

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN EL SISTEMA DE BAJA TENSIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE TUBERÍAS DE PVC**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**LUIS TOMÁS BLANCO DEL ROSARIO**

**PROMOCIÓN  
2003- I**

**LIMA – PERÚ  
2010**

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL CONTROL  
DE ARMÓNICOS EN EL SISTEMA DE BAJA TENSIÓN DE  
UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE TUBERÍAS DE PVC**

Mi eterno agradecimiento a Dios por ser mi fortaleza, a mi tía Felícita y a mis padres Armando y Victoria los seres que más quiero en este mundo.

## SUMARIO

El presente informe comprende el análisis y la solución al problema de distorsión armónica en el sistema de 440Vac de una planta industrial de fabricación de tuberías de PVC. En este trabajo se busca reflejar las condiciones actuales de operación e identificar la necesidad de la instalación de filtros de armónicos.

En base a las mediciones en campo y los resultados de los análisis, se evalúa los niveles de distorsión armónica que cumplan con la norma americana IEEE 519 versión 1992 y la norma peruana NTCSE (norma técnica de la calidad del servicio eléctrico); los análisis son realizados en los puntos de acoplamiento establecidos, tanto en los alimentadores principales como en las cargas no lineales, como son los convertidores de frecuencia AC/DC y AC/AC existentes en la instalación.

Como parte de las soluciones, se especifica las bondades técnicas de los filtros considerados para controlar los armónicos, que permiten mantener los valores de armónicos de corriente por debajo del recomendado por la norma IEEE 519 versión 1992.

Otro de los puntos de interés es la evaluación económica, para esto se realiza un análisis de inversión de las soluciones técnicas y condiciones operativas, permitiéndonos tomar la solución más conveniente buscando mejorar la calidad de energía del sistema eléctrico.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>ANTECEDENTES</b>	
1.1 Objetivo	2
1.2 Alcances	2
1.3 Metodología	2
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>FUNDAMENTO TEÓRICO SOBRE DISTORSIÓN ARMÓNICA</b>	
2.1 Definición	4
2.2 Clasificación de los Armónicos	6
2.3 Armónicos característicos y no característicos	7
2.4 Distorsión armónica de tensión	7
2.4.1 Límites de distorsión armónica de tensión	8
2.5 Distorsión armónica de corriente	10
2.5.1 Límites de distorsión armónica de corriente	10
2.6 Interarmónicos y subarmónicos de tensión y corriente	12
2.7 Fuentes de generación de armónicas	12
2.8 Efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos	13
2.8.1 Motores y generadores	14
2.8.2 Transformadores	15
2.8.3 Cables y conductores	16
2.8.4 Condensadores y factor de potencia	16
2.8.5 Equipos electrónicos	17
2.8.6 Medidores de energía	18
2.8.7 Conmutadores y aplicaciones de relés	18
2.8.8 Interferencia telefónica	19
2.9 Métodos de minimización de distorsión armónica mediante filtros	19

2.9.1	Filtros pasivos o sintonizados	20
2.9.2	Filtros activos o compensadores activos	21
2.9.3	Filtros híbridos	23

### **CAPÍTULO III**

#### **ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN LA INSTALACIÓN INDUSTRIAL**

3.1	Descripción del problema	24
3.2	Identificación de armónicas mediante mediciones en campo	24
3.2.1	Equipos e instrumentos utilizados	24
3.2.2	Mediciones efectuadas en campo	26
3.3	Análisis del sistema eléctrico en 440Vac	31
3.3.1	Análisis de impedancias de líneas	32
3.3.2	Cálculo y análisis de límites de distorsión de demanda	33
3.3.3	Análisis y resultados de medición de distorsión armónica	35
3.3.4	Resumen de la medición de distorsión armónica	59

### **CAPÍTULO IV**

#### **SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA OBTENIDA**

4.1	Solución mediante filtros pasivos LCL	65
4.1.1	Consideraciones técnicas	65
4.1.2	Especificaciones técnicas	65
4.1.3	Ventajas técnicas	67
4.1.4	Desventajas técnicas	67
4.2	Solución mediante filtros activos AF	67
4.2.1	Consideraciones técnicas	67
4.2.2	Especificaciones técnicas	68
4.2.3	Ventajas técnicas	69
4.2.4	Desventajas técnicas	69
4.3	Instalación complementaria mediante banco de condensadores	69
4.3.1	Consideraciones técnicas	69
4.3.2	Especificaciones técnicas	70

### **CAPÍTULO V**

#### **ANÁLISIS ECONÓMICO**

5.1	Análisis del costo de estudio de armónicas	72
-----	--	----

5.2	Análisis de costos de alternativas de solución	73
5.3	Ahorros en pérdidas eléctricas	75
5.3.1	Ahorro del costo de pérdidas eléctricas	77
5.4	Análisis de rentabilidad	79
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	82
	<b>ANEXOS</b>	84
	Anexo A:	
	Plano eléctrico unifilar general de la planta	85
	Anexo B:	
	Características de analizador de redes CIRCUTOR AR-5L	86
	Anexo C:	
	Catálogo de filtro pasivo LCL	96
	Anexo D:	
	Catálogo de filtro activo AF	101
	Anexo E:	
	Álbum fotográfico	105
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	108

## **PRÓLOGO**

El propósito de este informe es mejorar las condiciones de operación de los equipos en una planta industrial de fabricación de tuberías de PVC, en cuanto a la calidad de energía eléctrica de la red de alimentación en 440Vac; conocer las causas que afectan el funcionamiento de los equipos eléctricos, su comportamiento en el sistema y qué medidas se pueden tomar para minimizar las distorsiones armónicas presentadas en la red.

En todo sistema eléctrico se necesita conocer todos los parámetros que influyen en la operación de los equipos, por lo que la distorsión armónica de corriente y de tensión, son parámetros importantes que nos permiten evaluar las condiciones operativas en base a las normas y optar por soluciones que mejoren la calidad de energía.

El presente informe describe en el primer capítulo los objetivos, alcances y la metodología a desarrollar, en el segundo capítulo se define el marco teórico referido a la distorsión armónica y todos sus aspectos, en el tercer capítulo se refiere al problema central de distorsión armónica en la instalación de la planta industrial Matusita de fabricación de tuberías de PVC, los resultados y análisis de parámetros medidos; en el cuarto capítulo se presenta las soluciones para la distorsión armónica obtenida, por último en el quinto capítulo se muestra la evaluación económica de las soluciones planteadas.

# **CAPÍTULO I**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1 Objetivo**

El presente trabajo, titulado: Análisis técnico económico para el control de armónicos en el sistema de baja tensión de una planta de producción de tuberías de PVC, tiene los siguientes objetivos:

- a) Determinar los niveles de distorsión armónica en el sistema de 440Vac y verificar el cumplimiento de la norma IEEE 519 y NTCSE.
- b) Plantear soluciones técnicas económicas, basado en los análisis de medición y normatividad.
- c) Mejorar en alguna manera la calidad de energía como los costos de operación.
- d) Establecer las recomendaciones pertinentes a la empresa analizada, según las conclusiones alcanzadas después del estudio.

### **1.2 Alcances**

En este trabajo se abordará el tema del contenido armónico de corriente y de tensión que están presentes en la red de alimentación en 440Vac de la planta de producción de tuberías de PVC, mediante los siguientes análisis:

- a) En base a mediciones en campo.
- b) Evaluación con los límites permisibles por las normas.

Basado en los análisis y en los lineamientos normativos se plantea soluciones de mejoras, donde se indican las bondades técnicas y la evaluación económica de los mismos.

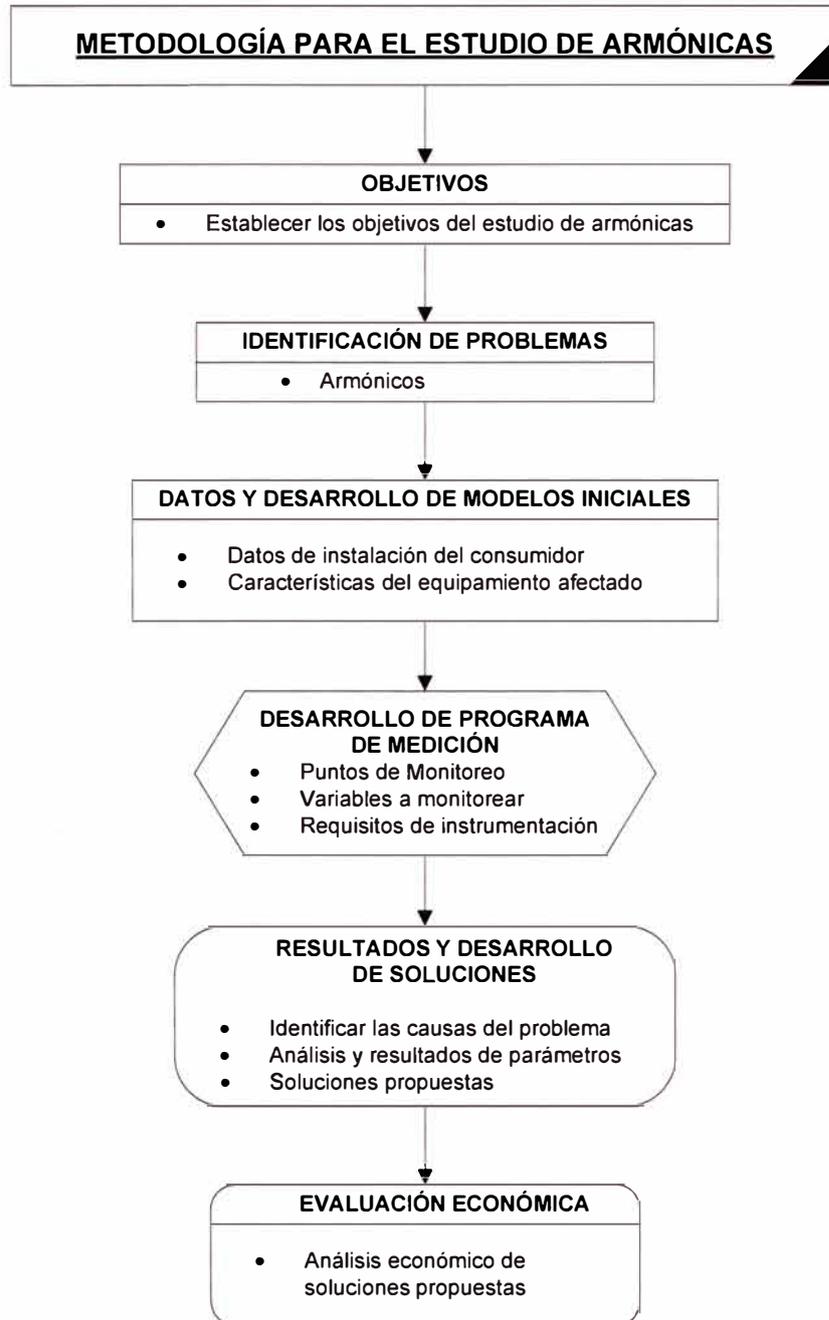
### **1.3 Metodología**

Cuando se tiene un problema de distorsión armónica, el análisis se inicia fijando los objetivos del estudio, posteriormente se debe hacer una identificación del problema, como también tener los datos de los consumos de energía, las características de las cargas posibles que generan las distorsiones, como también de los equipos afectados.

Posteriormente se lleva a cabo un plan de mediciones en el terreno, esto es en los puntos más convenientes donde podamos realizar una evaluación eficaz al problema de armónicas

y obtener resultados correctos; por último proponer la solución más conveniente desde el punto de vista técnico y económico, esto mediante una evaluación económica.

En la Figura 1.1, se indica un flujo grama donde se muestra la secuencia o etapas para llevar a cabo nuestro estudio y análisis de distorsión armónica en la planta en mención.



**Fig. 1.1 Flujo grama de secuencia para el estudio de armónicas**

## CAPÍTULO II

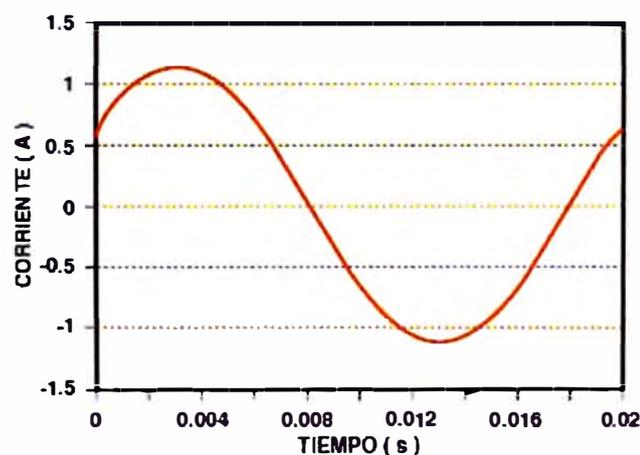
### FUNDAMENTO TEÓRICO SOBRE DISTORSIÓN ARMÓNICA

#### 2.1 Definición

La distorsión armónica es el cambio en la forma de onda de tensión y corriente en un sistema eléctrico, ocasionado por la operación de cargas no lineales compuestas por semiconductores cuya aplicación ahora en día se refleja en la electrónica de potencia; trayendo como consecuencia la mala operación y el incremento de pérdidas en los equipos de una instalación.

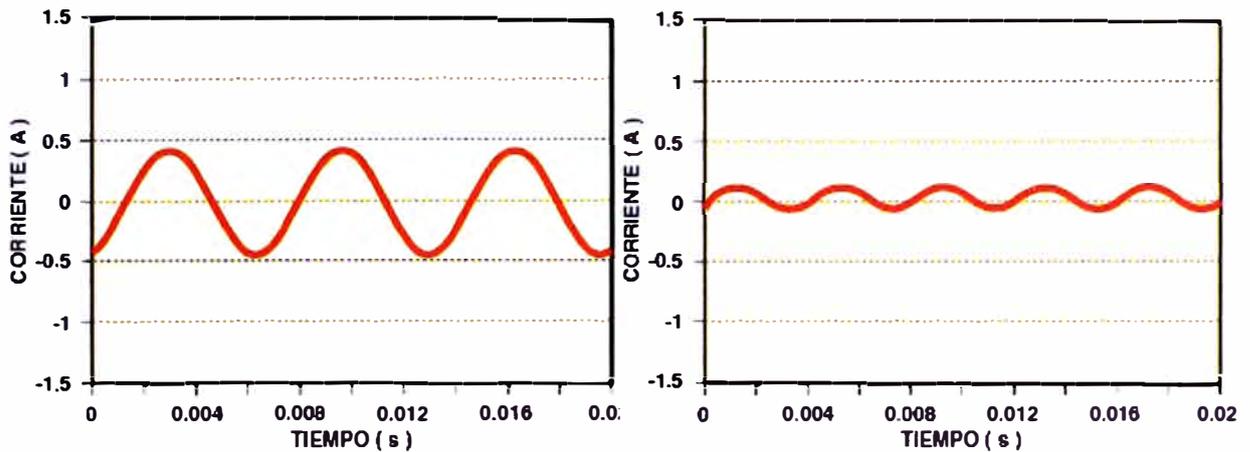
Una componente armónica en un sistema de potencia AC es definida como una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema [1]. Cada componente armónica se suma a la onda fundamental y de esta manera provoca la distorsión de la onda. Por ejemplo para una frecuencia fundamental de 60Hz, la quinta armónica se obtiene multiplicando 60 por 5, lo que equivale a 300Hz [4].

La Figura 2.1, muestra la forma de la onda fundamental de corriente a 60 Hz [9].



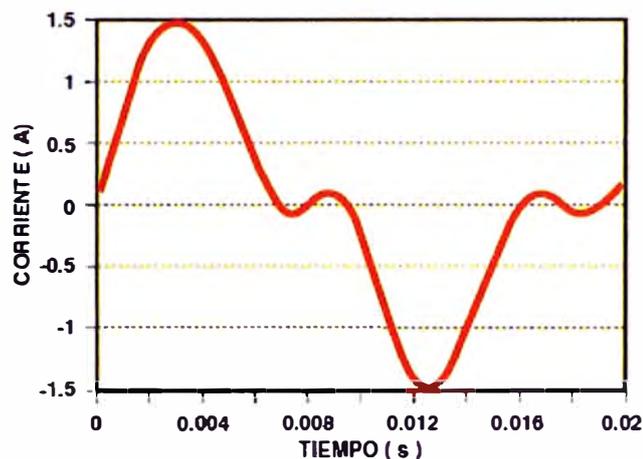
**Fig. 2.1 Onda fundamental de la corriente**

La Figura 2.2, muestra las formas de onda de los armónicos de orden 3° y 5° con frecuencias de 180 Hz y 300 Hz respectivamente [9].



**Fig. 2.2 Onda del 3° y 5° armónico de la corriente**

La Figura 2.3, muestra la forma de onda de corriente distorsionada, compuesta por la fundamental a 60 Hz y los armónicos de tercer y quinto orden [9].



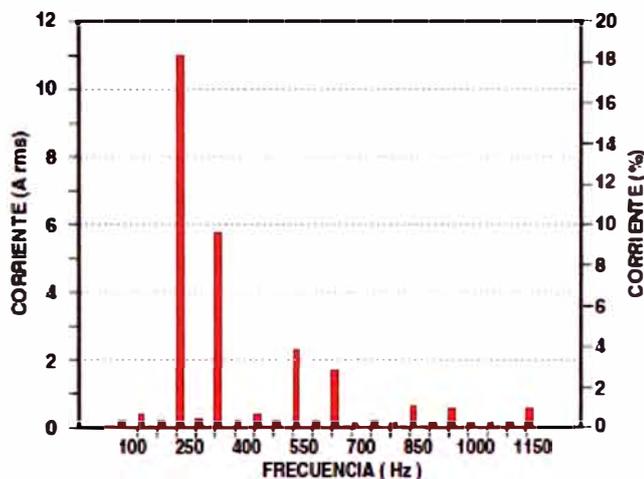
**Fig. 2.3 Onda fundamental más el 3° y 5° armónico de la corriente**

Las formas de onda de tensión y de corriente son periódicas y pueden expresarse como una serie de Fourier, cuya expresión para todo fenómeno periódico se indica en la ecuación (2.1).

$$y(t) = Y_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \text{sen}(n\omega_1 t + \theta_n) ; \omega_1 = 2\pi f_1 \quad (2.1)$$

Donde  $\omega_1$  es la frecuencia ( $f_1 = f_0$  Hz) denominado frecuencia fundamental,  $Y_0$  es la amplitud de la componente continua,  $Y_n$  es el valor eficaz del armónico de orden  $n$  y  $\theta_n$  es el desfase de la componente armónica en el momento inicial. Normalmente, la amplitud de los armónicos disminuye con la frecuencia. Según las normas, se toman en consideración los armónicos hasta el orden o rango 40 [5].

La amplitud de cada armónico en función del orden, viene expresada en un histograma o espectro de armónicas [5]. En la Fig. 2.4 se muestra el espectro de armónica de la corriente de una determinada carga, en porcentaje de la corriente fundamental [9].



**Fig. 2.4 Espectro de armónicos de corriente**

Se define el parámetro THD como la distorsión armónica total, ésta es usada para definir el efecto de los armónicos a la tensión y/o corriente del sistema [1]. La distorsión armónica total de tensión se define como  $THD_V$  y  $THD_I$  en el caso de la corriente [4]. El THD se puede interpretar como que proporción de la señal de 60Hz representa la señal distorsionada. El  $THD_I$  es generado por las cargas, mientras que el  $THD_V$  depende del tipo de carga que este inyectando corrientes armónicas y la impedancia del sistema [1].

El estándar de la IEEE 519, establece los límites para inyección de corrientes en un sistema de potencia, que si son respetados; garantizan un voltaje de buena calidad en las barras o nodos de una instalación. En el caso de la NTCSE solo se establecen los límites de distorsión de tensión según los niveles de tensión del sistema que se quiere evaluar.

## 2.2 Clasificación de los Armónicos

Los armónicos se clasifican por su orden, frecuencia y secuencia. Las secuencias pueden ser positiva, negativa y cero. Las armónicas de secuencia positiva tienen la misma rotación de fases que la tensión trifásica aplicada, las de secuencia negativa tienen rotación de fases opuestas, mientras que las de secuencia cero, las tres fases tienen igual ángulo de fase, estos también son llamadas armónicas triples [4].

En un sistema balanceado se tiene cargas idénticas y no existen componentes de secuencia cero, por lo que la corriente en el neutro es cero. Para la existencia de componentes de secuencia cero, las magnitudes son iguales y se suman en el conductor

neutro, siendo el triple de las componentes en cada fase. En la Tabla N° 2.1 se muestra la secuencia de los armónicos [4].

**Tabla N° 2.1 Secuencia de los distintos órdenes de armónicas**

Armónico	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	15°	n
Frecuencia	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900	60xn
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	...

Para un sistema eléctrico las armónicas de orden par son nulas, debido a que las cargas actúan en forma simétrica y periódica. La simetría y periodicidad de una onda debe de cumplir la condición de  $F(t) = -F(t+T)$ ; es por esto que las armónicas pares no se encuentran en las soluciones, aunque en la práctica presentan valores muy bajos.

### 2.3 Armónicos característicos y no característicos

Los armónicos característicos son producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. En un convertidor de 6 pulsos, los armónicos característicos son los armónicos impares diferentes a los múltiplos de tres, por ejemplo, los de orden  $k = 5^\circ, 7^\circ, 11^\circ, 13^\circ$ , etc., que cumplen la condición  $k = np \pm 1$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ , etc.), donde  $p =$  número de pulsos del convertidor [1].

Los armónicos no característicos son aquellos que no son producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. Estos pueden ser el resultado de frecuencias oscilatorias; una demodulación de armónicos característicos y la fundamental; o un desbalance en los sistemas de potencia AC, el ángulo de retardo asimétrico, o el funcionamiento del cicloconvertidor [1].

### 2.4 Distorsión armónica de tensión

La distorsión armónica de tensión es un factor que mide el alejamiento de la forma de onda de tensión con respecto a la forma de onda sinusoidal pura. Este factor de distorsión se denota como  $THD_V$  y normalmente se expresa en porcentaje.

El parámetro más importante a evaluar cuando se tiene circulación de armónicas en el sistema de potencia es el  $THD_V$ , que depende del tipo de carga que este inyectando corrientes armónicas y la impedancia del sistema compuesta por transformadores y motores, que interactúan con la impedancia de los capacitores [1].

El  $THD_V$  se define como el cociente, expresado en porcentaje, entre el valor eficaz de los armónicos individuales de tensión y el valor eficaz de la tensión fundamental. La distorsión armónica de tensión definida como  $THD_V$ , considera la contribución de cada componente

armónico individual en la señal, ya sea para un sistema de potencia de baja, media y alta tensión [4]. El factor  $THD_V$  se indica en la ecuación (2.2).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (2.2)$$

Donde:

$\sum_{h=2}^n V_h^2$  : es la suma de los cuadrados de las amplitudes de todos los armónicas de tensión,

en donde h es el orden armónico.

$V_1$  : es la amplitud de la tensión fundamental.

#### 2.4.1 Límites de distorsión armónica de tensión

El término  $THD_V$ , es la distorsión armónica total de tensión, en porcentaje de la tensión a la frecuencia fundamental nominal. Los límites definidos por la norma IEEE 519 v.1992, son dados en la Tabla N° 2.2, estos pueden ser usados como valores de diseño de sistemas para el peor de los casos, con una operación normal (condiciones que duran más de una hora). Para periodos cortos, durante cortes ó condiciones inusuales, los límites pueden exceder el 50% [1].

**Tabla N° 2.2 Límites de distorsión armónica de tensión – IEEE 519 - 1992**

Tensión en barra en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual de tensión (%)	Distorsión total de tensión THD (%)
Hasta 69 kV	3.0	5.0
De 69.001 kV a 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV y más	1.0	1.5

Nota: Los sistemas de alta tensión pueden llegar hasta un 2.0% en THD cuando lo que causa es una alta tensión terminal DC, el cual podría ser atenuado.

En la Tabla N° 2.2, se muestra los límites sobre componentes individuales y sobre la distorsión total de tensión, ya sea para tres clases de tensiones; hasta 69 kV, de 69 a 161 kV, y de 161 kV a más, a su vez podemos notar que los límites de distorsión de tensión individual y total disminuyen cuando la tensión aumenta.

Para el caso de la NTCSE; los valores eficaces (RMS) de las tensiones armónicas individuales ( $V_i$ ) y el factor de distorsión armónica de tensión ( $THD_V$ ), expresado como porcentaje de la tensión nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite ( $THD_V$  y  $V_i$ ) indicados en la Tablas N° 2.3 y N° 2.4 respectivamente [2].

Para efecto de la norma peruana NTCSE, se consideran las armónicas comprendidas entre la dos (2°) y la cuarenta (40°), ambas inclusive [2].

**Tabla N° 2.3 Límites de distorsión total de tensión – NTCSE**

	Mediana y Baja Tensión	Alta y Muy Alta Tensión
THDv(%)	8%	3%

**Tabla N° 2.4 Límites de distorsión de tensión individual – NTCSE**

Armónica	Límite Permissible Individual de Tensión	
	Alta y Muy Alta Tensión	Mediana y Baja Tensión
2	1.50	2.00
3	1.50	5.00
4	1.00	1.00
5	2.00	6.00
6	0.50	0.50
7	2.00	5.00
8	0.20	0.50
9	1.00	1.50
10	0.20	0.50
11	1.50	3.50
12	0.20	0.20
13	1.50	3.00
14	0.20	0.20
15	0.30	0.30
16	0.20	0.20
17	1.00	2.00
18	0.20	0.20
19	1.00	1.50
20	0.20	0.20
21	0.20	0.20
22	0.20	0.20
23	0.70	1.50
24	0.20	0.20
25	0.70	1.50
26	0.20	0.20
27	0.20	0.20
28	0.20	0.20
29	0.20	0.29
30	0.20	0.20
31	0.18	0.28
32	0.20	0.20
33	0.20	0.20
34	0.20	0.20
35	0.17	0.27
36	0.20	0.20
37	0.17	0.27
38	0.20	0.20
39	0.20	0.20
40	0.20	0.20

## 2.5 Distorsión armónica de corriente

La distorsión armónica de corriente, es un factor que mide el alejamiento de la forma de onda de corriente con respecto a la forma de onda sinusoidal pura. Este factor de distorsión se denota como  $THD_I$  y normalmente se expresa en porcentaje, pudiendo ser mayor al 100%. Una corriente distorsionada es la causante de originar el incremento de pérdidas en una instalación esto es haciendo que las impedancias en serie aumenten con la frecuencia, causando un calentamiento adicional por encima de lo que se esperaría para el valor rms de la forma de onda [1]. La distorsión armónica de corriente definida como  $THD_I$ , considera la contribución de cada componente armónico individual en la señal, ya sea para un sistema de potencia de baja, media y alta tensión [4]. El factor  $THD_I$  se indica en la ecuación (2.3).

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} * 100\% \quad (2.3)$$

Donde:

$\sum_{h=2}^n I_h^2$  : es la suma de los cuadrados de las amplitudes de todos los armónicas de corriente,

en donde h es el orden armónico.

$I_1$  : es la amplitud de la corriente fundamental.

### 2.5.1 Límites de distorsión armónica de corriente

Idealmente, la distorsión armónica causada por un solo consumidor puede ser limitada a un nivel aceptable en algún punto del sistema; en tanto que el sistema completo puede ser operado sin distorsión armónica substancial en cualquier parte del sistema. Los límites de distorsión armónica recomendados por la norma IEEE 519 – 1992, establece la máxima distorsión de corriente aceptable para un consumidor [1].

Los límites indicados en la Tabla N° 2.5, pueden ser usados como valores de diseño de un sistema para condiciones ideales en operación normal (condiciones que duran más de una hora). Para períodos cortos, durante arranques altos ó en condiciones inusuales, los límites pueden exceder en 50% [1].

Los límites de corriente armónica son basados en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia al cual la carga está conectada. La relación  $I_{SC}/I_L$ , es la relación de la corriente de cortocircuito (SCR) disponible en el punto de acoplamiento (PCC), con respecto a la máxima corriente de carga fundamental [1]. El PCC es el punto de

acoplamiento común (point of common coupling) y corresponde al lugar en que se interconectan el convertidor (carga no lineal) con los otros consumidores.

El tamaño del consumidor esta dado por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga  $I_L$ , incluyendo las cargas lineales y no lineales presentes en la instalación. El tamaño del sistema de potencia esta dado por el nivel de la corriente de cortocircuito  $I_{SC}$ , en el PCC. La relación de estas dos corrientes define el SCR expresada en la ecuación (2.4).

$$SCR = \frac{\text{Potencia.de.cortocircuito}(MVA)}{\text{Carga}(MVA)} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (2.4)$$

Si la relación  $I_{SC}/I_L$  presenta un valor alto, nos indica que la carga es pequeña y que los límites permisibles no serán tan estrictos como aquellos cuya relación es más baja. En la Tabla N° 2.5 se indican los niveles máximos de distorsión armónica de corriente, de acuerdo al orden de la armónica y la relación (SCR).

**Tabla N° 2.5 Límites de distorsión de corriente en el PCC  
para sistemas de distribución (120V a 69,000V) – IEEE 519**

<b>Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico Fundamental</b>						
<b>I<sub>sc</sub>/I<sub>L</sub></b>	<b>&lt;11</b>	<b>11 ≤ h &lt; 17</b>	<b>17 ≤ h &lt; 23</b>	<b>23 ≤ h &lt; 35</b>	<b>35 ≤ h</b>	<b>TDD</b>
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites armónicos impares mostrados anteriormente.  
\*Todo equipo de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, sin tener en cuenta la relación  $I_{sc}/I_L$  real.

**Donde:**  
**I<sub>sc</sub>** = Máxima corriente de cortocircuito en el punto de acoplamiento común (PCC)  
**I<sub>L</sub>** = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.  
**TDD** = Distorsión total de la demanda en % de la demanda máxima.

Cabe notar que los límites de distorsión por corriente son expresados en términos de la distorsión total de demanda (TDD), el cual refiere a la demanda eléctrica durante un periodo de 15 a 30 minutos [4]. La distorsión de demanda total se puede expresar como la suma de la raíz cuadrada total de las distorsiones de corriente armónica en porcentaje de la máxima corriente de carga demanda [1]; la expresión se muestra en la ecuación (2.5).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_{Max}} = THD_I \cdot \frac{I_f}{I_{Max}} \quad (2.5)$$

De la misma ecuación (2.5), se deduce que la distorsión de demanda total está en función a la distorsión total de corriente; en donde  $I_F$  es la corriente de demanda instantánea e  $I_{Max}$  es la corriente máxima presente en el sistema.

