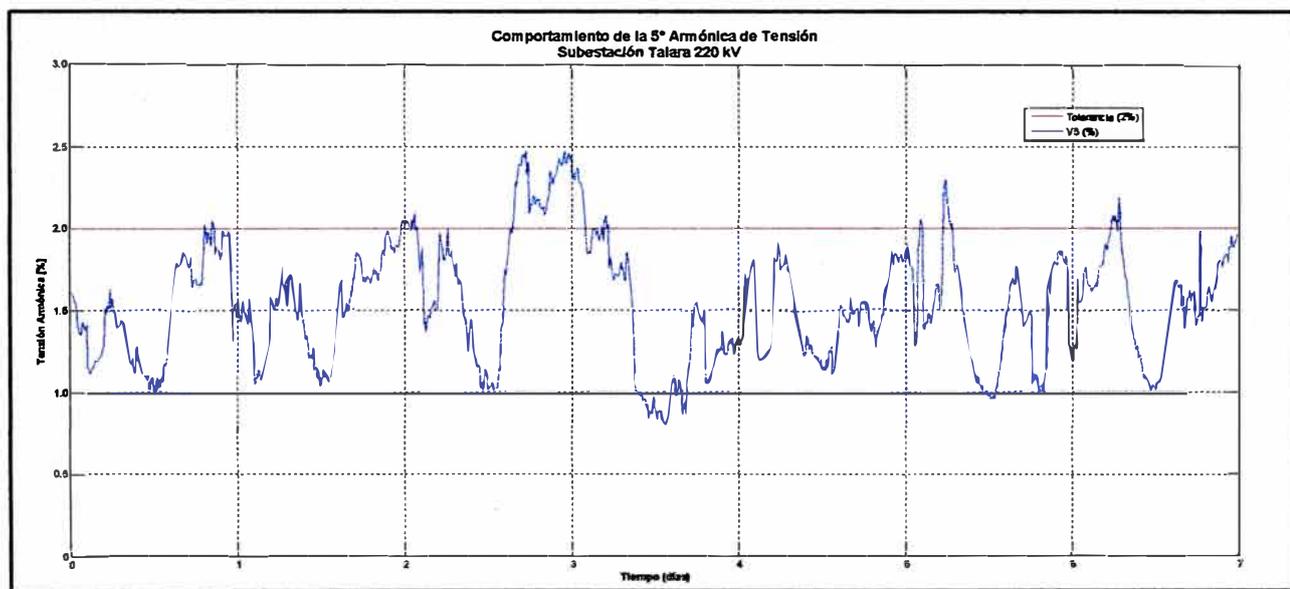
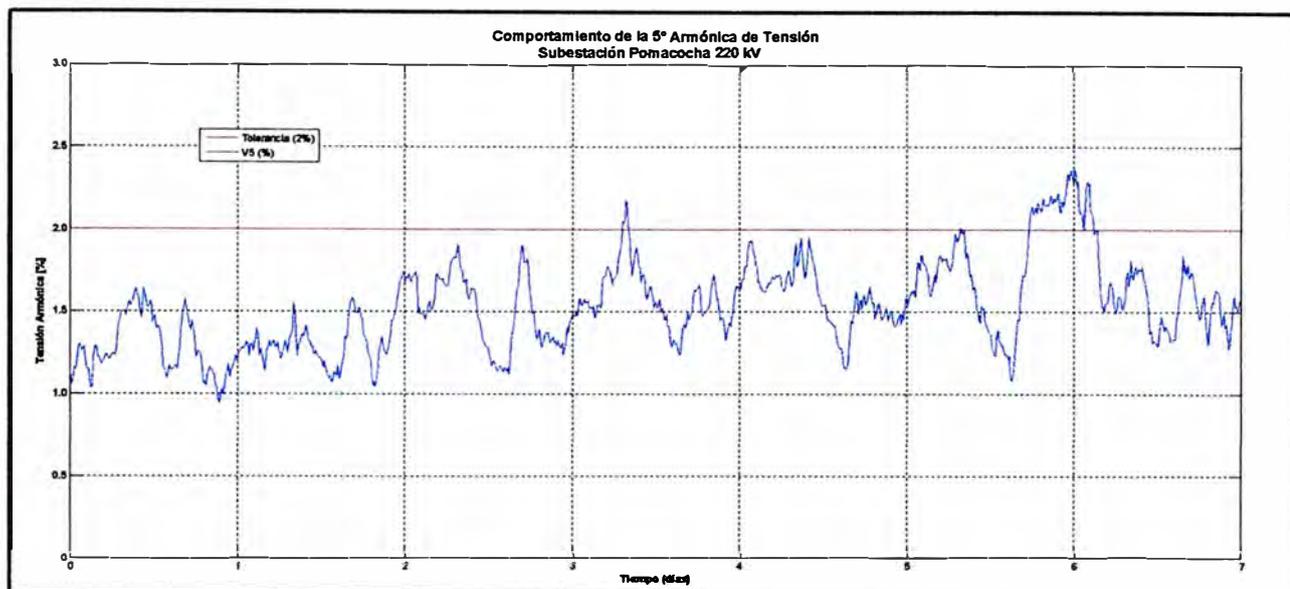
1. Los transformadores de medida tipo capacitivo no son recomendables para medición de armónicos debido a que estos tipos de transformadores son diseñados para operar a la frecuencia fundamental con un rango del  $\pm 10$  Hz. Por consiguiente, la medición de armónicos con este tipo de transformadores podría generar resonancias que provoquen la amplificación de las