Para el caso de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) no establece límite alguno para la distorsión por corriente, como ya se indicó la distorsión por corriente es de responsabilidad del propio usuario ó consumidor, de poder controlar los niveles de distorsión por corriente de acuerdo a las cargas no lineales en su operación.

## 2.6 Interarmónico y subarmónico de tensión y corriente

Los interarmónicos son tensiones o corrientes cuya frecuencia es un múltiplo no entero de la frecuencia fundamental del suministro. Cuanto mayor es el margen de la frecuencia de los componentes de la corriente, mayor es el riesgo que se presenten fenómenos de resonancia no deseados, que pueden aumentar la distorsión de la tensión y producir sobrecargas o perturbaciones en el funcionamiento de los equipos e instalaciones del usuario [8]. Las principales fuentes de distorsión de forma de onda por inter-armónicos son hornos de arco.

El término subarmónico es un caso particular de interarmónico cuya frecuencia es menor que la frecuencia fundamental. La corriente subarmónica puede causar la saturación de transformadores de corriente y daños en los generadores sincrónicos [8]. En la Tabla N° 2.6 se muestra las definiciones matemáticas.

**Tabla N° 2.6 Componentes espectrales de una forma de onda**

Armónico	$f = n f_1$ donde n es un entero mayor que cero
Componente de cte. continua	$f = n f_1$ para $n=0$
Interarmónico	$f \neq n f_1$ donde n es un entero mayor que cero
Subarmónico	$f > 0$ Hz y $f < f_1$
f <sub>1</sub> = frecuencia fundamental de la tensión (armónico básico)	

## 2.7 Fuentes de generación de armónicas

Las distorsiones armónicas son producidas por la operación de cargas no lineales. Una carga no lineal es aquella que no muestra una corriente sinusoidal al ser excitada por un voltaje sinusoidal de la misma frecuencia.

Las cargas no lineales se pueden clasificar en:

### a) Convertidores de Gran Potencia.

Son aquellos cuya potencia nominal es mayor a 1 MW. Generalmente tienen mucha más inductancia en el lado de corriente continua que en el de corriente alterna; por lo que la corriente continua es prácticamente constante y el convertidor actúa como una fuente de tensión armónica en el lado corriente continua y como una fuente de corriente armónica en el lado de corriente alterna. Con un sistema perfectamente simétrico, las corrientes resultantes son exactamente iguales en todas las fases [7].

**b) Convertidores de Mediana Potencia.**

Son aquellos cuya potencia nominal se encuentra entre 100 kW y 1 MW. Se utilizan con frecuencia en instalaciones industriales para controlar motores de corriente continua. También entran en esta categoría los variadores estáticos de velocidad para el control de motores de inducción [7].

**c) Convertidores de Baja Potencia.**

Son aquellos convertidores cuya potencia no supera los 100 kW. Entre las cargas no lineales de baja potencia se encuentran: iluminación no incandescente, televisores, radios, estéreos, computadoras personales y cualquier equipo que utilice corriente continua. Estas podrían representar un problema, con respecto a la contaminación armónica, cuando un número de ellas están activas en forma simultánea a un mismo punto común de acoplamiento (PCC). Generalmente estos equipos de baja potencia utilizan rectificadores de onda completa, cuya contaminación armónica predomina en el tercer orden [7].

**d) Otras Fuentes de Armónicos.**

Entre otras fuentes están las cargas que trabajan mediante arcos eléctricos (soldadores, hornos de arco, etc.) Como fuente futura puede estar la carga de batería de los vehículos eléctricos y su posible masificación exigirá de grandes cantidades de potencia en corriente continua, lo cual supone incremento en el número de equipos contaminantes [7].

## **2.8 Efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos.**

Los impactos más significativos generados por las distorsiones en las ondas de tensión y corriente, son los registros incorrectos en equipos de control y monitoreo, así como las pérdidas adicionales debidas al calentamiento. Estos efectos se acentúan como resultado de situaciones de resonancia serie o paralelo. Si la fuente de potencia del sistema es un dispositivo estático aislado, contribuirá al contenido armónico [7]. El efecto de una o más fuentes armónicas sobre un sistema de potencia dependerá principalmente de las características de respuesta en frecuencia del sistema. Las cargas no lineales pueden ser representadas generalmente como fuentes de corrientes armónicas. Por consiguiente, la

distorsión armónica de tensión en los sistemas de potencia dependerá de las características de impedancia vs frecuencia [7].

Los efectos de la distorsión de tensión más probablemente es degradar el aislamiento y de acortar la vida útil de los equipos [3]. A continuación se describen algunos de los efectos más comunes originadas por las armónicas:

- a) Incremento de las pérdidas en los equipos, cables y demás dispositivos asociados [3].
- b) Pulsaciones ó reducción del par de torsión en equipos rotativos [3].
- c) Envejecimiento prematuro sobre el aislamiento de los equipos [3].
- d) Aumento de ruido auditivo de equipo rotativo y estático [3].
- e) Mala operación de equipos sensibles a las formas de onda [3].
- f) Amplificación substancial de corrientes y voltajes debido a resonancia [3].
- g) Interferencia en sistemas de comunicación debido a uniones inductivas entre circuitos de potencia y comunicación [3].

A continuación se describen los efectos de armónicas en diferentes equipos:

### **2.8.1 Motores y generadores**

El mayor efecto de las tensiones y corrientes armónicas sobre máquinas rotatorias del sistema de potencia, es el incremento del calentamiento, debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre cuando están sometidas a altas frecuencias [1].

Las componentes armónicas de la tensión afectan la eficiencia de la máquina, y además pueden afectar el par (torque) desarrollado. Las corrientes armónicas en un motor pueden hacer mayor la emisión de ruido, comparable al que se produce con una alimentación sinusoidal. Además, producen una distorsión de distribución del flujo en el entrehierro, que puede causar o intensificar el fenómeno de engranaje (“cogging”), contrario al arranque suave, o de arrastre (“crawling”), el cual produce grandes deslizamientos, estos fenómenos producen pulsaciones de par que pueden afectar la calidad de los productos en un proceso industrial sensible. Pares producidos por corrientes armónicas como el quinto y el séptimo, tienen el potencial suficiente para crear oscilaciones mecánicas en un turbo-generador o en sistemas motor-carga [7]. Las oscilaciones mecánicas se presentan cuando los torques causados por una interacción entre corrientes armónicas y el campo magnético de la frecuencia fundamental, excita una frecuencia de resonancia mecánica. Por ejemplo, el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir un estímulo de torsión en el rotor del generador a la frecuencia del sexto armónico [1].

Si la frecuencia de resonancia mecánica está cerca de la frecuencia del estímulo eléctrico, se podrían desarrollar esfuerzos mecánicos en partes del rotor. Adicionalmente, el flujo de corrientes armónicas en el estator produce pérdidas que aumentan la temperatura tanto en el estator como en el rotor; el efecto final de los armónicos, es la reducción de la eficiencia y la vida útil de la máquina [7].

### **2.8.2 Transformadores**

El efecto de los armónicos en los transformadores es doble: las corrientes armónicas causan un incremento de las pérdidas en el cobre y pérdidas de flujos de dispersión; y las tensiones armónicas causan un incremento de las pérdidas en el hierro. El efecto total es un incremento en el calentamiento del transformador. La norma IEEE C57.12.00-1987 proporciona un límite de armónicos de corriente para los transformadores. El límite superior del factor de distorsión de corriente es 5% [1].

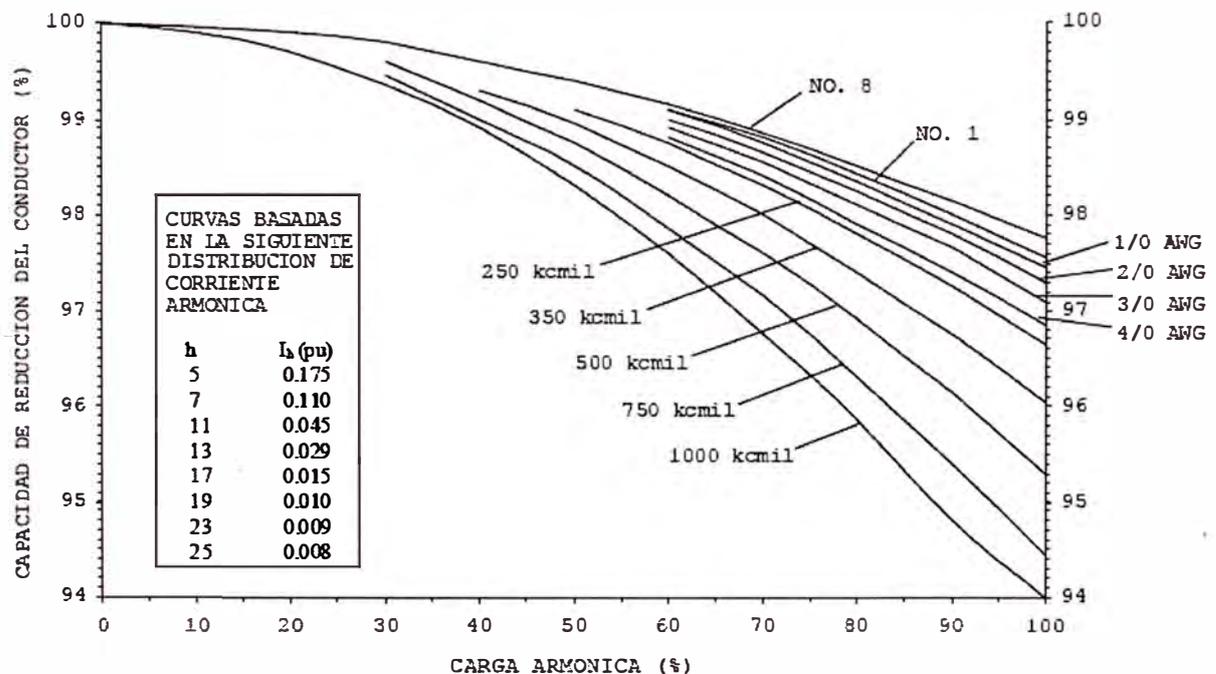
Puede notarse que las pérdidas en los transformadores, causadas tanto por las corrientes como por las tensiones armónicas son directamente proporcionales a la frecuencia, por lo tanto, las componentes armónicas de frecuencias altas pueden causar un calentamiento en el transformador más importante que los armónicos de frecuencias bajas [7].

Las pérdidas en el transformador pueden ser separadas en pérdidas con cargas y sin carga o en vacío. Las pérdidas bajo carga son producidas por el efecto Joule ( $I^2R$ ) y las pérdidas en vacío son por dispersión y por la histéresis en el hierro, éstas son de especial importancia cuando se evalúa la adición de calor debido al efecto de una forma de onda de corriente no sinusoidal [7].

Las pérdidas por dispersión son por corrientes parásitas debido al flujo electromagnético extraviado en el devanado, núcleo, abrazadera del núcleo, campo magnético, pared del tanque y otras partes estructurales del transformador. Las pérdidas extraviadas del devanado incluyen pérdidas aisladas de corrientes de Eddy en los conductores del devanado y pérdidas debido a la circulación de corrientes entre circuitos devanados paralelos o aislados. Esta pérdida aumentará en proporción al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia. La temperatura también aumentará en las partes estructurales por las corrientes de Eddy, aproximadamente al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia. La IEEE C57.110-1998 proporciona un procedimiento de cálculo para obtener las pérdidas de corriente de Eddy para un transformador dado. Las pérdidas por dispersión son de especial importancia cuando se evalúa el aumento del calentamiento debido a los efectos de corrientes no sinusoidales [7].

### 2.8.3 Cables y conductores

El flujo de corrientes no sinusoidales en un conductor causa un calentamiento adicional, por encima del que se esperaría para el valor eficaz de la onda fundamental. Esto se debe a dos fenómenos: “efecto pelicular” y “efecto proximidad”, los cuales varían en función de la frecuencia, del calibre del conductor y del espaciamiento. Como resultado de estos dos efectos, la resistencia efectiva en corriente alterna ( $R_{ac}$ ) es mayor que la resistencia en corriente continua ( $R_{cc}$ ), especialmente en conductores muy largos, amplificándose las pérdidas  $I^2 \times R_{ac}$  [1]. Los cables en un sistema resonante están sujetos a fenómenos de sobre tensión (esfuerzos dieléctricos) y corona, los cuales pueden progresivamente deteriorar el dieléctrico (aislamiento) del conductor. Adicionalmente el sobrecalentamiento producido por los niveles de armónicos contribuye a su degradación [7].



**Fig. 2.4 Degradación de la ampacidad del cable vs  $THD_1$**   
( $THD_1$  típica de 6 pulsos) – IEEE 519 v. 1992

### 2.8.4 Condensadores y factor de potencia

Los bancos de condensadores usados para controlar la tensión y mejorar el factor de potencia, así como los cables aislados, son los principales componentes que afectan las características de respuesta en frecuencia del sistema. La conexión de los condensadores puede causar condiciones de resonancia (tanto serie como paralelo) que pueden elevar los niveles de distorsión armónica [7]. El valor de la reactancia de un banco de condensadores disminuye con la frecuencia, por tanto el banco, actúa como una carga para corrientes

armónicas altas. Este efecto incrementa el calentamiento y el esfuerzo dieléctrico. El cambio frecuente de componentes no magnéticos (por ejemplo núcleo de hierro), tal como transformadores y reactores, puede producir corrientes, que se agregarán a la carga de condensadores. La norma IEEE Std. 18-1992 proporciona los límites en tensión, corriente y potencia reactiva para bancos de condensadores. Esto puede ser usado para determinar el máximo nivel de armónicos permisible [1].

El incremento del calentamiento y los esfuerzos de tensión en el dieléctrico, por la circulación de armónicos reducen la vida útil de los condensadores. Aunque la discusión previa tiene la intención de describir los efectos en elementos de sistemas de distribución tal como el mejoramiento del factor de potencia o condensadores para el filtrado de armónicos, se puede notar que otros condensadores también pueden ser afectados. Por ejemplo, los condensadores usados para arranque en motores monofásicos, o aquellos usados en circuitos rectificadores amortiguadores, serán sujetos a similares esfuerzos térmicos y de tensión [1]. Las capacitancias de carga de línea, en líneas de transmisión y cables aislados también están en paralelo con la inductancia del sistema. Por consiguiente, ellos son similares a los condensadores paralelos con respecto al efecto de las características de respuesta en frecuencia del sistema. Usualmente los bancos de condensadores son predominantes en la industria y en la red de distribución [7].

### **2.8.5 Equipos electrónicos**

Los equipos electrónicos son susceptibles a operar incorrectamente a causa de la presencia de distorsiones armónicas. Estos equipos son a menudo dependientes de la determinación exacta de los cruces por cero y otros aspectos de la forma de onda de la tensión. La distorsión armónica puede resultar en desplazamiento del cruce por cero de la tensión o del punto al cual una tensión de fase se hace más grande que otra. Estos son puntos críticos para muchos tipos de circuitos electrónicos de control, y pueden resultar operaciones incorrectas de estos desplazamientos [1].

Otros tipos de equipos electrónicos pueden ser afectados por la transmisión de fuentes armónicas a través de la fuente de poder o por acoplamiento magnético de armónicos en los componentes de los equipos. Las computadoras y equipos relacionados, como los controladores programables, frecuentemente requieren fuentes A.C. con no más de un 5% de factor de distorsión armónica, con un máximo individual armónico del 3% de la tensión fundamental [1]. Los altos niveles armónicos traen como consecuencia operaciones erráticas de los equipos que pueden, en algunos casos, tener serias consecuencias, siendo el

más serio de estos funcionamientos inadecuados el relativo al instrumental médico. Efectos de interferencia de armónicos menos dramáticos pueden ocasionalmente observarse en equipos de radio y televisión, al igual que en video grabadoras y sistemas reproductores de audio [7].

### **2.8.6 Medidores de energía**

El efecto de la distorsión armónica en equipos medidores de energía con disco de inducción es capaz de generar lecturas erróneas, ya que las tensiones y corrientes armónicas están desfasadas entre sí, causando una variación en la potencia activa generada por esta señal. En condiciones de resonancia los niveles de tensión y corriente pueden incrementarse afectando el correcto funcionamiento de estos medidores. Una distorsión armónica total de corriente mayor al 20% puede causar considerables errores en la medición. En medidores de energía con equipos electrónicos que miden el verdadero valor eficaz de las ondas de tensión y corriente, no se ven afectados por la distorsión armónica [7].

### **2.8.7 Conmutadores y aplicaciones de relés**

Como con otros tipos de equipos, las corrientes armónicas pueden incrementar el calentamiento y las pérdidas en mecanismos de control, por lo tanto reducen la capacidad de carga de la corriente de estado sólido y acortan la vida de algunos componentes aislantes. Los fusibles sufren una reducción en su capacidad nominal debido al calentamiento generado por los armónicos durante la operación “normal”. No hay actualmente ninguna norma para los niveles de corrientes armónicas requeridas por los dispositivos de maniobra o fusibles para la interrupción o carga. Todas las pruebas son realizadas en rangos de frecuencias de alimentación.

En estudios anteriores se ha determinado que muchos tipos de relés de protección generalmente no responden a ningún parámetro identificable tal como valores rms de una cantidad primaria ó la componente de frecuencia fundamental de esta cantidad. Como una consideración relacionada, el funcionamiento de un relé a un rango de entradas de frecuencia simple, no es una indicación de cuanto responderá éste a una onda distorsionada, donde la superposición no es aplicada. Los relés de múltiples entradas pueden ser más impredecibles que los relés de una sola entrada en presencia de la onda distorsionada. La respuesta de los relés bajo condiciones de distorsión puede variar entre relés que tienen las mismas características de frecuencia fundamental, no sólo entre diferentes fabricantes, sino también entre diferentes modelos de relés del mismo fabricante.

Por efecto de la contaminación armónica los relés muestran una tendencia a modificar su respuesta de operación tanto en el tiempo como en magnitud, por ejemplo tienden a operar lentamente a picos de corriente más altos, en lugar de operar más rápidamente con valores picos muy bajos. Los relés de baja frecuencia estática son susceptibles a sustanciales cambios en las características de operación. En muchos casos, los cambios en las características son relativamente pequeños sobre el rango moderado de distorsiones esperadas durante la operación normal (por ejemplo un factor armónico de 5%). Para diferentes fabricantes, los relés de sobre corriente o sobre tensión muestran diferentes cambios en las características de operación. Dependiendo del contenido armónico, la operación de torsión de los relés es a veces inversa. Los relés que emiten una impedancia balanceada muestran exceso o escasez, dependiendo de la distorsión. A veces los armónicos dañan la operación de alta velocidad de los relés diferenciales. Algunas pruebas demuestran que los relés pueden exhibir fijación completa.

En general, los niveles de armónicos requeridos para causar mal funcionamiento de los relés son mayores que los niveles recomendados en las normas. Los factores de distorsión entre 10% y 20% generalmente son requeridos para causar problemas en la operación de algunos tipos de relés [7].

### **2.8.8 Interferencia telefónica**

La presencia de corrientes o tensiones armónicas en los sistemas asociados con aparatos de conversión de potencia, pueden producir campos eléctricos y magnéticos. Estos afectan el funcionamiento de los sistemas de comunicación, en virtud de la sensibilidad de estos sistemas. En los aparatos de conversión de energía, la perturbación es una función que depende, tanto de la amplitud, como de la frecuencia de las componentes de perturbación.

Los armónicos entre 540 Hz (novenos armónico) y 1200 Hz (veinte-avo armónico) son los que generalmente causan interferencia. Las tensiones y corrientes se incrementan con la frecuencia [7].

### **2.9 Métodos de minimización de distorsión armónica mediante filtros**

La limitación de las distorsiones armónicas de la red a valores bajos específicos se consigue con el empleo de filtros. Existen 3 clases de filtros que permiten reducir las distorsiones armónicas:

- a) Filtros pasivos o sintonizados.
- b) Filtros activos o compensadores activos.
- c) Filtros híbridos.

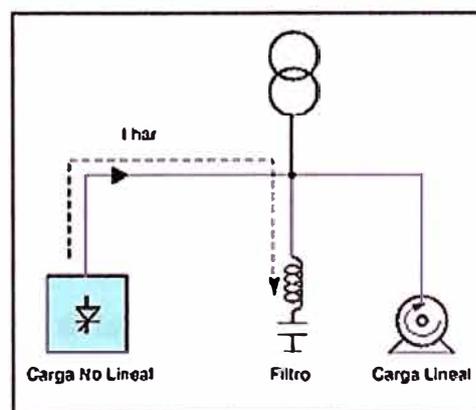
### 2.9.1 Filtros pasivos o sintonizados

Una manera de minimizar las armónicas, es proporcionar un camino de baja impedancia en la barra de la carga; para esto se hace el empleo de filtros pasivos, los cuales están conformados por condensadores e inductancias. Son llamados pasivos debido a que no responden a cambios en frecuencia (inductores y capacitores no cambian sus valores).

Con el uso del condensador en serie con una inductancia a la entrada, se busca obtener la resonancia con un armónico de una frecuencia dada, esta instalación presenta una impedancia muy baja a la frecuencia de resonancia, y se comporta como un cortocircuito para el armónico considerado. Es posible utilizar simultáneamente varios conjuntos sintonizados a frecuencias diferentes para eliminar varios rangos de armónicos. Los filtros pasivos contribuyen además a compensar la energía reactiva de la instalación. Aunque aparentemente simple, este principio exige un cuidadoso estudio de la instalación, porque si el filtro se comporta perfectamente como un cortocircuito para la frecuencia deseada, puede tener el riesgo de resonancia con las otras inductancias de la red a otras frecuencias y correr el riesgo de que en la instalación aumenten los niveles de armónicos que antes no eran perjudiciales [6]. Esta tecnología permite solo una reducción parcial de las corrientes armónicas, además, la acción se limita solo a unos pocos órdenes (típicamente: 5, 7, y 11).

Adicionalmente, la corriente nominal del filtro es muy dependiente de la distorsión existente, dado que el filtro presenta una baja impedancia en su frecuencia de resonancia.

Las aplicaciones típicas para los filtros pasivos son las instalaciones de potencia media o de potencia alta (> pocos cientos de kVA) lo que incluye variadores de velocidad, hornos de inducción, hornos de arco y rectificadores, y también aquellas que requieren corrección del factor de potencia [10]. En la Fig. 2.5 se muestra un esquema de un filtro pasivo en conexión paralelo a la carga.



**Fig. 2.5 Esquema de un filtro pasivo paralelo a la carga**

Entre las principales conexiones para los filtros pasivos se tiene:

**a) Filtro serie**

Consiste en un capacitor y un inductor conectados en paralelo y en conjunto conectados en serie con la carga, presenta una alta impedancia como bloqueo para las corrientes armónicas y evita que lleguen a la fuente de alimentación. La inductancia debe diseñarse para la corriente de carga, haciendo que sea muy costoso [7].

Una aplicación común es para sistemas monofásicos donde minimiza efectivamente la 3ra armónica (orden de armónica más común en sistemas monofásicos), se sintoniza a una frecuencia particular, ofreciendo una alta impedancia únicamente a la componente de frecuencia sintonizada.

**b) Filtro paralelo**

Es el más usual, conformados por un capacitor y un inductor conectados en serie y en conjunto conectados en paralelo con la carga. Este tipo de filtro presenta un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas y las drena a tierra sin peligro alguno.

Se pueden incorporar al filtro los condensadores para corregir el factor de potencia a frecuencia fundamental. Pueden obtenerse arreglos para características múltiples de filtrado (puede filtrar más de una frecuencia) [7]. Al no conducir la corriente total de la carga, estos filtros son de menor costo.

### **2.9.2 Filtros activos ó compensadores activos**

El compensador activo es un equipo de electrónica de potencia, con control digital. Los sensores de corriente se usa es para la medición de la corriente de carga de la línea.

El filtro activo permite neutralizar el efecto de una perturbación inyectando un valor igual al de la perturbación pero opuesto en fase [5]. La combinación de «carga perturbadora + compensador activo» constituye una carga lineal (en la que la corriente y la tensión están relacionadas por un coeficiente  $k$ ). Este tipo de dispositivo resulta especialmente válido para la depuración de las redes de baja tensión, sea el que sea el punto de conexión escogido y el tipo de carga (porque este dispositivo se auto-adapta) [6].

Según el nivel de inserción puede ser:

- Una compensación local: si el compensador está asociado a una carga no lineal.
- Una compensación general: si la conexión se realiza por ejemplo a nivel del cuadro general de baja tensión de la instalación.

El compensador activo constituye por tanto una fuente de corriente independiente de la impedancia de la red, y tiene las características intrínsecas siguientes:

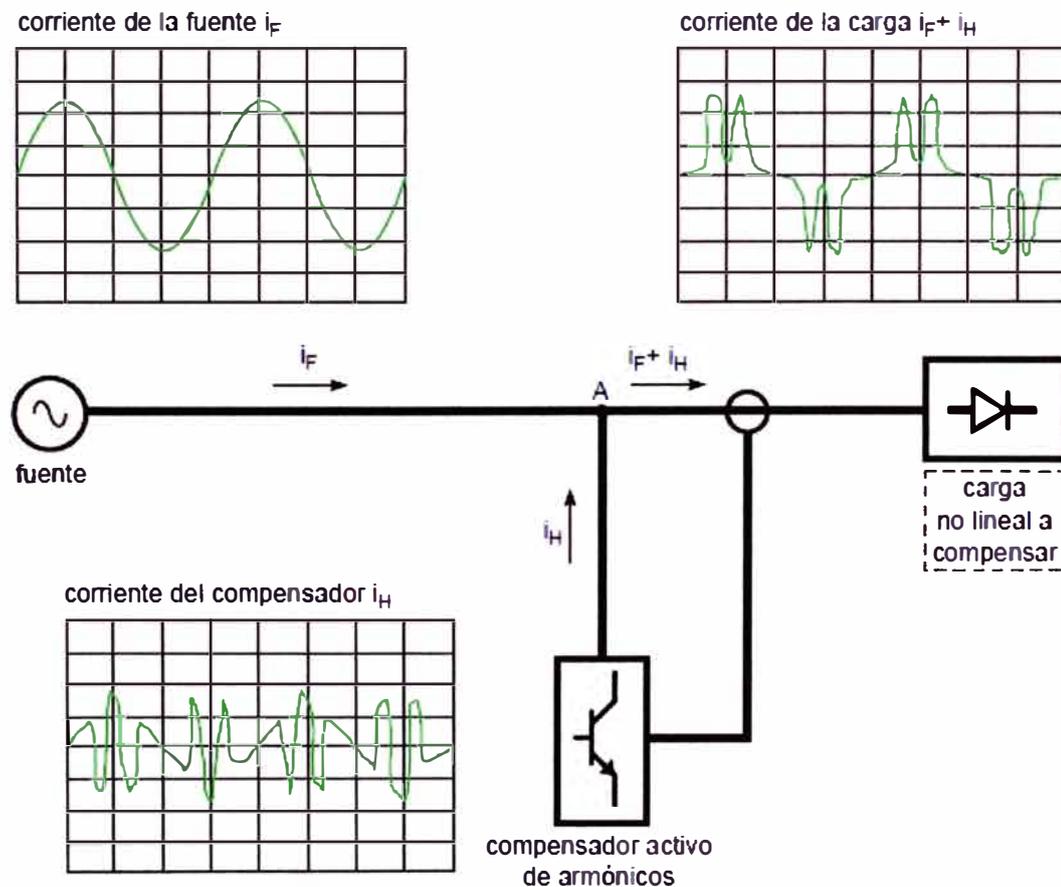
-Su banda pasante es suficiente para garantizar la supresión de las componentes armónicas mayoritarias (estadísticamente hablando) de la corriente de la carga. Típicamente, consideramos que el margen H2 - H23 es válido, porque cuanto más elevado es el orden, menor es la amplitud de los armónicos.

-Su tiempo de respuesta es tal que la compensación de armónicos es efectiva no sólo en régimen estable, sino incluso en régimen transitorio «lento» (algunas decenas de ms).

-Su potencia permite atender los objetivos de compensación fijos, lo que no garantiza necesariamente la compensación total y permanente de los armónicos generados por la(s) carga(s).

Supuesto que se cumplan simultáneamente estos tres objetivos, entonces el compensador activo constituye un excelente compensador, porque se auto adapta y no tiene riesgo alguno de interacción con la impedancia de la red [6].

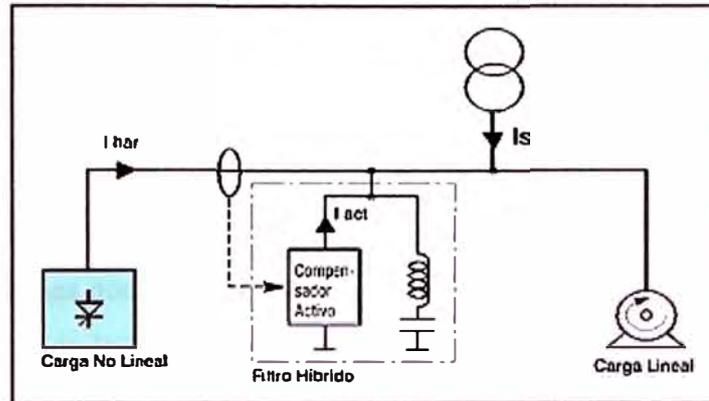
En la Fig. 2.6 se muestra la neutralización de armónicas de un filtro activo, esto se produce cuando el filtro activo inyecta una corriente igual a la corriente distorsionada pero opuesto en fase; cuyo resultado se tiene una onda de corriente pura en la dirección de la fuente de alimentación.



**Fig. 2.6 Principio de operación del compensador activo de armónicos**

### 2.9.3 Filtros híbridos

Está compuesto por un filtro activo y un filtro pasivo sintonizado al armónico preponderante para su mitigación, y que además suministra la energía reactiva necesaria.



**Fig. 2.7 Esquema de conexión de un filtro híbrido**

El filtro pasivo se sintoniza en la frecuencia armónica predominante, y entrega la energía reactiva requerida. El compensador activo se dedica al resto de los armónicos.

Esta solución permite un alto nivel de funcionalidad, dado al gran número del orden armónico cubierto. El uso del filtro pasivo dedicado a la frecuencia del orden predominante permite cubrir un rango más amplio de potencia. El compensador activo es ajustado sólo para una fracción (típicamente: entre  $1/3$  y  $1/2$ ) de la corriente armónica total [10].

Las aplicaciones típicas de los filtros híbridos son las mismas aplicaciones de los filtros pasivos, es decir, para instalaciones de potencia media y potencia alta (> pocos cientos de kVA), aplicaciones que demandan corrección del factor de potencia, además de la funcionalidad de eliminar el resto armónicos de orden diferente.

Con la reducción de la sección activa y la alimentación natural de la energía reactiva, la tecnología híbrida ofrece una solución óptima y económica para la mayoría de las instalaciones de alta potencia.

El filtro híbrido combina las ventajas de ambas tecnologías básicas: el filtro pasivo es una solución de bajo costo y el compensador activo es una solución de alta funcionalidad [10].

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN LA INSTALACIÓN INDUSTRIAL**

#### **3.1 Descripción del problema**

Uno de los problemas que se aprecian actualmente en la planta, es el contenido armónico de corriente presente en la red de alimentación en 440Vac. La tasa de distorsión armónica de corriente aguas arriba se ubica en un 22%, representando un riesgo en la instalación por lo que genera calentamientos y mal funcionamiento en los motores principales (máquinas extrusoras), así como el empeoramiento del factor de potencia trayendo como consecuencia el aumento de pérdidas eléctricas en la instalación.

Las fuentes principales de generación de armónicos de corrientes se originan aguas abajo mediante la operación de un convertidor de frecuencia AC/DC y un variador de velocidad AC/AC de 6 pulsos. En el punto de acoplamiento del convertidor AC/DC se genera una distorsión de corriente de 33%, causando en la operación del motor DC un calentamiento en 49°C en la carcasa estática y 64°C en los puntos de acople. Del mismo modo el variador de velocidad de 6 pulsos AC/AC genera en su punto de acople una distorsión de corriente de 59%, causando armónicas típicas de orden 5°, 7° y 11°; ocasionando el aumento de pérdidas y como consecuencia la disminución de la vida útil del motor AC, como se muestra en la Fig. 3.6.

#### **3.2 Identificación de armónicas mediante mediciones en campo**

Las mediciones se llevaron a cabo los días 2 y 3 de marzo del 2009 tanto en el tablero principal en 440Vac, como en los puntos de acoplamiento aguas abajo para el convertidor AC/DC (motor dc 75kW) y el convertidor AC/AC (motor ac 55kW), ambas cargas correspondientes a las máquinas extrusoras en 440Vac.

##### **3.2.1 Equipos e instrumentos utilizados**

Para realizar las mediciones de parámetros eléctricos de distorsión armónica se emplearon un equipo analizador de redes CIRCUTOR de última generación, un multímetro digital y una pinza amperimétrica, como se muestran en la Fig. 3.1, Fig. 3.2 y Fig. 3.3 respectivamente.

- Marca : **Circuitor**
- Modelo : **AR-5L**
- Código : **M80111**



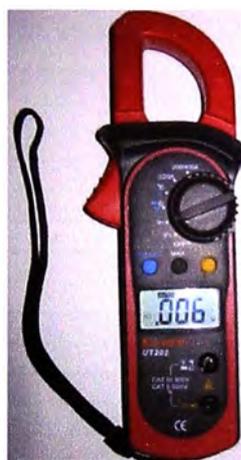
**Fig. 3.1 Analizador de redes AR-5L**

- Marca : **Promax**
- Modelo : **PD-750**
- Serie : **042700490350**



**Fig. 3.2 Multímetro Digital**

- Marca : **Konstar**
- Modelo : **UT202**
- Serie : **1080549229**



**Fig. 3.3 Pinza amperimétrica**

### 3.2.2 Mediciones efectuadas en campo

Para evaluar las condiciones de carga y la influencia de la distorsión armónica sobre la operación de las maquinas y demás instalaciones en 440Vac de la planta (Industrial Matusita), se han efectuado los registros de las siguientes variables:

- THD% de tensión y corriente (en valores mínimos, promedios y máximos)
- Armónicas de tensión y corriente.
- Potencia activa, reactiva y factor de potencia.



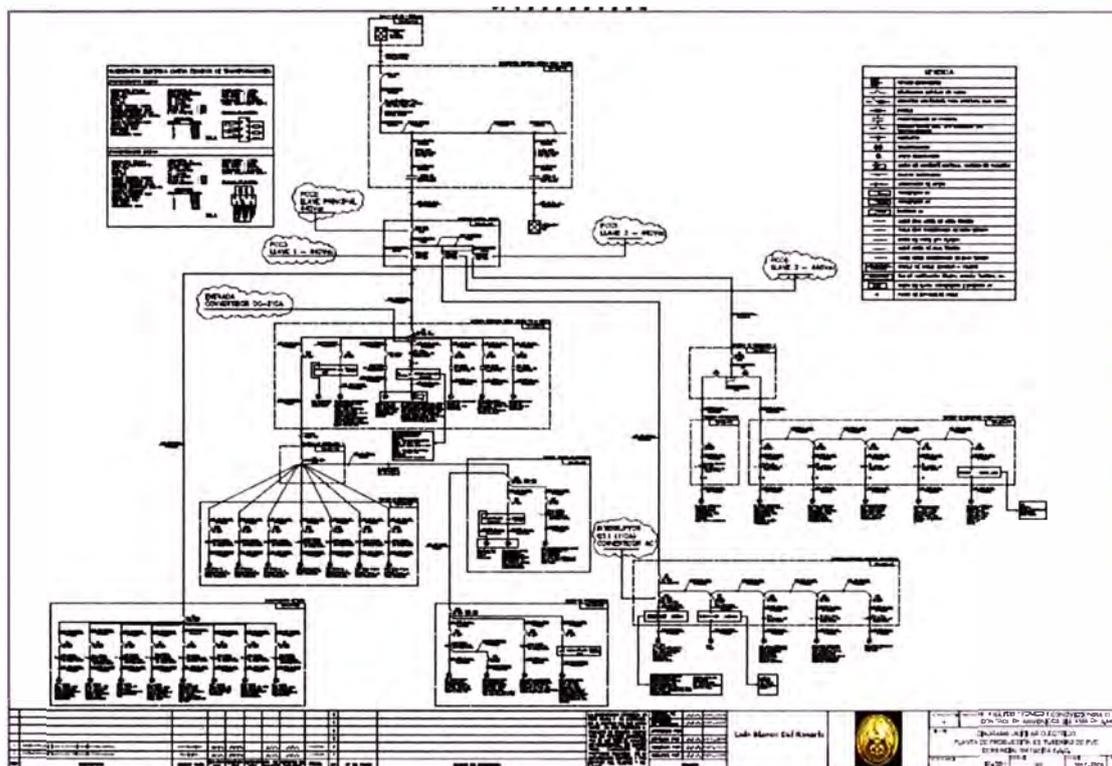
**Fig. 3.4** Medición de armónicas en el convertidor AC/DC de 75kW



**Fig. 3.5** Medición de armónicas en el convertidor AC/AC de 55kW

El periodo de medición de parámetros de calidad de producto, según lo que establece la NTCSE es de 7 días calendarios continuos para armónicos (periodo de iteración 10 minutos). Para las seis mediciones realizadas en la planta se tomó un tiempo de 2 días; las

mediciones se realizaron durante los periodos de máxima demanda, aguas abajo para el caso de los convertidores y aguas arriba para las llaves principales. Como validez podríamos decir que en los tiempos de máxima demanda se tiene una distorsión de demanda total (TDD) que se aproxima al valor real, esto es por la máxima corriente de carga demandada en dichos tiempos, donde el valor del TDD se aproxima al THD<sub>i</sub> encontrado. En la Fig. 3.6 se muestra el diagrama electrico unifilar y los puntos de medición establecidos (ver también anexo A).



**Fig. 3.6 Esquema electrico unifilar en 440Vac de la planta industrial**

El tiempo de registro y el periodo de iteración en cada punto medido, fue de acuerdo al siguiente cronograma de mediciones como se indica en la Tabla N° 3.1.

**Tabla N° 3.1 Cuadro de mediciones**

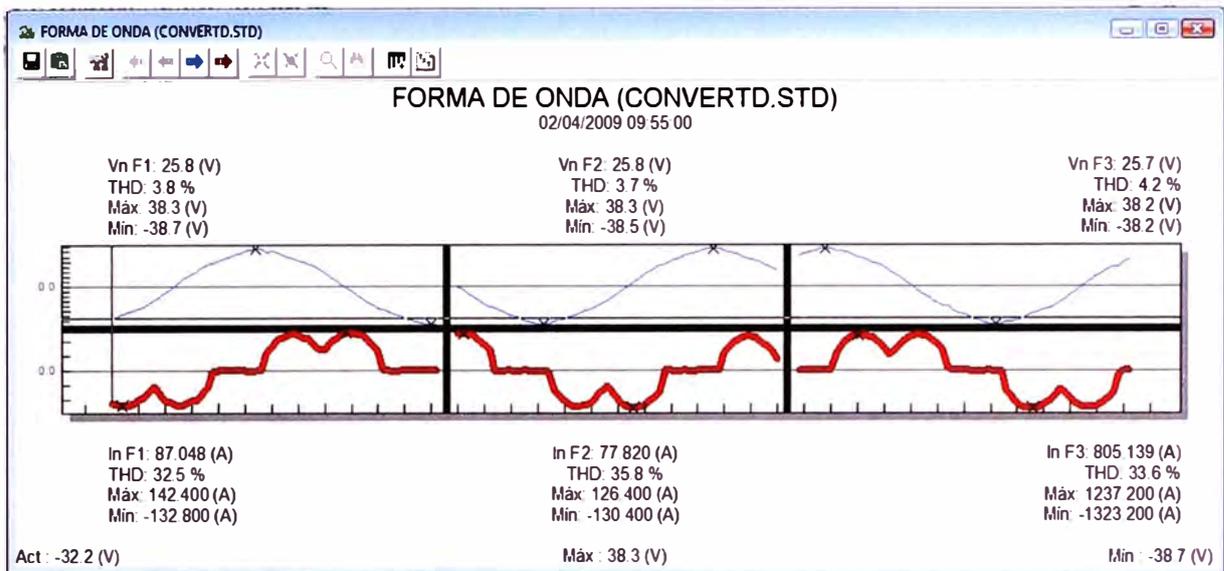
Item	Punto de medición	Tensión (V)	Equipo utilizado	Inicio de Mediciones	Término de Mediciones	Período (minutos)
1	Convertidor AC/DC	440	AR-5L	020409 9:55	020409 10:25	1
2	VDFA3	440	AR-5L	020409 11:35	020409 12:04	1
3	VDFG	440	AR-5L	020409 13:20	020409 13:49	1
4	Interruptor ( llave 1)	440	AR-5L	020409 15:40	020409 16:39	1
5	Interruptor ( llave 2)	440	AR-5L	030409 12:30	030409 12:59	0.5
6	Interruptor ( llave 3)	440	AR-5L	030409 15:05	030409 15:14	1
7	Interruptor principal	440	AR-5L	030409 11:17	030409 12:16	1

Los registros de mediciones principalmente aguas arriba fueron realizados en tiempos donde todos los equipos operaban a la vez simultaneamente.

A continuación se muestran las representaciones gráficas en los puntos medidos de las formas de onda de tensión y corriente por fase, en un instante de tiempo de acuerdo a la Tabla N° 3.1.

#### a) Convertidor AC/DC

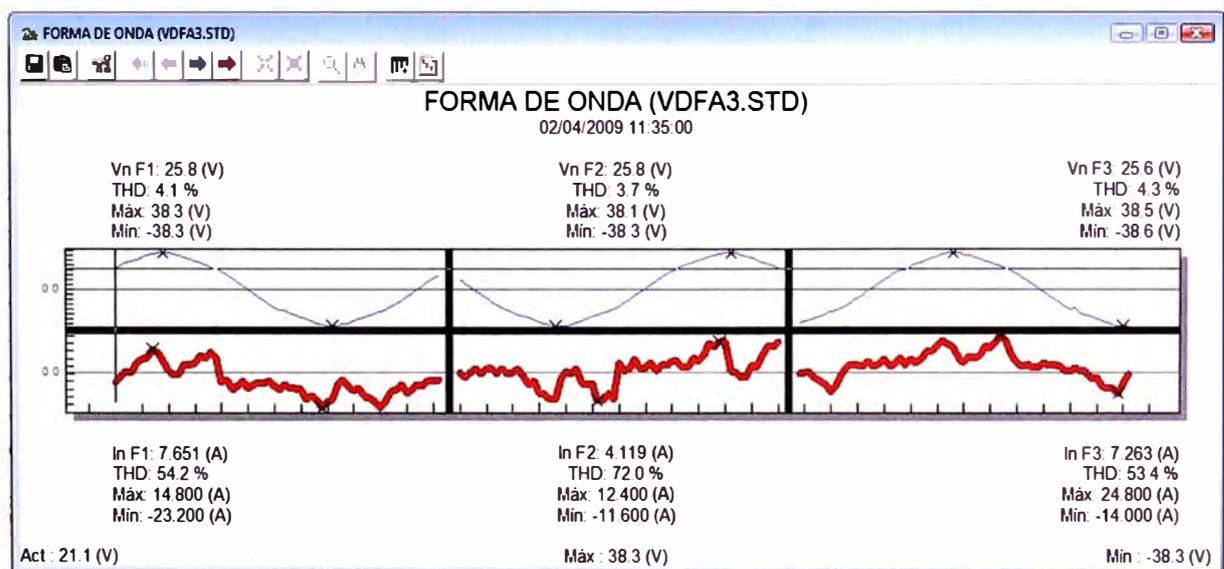
La gráfica de la Fig. 3.7 muestra la forma de onda de tensión y corriente del convertidor AC/DC, en un instante y en cada fase.



**Fig. 3.7** Forma de onda de tensión y corriente (convertidor AC/DC)

#### b) Convertidor de frecuencia VDFA3

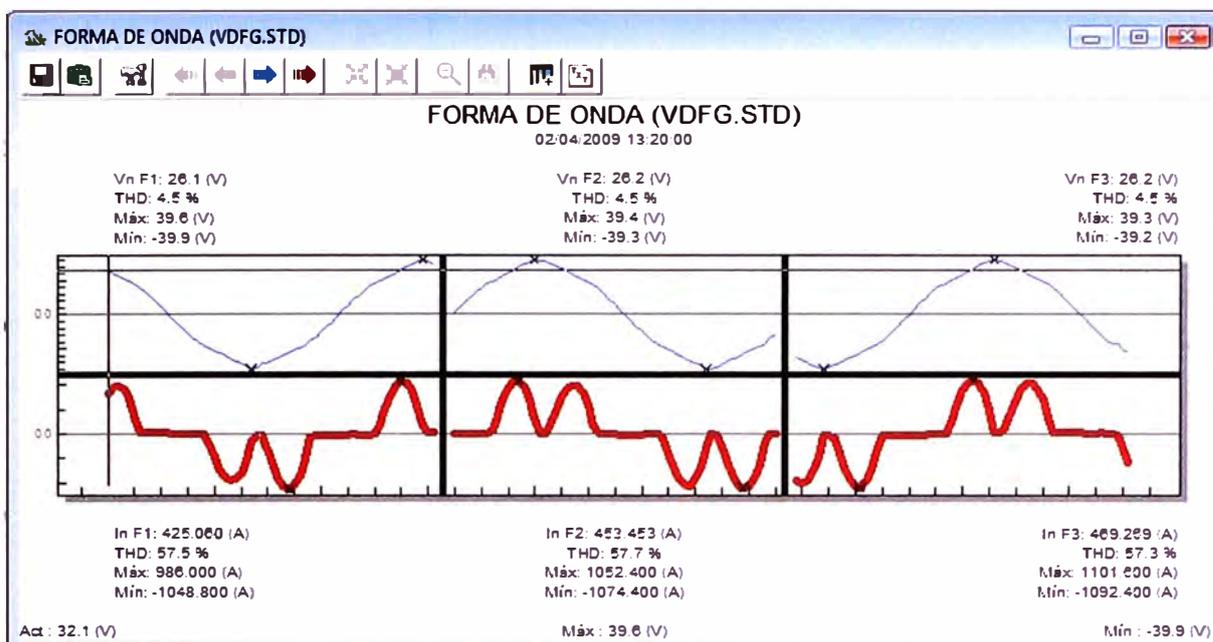
La gráfica de la Fig. 3.8 muestra la forma de onda de tensión y corriente del convertidor de frecuencia, en un instante y en cada fase.



**Fig. 3.8** Forma de onda de tensión y corriente (convertidor VDFA3)

### c) Convertidor de Frecuencia VDFG (6 pulsos)

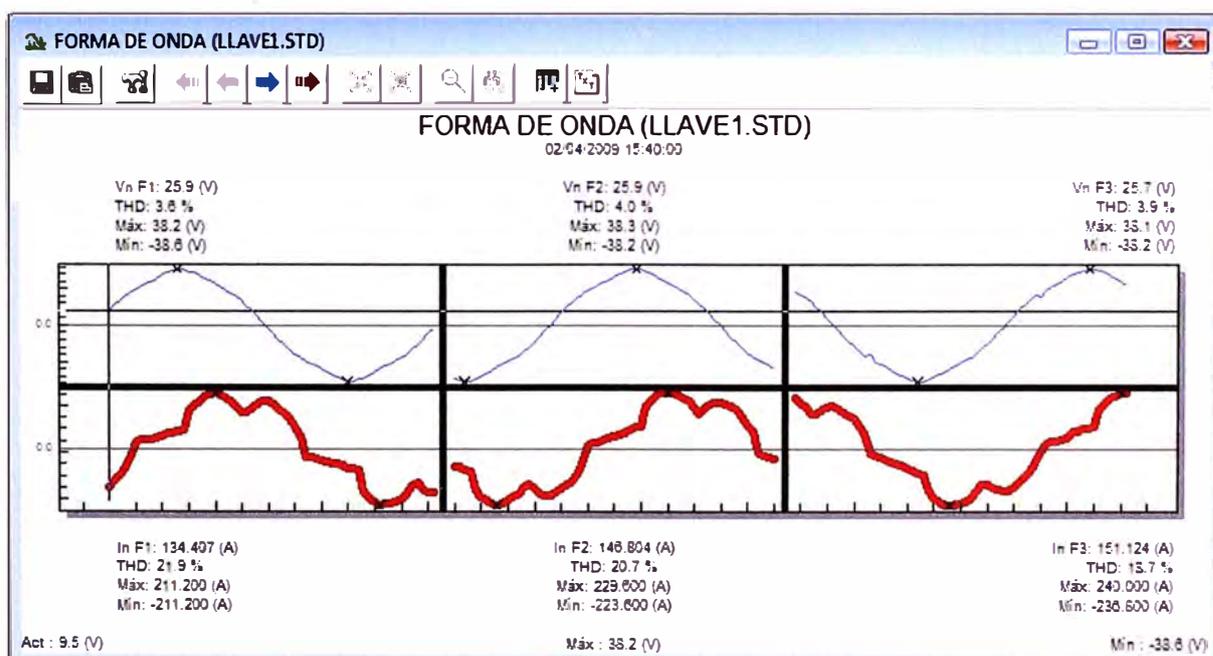
La gráfica de la Fig. 3.9 muestra la forma de onda de la tensión y de la corriente del convertidor de frecuencia de 6 pulsos, en un instante y en cada fase.



**Fig. 3.9 Forma de onda de tensión y corriente (convertidor VDFG)**

### d) Interruptor (llave 1)

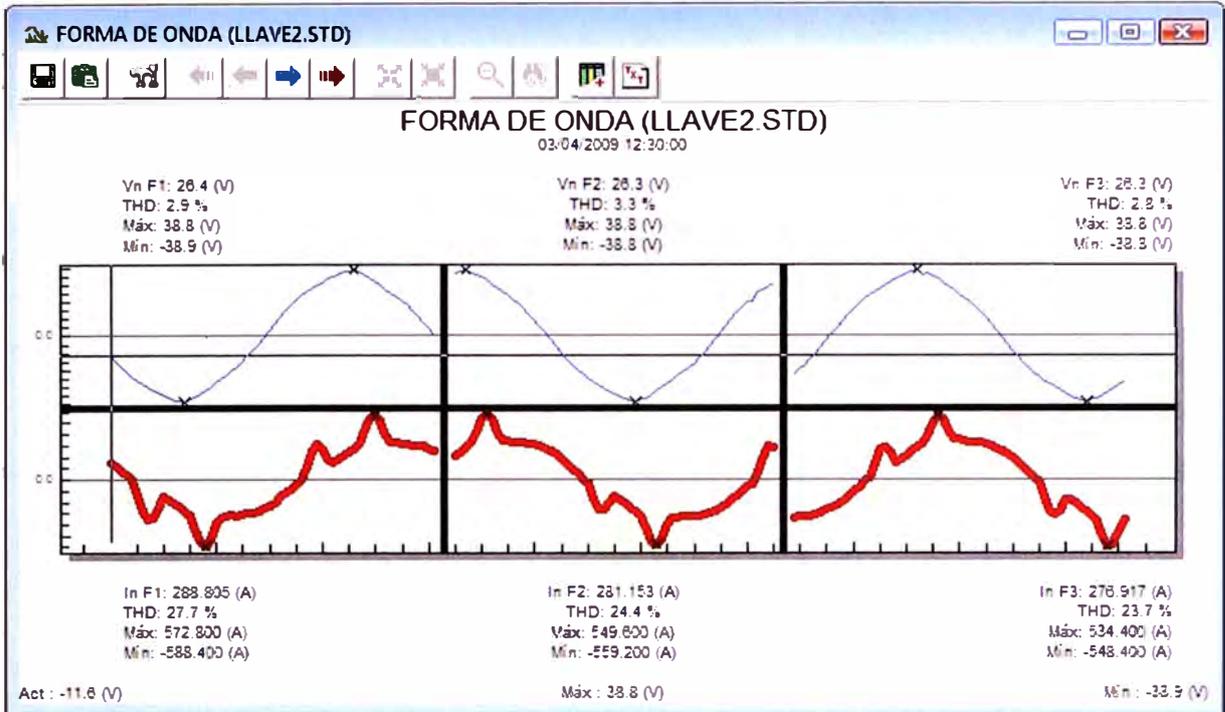
La gráfica de la Fig. 3.10 muestra la forma de onda de tensión y corriente en el interruptor de llave de alimentación general 1, en un instante y para cada fase.



**Fig. 3.10 Forma de onda de tensión y corriente (interruptor llave 1)**

### e) Interruptor (llave 2)

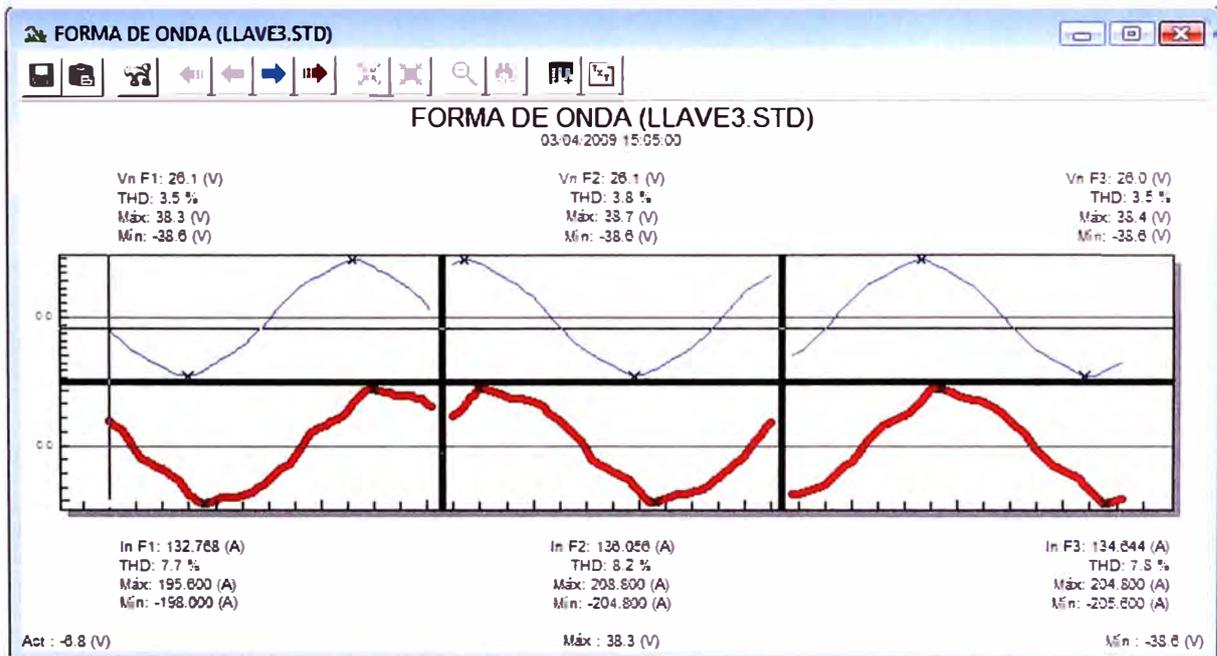
La gráfica de la Fig. 3.11 muestra la forma de onda de tensión y corriente en el interruptor de la llave de alimentación general 2, en un instante y para cada fase.



**Fig. 3.11** Forma de onda de tensión y corriente (interruptor llave 2)

### f) Interruptor (llave 3)

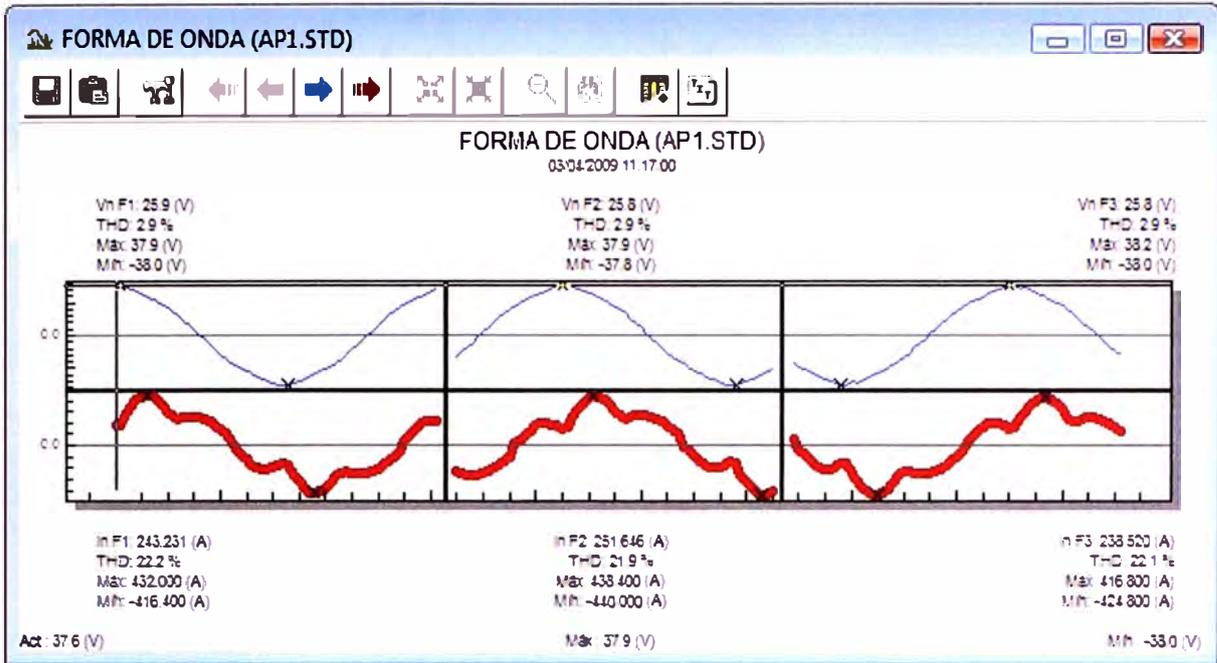
La gráfica de la Fig. 3.12 muestra la forma de onda de tensión y corriente en el interruptor de la llave de alimentación general 3, en un instante y para cada fase.



**Fig. 3.12** Forma de onda de tensión y corriente (interruptor llave 3)

### g) Interruptor principal (AP1)

La gráfica de la Fig. 3.13 muestra la forma de onda de tensión y corriente en el interruptor principal general en 440Vac, en un instante y para cada fase.



**Fig. 3.13 Forma de onda de tensión y corriente (interruptor principal AP1)**

Debemos tener presente que para efecto de análisis en la influencia de la distorsión armónica de cada carga no lineal, se toma en cuenta aquellos de mayor carga (mayores a 10HP) debido a que tienen mayor implicancia en las variables medidas.

### 3.3 Análisis del sistema eléctrico en 440Vac

Un aspecto importante para los análisis fue el levantamiento realizado para la elaboración del plano unifilar eléctrico del sistema de distribución de energía en 440Vac, donde se tomó como ayuda algunos esquemas propios de los catálogos de equipos que cuentan el personal del área de mantenimiento eléctrico de la planta.

El sistema se alimenta desde una subestación principal interna de la planta en 10kV que proviene de un PMI-749 otorgado por la empresa de distribución eléctrica (EDELNOR). El sistema en general tiene una potencia instalada de 1.43MVA, donde se componen de 02 transformadores de 630kVA y 800kVA con una relación de transformación de 10kV/460V y 10kV/230V respectivamente; cabe resaltar que la subestación no cuenta con un sistema de emergencia.

El sistema eléctrico en 440Vac de la planta, comprende el equipamiento de cargas como motores de inducción, cuyos equipos de mayor carga son accionados mediante convertidores AC/DC y AC/AC.

En la Tabla N° 3.2 se indica el equipamiento electromecánico que forma parte del sistema en 440Vac.