tensiones armónicas registradas. En consecuencia, se recomienda realizar mediciones de armónicos, en el punto a evaluar, con transformadores tipo inductivo o con transformadores de características similares.
2. Se recomienda realizar mediciones periódicas en los filtros de armónicos de la Planta de Aceros debido a que se prevé que dichos filtros no solo filtran las corrientes armónicas generadas por sus cargas (hornos) sino también las del SEIN, lo cual provocaría la sobrecarga de estos.
3. Para la reducción del flicker generado por los hornos e inyectado a la red de alimentación se puede cambiar: el sistema de iluminación, modificar el perturbador (cambiar la rapidez de llenado del horno), modificar la red (aislando la carga de los circuitos de iluminación), aumentar la potencia del transformador común (con impedancia de cortocircuito constante). O utilizar reactancias o capacitancias en serie al horno.

**ANEXOS**

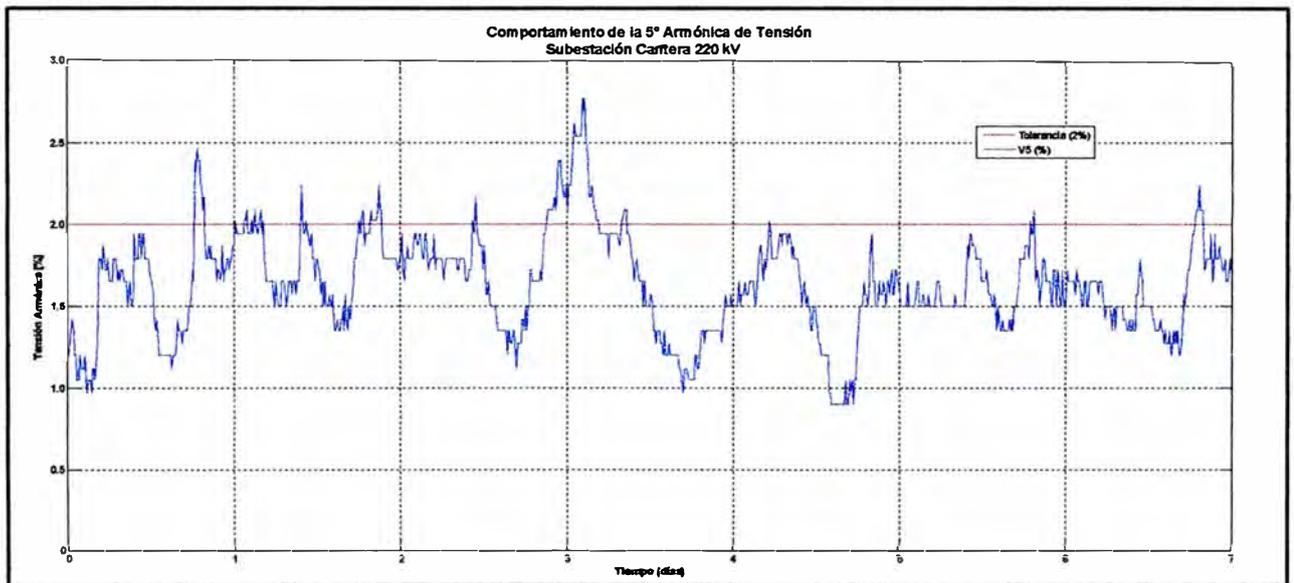
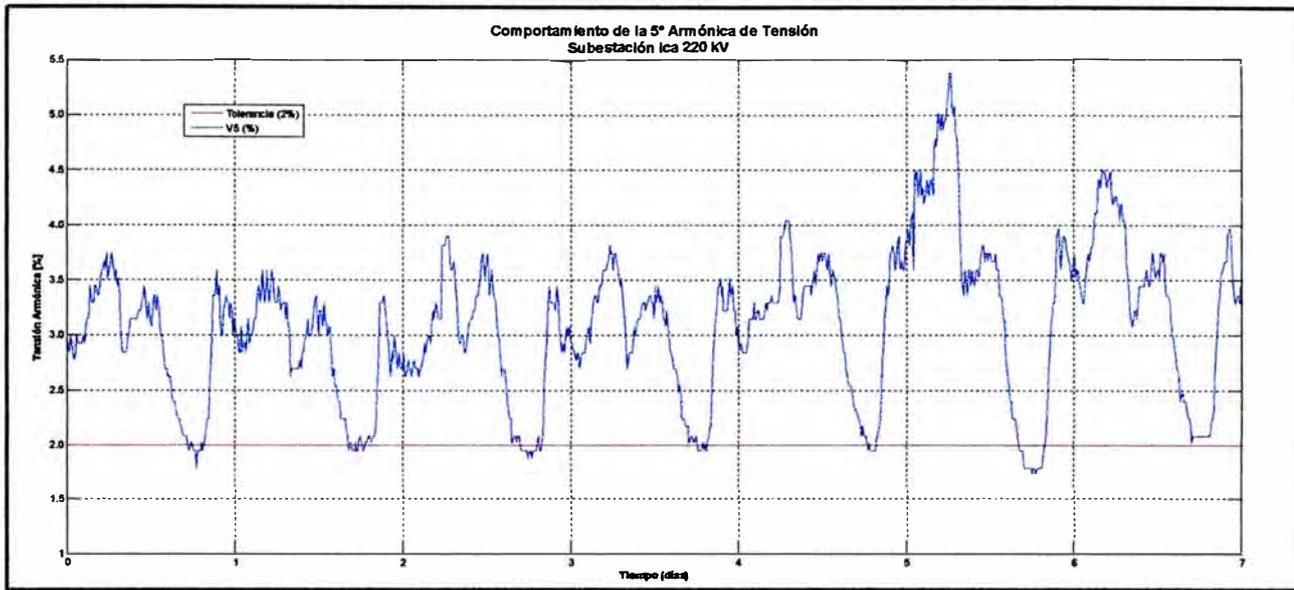
**ANEXO A: Comportamiento de la 5ª Armónica en el SEIN**

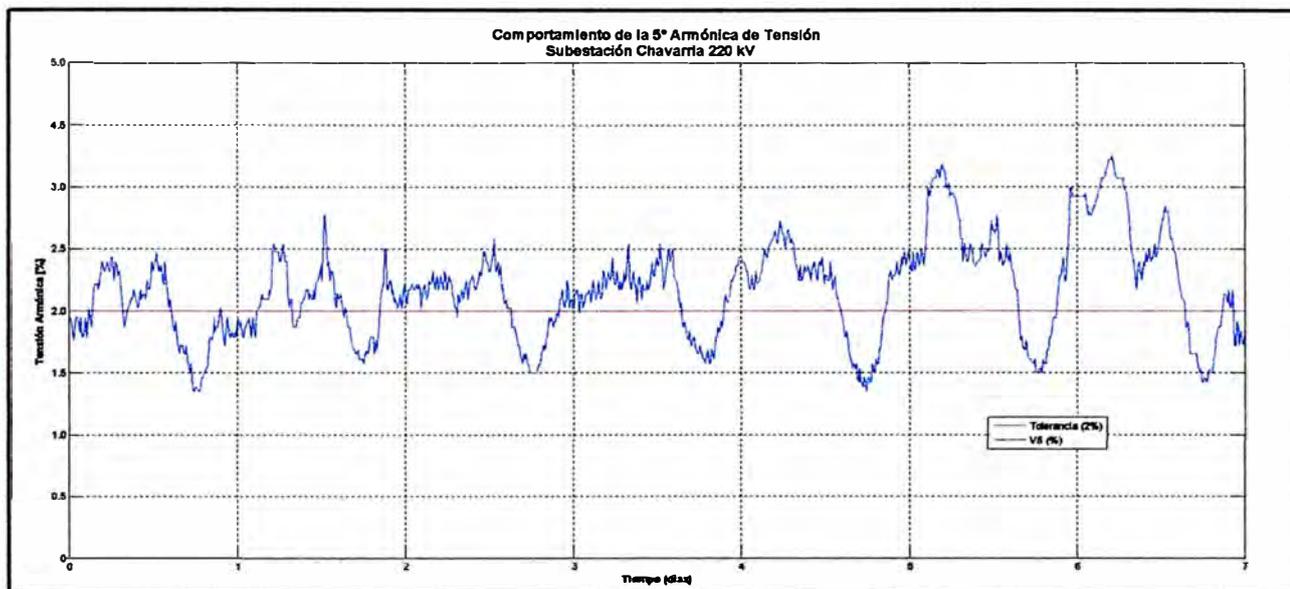
**ANEXO A: Comportamiento de la 5ª Armónica en el SEIN**

### ANEXO A: Comportamiento de la 5° Armónica en el SEIN

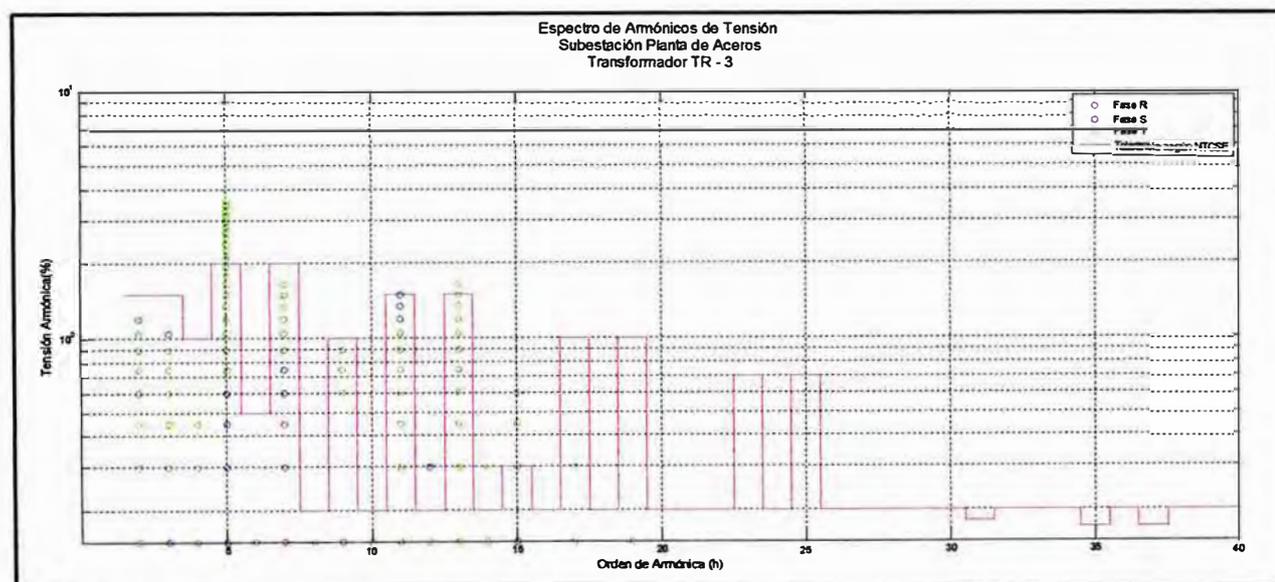
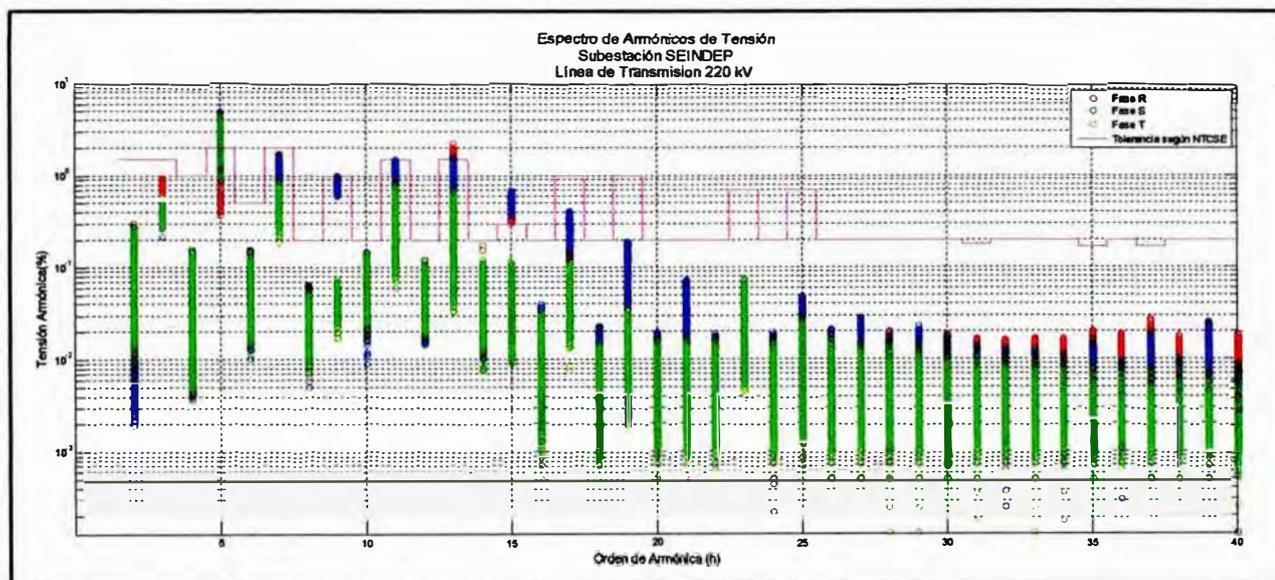