**Tabla N° 3.2 Equipamiento en 440Vac**

Ítem	Equipamiento en 440Vac	
	Tag (N° asignado)	Equipo
1	100-SAM-101	Subestación Aérea Monoposte (PMI-749)
2	100-SEI-102	Subestación Eléctrica Interna de la Planta
3	100-TG-103	Tablero General 440Vac
4	100-ME-104	Máquina Extrusora LSE80
5	100-TD-105	Tablero de Distribución N° 1
6	100-TE-106	Tanque de Enfriamiento
7	100-PU-107	Puller (prueba de esfuerzo)
8	100-UC-108	Unidad de Corte
9	100-AT-109	Acampanadora de Tubo
10	100-MER-110	Máquina Extrusora Rotomec
11	100-TD-111	Tablero de Distribución N° 2
12	100-TA-112	Tablero Arrancador
13	100-TDM-113	Tablero de Distribución Molino Granulador

### 3.3.1 Análisis de impedancias de líneas

Se determina a realizar el cálculo de impedancias de la red con referencia al punto de distribución de la llave principal, bajo la premisa que las corrientes armónicas generadas por la mayor carga tienden a desplazarse por el alimentador de menor impedancia.

De acuerdo al esquema unifilar partimos a calcular las impedancias de líneas de conductores de llegada y salida referidos al tablero general 100-TG-103 en 440Vac; esto es en la Tabla N° 3.3 se muestra las impedancias de cada línea.

**Tabla N° 3.3 Cálculo de impedancias de líneas de conductores**

Ítem	Cable	Calibre	Longitud	Resistencia 20°C	Reactancia Inductiva	Impedancia	Impedancia
	Tipo	mm <sup>2</sup>	Km	R (Ω/km)	XL (Ω/km)	Z (Ω/km)	Z (Ω)
1	<b>NYN</b>	<b>2(3-1x240)</b>	0.025	0.0468	0.0773	0.0903	<b>0.0023</b>
2	NYN	3-1x25	0.039	0.8977	0.1592	0.9117	0.0356
3	<b>NYN</b>	<b>3-1x185</b>	0.022	0.1213	0.1550	0.1968	<b>0.0043</b>
4	THW	3-1x95	0.075	0.2362	0.1560	0.2831	0.0212
5	THW	3-1x70	0.050	0.3206	0.1560	0.3565	0.0178

Según la Tabla N° 3.3 podemos determinar que los alimentadores NYN 2(3-1x240 mm<sup>2</sup>) y NYN 3-1x185 mm<sup>2</sup>, tienen una menor impedancia de 0.0023Ω y 0.0043Ω respectivamente; con lo que podemos afirmar que las corrientes armónicas tienden a conducirse por los alimentadores de menor impedancia. En el capítulo 3.3.3

determinaremos los armónicos de corriente que estarían conduciéndose en cada línea de alimentación.

### 3.3.2 Cálculo y análisis de límites de distorsión de demanda

Para los cálculos y análisis de los niveles de distorsión de demanda aplicaremos el estándar IEEE-519; en la Tabla N° 3.4 definimos en el sistema los puntos de acoplamiento común a basarnos para este trabajo.

**Tabla N° 3.4 Puntos de acoplamiento común (Pcc) en el sistema de 440Vac**

Item	Punto de Acoplamiento Común	Equipamiento		Acoplamiento Común
	PCC	Tag (N° asignado)	Equipo	Punto definido
1	PCC-2	100-SE-102	Subestación Eléctrica Interna de la Planta	Llave principal 440Vac (Lado de baja transformador 630kVA), 50kA
2	PCC-3	100-TG-103	Tablero General 440Vac	Llave 1 - 250/630A, 42kA
3	PCC-4		Tablero General 440Vac	Llave 2 - 160/200A, 35kA
4	PCC-5		Tablero General 440Vac	Llave 3 - 160/200A, 35kA
5	PCC-6	100-ME-104	Máquina Extrusora LSE80	Entrada Convertidor AC/DC - 210A
6	PCC-7	100-MER-110	Máquina Extrusora Rotomec	Interruptor Q3.1 (110A) - Convertidor AC/AC

Para determinar los límites de distorsión total de demanda (TDD), en los diferentes puntos del sistema, se hallaron las relaciones  $I_{SC}/I_L$  en dichos puntos definidos. Esta relación está en función de la corriente de corto circuito en dicho punto ( $I_{SC}$ ) y la corriente de demanda máxima sostenida por un período de 15 minutos ( $I_L$ ).

Las corrientes de corto circuito corresponden a los datos de diseño de la instalación, las cuales son las corrientes de falla de mayor magnitud que se pueden presentar en dichos puntos del sistema.

Para cada punto calculamos la relación  $I_{SC}/I_L$  como se indica:

#### 1) Análisis en PCC-2: Llave principal 440Vac (Lado de baja 460Vac transformador 630kVA)

Corriente de corto circuito (diseño): 50kA

Corriente máxima sostenida (medido): 609.62A

La corriente de corto circuito en el lado de baja tensión es igual a 50kA, mediante el analizador de energía conectado en el lado de baja tensión se midió una corriente máxima sostenida de 609.62A. Con los valores se obtiene la relación  $I_{SC}/I_L = 82.02$ , tamaño relativo del sistema con respecto a la carga, este valor se encuentra entre 50 a 100, lo cual determina un límite máximo de TDD de 12% según la norma IEEE 519-1992.

#### 2) Análisis en PCC-3: Llave 1 - 250/630A, 42kA (Tablero General 440Vac)

Corriente de corto circuito (diseño): 42kA

Corriente máxima sostenida (medido): 275A

La corriente de corto circuito en la llave 1 es 42kA, mediante el analizador de energía se midió una corriente máxima de 275A; con los valores se obtiene la relación  $I_{SC}/I_L = 152.73$ , tamaño relativo del sistema con respecto a la carga, este valor se encuentra entre 100 a 1000, lo cual determina un límite máximo de **TDD** de **15%** según la norma IEEE 519-1992.

### 3) Análisis en PCC-4: Llave 2 - 160/200A, 35kA (Tablero General 440Vac)

Corriente de corto circuito (diseño): 35kA

Corriente máxima sostenida (medido): 191.22A

La corriente de corto circuito en la llave 2 es 35kA, mediante el analizador de energía se midió una corriente máxima de 192.22A; con los valores se obtiene la relación  $I_{SC}/I_L = 183.04$ , tamaño relativo del sistema con respecto a la carga, este valor se encuentra entre 100 a 1000, lo cual determina un límite máximo de **TDD** de **15%** según la norma IEEE 519-1992.

### 4) Análisis en PCC-5: Llave 3 - 160/200A, 35kA (Tablero General 440Vac)

Corriente de corto circuito (diseño): 35kA

Corriente máxima sostenida (medido): 193.06A

La corriente de corto circuito en la llave 3 es 35kA, mediante el analizador de energía se midió una corriente máxima de 193.06A; con los valores se obtiene la relación  $I_{SC}/I_L = 181.29$ , tamaño relativo del sistema con respecto a la carga, este valor se encuentra entre 100 a 1000, lo cual determina un límite máximo de **TDD** de **15%** según la norma IEEE 519-1992.

### 5) Análisis en PCC-6: Entrada Convertidor AC/DC – 210A (Máquina Extrusora LSE80)

Corriente de corto circuito (diseño): 25kA

Corriente máxima sostenida (medido): 137.49A

La corriente de corto circuito en la entrada de alimentación del convertidor AC/DC es 25kA, mediante el analizador de energía se midió una corriente máxima de 137.49A; con los valores se obtiene la relación  $I_{SC}/I_L = 181.83$ , tamaño relativo del sistema con respecto a la carga, este valor se encuentra entre 100 a 1000, lo cual determina un límite máximo de **TDD** de **15%** según la norma IEEE 519-1992.

### 6) Análisis en PCC-7: Interruptor Q3.1 (110A) - Convertidor AC/AC (Máquina Extrusora Rotomec)

Corriente de corto circuito (diseño): 20kA

Corriente máxima sostenida (medido): 82.81A

La corriente de corto circuito en el interruptor Q3.1 de 110A es 20kA, mediante el analizador de energía se midió una corriente máxima de 82.81A; con los valores se obtiene la relación  $I_{SC}/I_L = 241.52$ , tamaño relativo del sistema con respecto a la carga, este valor se encuentra entre 100 a 1000, lo cual determina un límite máximo de **TDD** de **15%** según la norma IEEE 519-1992.

### 3.3.3 Análisis y resultados de medición de distorsión armónica

Para los análisis de medición de distorsión armónica se utiliza una medida de posición como lo es el percentil. La metodología de comparación establece que de los valores con 95% de probabilidad, se debe comparar con el valor contractual establecido [11].

Específicamente, el percentil 95 significa que el 95% de los datos analizados serán menores al valor resultante y el 5% restante serán superiores a éste.

El percentil 95% es un valor apropiado para planificación y gestión de medidas ya que asegura la disponibilidad del valor real de una serie de datos recopilados.

En base a las mediciones realizadas de acuerdo a la Tabla N° 3.4, se realiza los análisis de distorsión armónica total de tensión y corriente; como también el cálculo de distorsión total de demanda en los puntos de acoplamiento común ya indicados.

#### 1) Llave principal 440Vac (Lado de baja 460Vac transformador 630kVA)

En la **Tabla N° 3.5** se muestra que, la distorsión armónica total de tensión en la llave principal se encuentra por debajo del límite establecido por la norma NTCSE, en el cual se puede observar un THDv de **3.2%** que es menor a un **8%** normalizado, lo cual da cumplimiento con respecto a los límites de distorsión de tensión en este punto del sistema.

La distorsión total de demanda en este punto presenta un **19.41%**, el cual se encuentra por encima del límite establecido por la norma IEEE 519, según lo calculado en el numeral 3.3.2, inciso 1), la TDD no debe ser más del **12%**, observándose que en la fase 3 se presentan valores de TDD que llegan hasta el 20.59% y está por encima del límite permitido.

El cálculo de la distorsión total de demanda (TDD) se ha calculado con la ecuación (3.1).

$$TDD(\%) = THD_i(\%) \times \frac{I_F}{I_{Max}} \quad (3.1)$$

En conclusión podemos afirmar que excede el límite permisible y no cumple con el estándar.

**Tabla N° 3.5 Resultados: Llave principal 440Vac**

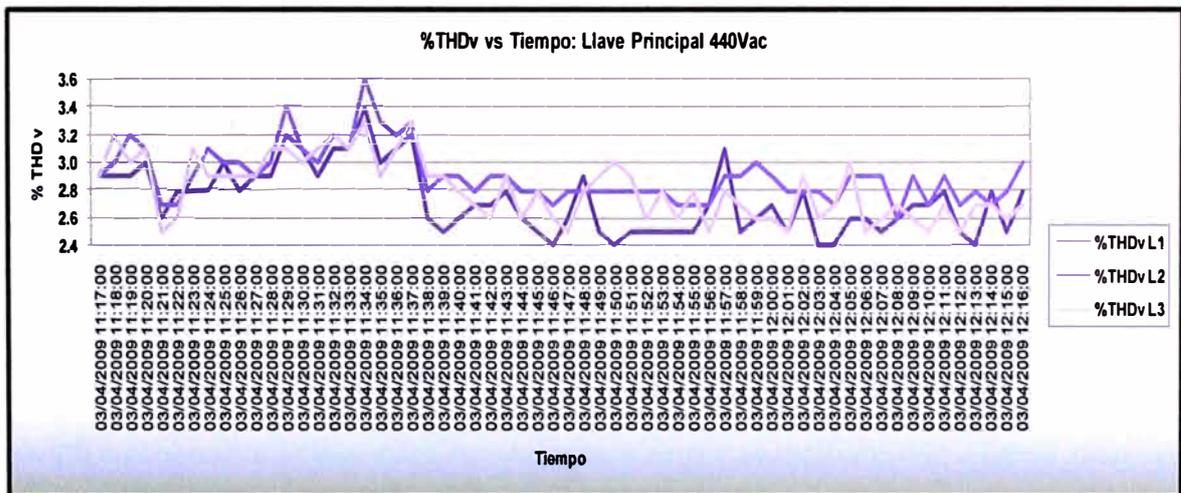
<b>Distorsión armónica total de tensión (medida)</b>			
	<b>THDv L1</b>	<b>THDv L2</b>	<b>THDv L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	2.73	2.91	2.81
<b>Máximo (%)</b>	3.40	3.60	3.30
<b>Mínimo (%)</b>	2.40	2.60	2.50
<b>Desviación estándar</b>	0.24	0.19	0.22
<b>Mediana (%)</b>	2.7	2.9	2.8
<b>Moda (%)</b>	2.5	2.8	2.9
<b>Percentil 95%</b>	3.2		

<b>Distorsión armónica total de corriente (medida)</b>			
	<b>THDi Fase L1</b>	<b>THDi Fase L2</b>	<b>THDi Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	21.64	21.27	22.27
<b>Máximo (%)</b>	27.90	26.60	28.10
<b>Mínimo (%)</b>	17.90	18.90	19.70
<b>Desviación estándar</b>	1.92	1.40	1.59
<b>Mediana (%)</b>	21.5	21.3	22.2
<b>Moda (%)</b>	22.2	20.4	22.5
<b>Percentil 95%</b>	24.2		

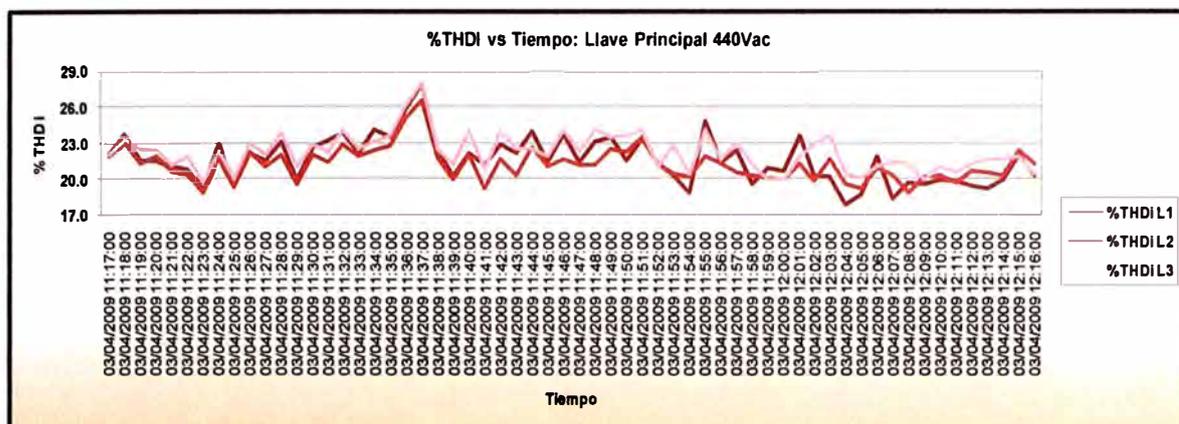
<b>Distorsión total de demanda (calculado)</b>			
	<b>TDD Fase L1</b>	<b>TDD Fase L2</b>	<b>TDD Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	16.81	16.57	17.44
<b>Máximo (%)</b>	19.56	17.90	20.59
<b>Mínimo (%)</b>	13.58	14.39	15.01
<b>Desviación estándar</b>	1.56	1.12	1.43
<b>Mediana (%)</b>	17.80	17.25	18.05
<b>Moda (%)</b>	19.82	18.79	17.61
<b>Percentil 95%</b>	19.41		



**Fig. 3.14 Distorsión armónica total de tensión: Llave principal – 440Vac**

En la Fig. 3.14 se muestra el comportamiento de la distorsión armónica total de tensión en donde este alcanza una distorsión máxima de 3.6% y una distorsión mínima del 2.4%, presentando una tendencia del 2.8% con respecto a la distorsión armónica de tensión. También en la Fig. 3.15 se muestra la distorsión armónica total de corriente por fase, en donde ésta alcanza una distorsión máxima del 28.10% y una distorsión mínima del 17.9%,

presentando una tendencia del 22% con respecto a la distorsión armónica de corriente durante el tiempo de medición.



**Fig. 3.15 Distorsión armónica total de corriente: Llave principal – 440Vac**

**Tabla N° 3.6 Resultados Distorsión Armónica individual: Llave Principal 440Vac**

DISTRORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL		
03/04/2009 Equivalente		
ARMÓNICO	%V 3 $\phi$ (%Vn)	%I 3 $\phi$ (%In)
THD	3.20	24.20
H2	0.15	1.07
H3	0.27	2.02
H4	0.08	0.51
H5	2.68	21.97
H6	0.14	0.11
H7	1.12	8.12
H8	0.06	0.46
H9	0.21	1.12
H10	0.15	0.14
H11	0.56	3.70
H12	0.10	0.15
H13	0.28	1.84
H14	0.21	0.64
H15	0.28	1.05
H16	0.11	0.20
H17	0.42	1.92
H18	0.17	0.12
H19	0.25	1.37
H20	0.10	0.20
H21	0.30	0.90
H22	0.22	0.27
H23	0.50	1.32
H24	0.14	0.21
H25	0.28	0.88
H26	0.11	0.17
H27	0.27	0.73
H28	0.12	0.24
H29	0.43	1.34
H30	0.09	0.19

Se puede observar en la Tabla N° 3.6, todos los armónicos individuales de tensión y corriente desde el 2° hasta el 30°, como resultado de la medición con referencia a la llave principal en 440Vac.

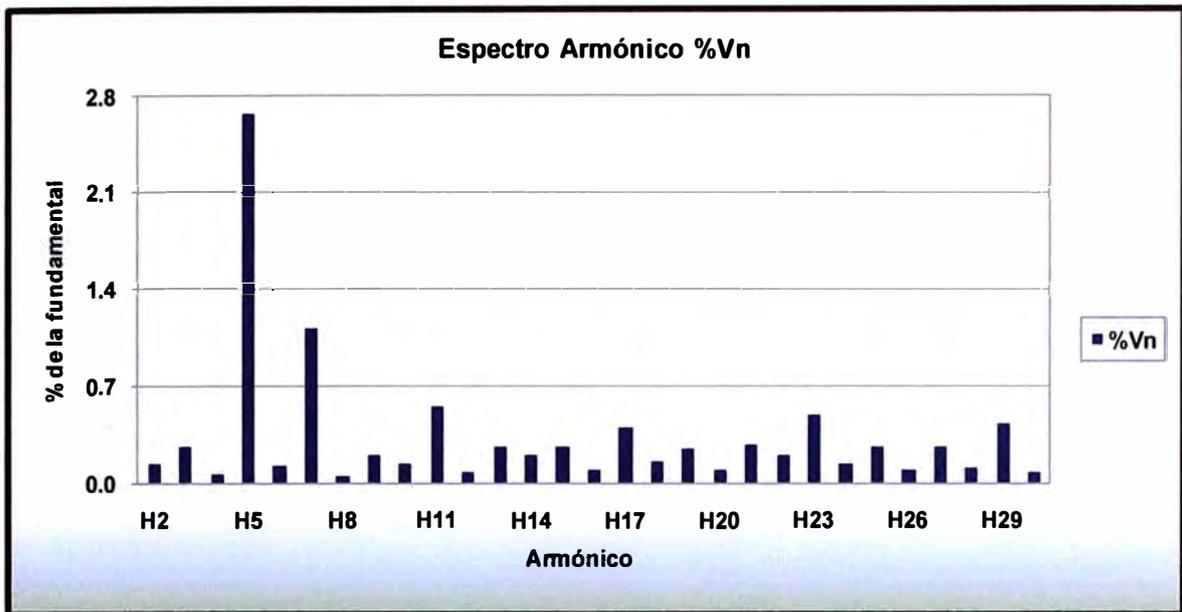


Fig. 3.16 Espectro armónico individual de tensión: Llave Principal 440Vac

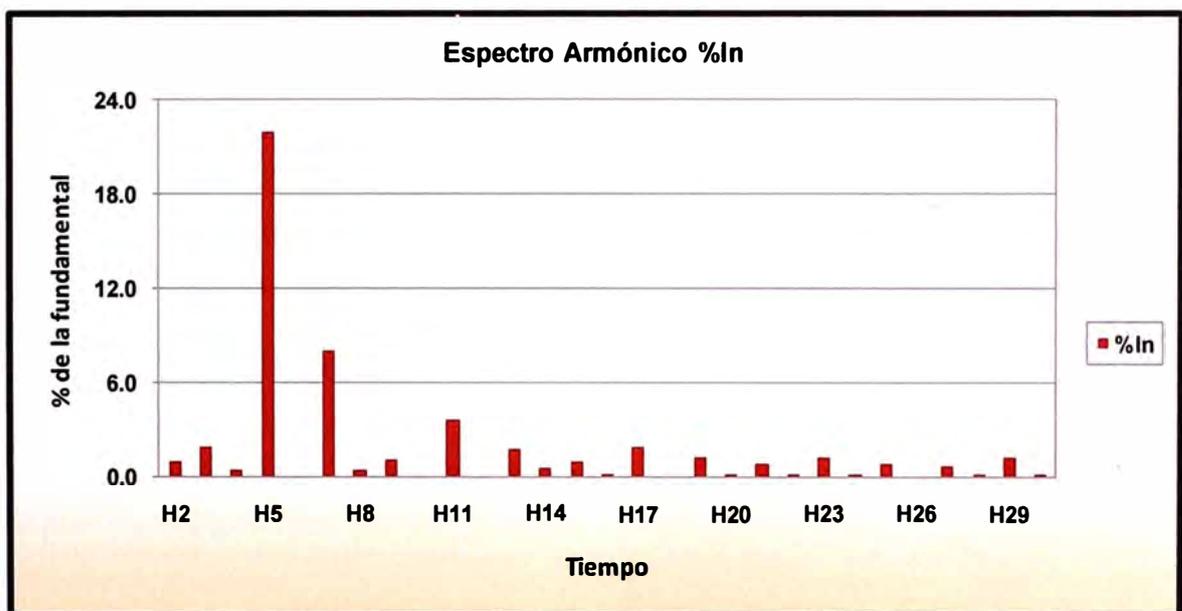


Fig. 3.17 Espectro armónico individual de corriente: Llave Principal 440Vac

La distorsión total de demanda (TDD), para este punto del sistema, de acuerdo a las normas determina un límite de 12% y a su vez establece los límites para los armónicos individuales con respecto al TDD en %, el cual no es más del 10% para todo  $h < 11$  y en nuestro caso observamos que el armónico 5° está por encima del límite con un 21.97%, para el armónico 7° está por debajo del límite con un 8.12%. Además para los armónicos individuales entre el  $11 \leq h < 17$  la norma establece un límite del 4.5%, observando así mismo que el armónico 11°, está por debajo del límite con un 3.7%.

Para los armónicos entre  $17 \leq h < 23$ , el límite es del **4%**, observándose que tenemos el armónico  $17^\circ$  por debajo del límite con un **1.92%** y la armónica  $19^\circ$  por debajo del límite con **1.37%**. Por último los armónicos individuales que están entre  $23 \leq h < 35$  el límite es del **1.5%**, observándose que para el armónico  $23^\circ$  se encuentra por debajo del límite con un **1.32%**.

En conclusión podemos mencionar que para la distorsión de corriente con referencia a este punto del sistema solo el **armónico  $5^\circ$**  excede el límite permisible y no cumple con el estándar.

Para los armónicos individuales de tensión, la norma IEEE 519 determina un límite del **3%**, en sistemas hasta 69kV, por lo tanto podemos observar que en este caso el **armónico  $5^\circ$**  que es de mayor incidencia, está por debajo del límite con un **2.68%**. Para el caso de la NTCSE, el límite permisible del armónico individual de tensión es **6%** para sistemas de media y baja tensión; por lo que también el **armónico  $5^\circ$**  se encuentra debajo de lo permisible. En conclusión con referencia a la distorsión por tensión, el **armónico  $5^\circ$**  cumple con los estándares.

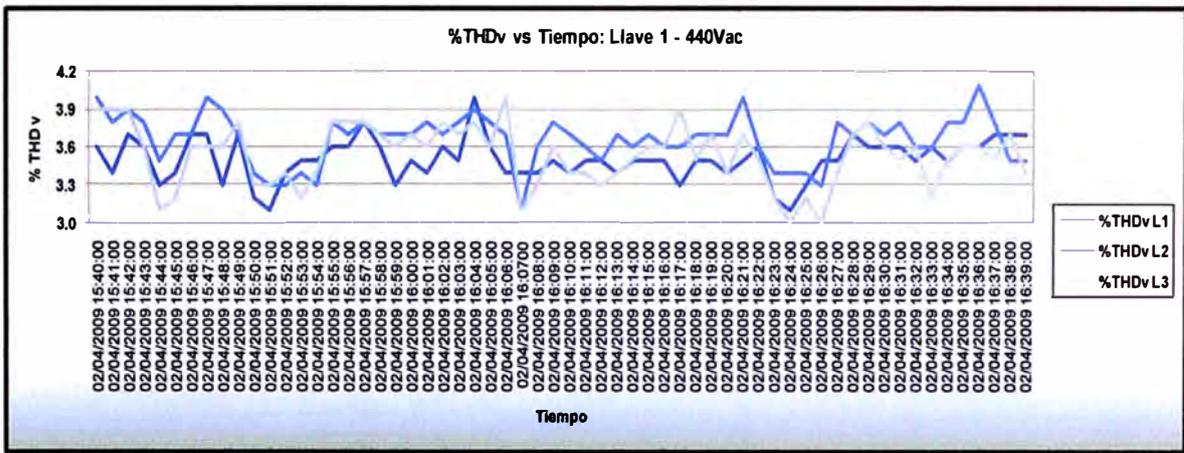
## 2) Llave 1 - 250/630A, 42kA (Tablero General 440Vac)

**Tabla N° 3.7 Resultados: Llave 1 (Tablero general 440Vac)**

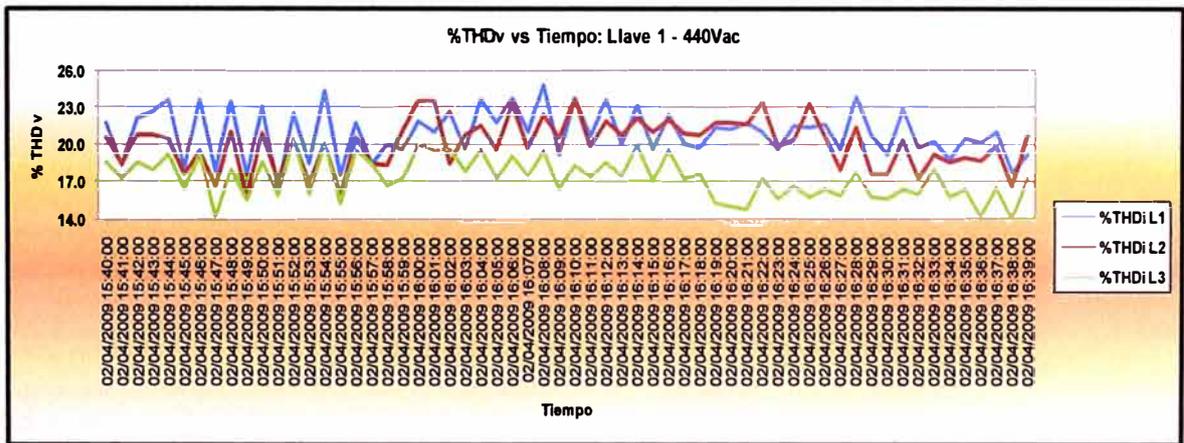
<b>Distorsión armónica total de tensión (medida)</b>			
	<b>THDv L1</b>	<b>THDv L2</b>	<b>THDv L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	3.51	3.67	3.54
<b>Máximo (%)</b>	4.00	4.10	4.00
<b>Mínimo (%)</b>	3.10	3.10	3.00
<b>Desviación estándar</b>	0.16	0.20	0.24
<b>Mediana (%)</b>	3.5	3.7	3.6
<b>Moda (%)</b>	3.5	3.7	3.6
<b>Percentil 95%</b>	3.9		
<b>Distorsión armónica total de corriente (medida)</b>			
	<b>THDi Fase L1</b>	<b>THDi Fase L2</b>	<b>THDi Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	21.02	20.22	17.48
<b>Máximo (%)</b>	24.90	23.90	20.60
<b>Mínimo (%)</b>	16.60	15.90	14.10
<b>Desviación estándar</b>	1.99	2.00	1.65
<b>Mediana (%)</b>	21.1	20.7	17.4
<b>Moda (%)</b>	23.7	20.7	17.4
<b>Percentil 95%</b>	23.7		
<b>Distorsión total de demanda (calculado)</b>			
	<b>TDD Fase L1</b>	<b>TDD Fase L2</b>	<b>TDD Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	20.33	19.49	16.88
<b>Máximo (%)</b>	19.96	18.82	15.85
<b>Mínimo (%)</b>	15.83	15.28	13.26
<b>Desviación estándar</b>	0.31	0.24	0.23
<b>Mediana (%)</b>	17.76	18.56	14.76
<b>Moda (%)</b>	21.60	18.48	14.64
<b>Percentil 95%</b>	16.90		

En la **Tabla N° 3.7** se muestra que, la distorsión armónica total de tensión en la llave 1 se encuentra por debajo del límite establecido por la norma NTCSE, en el cual se puede observar un THDv de **3.9%** que es menor a un **8%** normalizado, lo cual da cumplimiento con respecto a los límites de distorsión de tensión en este punto del sistema.

La distorsión total de demanda en este punto del sistema presenta un **16.9%**, el cual se encuentra por encima del límite establecido por la norma IEEE 519, según los cálculos realizados en el numeral 3.3.2, inciso 2), la TDD no debe ser más del **15%**, observándose que en la fase 1 se presentan valores de TDD que llegan hasta el **20.33%** y está por encima del límite permitido. En conclusión podemos afirmar que excede el límite permisible y no cumple con el estándar.



**Fig. 3.18** Distorsión armónica total de tensión: Llave 1 - 440Vac



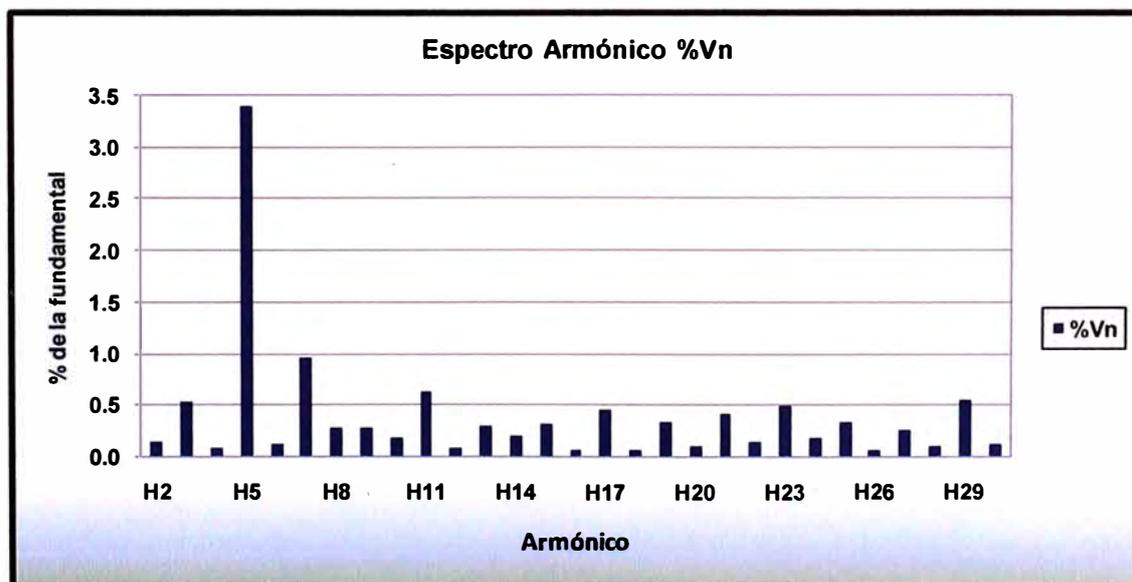
**Fig. 3.19** Distorsión armónica total de corriente: Llave 1 - 440Vac

En la Fig. 3.18 se muestra el comportamiento de la distorsión armónica total de tensión en donde este alcanza una distorsión máxima de 4.1% y una distorsión mínima del 3%, presentando una tendencia del 3.6% con respecto a la distorsión armónica de tensión. También, en la Fig. 3.19 se muestra la distorsión armónica total de corriente por fase, en

donde ésta alcanza una distorsión máxima del 24.9% y una distorsión mínima del 14.1%, presentando una tendencia del 20.7% con respecto a la distorsión armónica de corriente durante el tiempo de medición.

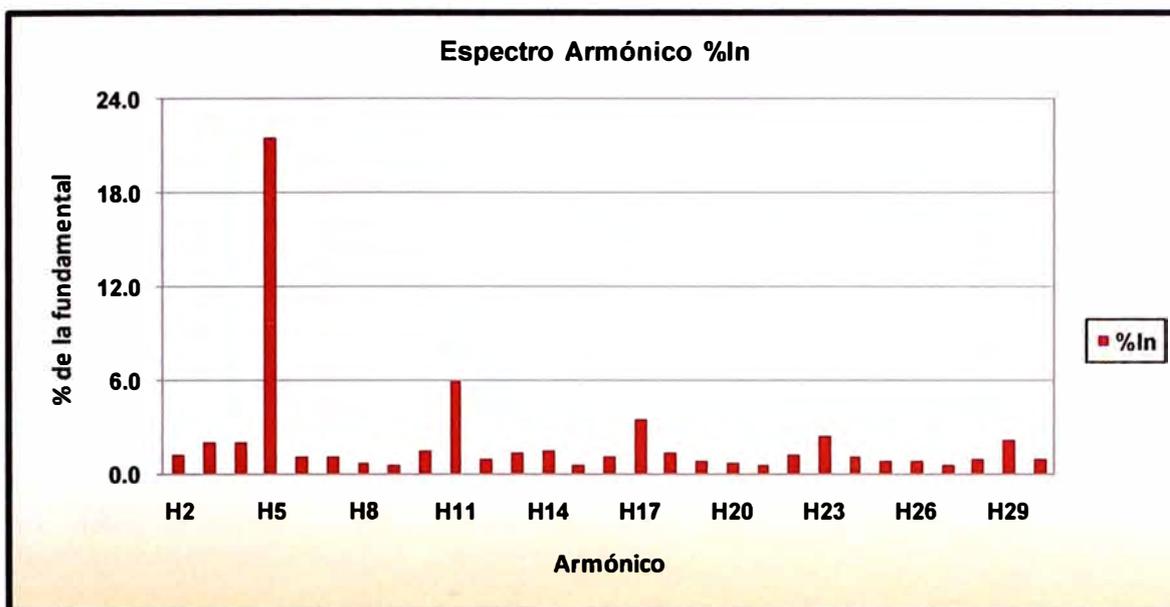
**Tabla N° 3.8 Resultados Distorsión Armónica individual: Llave 1 - 440Vac**

<b>DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL</b>		
<b>02/04/2009 Equivalente</b>		
<b>ARMÓNICO</b>	<b>%V 3<math>\phi</math> (%Vn)</b>	<b>%I 3<math>\phi</math> (%In)</b>
<b>THD</b>	<b>3.90</b>	<b>23.70</b>
H2	0.16	1.31
H3	0.54	2.13
H4	0.10	2.07
H5	3.41	21.54
H6	0.13	1.22
H7	0.97	1.23
H8	0.29	0.80
H9	0.29	0.71
H10	0.19	1.58
H11	0.64	5.97
H12	0.09	1.09
H13	0.30	1.41
H14	0.21	1.61
H15	0.33	0.71
H16	0.09	1.22
H17	0.47	3.60
H18	0.07	1.49
H19	0.34	0.96
H20	0.11	0.79
H21	0.42	0.71
H22	0.16	1.39
H23	0.51	2.59
H24	0.19	1.21
H25	0.35	0.95
H26	0.07	0.98
H27	0.27	0.70
H28	0.11	1.09
H29	0.56	2.33
H30	0.14	1.05



**Fig. 3.20 Espectro armónico individual de tensión: Llave 1 - 440Vac**

Se puede observar en la Tabla N° 3.8, todos los armónicos individuales de tensión y corriente desde el 2° hasta el 30°, como resultado de la medición con referencia a la llave 1 en 440Vac.



**Fig. 3.21 Espectro armónico individual de corriente: Llave 1 - 440Vac**

La distorsión total de demanda (TDD) para este punto del sistema, de acuerdo a la norma determina un límite de 15% y a su vez establece los límites para los armónicos individuales con respecto al TDD en %, el cuál es no más del 12% para todo  $h < 11$  y en nuestro caso observamos que el armónico 5° está por encima del límite con un 21.54%. Además para los armónicos individuales entre el  $11 \leq h < 17$ , la norma establece un límite del 5.5%, observando así mismo el armónico 11° está por encima del límite con un 5.97%. Para los armónicos entre  $17 \leq h < 23$  el límite es del 5%, observándose que tenemos el armónico 17° por debajo del límite con un 3.6%. Por último los armónicos individuales que están entre  $23 \leq h < 35$  el límite es del 2%, observándose que para el armónico 23° tenemos por encima del límite con un 2.59% y para el armónico 29° se encuentra por encima del límite con un 2.33%.

En conclusión podemos mencionar que para la distorsión de corriente con referencia a este punto del sistema es crítico, ya que los armónicos 5°, 11°, 23° y 29° exceden el límite permisible y no cumplen con el estándar.

Para los armónicos individuales de tensión, la norma IEEE 519 determina un límite del 3%, en sistemas hasta 69kV, por lo tanto podemos determinar que en este caso el armónico 5°, está sobre el límite con un 3.41%. Para el caso de la NTCSE, el límite

permisible del armónico individual de tensión es 6%, por lo tanto el **armónico 5°** se encuentra debajo de lo permisible. En conclusión con referencia a la distorsión por tensión, el **armónico 5°** no cumple con el estándar IEEE 519, más si cumple la NTCSE.

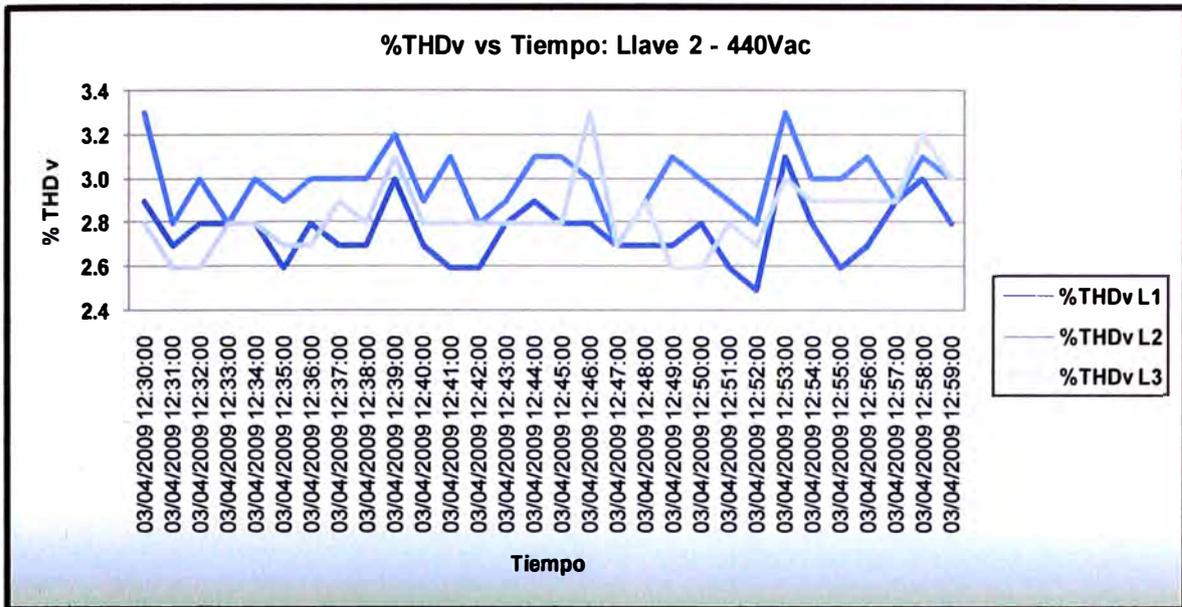
### 3) Llave 2 - 160/200A, 35kA (Tablero General 440Vac)

**Tabla N° 3.9 Resultados Llave 2 (Tablero general 440Vac)**

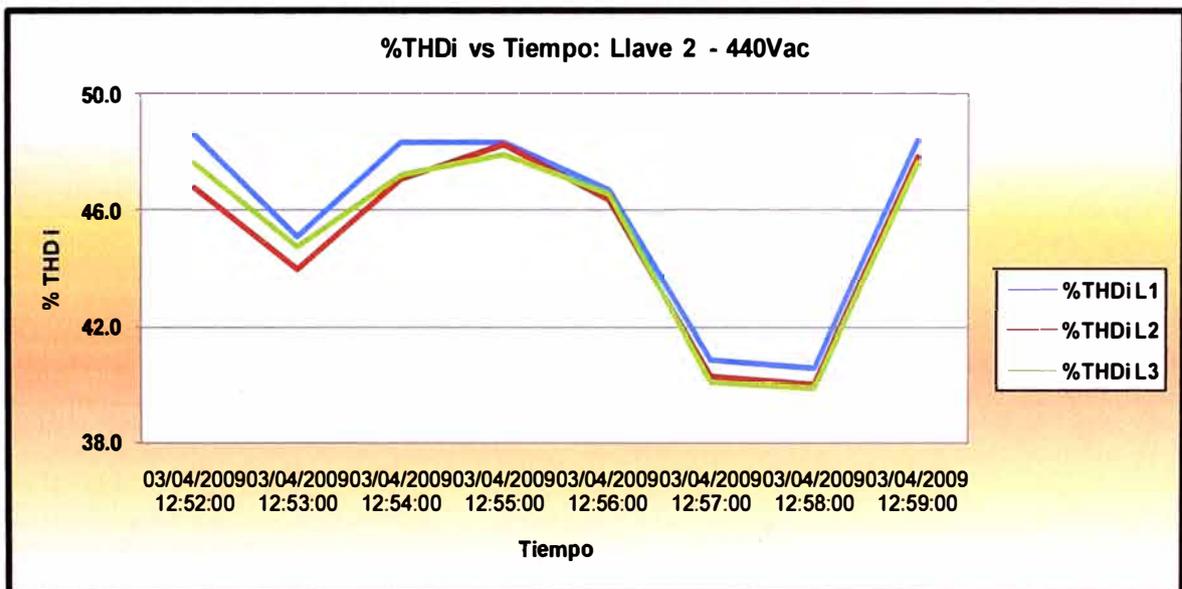
<b>Distorsión armónica total de tensión (medida)</b>			
	<b>THDv L1</b>	<b>THDv L2</b>	<b>THDv L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	2.76	2.99	2.83
<b>Máximo (%)</b>	3.10	3.30	3.30
<b>Mínimo (%)</b>	2.50	2.70	2.60
<b>Desviación estándar</b>	0.14	0.14	0.17
<b>Mediana (%)</b>	2.8	3.0	2.8
<b>Moda (%)</b>	2.8	3.0	2.8
<b>Percentil 95%</b>	<b>3.16</b>		
<b>Distorsión armónica total de corriente (medida)</b>			
	<b>THDi Fase L1</b>	<b>THDi Fase L2</b>	<b>THDi Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	42.81	42.17	41.30
<b>Máximo (%)</b>	48.60	48.30	47.90
<b>Mínimo (%)</b>	27.70	24.40	23.70
<b>Desviación estándar</b>	7.22	7.73	8.81
<b>Mediana (%)</b>	45.9	46.4	45.7
<b>Moda (%)</b>	48.3	47.1	47.6
<b>Percentil 95%</b>	<b>48.12</b>		
<b>Distorsión total de demanda (calculado)</b>			
	<b>TDD Fase L1</b>	<b>TDD Fase L2</b>	<b>TDD Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	35.47	34.96	34.18
<b>Máximo (%)</b>	45.77	45.42	45.20
<b>Mínimo (%)</b>	22.06	19.61	18.98
<b>Desviación estándar</b>	6.93	7.41	8.42
<b>Mediana (%)</b>	41.27	41.93	40.85
<b>Moda (%)</b>	43.43	42.57	42.55
<b>Percentil 95%</b>	<b>42.76</b>		

En la **Tabla N° 3.9** se muestra que, la distorsión armónica total de tensión en la llave 2 se encuentra por debajo del límite establecido por la norma NTCSE, en el cual se puede observar un THDv de **3.16%** que es menor a un **8%** normalizado, lo cual da cumplimiento con respecto a los límites de distorsión de tensión en este punto del sistema.

La distorsión total de demanda en este punto presenta un **42.76%**, el cual se encuentra por encima del límite establecido por la norma IEEE 519, según lo calculado en el numeral 3.3.2, inciso 3), la TDD no debe ser más del **15%**, observándose que en la fase 1 se presentan valores de TDD que llegan hasta el **45.77%** y está por encima del límite permitido. En conclusión podemos afirmar que el TDD excede el límite permisible y no cumple con el estándar IEEE 519.



**Fig. 3.22 Distorsión armónica total de tensión Llave 2 - 440Vac**



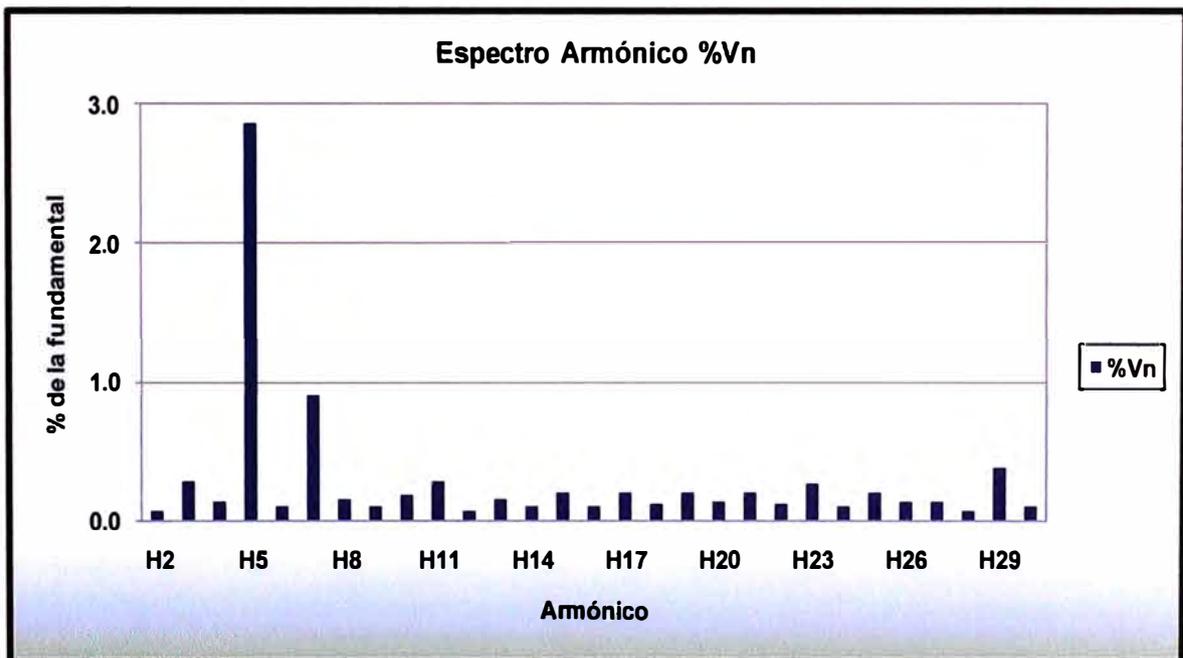
**Fig. 3.23 Distorsión armónica total de corriente Llave 2 - 440Vac**

En la Fig. 3.22 se muestra el comportamiento de la distorsión armónica total de tensión en donde este alcanza una distorsión máxima de 3.3% y una distorsión mínima del 2.5%, presentando una tendencia del 2.8% con respecto a la distorsión armónica de tensión.

También en la Fig. 3.23 se muestra la distorsión armónica total de corriente por fase, en donde ésta alcanza una distorsión máxima del 48.6% y una distorsión mínima del 23.7%, presentando una tendencia del 47% con respecto a la distorsión armónica de corriente durante el tiempo de medición.

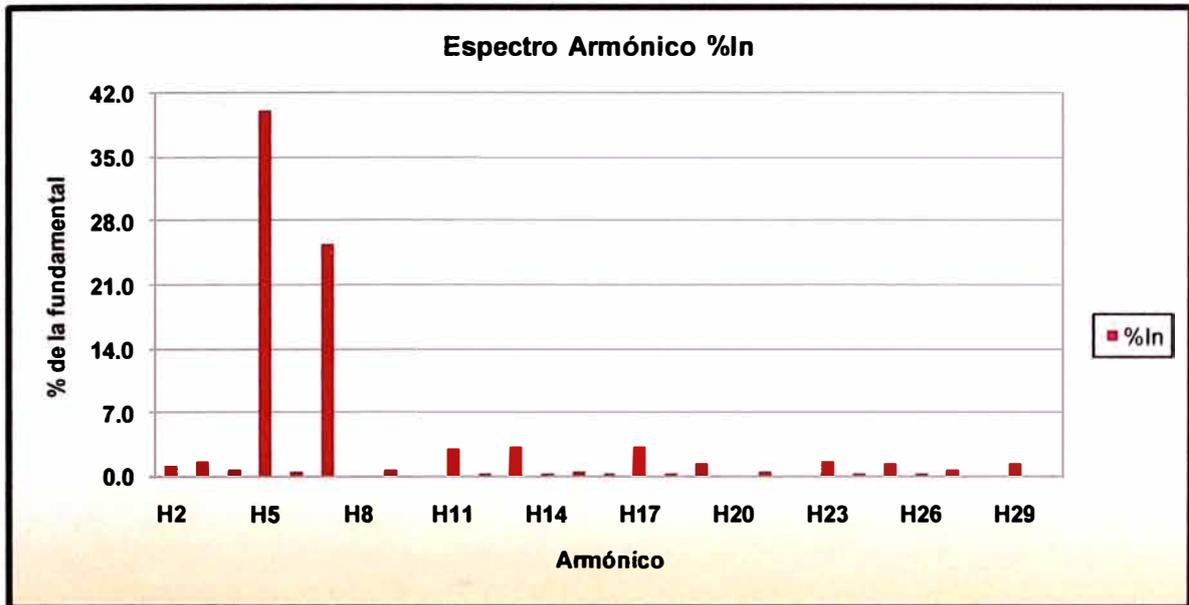
**Tabla N° 3.10 Resultados Distorsión Armónica individual: Llave 2 - 440Vac**

<b>DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL</b>		
<b>03/04/2009 Equivalente</b>		
<b>ARMÓNICO</b>	<b>%V 3<math>\phi</math> (%Vn)</b>	<b>%I 3<math>\phi</math> (%In)</b>
THD	3.16	48.12
H2	0.08	1.23
H3	0.29	1.76
H4	0.15	0.90
H5	2.86	40.21
H6	0.11	0.62
H7	0.91	25.50
H8	0.17	0.23
H9	0.12	0.74
H10	0.19	0.22
H11	0.30	3.03
H12	0.09	0.33
H13	0.17	3.38
H14	0.11	0.35
H15	0.21	0.60
H16	0.12	0.27
H17	0.21	3.23
H18	0.13	0.28
H19	0.20	1.40
H20	0.14	0.20
H21	0.22	0.69
H22	0.13	0.22
H23	0.27	1.78
H24	0.12	0.27
H25	0.22	1.43
H26	0.15	0.28
H27	0.15	0.70
H28	0.08	0.21
H29	0.39	1.44
H30	0.12	0.12



**Fig. 3.24 Espectro armónico individual de tensión: Llave 2 - 440Vac**

Se puede observar en la **Tabla N° 3.10**, todos los armónicos individuales de tensión y corriente desde el 2° hasta el 30°, como resultado de la medición con referencia a la llave 2 en 440Vac.



**Fig. 3.25 Espectro armónico individual de corriente: Llave 2 - 440Vac**

La distorsión total de demanda (TDD) para este punto del sistema, de acuerdo a la norma determina un límite de **15%** y a su vez establece los límites para los armónicos individuales con respecto al TDD en %, el cual no es más del **12%** para todo  $h < 11$  y en nuestro caso observamos que el armónico 5° está por encima del límite con un **40.21%**, para el armónico 7° está por encima del límite con un **25.5%**. Además para los armónicos individuales entre el  $11 \leq h < 17$ , la norma establece un límite del **5.5%**, observando así mismo el armónico 11° y 13° se encuentran por debajo del límite con un **3.03** y **3.38%** respectivamente.

Para los armónicos entre  $17 \leq h < 23$ , el límite es del **5%**, observándose que tenemos el armónico 17° por debajo del límite con un **3.23%**. Por último los armónicos individuales que están entre  $23 \leq h < 35$  el límite es del **2%**, observándose que para el armónico 23° se encuentra por debajo del límite con un **1.78%** y para el armónico 29° se encuentra por debajo del límite con un **1.44%**. En conclusión podemos mencionar que para la distorsión de corriente con referencia a este punto del sistema, los **armónicos 5° y 7°** exceden el límite permisible y no cumplen con el estándar.

Para los armónicos individuales de tensión, la norma IEEE 519 determina un límite del **3%**, en sistemas hasta 69kV, por lo tanto podemos determinar que en este caso el

**armónico 5º**, está por debajo del límite con un **2.86%**. Para el caso de la NTCSE, el límite permisible del armónico individual de tensión es **6%**, por lo tanto el **armónico 5º** se encuentra debajo de lo permisible. En conclusión con referencia a la distorsión por tensión, el **armónico 5º** cumple con los estándares.

4) **Llave 3 - 160/200A, 35kA (Tablero General 440Vac)**

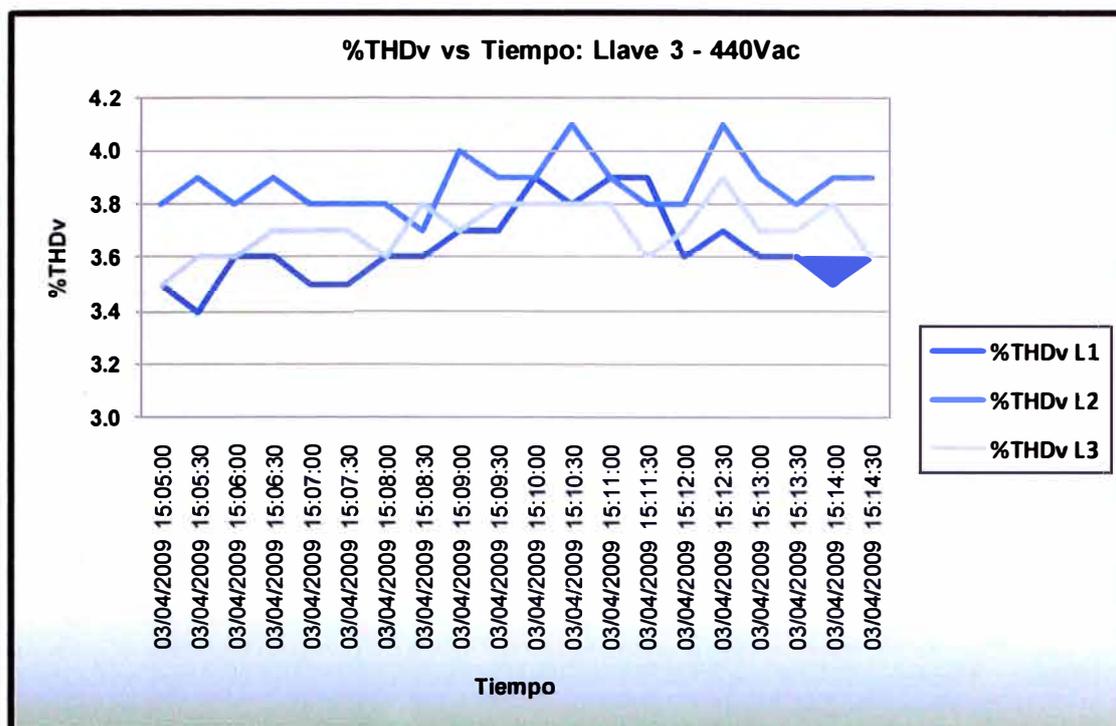
**Tabla N° 3.11 Resultados Llave 3 (Tablero general 440Vac)**

<b>Distorsión armónica total de tensión (medida)</b>			
	<b>THDv L1</b>	<b>THDv L2</b>	<b>THDv L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	3.64	3.88	3.71
<b>Máximo (%)</b>	3.90	4.10	3.90
<b>Mínimo (%)</b>	3.40	3.70	3.50
<b>Desviación estándar</b>	0.14	0.10	0.10
<b>Mediana (%)</b>	3.6	3.9	3.7
<b>Moda (%)</b>	3.6	3.8	3.7
<b>Percentil 95%</b>	<b>3.91</b>		
<b>Distorsión armónica total de corriente (medida)</b>			
	<b>THDi Fase L1</b>	<b>THDi Fase L2</b>	<b>THDi Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	9.50	9.48	9.58
<b>Máximo (%)</b>	11.40	11.70	11.80
<b>Mínimo (%)</b>	7.70	8.00	7.60
<b>Desviación estándar</b>	1.29	1.19	1.34
<b>Mediana (%)</b>	9.9	9.3	9.4
<b>Moda (%)</b>	8.1	8.2	8.5
<b>Percentil 95%</b>	<b>11.70</b>		
<b>Distorsión total de demanda (calculado)</b>			
	<b>TDD Fase L1</b>	<b>TDD Fase L2</b>	<b>TDD Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	8.07	8.04	8.12
<b>Máximo (%)</b>	9.87	10.07	10.18
<b>Mínimo (%)</b>	6.13	6.25	6.00
<b>Desviación estándar</b>	1.30	1.21	1.39
<b>Mediana (%)</b>	9.05	8.47	8.66
<b>Moda (%)</b>	5.61	5.66	7.71
<b>Percentil 95%</b>	<b>11.03</b>		

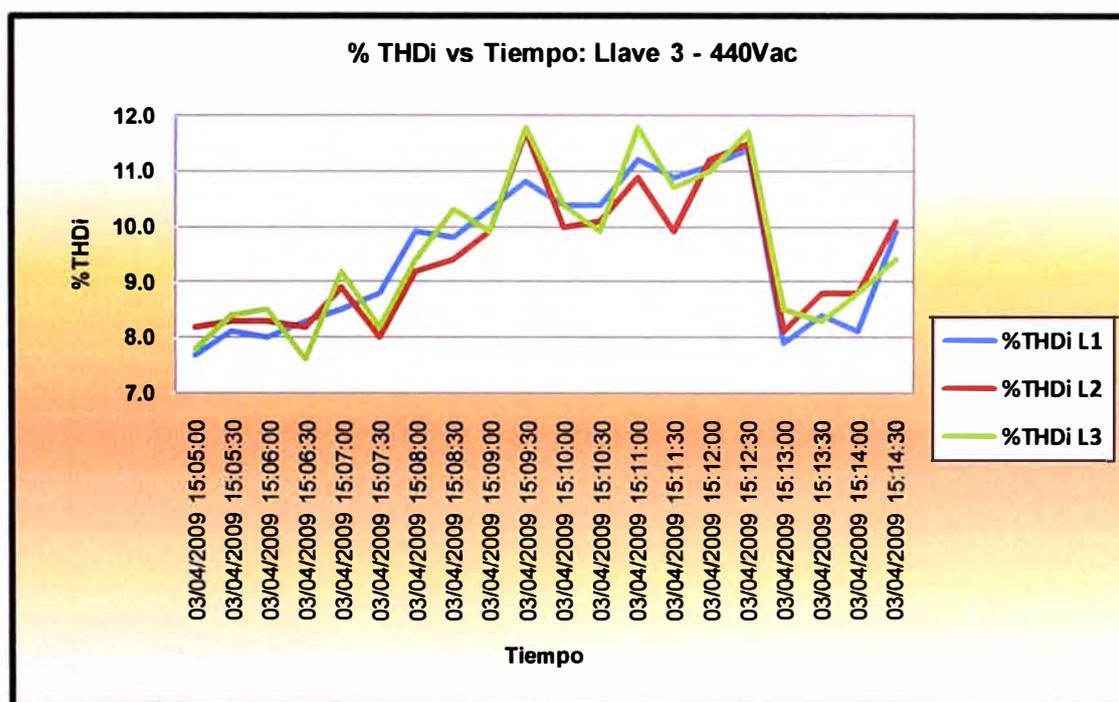
En la **Tabla N° 3.11** se muestra que, la distorsión armónica total de tensión en la llave 3 se encuentra por debajo del límite establecido por la norma NTCSE, en el cual se puede observar un THDv de **3.91%** que es menor a un **8%** normalizado, lo cual da cumplimiento con respecto a los límites de distorsión de tensión en este punto del sistema.