## ANEXO A: Comportamiento de la 5° Armónica en el SEIN

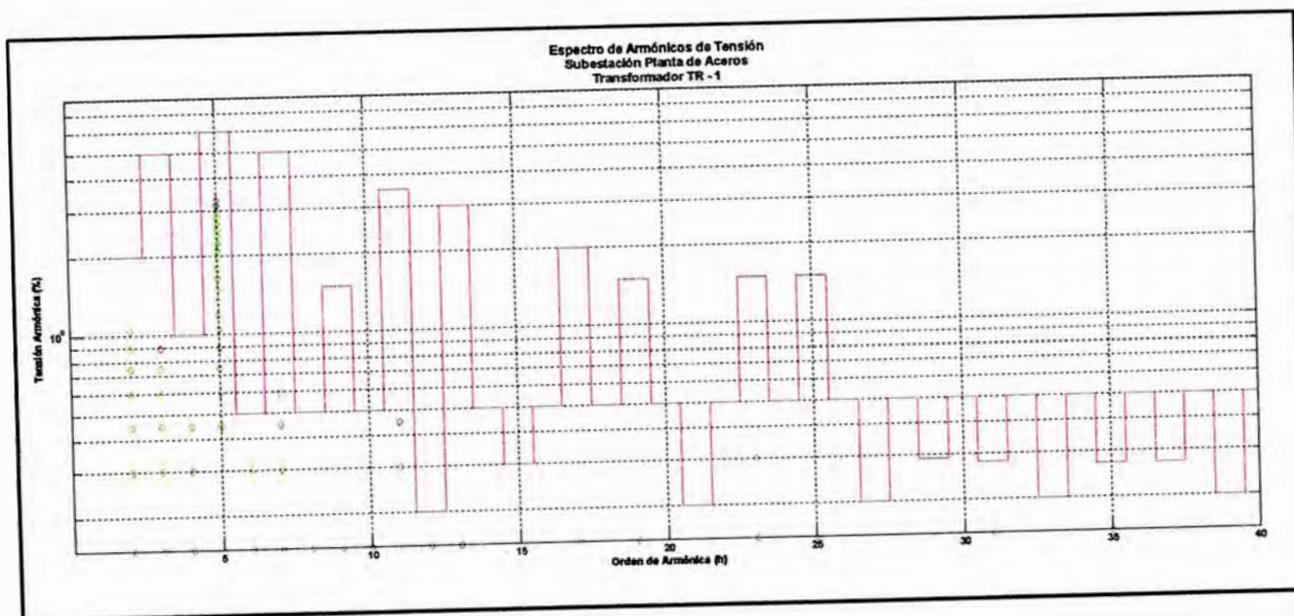
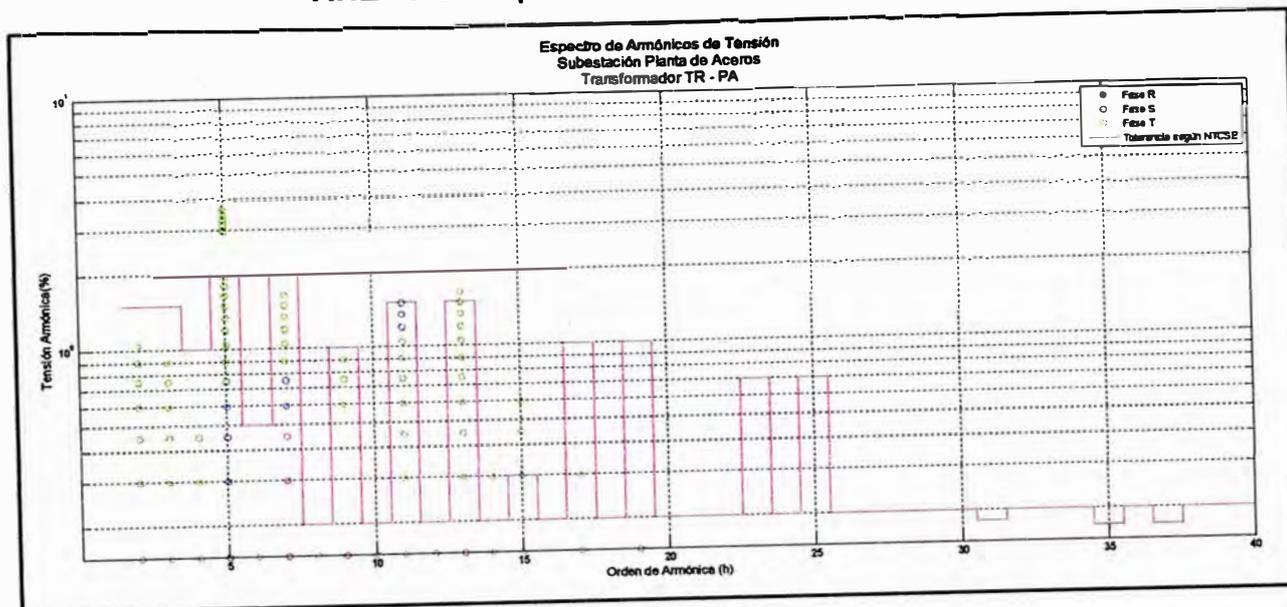


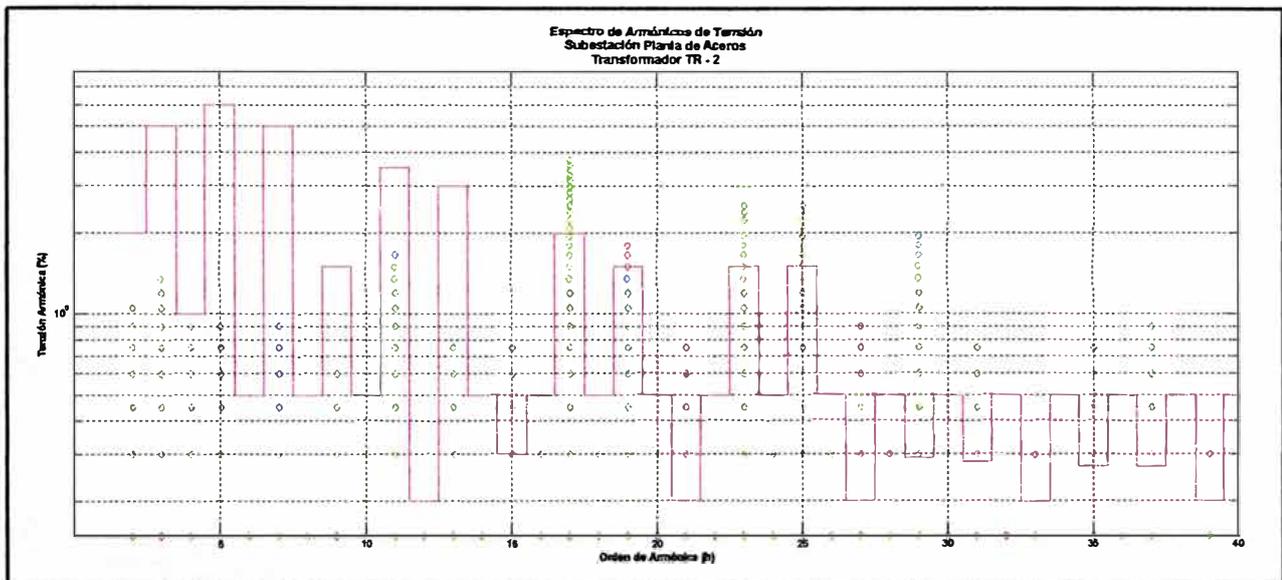
**ANEXO A: Comportamiento de la 5ª Armónica en el SEIN**

## ANEXO B: Espectro de Armónicas de Tensión



### ANEXO B: Espectro de Armónicas de Tensión



**ANEXO B: Espectro de Armónicas de Tensión**

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Angelo Baggini, "Handbook of POWER QUALITY".
- [2] Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, "Calidad de Producto".
- [3] Samuel Ramirez Castaño, Eduardo Antonio Cano, "Calidad del Servicio de Energía Eléctrica".
- [4] George J. Wakileh, "Power Systems Harmonics", Fundamentals, Analysis and Filter Design..
- [5] A. Llamas, S. Acevedo, J. De los Reyes, J. Baez, "Armónicas en Sistemas Eléctricos Industriales.
- [6] J. Arrillaga, B. C. Smith, N. Watson, "Power System Harmonic Analysis".
- [7] J. Arcila, "Armónicos en Sistemas Eléctricos".
- [8] "Análisis y Propuesta de Solución al Problema de Alta Distorsión Armónica: Caso Industrial", Universidad Nacional de Asunción – Facultad Politécnica.
- [9] J. Ruiz Vallejo, F. Ortiz Quintero, "Metodología para Identificar Fuentes Armónicas en Sistemas Eléctricos".
- [10] L. Luna Valdes, "Metodología para el Análisis de las Perturbaciones Armónicas en los Sistemas Industriales en Baja Tensión", Junio 2007.