La distorsión total de demanda en este punto presenta un **11.03%**, el cual se encuentra por debajo del límite establecido por la norma IEEE 519, según lo calculado en el numeral 3.3.2, inciso 4), la TDD no debe ser más del **15%**.

En conclusión podemos afirmar que la distorsión total de demanda (TDD) para este caso, se encuentra dentro del límite permisible y cumple con el estándar.



**Fig. 3.26 Distorsión armónica total de tensión: Llave 3 - 440Vac**



**Fig. 3.27 Distorsión armónica total de corriente: Llave 3 - 440Vac**

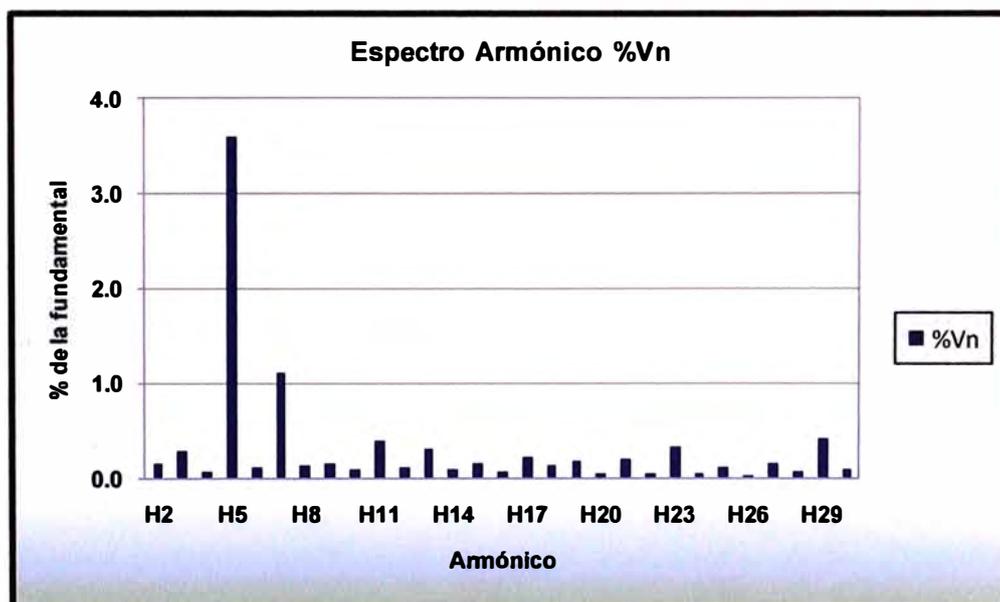
En la Fig. 3.26 se muestra el comportamiento de la distorsión armónica total de tensión en donde este alcanza una distorsión máxima de 4.1% y una distorsión mínima del 3.4%, presentando una tendencia del 3.7% con respecto a la distorsión armónica de tensión.

También en la Fig. 3.27 se muestra la distorsión armónica total de corriente por fase, en donde ésta alcanza una distorsión máxima del 11.8% y una distorsión mínima del 7.6%,

presentando una tendencia del 8.2% con respecto a la distorsión armónica de corriente durante el tiempo de medición.

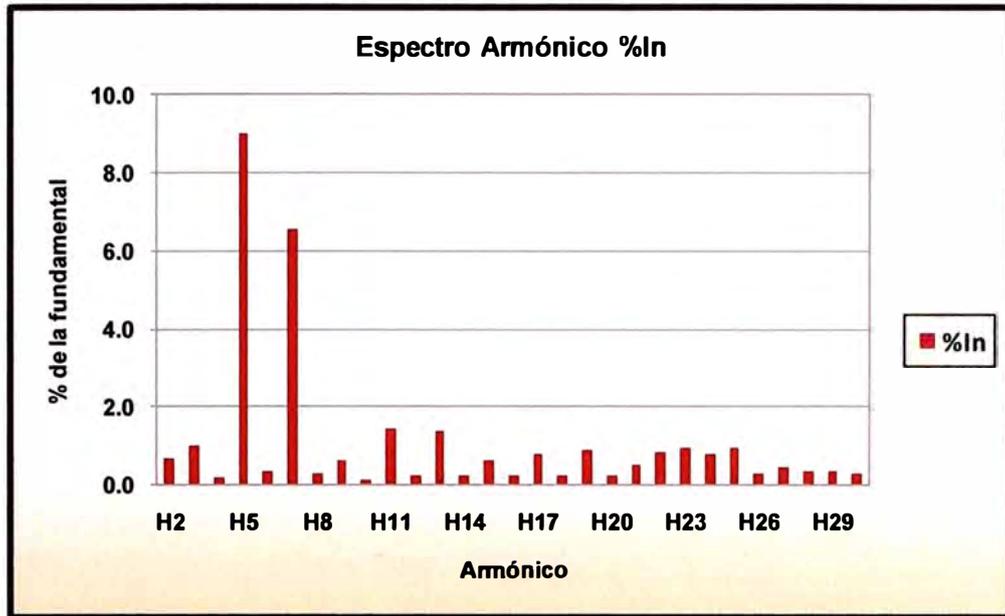
**Tabla N° 3.12 Resultados Distorsión Armónica individual: Llave 3 - 440Vac**

<b>DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL</b>		
<b>03/04/2009 Equivalente</b>		
<b>ARMÓNICO</b>	<b>%V 3<math>\phi</math> (%Vn)</b>	<b>%I 3<math>\phi</math> (%In)</b>
THD	3.91	11.70
H2	0.16	0.66
H3	0.29	1.00
H4	0.07	0.18
H5	3.60	9.00
H6	0.11	0.33
H7	1.13	6.58
H8	0.15	0.29
H9	0.17	0.64
H10	0.10	0.11
H11	0.42	1.47
H12	0.12	0.24
H13	0.31	1.40
H14	0.10	0.27
H15	0.16	0.66
H16	0.07	0.24
H17	0.23	0.81
H18	0.15	0.24
H19	0.20	0.88
H20	0.05	0.23
H21	0.20	0.51
H22	0.07	0.86
H23	0.33	0.94
H24	0.07	0.81
H25	0.12	0.96
H26	0.03	0.28
H27	0.17	0.48
H28	0.09	0.34
H29	0.42	0.35
H30	0.11	0.29



**Fig. 3.28 Espectro armónico individual de tensión: Llave 3 - 440Vac**

Se puede observar en la **Tabla N° 3.12**, todos los armónicos individuales de tensión y corriente desde el 2° hasta el 30°, como resultado de la medición con referencia a la llave 3 en 440Vac.



**Fig. 3.29 Espectro armónico individual de corriente: Llave 3 - 440Vac**

La distorsión total de demanda (TDD) para este punto del sistema, de acuerdo a la norma determina un límite de **15%** y a su vez establece los límites para los armónicos individuales con respecto al TDD en %, el cual es no más del **12%** para todo  $h < 11$  y en nuestro caso observamos que el armónico 5° está por debajo del límite con un **9%**, para el armónico 7° está por debajo del límite con un **6.58%**. Además para los armónicos individuales entre el  $11 \leq h < 17$  la norma establece un límite del **5.5%**, observando así mismo el armónico 11° y 13° se encuentran por debajo del límite con un **1.47** y **1.40%** respectivamente.

Para los armónicos entre  $17 \leq h < 23$ , el límite es del **5%**, observándose que tenemos el armónico 17° por debajo del límite con un **0.81%**. Por último los armónicos individuales que están entre  $23 \leq h < 35$ , el límite es del **2%**, observándose que para el armónico 23° se encuentra por debajo del límite con un **0.94%** y para el armónico 29° se encuentra por debajo del límite con un **0.35%**.

En conclusión podemos mencionar que para la distorsión de corriente individual con referencia a este punto del sistema, todos los armónicos se encuentran dentro del límite permisible y cumplen con el estándar IEEE 519.

Para los armónicos individuales de tensión, la norma IEEE 519 determina un límite del **3%**, en sistemas hasta 69kV, por lo tanto podemos determinar que en este caso el **armónico 5º**, está por encima del límite con un **3.6%**. Para el caso de la NTCSE, el límite permisible del armónico individual de tensión es **6%**, por lo tanto el **armónico 5º** se encuentra debajo de lo permisible. En conclusión con referencia a la distorsión por tensión, el **armónico 5º** no cumple con el estándar IEEE 519, más si cumple la NTCSE.

#### 5) Entrada Convertidor AC/DC – 210A (Máquina Extrusora LSE80)

**Tabla N° 3.13 Resultados Convertidor AC/DC-210A (Máquina Extrusora LSE80)**

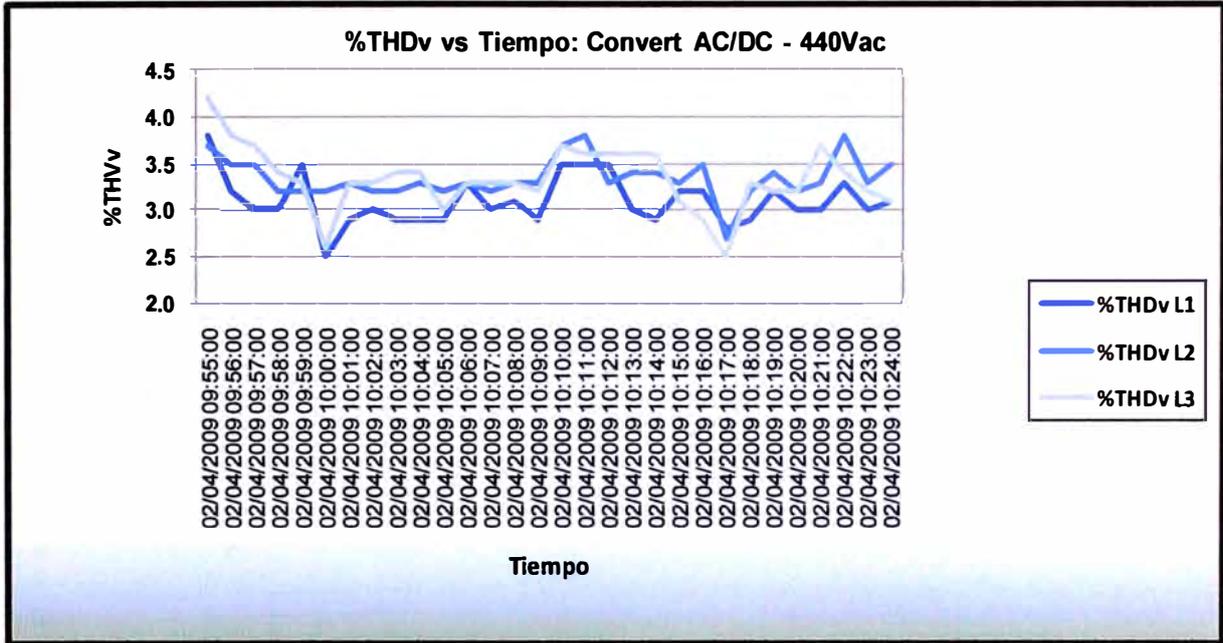
<b>Distorsión armónica total de tensión (medida)</b>			
	<b>THDv L1</b>	<b>THDv L2</b>	<b>THDv L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	3.10	3.35	3.34
<b>Máximo (%)</b>	3.80	3.80	4.20
<b>Mínimo (%)</b>	2.50	2.70	2.50
<b>Desviación estándar</b>	0.27	0.22	0.34
<b>Mediana (%)</b>	3.0	3.3	3.3
<b>Moda (%)</b>	3	3.2	3.3
<b>Percentil 95%</b>	<b>3.76</b>		
<b>Distorsión armónica total de corriente (medida)</b>			
	<b>THDi Fase L1</b>	<b>THDi Fase L2</b>	<b>THDi Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	33.12	33.68	33.60
<b>Máximo (%)</b>	35.00	35.80	35.40
<b>Mínimo (%)</b>	30.90	31.60	32.20
<b>Desviación estándar</b>	1.15	1.14	0.87
<b>Mediana (%)</b>	33.2	33.7	33.6
<b>Moda (%)</b>	33.9	33.6	33.6
<b>Percentil 95%</b>	<b>35.17</b>		
<b>Distorsión total de demanda (calculado)</b>			
	<b>TDD Fase L1</b>	<b>TDD Fase L2</b>	<b>TDD Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	33.01	33.68	33.41
<b>Máximo (%)</b>	34.56	35.38	34.52
<b>Mínimo (%)</b>	30.66	31.48	31.95
<b>Desviación estándar</b>	1.01	0.00	0.33
<b>Mediana (%)</b>	32.79	32.89	33.13
<b>Moda (%)</b>	33.53	32.84	33.26
<b>Percentil 95%</b>	<b>34.78</b>		

En la **Tabla N° 3.13** se muestra que, la distorsión armónica total de tensión en el convertidor AC/DC se encuentra por debajo del límite establecido por la norma NTCSE, en el cual se puede observar un THDv de **3.76%** que es menor a un **8%** normalizado, lo cual da cumplimiento con respecto a los límites de distorsión de tensión en este punto del sistema.

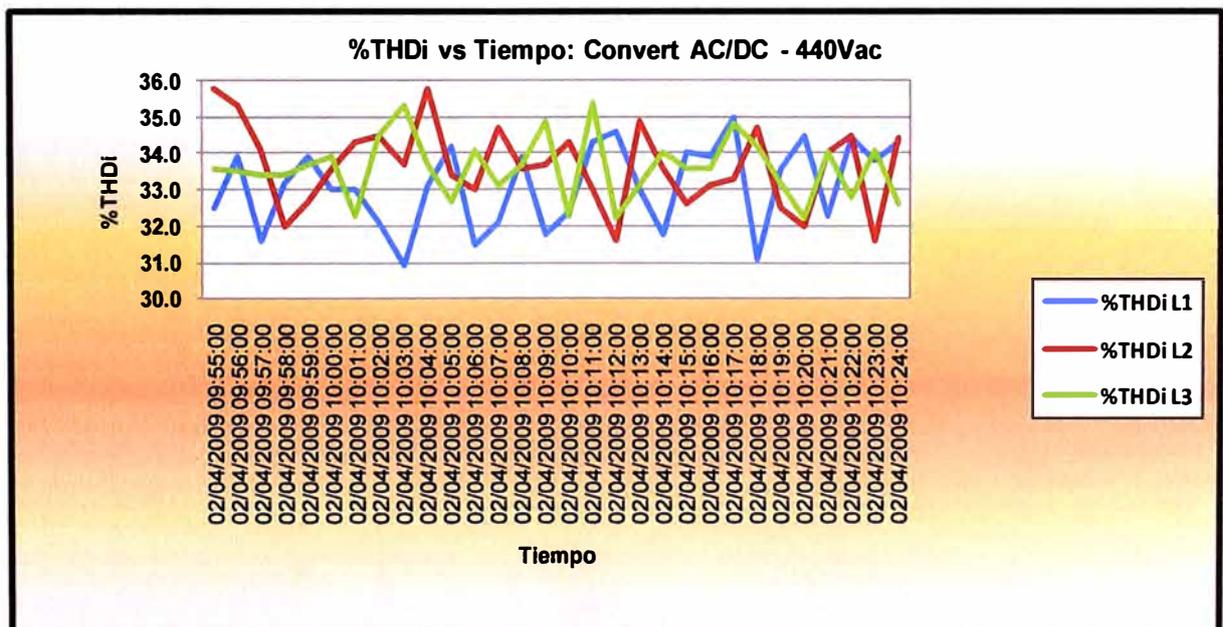
La distorsión total de demanda en este punto presenta un **34.78%**, el cual se encuentra por encima del límite establecido por la norma IEEE 519, según lo calculado en el numeral 3.3.2, inciso 5), la TDD no debe ser más del **15%**. En conclusión podemos afirmar que excede el límite permisible y no cumple con el estándar.

En la Fig. 3.30 se muestra el comportamiento de la distorsión armónica total de tensión en donde este alcanza una distorsión máxima de 4.2% y una distorsión mínima del 2.5%, presentando una tendencia del 3.2% con respecto a la distorsión armónica de tensión.

También en la Fig. 3.31 se muestra la distorsión armónica total de corriente por fase, en donde ésta alcanza una distorsión máxima del 35.8% y una distorsión mínima del 30.9%, presentando una tendencia del 33.6% con respecto a la distorsión armónica de corriente durante el tiempo de medición.



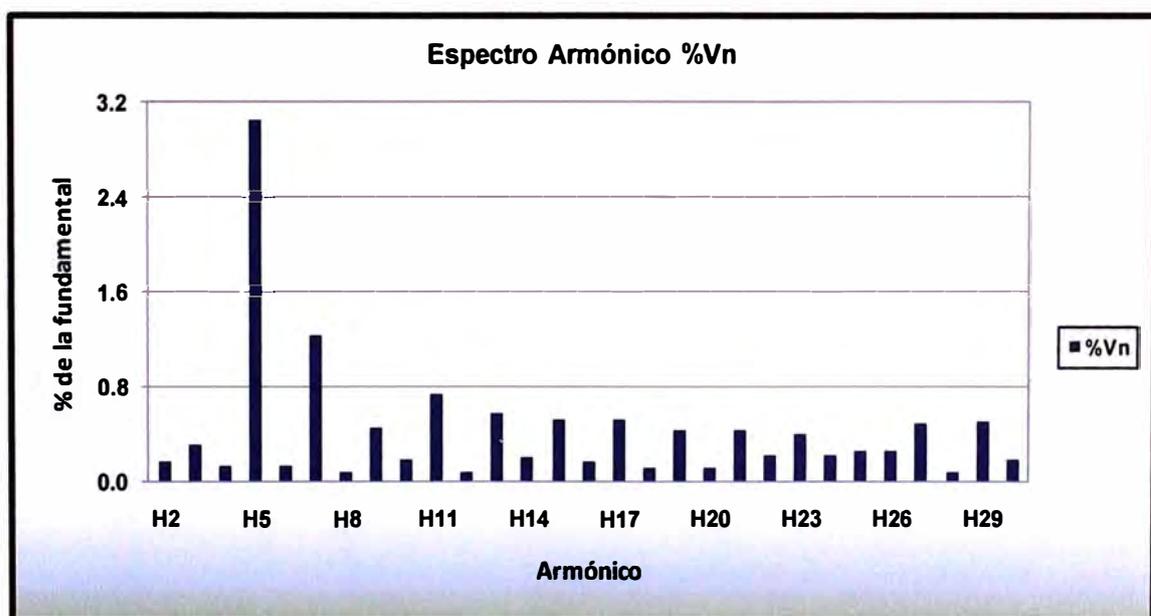
**Fig. 3.30 Distorsión armónica total de tensión: Convertidor AC/DC - 440Vac**



**Fig. 3.31 Distorsión armónica total de corriente: Convertidor AC/DC - 440Vac**

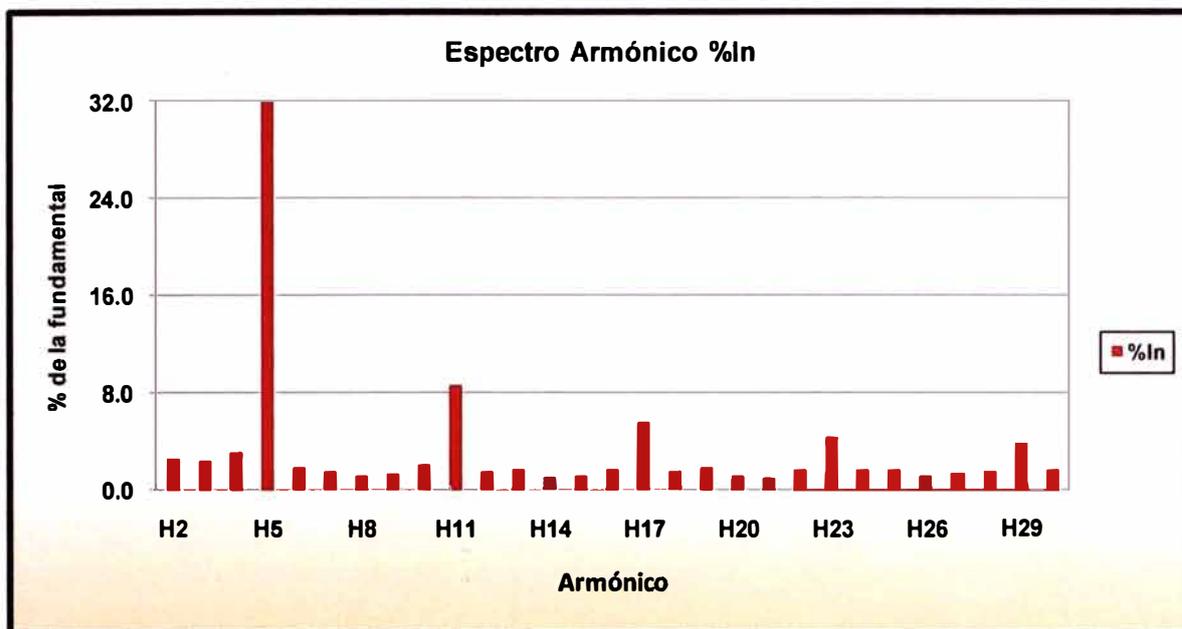
**Tabla N° 3.14 Resultados Distorsión Armónica individual: Convertidor AC/DC - 440Vac**

<b>DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL</b>		
<b>02/04/2009 Equivalente</b>		
<b>ARMÓNICO</b>	<b>%V 3<math>\phi</math> (%Vn)</b>	<b>%I 3<math>\phi</math> (%In)</b>
THD	3.76	35.17
H2	0.17	2.69
H3	0.32	2.42
H4	0.14	3.08
H5	3.05	32.00
H6	0.13	1.80
H7	1.24	1.50
H8	0.08	1.21
H9	0.45	1.38
H10	0.18	2.02
H11	0.75	8.72
H12	0.08	1.49
H13	0.58	1.68
H14	0.20	1.01
H15	0.52	1.10
H16	0.17	1.72
H17	0.53	5.64
H18	0.11	1.52
H19	0.43	1.83
H20	0.12	1.26
H21	0.44	0.96
H22	0.23	1.62
H23	0.41	4.41
H24	0.22	1.71
H25	0.27	1.64
H26	0.25	1.24
H27	0.50	1.40
H28	0.07	1.59
H29	0.51	3.80
H30	0.18	1.73



**Fig. 3.32 Espectro armónico individual de tensión: Convertidor AC/DC - 440Vac**

Se puede observar en la **Tabla N° 3.14**, todos los armónicos individuales de tensión y corriente desde el 2° hasta el 30°, como resultado de la medición con referencia al Convertidor AC/DC en 440Vac.



**Fig. 3.33 Espectro armónico individual de corriente: Convertidor AC/DC - 440Vac**

La distorsión total de demanda (TDD) para este punto del sistema, de acuerdo a la norma determina un límite de **15%** y a su vez establece los límites para los armónicos individuales con respecto al TDD en %, el cual es no más del **12%** para todo  $h < 11$  y en nuestro caso observamos que el armónico 5° está por encima del límite con un **32%**. Además para los armónicos individuales entre el  $11 \leq h < 17$ , la norma establece un límite del **5.5%**, observando así mismo que el armónico 11° se encuentran por encima del límite con un **8.72%**.

Para los armónicos entre  $17 \leq h < 23$ , el límite es del **5%**, observándose que tenemos el armónico 17° por encima del límite con un **5.64%**. Por último los armónicos individuales que están entre  $23 \leq h < 35$  el límite es del **2%**, observándose que para el armónico 23° se encuentra por encima del límite con un **4.41%** y para el armónico 29° se encuentra por encima del límite con un **3.8%**. En conclusión podemos mencionar que para la distorsión de corriente con referencia a este punto del sistema, los **armónicos 5°, 11°, 17°, 23° y 29°** se encuentran por encima del límite permisible y no cumplen con el estándar IEEE 519.

Para los armónicos individuales de tensión, la norma IEEE 519 determina un límite del **3%**, en sistemas hasta 69kV, por lo tanto podemos determinar que en este caso el

**armónico 5º**, está sobre el límite con un **3.05%**. Para el caso de la NTCSE, el límite permisible del armónico individual de tensión es **6%**, por lo tanto el **armónico 5º** se encuentra debajo de lo permisible. En conclusión con referencia a la distorsión por tensión, el **armónico 5º** no cumple con el estándar IEEE 519, más si cumple la NTCSE.

6) **Interruptor Q3.1 (110A) - Convertidor AC/AC (Máquina Extrusora Rotomec)**

**Tabla N° 3.15 Resultados Convertidor AC/AC (Máquina Extrusora Rotomec)**

<b>Distorsión armónica total de tensión (medida)</b>			
	<b>THDv L1</b>	<b>THDv L2</b>	<b>THDv L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	3.92	3.77	3.69
<b>Máximo (%)</b>	4.60	4.60	4.50
<b>Mínimo (%)</b>	3.10	2.80	2.80
<b>Desviación estándar</b>	0.50	0.57	0.51
<b>Mediana (%)</b>	4.10	3.90	3.90
<b>Moda (%)</b>	4.40	3.00	3.10
<b>Percentil 95%</b>	<b>4.50</b>		
<b>Distorsión armónica total de corriente (medida)</b>			
	<b>THDi Fase L1</b>	<b>THDi Fase L2</b>	<b>THDi Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	58.55	59.82	59.43
<b>Máximo (%)</b>	60.30	61.10	60.90
<b>Mínimo (%)</b>	56.90	58.00	57.80
<b>Desviación estándar</b>	0.94	0.87	1.03
<b>Mediana (%)</b>	58.50	59.90	59.45
<b>Moda (%)</b>	57.80	61.10	58.10
<b>Percentil 95%</b>	<b>60.90</b>		
<b>Distorsión total de demanda (calculado)</b>			
	<b>TDD Fase L1</b>	<b>TDD Fase L2</b>	<b>TDD Fase L3</b>
<b>Promedio (%)</b>	55.14	56.29	56.01
<b>Máximo (%)</b>	56.96	57.87	57.62
<b>Mínimo (%)</b>	53.35	54.38	54.36
<b>Desviación estándar</b>	0.87	0.81	0.96
<b>Mediana (%)</b>	56.46	58.33	57.81
<b>Moda (%)</b>	61.83	57.99	56.21
<b>Percentil 95%</b>	<b>59.21</b>		

En la **Tabla N° 3.15** se muestra que, la distorsión armónica total de tensión en el convertidor AC/AC se encuentra por debajo del límite establecido por la norma NTCSE, en el cual se puede observar un THDv de **4.5%** que es menor a un **8%** normalizado, lo cual da cumplimiento con respecto a los límites de distorsión de tensión en este punto del sistema.

La distorsión total de demanda en este punto presenta un **59.21%**, el cual se encuentra por encima del límite establecido por la norma IEEE 519, según lo calculado en el numeral 3.3.2, inciso 6), la TDD no debe ser más del **15%**. En conclusión podemos afirmar que excede el límite permisible y no cumple con el estándar.

En la Fig.3.34 se muestra el comportamiento de la distorsión armónica total de tensión en donde este alcanza una distorsión máxima de **4.6%** y una distorsión mínima del **2.8%**,

presentando una tendencia del 3.1% con respecto a la distorsión armónica de tensión. También en la Fig.3.35 se muestra la distorsión armónica total de corriente por fase, en donde ésta alcanza una distorsión máxima del 61.1% y una distorsión mínima del 56.9%, presentando una tendencia del 58.1% con respecto a la distorsión armónica de corriente durante el tiempo de medición.

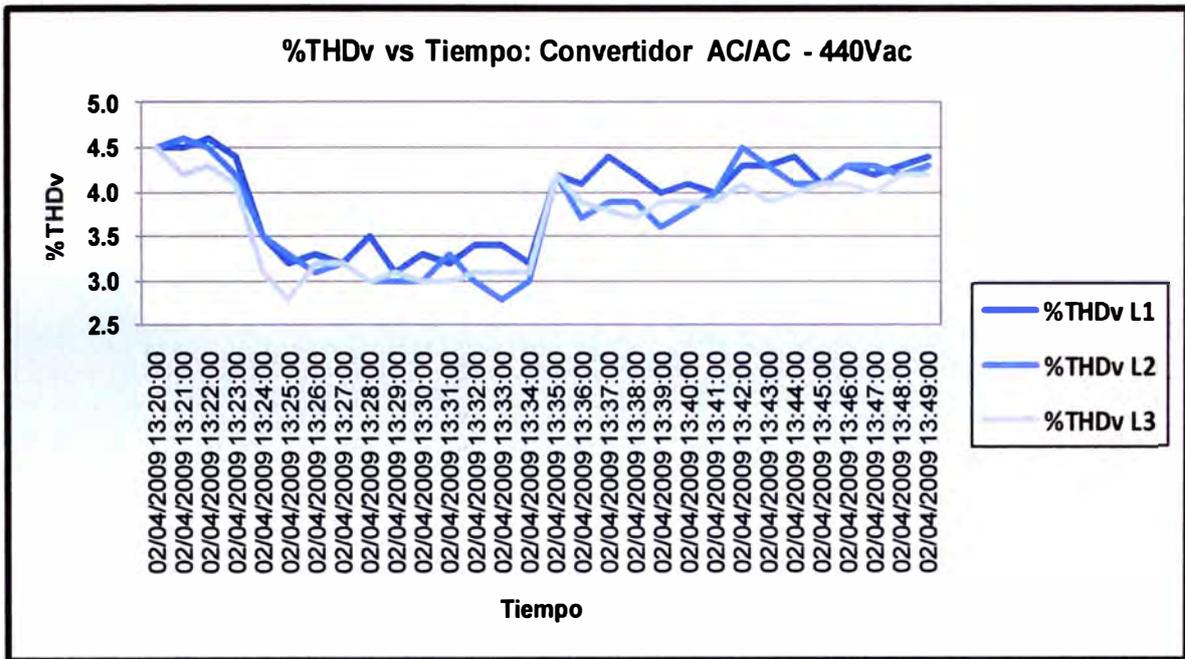


Fig. 3.34 Distorsión armónica total de tensión: Convertidor AC - 440Vac

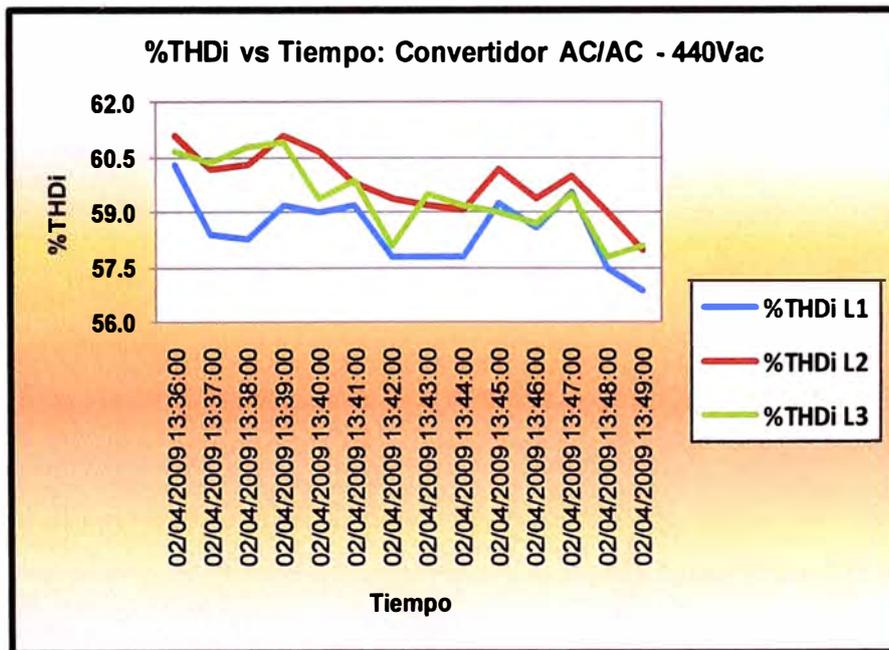
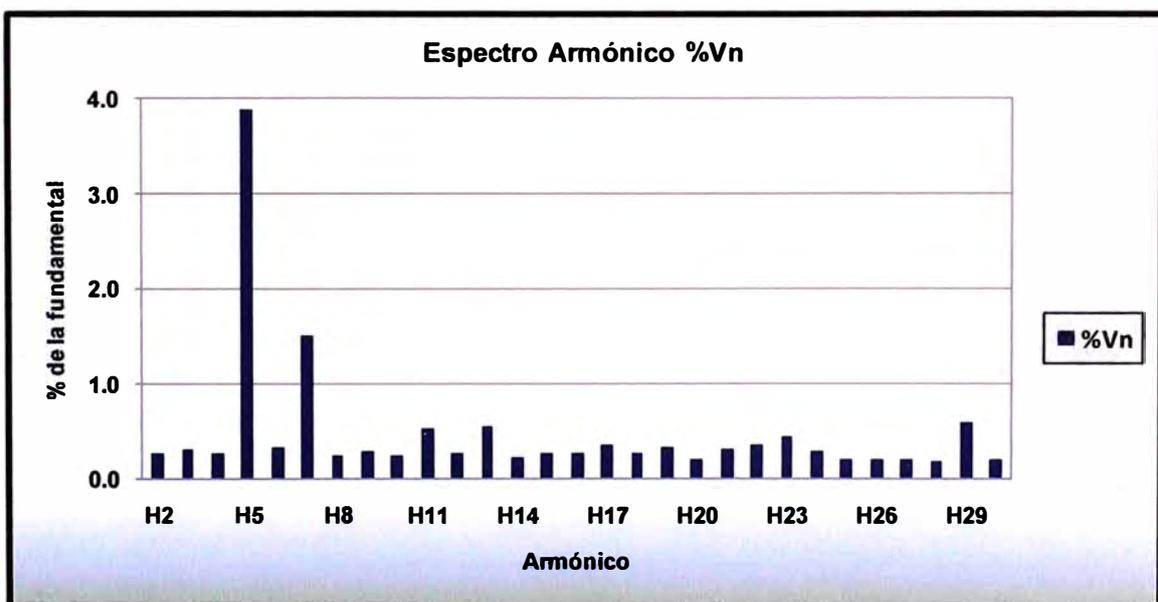


Fig. 3.35 Distorsión armónica total de corriente: Convertidor AC/AC - 440Vac

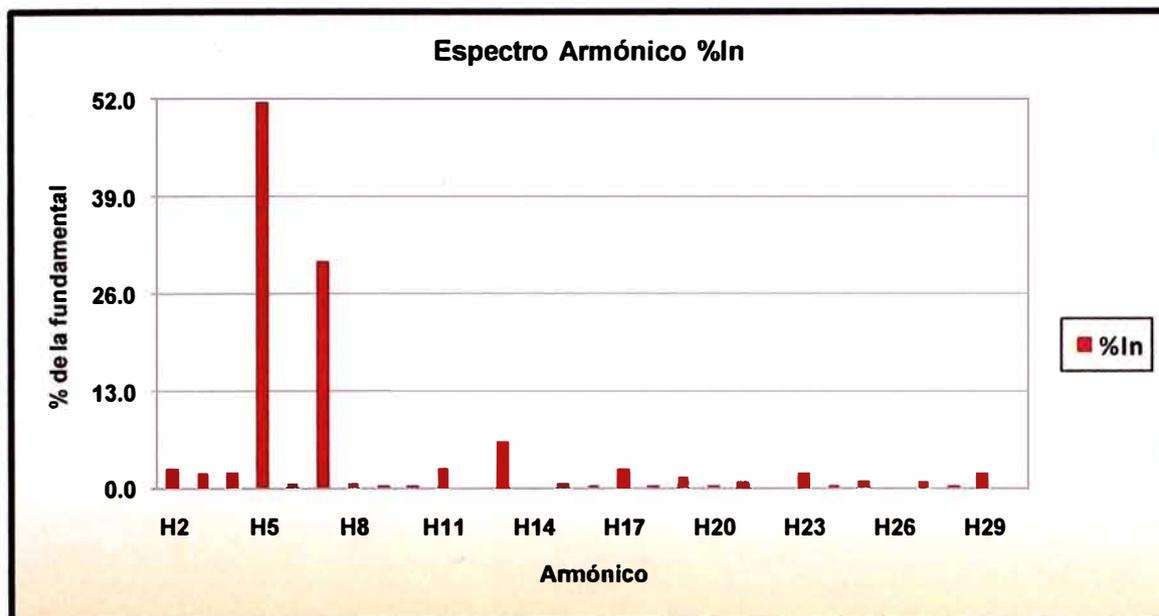
**Tabla N° 3.16 Resultados Distorsión Armónica individual: Convertidor AC/AC - 440Vac**

<b>DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL</b>		
<b>02/04/2009 Equivalente</b>		
<b>ARMÓNICO</b>	<b>%V 3<math>\phi</math> (%Vn)</b>	<b>%I 3<math>\phi</math> (%In)</b>
THD	4.50	60.90
H2	0.27	2.61
H3	0.31	2.20
H4	0.27	2.01
H5	3.88	51.81
H6	0.34	0.62
H7	1.51	30.57
H8	0.25	0.88
H9	0.30	0.50
H10	0.26	0.37
H11	0.53	2.61
H12	0.27	0.28
H13	0.55	6.43
H14	0.24	0.24
H15	0.28	0.61
H16	0.28	0.35
H17	0.36	2.80
H18	0.28	0.32
H19	0.34	1.52
H20	0.22	0.47
H21	0.31	0.96
H22	0.36	0.30
H23	0.44	2.21
H24	0.29	0.54
H25	0.22	0.93
H26	0.20	0.30
H27	0.21	1.03
H28	0.19	0.47
H29	0.60	2.23
H30	0.22	0.16



**Fig. 3.36 Espectro armónico individual de tensión: Convertidor AC/AC - 440Vac**

Se puede observar en la **Tabla N° 3.16**, todos los armónicos individuales de tensión y corriente desde el 2° hasta el 30°, como resultado de la medición con referencia al Convertidor AC/AC en 440Vac.



**Fig. 3.37 Espectro armónico individual de corriente: Convertidor AC/AC - 440Vac**

La distorsión total de demanda (TDD) para este punto del sistema, de acuerdo a la norma determina un límite de 15% y a su vez establece los límites para los armónicos individuales con respecto al TDD en %, el cual es no más del 12% para todo  $h < 11$  y en nuestro caso observamos que el armónico 5° está por encima del límite con un 51.81%, para el armónico 7° sobrepasa el límite con un 30.57%. Además para los armónicos individuales entre el  $11 \leq h < 17$  la norma establece un límite del 5.5%, observando así mismo que el armónico 11° se encuentran por debajo del límite con un 2.61%, para el armónico 13° sobrepasa el límite con 6.43%.

Para los armónicos entre  $17 \leq h < 23$ , el límite es del 5%, observándose que tenemos el armónico 17° por debajo del límite con un 2.8%. Por último los armónicos individuales que están entre  $23 \leq h < 35$  el límite es del 2%, observándose que para el armónico 23° se encuentra por encima del límite con un 2.21% y para el armónico 29° se encuentra por encima del límite con un 2.23%.

En conclusión podemos mencionar que para la distorsión de corriente con referencia a este punto del sistema, los **armónicos 5°, 7°, 13°, 23° y 29°** se encuentran por encima del límite permisible y no cumplen con el estándar IEEE 519.

Para los armónicos individuales de tensión, la norma IEEE 519 determina un límite del **3%**, en sistemas hasta 69kV, por lo tanto podemos determinar que en este caso el **armónico 5º**, está por encima del límite con un **3.88%**. Para el caso de la NTCSE, el límite permisible del armónico individual de tensión es **6%**, por lo tanto el **armónico 5º** se encuentra debajo de lo permisible. En conclusión con referencia a la distorsión por tensión, el **armónico 5º** no cumple con el estándar IEEE 519, pero si cumple la NTCSE.

#### **3.3.4 Resumen de la medición de distorsión armónica**

En forma general podemos resumir los análisis realizados de distorsión armónica tal como se indica en las siguientes tablas:

En la Tabla N° 3.17 se muestra la distorsión armónica total de tensión THD<sub>v</sub> (medida) y de demanda TDD (calculada) en cada punto de acoplamiento común, evaluados de acuerdo a lo permisible por las normas IEEE 519 y NTCSE.

En la Tabla N° 3.18 se muestra la distorsión armónica individual de tensión h<sub>v</sub> (medida) en cada punto de acoplamiento común, evaluados de acuerdo al estándar IEEE 519 para un voltaje menor que 69kV y la norma NTCSE.

En la Tabla N° 3.19 se muestra la distorsión armónica individual de corriente h<sub>i</sub> (medida) en cada punto de acoplamiento común, evaluados de acuerdo al estándar IEEE 519 para un voltaje menor que 69kV.

**Tabla N° 3.17 Cuadro resumen: Análisis normativo de distorsión armónica total de tensión y de demanda**

CUADRO RESÚMEN: ANALISIS NORMATIVO DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE TENSIÓN Y DE DEMANDA							
Item	Punto de Acoplamiento Común	Acoplamiento Común	NTCSE		ESTANDAR IEEE 519		
	PCC		Punto definido	% THDv (medida)	8% (permisible)	% TDD (calculado)	% TDD (permisible)
1	PCC-2	Llave principal 440Vac (Lado de baja 460Vac transformador 630kVA)	3.20%	Cumple	19.41%	12%	No cumple
2	PCC-3	Llave 1 - 250/630A, 42kA (Tablero General 440Vac)	3.90%	Cumple	16.90%	15%	No cumple
3	PCC-4	Llave 2 - 160/200A, 35kA (Tablero General 440Vac)	3.16%	Cumple	42.76%	15%	No cumple
4	PCC-5	Llave 3 - 160/200A, 35kA (Tablero General 440Vac)	3.91%	Cumple	11.03%	15%	Cumple
5	PCC-6	Entrada Convertidor AC/DC – 210A (Máquina Extrusora LSE80)	3.76%	Cumple	34.78%	15%	No cumple
6	PCC-7	Interruptor Q3.1 (110A) - Convertidor AC/AC (Máquina Extrusora Rotomec)	4.50%	Cumple	59.21%	15%	No cumple

**Tabla N° 3.18 Cuadro resumen: Análisis normativo de distorsión armónica individual de tensión hv**

CUADRO RESÚMEN: ANALISIS NORMATIVO DE DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN								
Item	Punto de Acoplamiento Común	Acoplamiento Común	ESTANDAR IEEE 519				NTCSE	
			Distorsión de tensión para V < 69kV				hv para M. y B.T.	
	PCC	Punto definido	Armónico	% Vn	Armónico Individual permisible	Condición	Armónico Individual permisible	Condición
1	PCC-2	Llave principal 440Vac (Lado de baja 460Vac transformador 630kVA)	5°	2.68%	3%	Cumple	6%	Cumple
2	PCC-3	Llave 1 - 250/630A, 42kA (Tablero General 440Vac)	5°	3.41%	3%	No cumple	6%	Cumple
3	PCC-4	Llave 2 - 160/200A, 35kA (Tablero General 440Vac)	5°	2.86%	3%	Cumple	6%	Cumple
4	PCC-5	Llave 3 - 160/200A, 35kA (Tablero General 440Vac)	5°	3.60%	3%	No cumple	6%	Cumple
5	PCC-6	Entrada Convertidor AC/DC – 210A (Máquina Extrusora LSE80)	5°	3.05%	3%	No cumple	6%	Cumple
6	PCC-7	Interruptor Q3.1 (110A) - Convertidor AC/AC (Máquina Extrusora Rotomec)	5°	3.88%	3%	No cumple	6%	Cumple

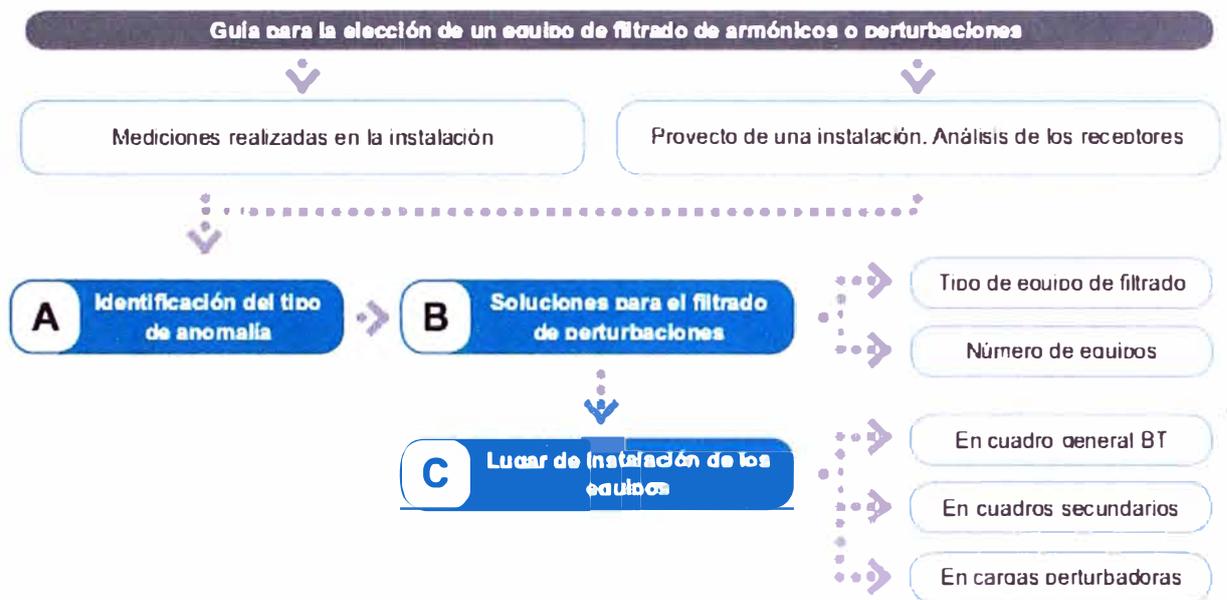


## CAPÍTULO IV

### SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA OBTENIDA

Después de realizar un análisis cuidadoso de distorsión armónica de voltaje y de corriente, se determinó a qué frecuencia se producen dichas distorsiones, de acuerdo a la operación de los equipos en particular; podemos proponer una solución basada en elementos absorbentes de armónicas como son los filtros y banco de condensadores.

Como medio de selección del tipo de filtro se ha utilizado el catalogo del fabricante español CIRCUTOR, siguiendo la secuencia como se indica en la Fig.4.1.



**Fig. 4.1** Guía para la elección de un equipo de filtrado de armónicos

En la Fig. 4.1 se muestra los pasos para seleccionar un equipo de filtrado; esto en base a la mediciones ejecutadas y/o análisis de parámetros, podemos identificar el tipo de anomalía existente en la instalación y considerar el tipo de filtro adecuado, cuya ubicación se hará tomando en cuenta la incidencia de éste en la instalación.

En la Fig. 4.2 identificamos en nuestro caso, el problema de calentamiento por sobrecarga, donde la causa es la existencia de armónicos y cuya solución es el filtrado de armónicos.



Fig. 4.2 Identificación del tipo de anomalía



Fig. 4.3 Tipo de filtros de armónicos

En la Fig. 4.3 se muestra los tipos de filtros de absorción (pasivos) y activos como soluciones posibles. Para nuestro problema central seleccionamos los filtros pasivos del tipo LCL, de acuerdo al catálogo del fabricante éstos son para los convertidores AC/DC y AC/AC existentes en la instalación. Como otra alternativa podríamos considerar un filtro activo 3Ø en el cuadro general de baja tensión.

	SOLUCIÓN	CUADROS GENERALES DE BT	CUADROS SECUNDARIOS DE BT	INDIVIDUAL
Filtros Rechazo FR/FRE	Compensación de la energía reactiva			
Filtros Activos Trifásico Monofásico	Compensación de armónicos			
Filtro de Absorción regulados FAR	Filtrado de armónicos Compensación de reactiva			
Filtros LCL Reactancias LR	Filtrado de armónicos			
Filtros EMI (EMR)	Filtrado de altas frecuencias			
Sistemas de Bloqueo (TSA, FB3)	Descarga del tercer armónico			

**Fig. 4.4 Cuadro resumen de lugar de instalación de equipos de filtrado**

De acuerdo a la Fig. 4.4, existen 3 puntos posibles en una instalación para la colocar equipos para eliminación de armónicas:

- En bornes de la carga fuente de armónicas; siendo ésta la ubicación más idónea ya que elimina la distorsión justo en el lugar en que se produce, evitando su distribución a lo largo de las líneas de distribución de la instalación.
- En los cuadros secundarios de baja tensión, esto es cuando existen diferentes cargas de pequeña potencia conectadas a los cuadros secundarios de distribución. Su eliminación permite la descarga de las líneas que van al cuadro general.
- En los cuadros generales de baja tensión, esto es cuando las distorsiones han sido eliminadas o atenuadas en las propias cargas o en los cuadros secundarios, la colocación en el cuadro general de un equipo de filtrado permite la eliminación de residuos restante [12].

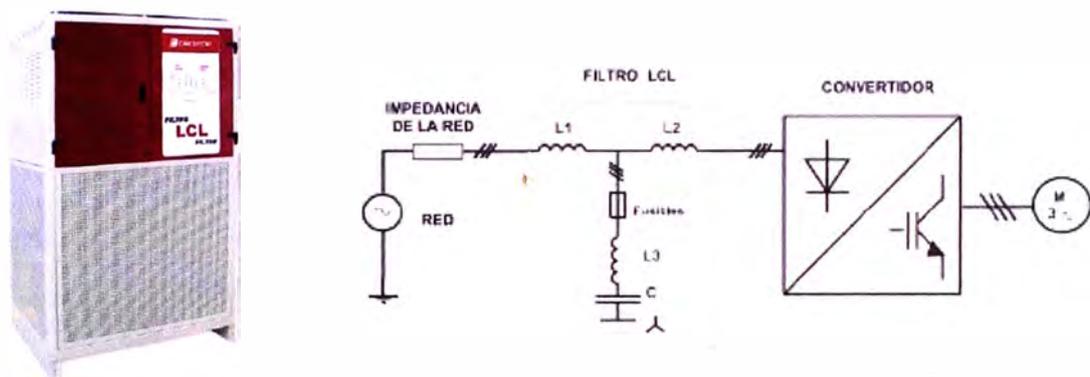
## 4.1 Solución mediante filtros pasivos LCL

### 4.1.1 Consideraciones técnicas

Los **filtros LCL** están especialmente diseñados para eliminar los armónicos de la corriente absorbida por convertidores de potencia de 6 pulsos. Éstos son elementos pasivos a base de una combinación serie-paralelo de inductancias y condensadores, adaptados a filtrar la entrada de los convertidores electrónicos, éstos son dispuestos y sintonizados a la frecuencia o frecuencias de las corrientes armónicas existentes [12].

Los **filtros LCL** se seleccionan por la corriente consumida por el convertidor. Para convertidores de muy baja potencia puede utilizarse un **filtro LCL** para la alimentación de varios convertidores, siempre y cuando funcionen a la vez.

Si se alimentan gran número de convertidores que pueden arrancar o parar por separado se pierde en gran parte la eficacia del filtro. En tal caso es mejor que cada convertidor tenga su propio filtro.



**Fig. 4.5 Filtro LCL. Esquema de conexión**

### 4.1.2 Especificaciones técnicas

Las características técnicas de los **filtros LCL** para cada convertidor se indican:

- a) **01 Filtro LCL para reducción de armónicos de Convertidor AC/AC trifásico 55kW 440V 60Hz 3F.** Compuesto por lo siguiente:

1 Gabinete metálico auto soportado modular, fabricado en base a planchas de hierro:

- Estructura: Plancha LAF doblada de 2mm.
- Puerta: Plancha LAF doblada de 2mm.
- Techo: Plancha LAF doblada de 2mm.
- Paneles: Plancha LAF doblada de 1.5mm.

Tratamiento de superficies metálicas por decapado químico y fosfatizado por inmersión.

Acabado con pintura electrostática en polvo secado al horno, color gris RAL-7035.

Cerraduras multipunto tipo maneta.

Con zócalo de 100mm de alto color negro RAL-7022.

Grado de protección: **IP40**

Dimensiones aproximadas: Altura: 1700mm., Ancho: 600mm y Fondo: 600mm.

1 Porta fusible trifásico NH-00 500V 160A, M. SCHNEIDER

3 Fusibles NH-00 500V 50A.

2 Reactancias de línea L1 y L2, CIRCUTOR.

1 Reactancia de filtro L3, CIRCUTOR

1 Condensador de filtro C1, CIRCUTOR

1 Juego de barras de conexión para 150A. Cu 3x15mm.

1 Juego de barras de tierra 450A. Cu 5x30mm.

1 Juego de cables de control, aisladores, borneras y accesorios.

b) **01 Filtro LCL para reducción de armónicos de Convertidor AC/DC trifásico 75kW 440V 60Hz 3F.** Compuesto por lo siguiente:

1 Gabinete metálico auto soportado modular, fabricado en base a planchas de fierro:

Estructura: Plancha LAF doblada de 2mm.

Puerta: Plancha LAF doblada de 2mm.

Techo: Plancha LAF doblada de 2mm.

Paneles: Plancha LAF doblada de 1.5mm.

Tratamiento de superficies metálicas por decapado químico y fosfatizado por inmersión.

Acabado con pintura electrostática en polvo secado al horno, color gris RAL-7035.

Cerraduras multipunto tipo maneta.

Con zócalo de 100mm de alto color negro RAL-7022.

Grado de protección: **IP40**

Dimensiones aproximadas:

Altura: 1700mm., Ancho: 600mm y Fondo: 600mm.

1 Porta fusible trifásico NH-00 500V 160A, M. SCHNEIDER

3 Fusibles NH-00 500V 80A.

2 Reactancias de línea L1 y L2, CIRCUTOR.

1 Reactancia de filtro L3, CIRCUTOR

1 Condensador de filtro C1, CIRCUTOR

1 Juego de barras de conexión para 150A. Cu 3x15mm.

1 Juego de barras de tierra 450A. Cu 5x30mm.

1 Juego de cables de control, aisladores, borneras y accesorios.

### 4.1.3 Ventajas técnicas

Las ventajas en el uso de los **filtros LCL** son:

- a) Reduce la distorsión de la onda de corriente hacia la red y el resto de la instalación.
- b) Diseñados para reducir el THD<sub>i</sub> a valores inferiores a un 10%.
- c) Cumple con el estándar **IEEE-519** y la norma **IEC-61000-3.4**.
- d) El filtrado se da principalmente a los armónicos de corriente de 5° y 7° orden y de manera secundaria los de 11° y 13° orden.
- e) A plena carga se consiguen reducciones del THD<sub>i</sub> hasta por debajo del 5%.
- f) Tiene la función de absorción y/o bloqueo.
- g) Se obtiene un ahorro de energía por la reducción de la corriente eficaz (RMS), por lo tanto reducimos los kVA demandados.
- h) Mejora el factor de potencia real (reactiva + armónicos).
- i) Permite el incremento de la vida útil de equipos aguas arriba al reducir las pérdidas térmicas que se generan.
- j) Limita transitorios de corriente, evitando daños al convertidor y disparos por sobretensión que afectan procesos de producción.
- k) Bajo costo en el equipamiento.

### 4.1.4 Desventajas técnicas

- a) Se limitan a ubicarse en forma individual, pues a escala global son conflictivos por que se adaptan mal a las cargas.

## 4.2 Solución mediante filtros activos AF

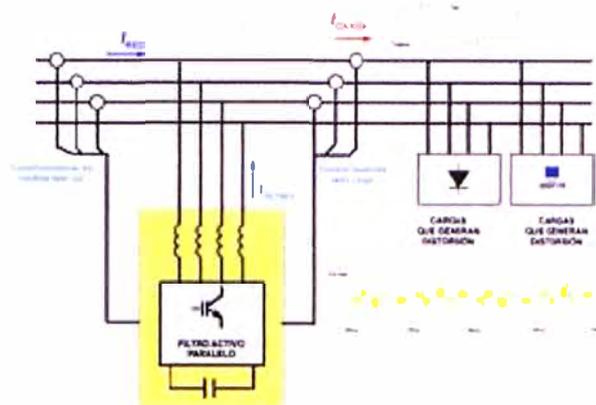
### 4.2.1 Consideraciones técnicas

Los **filtros activos AF** proporcionan una solución global al problema de compensación de armónicos; el principio de funcionamiento se basa en la inyección en contraste de corrientes armónicas iguales a las existentes en la instalación. Esto permite que, aguas arriba del punto de conexión del filtro, la señal no presente prácticamente distorsión armónica. La regulación de corriente lo realiza un DSP en forma automática [12].

En la Fig. 4.6 se muestra el esquema del filtro activo AF, cuyo principio se basa en la ecuación (4.1).

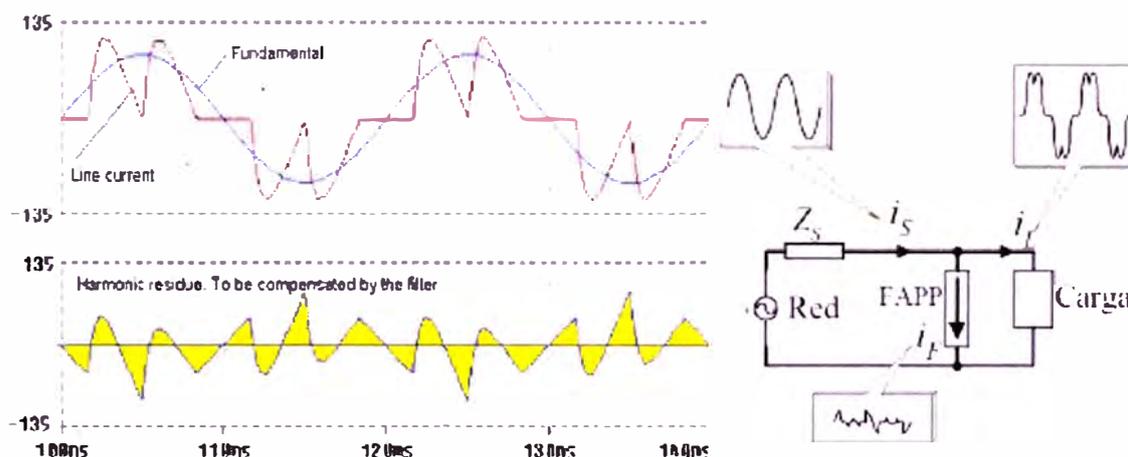
$$I_{FILTRO} = I_{RED} - I_{CARGA} \quad (4.1)$$

Es decir, detecta la diferencia existente entre la onda senoidal deseada ( $I_{RED}$ ) de corriente y la señal deformada por efecto de los armónicos ( $I_{CARGA}$ ). Por tanto, procede a inyectar la diferencia existente entre ambas ondas ( $I_{FILTRO}$ ) [12].



**Fig. 4.6 Esquema de filtro activo AF**

En la Fig. 4.7 se observa las formas de onda de las corrientes inyectadas por los filtros activos. En ellas se aprecian, la onda deseada, la onda deformada existente y la corriente del filtro ( $I_{\text{FILTRO}}$ ), en el caso de un filtro trifásico.



**Fig. 4.7 Formas de onda de corriente inyectadas por el filtro activo**

CIRCUTOR dispone la serie **NETACTIVE AF-3W**, el cual permite un filtrado para instalaciones de 3 hilos con capacidad de **filtrado hasta el armónico 20** sin equilibrado de fases.

#### 4.2.2 Especificaciones técnicas

Las características técnicas del **filtro activo AF** a ubicar en el cuadro general 440Vac se indica:

**01 Filtro Activo de 800A 440V 3F**

Tipo AF-3W

Corriente nominal por fase  $I_n$  (A): 800A

Dimensiones aproximadas:

Altura: 2100mm.

Ancho: 1200mm.

Fondo: 1930mm.

Instrumentos de medida mediante Display LCD para:

Valores eficaces de tensión.

Nivel THDi % y THDv % hasta el 21° armónico.

Temperatura de operación: 35°C

#### 4.2.3 Ventajas técnicas

Las ventajas en el uso de **filtros activos AF** son:

- a) Apropriado en instalaciones donde presentan una gran variación de carga (amplio espectro de armónicos)
- b) Aplicables para una serie de cargas no lineales repartidas en forma de pequeñas cargas en la red, de forma que no es posible el uso de filtros pasivos individuales.
- c) Reduce el THD<sub>i</sub> a valores inferiores a un 10%.
- d) Cumple con el estándar **IEEE-519** y la norma **IEC-61000-3.4**.
- e) Se obtiene un ahorro de energía por la reducción de la corriente eficaz (RMS), por lo tanto reducimos los kVA demandados.
- f) Mejora el factor de potencia real aguas arriba.
- g) Permite continuar la compensación de otros armónicos que se pueden adicionar debido al incremento de nuevas cargas futuras en la instalación.

#### 4.2.4 Desventajas técnicas

- a) Alto costo en el equipamiento.

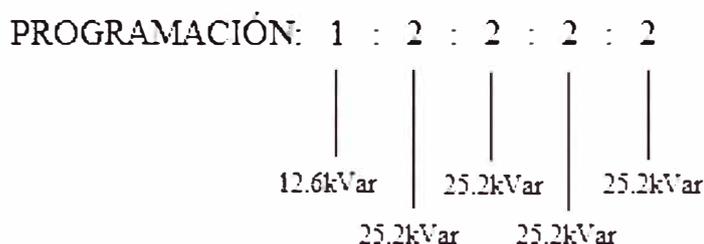
### 4.3 Instalación complementaria mediante banco de condensadores

La compensación de energía reactiva juega un papel importante, tanto en lo técnico como en lo económico de una instalación eléctrica. Ante las soluciones de los filtros para la minimización de los armónicos, podríamos mejorar aún el consumo de energía con la implementación de 01 banco de condensadores automático en el tablero general en 440Vac, mejorando el factor de potencia a un valor de 0.98.

#### 4.3.1 Consideraciones técnicas

Se propone la instalación de 01 banco de condensadores automático de 5 etapas de capacidad 113.40kVar, 440Vac, 60Hz, 3F. (1x12.6kVar + 4x25.2kVar). La programación es: 1: 2: 2: 2: 2; según sea la programación Fig. 4.8, este permitirá que la compensación sea

en forma escalonada, es decir según requiera la carga este compensará lo necesario con referencia al factor de potencia 0.98 ó un poco más. Los bancos entrarán en forma escalonada según se necesite compensar, quedando algún banco fuera si no se requiere.



**Fig. 4.8 Programación de 5 etapas**

Mediante esta programación se regula mejor la compensación reactiva. El banco de condensadores automático cuenta con un regulador de potencia reactiva diseñado hasta 8 escalones, para este caso se emplearán 5 escalones ya que se cuenta con 5 bancos condensadores.

#### 4.3.2 Especificaciones técnicas

Las características técnicas del **Banco de condensadores automático** a ubicar en el tablero general en 440Vac se indican:

##### **01 Banco de Condensadores Automático con Filtros de Rechazo de Armónicos.**

**113.40kVar 440V 60Hz 3F. (1x12.6kVar+4x25.2kVar)**

**Programa: 1:2:2:2:2**, Compuesto por lo siguiente:

1 Gabinete metálico auto soportado modular.

Fabricado en base a planchas de fierro, según lo siguiente:

- Estructura: Plancha LAF doblada de 2mm.
- Puerta: Plancha LAF doblada de 2mm.
- Techo: Plancha LAF doblada de 2mm.
- Paneles: Plancha LAF doblada de 1.5mm.

Tratamiento de superficies metálicas por decapado químico y fosfatizado por inmersión.

Acabado con pintura electrostática en polvo secado al horno, color gris RAL-7035.

Cerraduras multipunto tipo maneta.

Con zócalo de 100mm de alto color negro RAL-7022.

Grado de protección: **IP40**

Dimensiones aproximadas: Altura: 2100mm., Ancho: 900mm y Fondo: 600mm.

1 Interruptor general 3x250A 30kA/440V regulable, T3N630, ABB

5 Porta fusible trifásico NH-00 500V 160A, M. SCHNEIDER

- 3 Fusibles NH-00 500V 25A.
- 12 Fusibles NH-00 500V 50A.
- 1 Contactor 15kVar 440V Bobina: 220V, CIRCUTOR.
- 6 Contactor 32kVar 440V Bobina: 220V, CIRCUTOR.
- 1 Reactancia de 3.06mH 18A, CIRCUTOR
- 4 Reactancia de 1.53mH 37A, CIRCUTOR
- 1 Condensador trifásico tubular 12.6kVar/440V 18kVar/525V, CIRCUTOR.
- 4 Condensador trifásico tubular 25.2kVar/440V 36kVar/525V, CIRCUTOR.
- 1 Regulador de potencia reactiva 8 escalones, C-8, CIRCUTOR.
- 2 Ventiladores axiales 185x185mm 400m<sup>3</sup>/h 230Vca.
- 2 Extractores axiales 185x185mm 400m<sup>3</sup>/h 230Vca.
- 1 Termostato ambiental 5-40°C.
- 1 Transformador de control 400VA 460/230V monofásico.
- 6 Porta fusibles con fusible 10x38mm 500V 2A
- 1 Juego de barras colectoras para 450A. Cu 5x30mm.
- 1 Juego de barras de conexión para 150A. Cu 3x15mm.
- 1 Juego de barras de tierra 450A. Cu 5x30mm.
- 1 Juego de cables de control, aisladores, borneras y accesorios.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS ECONÓMICO

#### 5.1 Análisis del costo de estudio de armónicas

Debido a la operación de convertidores de frecuencia (440Vac) en las máquinas de extrusión se ha visto el interés por parte de la empresa de realizar un estudio de armónicas para establecer la existencia de problemas de armónicas y sus consecuencias en la instalación en 440Vac; por tal motivo se ha realizado un presupuesto basado en un análisis de precios unitarios detallado, dicha información se presenta con carácter informativo académico para tener una idea del costo que implica realizar un estudio de armónicas. El presupuesto para este estudio se indica en la **Tabla N° 5.1**.

**Tabla N° 5.1 Presupuesto de estudio de armónicas**

Item	Descripción	Und	Metrado	P.U. (\$)	Parcial (\$)	Total (\$)
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">  <p><b>LB</b> LUIS BLANCO DEL ROSARIO <small>Proyectos y Obras en Energía Minera e Industrial</small></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>PRESUPUESTO</b></p> </div> </div> <p>           Proyecto: <b>ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN 440Vac</b>            Cliente: <b>Comercial Matusita SAC</b>            Ubicación: <b>Lima Industrial</b>            Fecha: <b>Abril 2009</b> </p>						
1.00	<u>Mobilización y Desmovilización</u>	Glb	1.00	34.74	34.74	
2.00	<u>Cordinaciones Preliminares</u>	Glb	1.00	6.87	6.87	
3.00	<u>Ejecución de Estudio de Armónicas</u>					
3.10	Trabajos Preliminares	Glb	1.00	349.70	349.70	
3.20	Alquiler de Equipos p/Mediciones en Campo	Glb	1.00	151.50	151.50	
3.30	Mediciones en campo	Glb	1.00	25.20	25.20	
3.40	Descarga de datos	Glb	1.00	3.43	3.43	
3.50	Trabajos de gabinete	Glb	1.00	1,127.88	1,127.88	
4.00	<u>Disposiciones finales</u>	Glb	1.00	13.73	13.73	
COSTO DIRECTO					\$	1,713.04
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>					<b>\$</b>	<b>1,713.04</b>
G. GENERALES INDIRECTOS						0.00
UTILIDAD						171.30
<b>SUB TOTAL: COSTO DE ESTUDIO DE ARMÓNICOS</b>						<b>\$ 1,884.35</b>
I.G.V. 19%					\$	358.03
<b>TOTAL: COSTO DE ESTUDIO DE ARMÓNICOS</b>					<b>\$</b>	<b>2,242.37</b>

Las coordinaciones preliminares; se refieren a las reuniones iniciales tenidas con el gerente de producción y el jefe de mantenimiento, sobre los trabajos a realizar en la planta.

Los trabajos preliminares comprende el levantamiento de información de campo de las características de los equipos, conductores, convertidores y variadores de velocidad. Las disposiciones finales se refieren a las reuniones de entrega de informe final y sugerencias técnicas.

El trabajo de estudio de armónicas del sistema en 440Vac de la planta tiene un valor de **mil ochocientos ochenta y cuatro con 35/100 dólares americanos (USD \$ 1,884.35)**; éste valor no incluye el impuesto general a las ventas.

## 5.2 Análisis de costos de alternativas de solución

Para tener una viabilidad económica en este proyecto, se ha buscado optimizar los costos en los equipamientos; pues estos son de fabricación nacional (componentes ensamblados en planta del proveedor), de los cuales los costos son mucho menor que los importados. Los costos para cada alternativa de solución se indican en la Tabla N° 5.2 y Tabla N° 5.3.

**Tabla N° 5.2 Costo de equipamiento y montaje: Alternativa N° 1**

<b>COSTO DE EQUIPAMIENTO Y MONTAJE: ALTERNATIVA N° 1</b>						
Item	Descripción	Und	Cantidad	P.U. (\$)	Parcial (\$)	Total (\$)
<b>1.0</b>	<b>Suministro de Equipamiento</b>					<b>18,711.60</b>
1.1	Filtro LCL para reducción de armónicos de Convertidor AC/AC trifásico 55kW 440V 60Hz 3F.	u	1	4,506.67	4,506.67	
1.2	Filtro LCL para reducción de armónicos de Convertidor AC/DC trifásico 75kW 440V 60Hz 3F.	u	1	7,438.00	7,438.00	
1.3	Banco de Condensadores Automático con filtros de rechazo de armónicos 113.40kVar 440V 60Hz 3F.	u	1	6,766.93	6,766.93	
<b>2.0</b>	<b>Suministro de Alimentadores</b>					<b>710.65</b>
<b>2.1</b>	<b>Cables</b>					
2.1.1	Cable NYY 3x25mm <sup>2</sup> - 0.6/1kV (Convertidor AC/AC - 55kW)	Mt	3	9.58	28.74	
2.1.2	Cable NYY 3x35mm <sup>2</sup> - 0.6/1kV (Convertidor AC/DC - 75kW)	Mt	44	12.97	570.68	
2.1.3	Cable NYY 3x50mm <sup>2</sup> - 0.6/1kV (Banco Condensadores)	Mt	4	18.05	72.20	
<b>2.2</b>	<b>Terminaciones</b>					
2.2.1	Terminales de comprensión 25mm <sup>2</sup>	u	6	1.77	10.61	
2.2.2	Terminales de comprensión 35mm <sup>2</sup>	u	6	2.10	12.61	
2.2.3	Terminales de comprensión 50mm <sup>2</sup>	u	6	2.46	14.79	
<b>2.3</b>	<b>Otros</b>					
2.3.1	Cintillo Nylon 200mm	%	0.3	3.40	1.02	
<b>3.0</b>	<b>Montaje de Equipamiento</b>					<b>600.71</b>
3.1	Movilización y Desmovilización	Glb	1	445.48	445.48	
3.2	Montaje de Filtro LCL p/convertidor AC/AC, 3ø, 55kW 440V 60Hz.	Glb	1	74.74	74.74	
3.3	Montaje de Filtro LCL p/convertidor AC/DC, 3ø, 75kW 440V 60Hz.	Glb	1	43.07	43.07	
3.4	Montaje de Banco de Condensadores Automático con filtros de rechazo de armónicos 113.40kVar 440V 60Hz 3F.	Glb	1	37.43	37.43	
<b>4.0</b>	<b>Pruebas Finales y Puesta en Servicio</b>					<b>111.50</b>
4.1	Pruebas finales y puesta en servicio	Glb	1	111.50	111.50	
<b>SUB TOTAL: INVERSIÓN EN EQUIPAMIENTO Y MONTAJE (ALTERNATIVA 1)</b>						<b>\$ 20,134.46</b>
I.G.V. 19%						\$ 3,825.55
<b>TOTAL: INVERSIÓN EN EQUIPAMIENTO Y MONTAJE (ALTERNATIVA 1)</b>						<b>\$ 23,960.01</b>

En la **Tabla N° 5.2** se indica la alternativa N° 1, donde se propone 01 filtro LCL individual de 55kW para el convertidor AC/AC, 01 filtro LCL individual de 75kW para el convertidor AC/DC y 01 banco automático de capacitores de 113.40kVar, integrado por 5 pasos de uno de 12.6kVar y cuatro de 25.2kVar cada uno. Se indica el suministro de alimentadores y el montaje de todo el equipamiento.

**Precio unitario: \$ 18,711.60** (Dieciocho mil setecientos once con 60/100 dólares americanos) Este costo considera los equipos puestos en fábrica.

**Mano de obra, cables, soportes y pruebas: \$ 1,422.86** (Mil cuatrocientos veintidós con 86/100 dólares americanos)

**Tabla N° 5.3 Costo de equipamiento y montaje: Alternativa N° 2**

COSTO DE EQUIPAMIENTO Y MONTAJE: ALTERNATIVA N° 2						
Item	Descripción	Und	Cantidad	P.U. (\$)	Parcial (\$)	Total (\$)
<b>1.0</b>	<b>Suministro de Equipamiento</b>					<b>64,131.73</b>
1.1	Filtro Activo de 800A, 440V 3F, para reducción de armónicos en cuadro general BT	u	1	57,364.80	57,364.80	
1.2	Banco de Condensadores Automático con filtros de rechazo de armónicos 113.40kVar, 440V, 60Hz 3F.	u	1	6,766.93	6,766.93	
<b>2.0</b>	<b>Suministro de Alimentadores</b>					<b>1,117.55</b>
<b>2.1</b>	<b>Cables</b>					
2.1.1	Cable NYY 1x240mm <sup>2</sup> - 0.6/1kV (filtro activo)	Mt	27	35.02	945.54	
2.1.2	Cable NYY 3x50mm <sup>2</sup> - 0.6/1kV (Banco Condensadores)	Mt	4	18.05	72.20	
<b>2.2</b>	<b>Terminaciones</b>					
2.2.1	Terminales de comprensión 240mm <sup>2</sup>	u	12	7.00	84.00	
2.2.2	Terminales de comprensión 50mm <sup>2</sup>	u	6	2.46	14.79	
<b>2.3</b>	<b>Otros</b>					
2.3.1	Cintillo Nylon 200mm	%	0.3	3.40	1.02	
<b>3.0</b>	<b>Montaje de Equipamiento</b>					<b>570.95</b>
3.1	Movilización y Desmovilización	Glb	1	445.48	445.48	
3.2	Montaje de Filtro Activo de 800A, 440V 3F, p/Cuadro general BT	Glb	1	88.04	88.04	
3.3	Montaje de Banco de Condensadores Automático con filtros de rechazo de armónicos 113.40kVar, 440V, 60Hz 3F.	Glb	1	37.43	37.43	
<b>4.0</b>	<b>Pruebas Finales y Puesta en Servicio</b>					<b>111.50</b>
4.1	Pruebas finales y puesta en servicio	Glb	1	111.50	111.50	
<b>SUB TOTAL: INVERSIÓN EN EQUIPAMIENTO Y MONTAJE (ALTERNATIVA 2)</b>						<b>\$ 65,931.72</b>
I.G.V. 19%						<b>\$ 12,527.03</b>
<b>TOTAL: INVERSIÓN EN EQUIPAMIENTO Y MONTAJE (ALTERNATIVA 2)</b>						<b>\$ 78,458.75</b>

En la **Tabla N° 5.3** se indica la alternativa N° 2, donde se propone 01 filtro Activo de 800A, 440Vac, 3F en el cuadro general de 440Vac y 01 banco automático de capacitores de 113.40kVar, integrado por 5 pasos de uno de 12.6kVar y cuatro de 25.2kVar cada uno. Se indica el cuadro de costos por el suministro de alimentadores (cables, terminaciones y soportes) y el montaje de todo el equipamiento.

**Precio unitario: \$ 64,131.73** (Sesenta y cuatro mil ciento treinta y uno con 73/100 dólares americanos). Este costo considera los equipos puestos en fábrica.

**Mano de obra, cables, soportes y pruebas: \$ 1,799.99** (Mil setecientos noventa y nueve con 99/100 dólares americanos)

Como se ha podido notar, las formas para la mitigación de armónicas mediante filtros se da en forma local y global; podemos concluir que la mitigación de armónicas en forma local es la más económica y viable; a comparación de la mitigación en forma global que es muy costosa.

### 5.3 Ahorros en pérdidas eléctricas

El análisis para la minimización de armónicas implica mejorar el factor de potencia y por consiguiente reducir los costos por concepto de pérdidas eléctricas. Para la mitigación de armónicos más conveniente, mediante filtros pasivos individuales del tipo LCL consideramos una THDi de 10%, para evaluar los ahorros en la entrada del alimentador principal (440Vac) emplearemos las siguientes ecuaciones [7]:

El factor de potencia de la fundamental (FPF):

$$FPF = \cos\phi \quad (5.1)$$

El factor de potencia de distorsión (FPD):

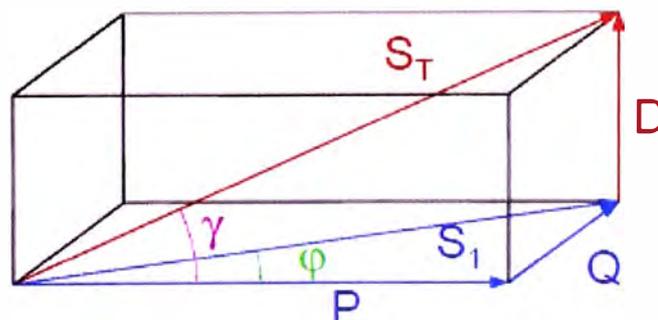
$$FPD = \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (5.2)$$

El factor de potencia verdadero (FPV):

$$FPV = \cos\phi \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (5.3)$$

Entonces: (5.1) y (5.2) en (5.3):

$$FPV = FPF \cdot FPD \quad (5.4)$$



**Fig. 5.1 Representación del triángulo de potencia con distorsión armónica**

**a) Cálculo de pérdidas en entrada principal de tablero general 440Vac**

Conociendo las mediciones obtenidas en la entrada del tablero general 440Vac se tiene un FPV=0.70 y P=118kW.

De la ecuación (5.3):

Inicialmente sin filtro:

$$0.7 = \text{Cos}\phi \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(0.242)^2}}; \text{ De donde: FPF}=\text{Cos}\phi = 0.72021$$

Cálculo proyectado del factor de potencia verdadero con los filtros instalados:

$$\text{FPV} = 0.72021 \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(0.1)^2}}; \text{ De donde: FPV} = 0.7166$$

Luego:

- Con los filtros instalados se obtendría un ahorro en pérdidas (kVAr) de:

$$\Delta Q = P(\text{tag}\gamma_1 - \text{tag}\gamma_2)$$

$$\Delta Q = P(\text{tag}45.57 - \text{tag}44.23)$$

$$\Delta Q = (118kW)(0.04662)$$

$$\Delta Q = 5.5kVAr$$

- Con el banco de condensadores automático instalado se obtendría un ahorro en pérdidas (kVAr) de:

(Con los filtros FPV=0.7166 y con los bancos condensadores FPV=0.96)

Entonces:

$$\Delta Q' = P(\text{tag}\gamma_1 - \text{tag}\gamma_2)$$

$$\Delta Q' = P(\text{tag}44.23 - \text{tag}16.26)$$

$$\Delta Q' = (118kW)(0.682)$$

$$\Delta Q' = 80.436kVAr$$

En conclusión podríamos decir que con la instalación de los filtros de armónicas y el banco de condensadores automático en el tablero general (440Vac), se llegaría a obtener un ahorro total en pérdidas de potencia reactiva de 85.936kVAr, que se dejaría de tomar de la red.

**b) Cálculo de ahorro en pérdidas en cables alimentadores principales**

Para los cálculos se ha empleado la expresión:  $\Delta P_l = 3 * R(Ir_1^2 - Ir_2^2)kW$ , donde:

R es la resistencia del cable en  $\Omega$

$I_1$  : Corriente reactiva antes de la compensación en Amp.

$I_2$  : Corriente reactiva después de la compensación en Amp.

En la Tabla N° 5.4, se muestra las pérdidas calculadas en los cables alimentadores principales aguas arriba.

**Tabla N° 5.4 Pérdidas en cables principales**

Item	Cable	Calibre	Ahorro x pérdidas	Total pérdidas
	Tipo	mm 2	$\Delta PL$ (kW)	(kW)
1	NY Y	2(3-1x240)	0.084	2.96
2	NY Y	3-1x25	0.005	
3	NY Y	3-1x185	0.144	
4	THW	3-1x95	2.480	
5	THW	3-1x70	0.249	

### c) Cálculo de ahorros por pérdidas en el cobre de transformador de 630kVA

Para el cálculo de pérdidas en el cobre se ha empleado la siguiente expresión:

$$\Delta P_{cu} = P_{cu_T} * (C_1^2 - C_2^2) kW \quad (5.5)$$

Donde:

$\Delta P_{cu}$  : Ahorro en pérdida en el cobre.

$P_{cu_T}$  : Pérdida en el cobre del transformador (según el fabricante 9kW)

C: índice de carga ( $C = I_m / I_n$ )

$I_m$ : Corriente medida en el secundario del transformador.

$I_n$ : Corriente nominal de placa.

$C_1$  : Índice de carga antes de la compensación.

$C_2$  : Índice de carga después de la compensación.

El ahorro en pérdida en el cobre calculado para el transformador de 630kVA se muestra en la Tabla N° 5.5

**Tabla N° 5.5 Pérdidas en el cobre de transformador 630kVA**

Item	Transformador 630kVA	I Sec.	I nominal	Indice de carga	Potencia de CC	Pérdidas en el Cu	Ahorro x pérdidas	Total pérdidas
		$I_m$	$I_n$	C	Pcc (kW)	Pcu (Kw)	$\Delta P_{cu}$ (kW)	(kW)
1	Antes	210.36	790.72	0.2660	9.00	0.64	0.28	0.278
2	Después	157.99	790.72	0.1998	9.00	0.36		

### 5.3.1 Ahorro del costo de pérdidas eléctricas

#### a) Horas efectivas de funcionamiento de la instalación en 440Vac

La instalación funciona 7h/día de lunes a viernes y sábados 4h/día (extrusoras 440Vac)

De los cuales:

4h a plena carga y 3h al 90% de L-V: **6.7 horas/día**

4h a plena carga (sábados): **4 horas/día**

Para el cálculo del número de horas efectivas/mes se tomarán 22días (L-V) + 4 días (S) laborables.

Entonces el cálculo será:

$$22 \text{ días} \times 6.7 \text{ horas/día} + 4 \text{ días} \times 4 \text{ horas/día} = \mathbf{163.4 \text{ horas/mes}}$$

Por lo tanto las horas efectivas de operación (extrusoras) en 440Vac es **163.4 horas/mes.**

**b) Costo de ahorros de energía y operación (impacto económico)**

La planta industrial cuenta con una tarifa de energía eléctrica MT4 y con una potencia contratada de 1,000kW, es decir es un cliente regulado de media tensión. Para los costos de energía se hace uso del pliego tarifario correspondiente, como se indica en la Tabla N° 5.6.

**Tabla N° 5.6 Pliego tarifario lima norte: Edelnor**

TARIFA MT4:	TARIFA CON SIMPLE MEDICIÓN DE ENERGIA ACTIVA Y CONTRATACIÓN O MEDICIÓN DE UNA POTENCIA 1E1P	FEBRERO 2010	
	Cargo Fijo Mensual	SI./mes	2.64
	Cargo por Energía Activa	ctm. SI./kW.h	11.35
	Cargo por Potencia Activa de generación para Usuarios:		
	Presentes en Punta	SI./kW-mes	24.52
	Presentes Fuera de Punta	SI./kW-mes	15.10
	Cargo por Potencia Activa de redes de distribución para Usuarios:		
	Presentes en Punta	SI./kW-mes	9.67
	Presentes Fuera de Punta	SI./kW-mes	10.02
	Cargo por Energía Reactiva que exceda el 30% del total de la Energía Activa	ctm. SI./kVar.h	3.60

Calculamos el índice de calificación tarifaria del cliente, este se efectúa según el grado de utilización de la potencia en las horas de punta o fuera de punta; la expresión de indica en la ecuación (5.6).

$$I.C.T. = \frac{Ea_{HP}}{150 \times MD_{mes}} \quad (5.6)$$

Donde:

$I.C.T.$ : Índice de calificación tarifaria.

$Ea_{HP}$ : Energía activa en hora punta.

$MD_{mes}$ : Máxima demanda leída del mes.

Si  $I.C.T. < 0.5$ , indica que el cliente está fuera de punta.

Si  $I.C.T. > 0.5$ , indica que el cliente presente en horas punta.

Para nuestro estudio, empleando la ecuación (5.6) (considerando que la planta no opera los domingos) y el consumo mensual del recibo de electricidad se tiene:

$$I.C.T. = \frac{36,560kWh}{130h \times 450kW}$$

$I.C.T.=0.62$ , entonces podemos decir que el cliente está presente en punta.

De acuerdo a las horas efectivas de operación y las pérdidas calculadas, en la Tabla N° 5.7 se muestran los ahorros calculados en potencia y energía, como también los ahorros de operación en 440Vac de la planta; los ahorros se ha proyectado para un año, para ello se ha considerado la tarifa del pliego tarifario indicado en la Tabla N° 5.6, considerando que el cliente está presente en punta.

**Tabla N° 5.7 Cuadro de ahorros totales en \$/año**

ITEM	DESCRIPCIÓN DE MEJORAS	PÉRDIDAS	Ahorro en Potencia y Energía		\$/ año	\$/ año
1	Ahorro por pérdidas por efecto joule en cables alimentadores principales de BT	2.960 kW	3.238 kW	Ahorro por potencia activa de generacion (presente en punta)	952.75	337.85
2	Ahorro por pérdidas en el cobre del transformador 630kVA	0.278 kW				
3	Ahorro por pérdidas por efecto joule en cables alimentadores principales de BT	2.960 kW	3.238 kW	Ahorro por potencia activa de redes de distribución (presente en punta)	375.74	133.24
4	Ahorro por pérdidas en el cobre del transformador 630kVA	0.278 kW				
5	Ahorro por pérdidas por efecto joule en cables alimentadores principales de BT	2.960 kW	529.089 kWh	Ahorro por Energía activa	720.62	255.54
6	Ahorro por pérdidas en el cobre del transformador 630kVA	0.278 kW				
7	Ahorro por pérdidas de potencia reactiva (kVAr)	85.94 kVAr	14,041.942 kVArh	Ahorro por Energía reactiva	6,066.12	2,151.11
8	Ahorro por concepto de reducción de costo de mantenimiento (horas extras del personal + respuestos + consumibles)					819.84
9	Ahorro por concepto de horas de parada (Instalación en 440Vac)					30,844.56
<b>Total \$ /año</b>					<b>34,542.139</b>	

En el cuadro de ahorros de la Tabla N° 5.7, se ha considerado el ahorro por potencia activa de generación y de redes de distribución presente en punta. Además el ahorro por concepto de reducción de costo de mantenimiento que representa en un año un promedio de 819.84 dólares; así también el ahorro de 2,570.38 \$/mes por horas de parada, que representa anualmente un ahorro de 30,844.56 \$/año. Considerando todos los ahorros se obtiene al año un ahorro total de 34,542.139 dólares americanos.

#### 5.4 Análisis de rentabilidad

Para analizar la rentabilidad de ambas alternativas de solución, emplearemos los ahorros anuales en costo de pérdidas de energía y de operación calculados. Los cálculos a emplear se realizan tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo; para esto se calcula los parámetros económicos como el valor actual neto (VAN), la tasa de interés de retorno (TIR), la relación beneficio – costo (B/C) y el período de recuperación de la inversión (PRI) [13]. Para los cálculos de inversión se considera una tasa de interés de 12% anual, la depreciación anual del equipamiento a lo largo de la vida útil estimada (vida útil 10 años), costo de operación y mantenimiento (400 dólares al año para la instalación en 440Vac); se

considera una inversión en los equipamientos de \$ 20,134.46 y \$ 65,931.72 para la solución de la alternativa N° 1 y N° 2 respectivamente.

Los resultados son obtenidos utilizando las funciones financieras de la hoja de cálculo de EXCEL. Los análisis de inversión para la alternativa N° 1 y 2, se indican en las Tablas N° 5.8 y 5.9 respectivamente.

**Tabla N° 5.8 Análisis de inversión: Solución Alternativa N° 1**

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flujo (\$)	-20,134.46	33,393.68	33,393.68	33,393.68	33,393.68	33,393.68	33,393.68	33,393.68	33,393.68	33,393.68	33,393.68

Tasa anual	12%
------------	-----

**Métodos de Evaluación y Datos Obtenidos:**

VAN 12.00%	168,547.25																	
TIR	165.84%																	
PRI	1.00	✓	1	2	✓	3	✓	4	✓	5	✓	6	✓	7	✓	8	✓	9
B/C	9.37																	
PAYBACK	7.24 Meses																	

De acuerdo a la Tabla N° 5.8 podemos concluir lo siguiente:

- El VAN es mayor que cero y esto significa que existe una ganancia.
- El TIR es 165.84% y es mayor al 12%, esto significa que la inversión tiene una rentabilidad asociada mayor que la tasa de mercado (tasa 12% anual), por lo tanto diríamos que es más conveniente.
- El tiempo de recuperación de la inversión se da en el primer año (7.24 meses).
- La relación Beneficio Costo es 9.37, lo cual implica que los ingresos son mayores que los egresos para un periodo de 10 años, entonces la inversión es aconsejable.

**Tabla N° 5.9 Análisis de inversión: Solución Alternativa N° 2**

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flujo (\$)	-65,931.72	31,576.87	31,576.87	31,576.87	31,576.87	31,576.87	31,576.87	31,576.87	31,576.87	31,576.87	31,576.87

Tasa anual	12%
------------	-----

**Métodos de Evaluación y Datos Obtenidos:**

VAN 12.00%	112,485																	
TIR	46.87%																	
PRI	3.00	✓	✓	✓	3	✓	4	✓	5	✓	6	✓	7	✓	8	✓	9	
B/C	2.71																	
PAYBACK	25.06 Meses																	

De acuerdo a la Tabla N° 5.9 podemos concluir lo siguiente:

- El VAN es mayor que cero y esto significa que existe una ganancia.
- El TIR es 46.87% y es mayor al 12%, esto significa que la inversión tiene una rentabilidad asociada mayor que la tasa de mercado (tasa 12% anual), por lo tanto es conveniente.
- El tiempo de recuperación de la inversión se da en el tercer año (25.06 meses).

- La relación Beneficio-Costo es 2.71 y es mayor a uno, lo cual implica que los ingresos son mayores que los egresos, entonces la inversión es aconsejable.

Como conclusión final podemos afirmar que la solución de la alternativa N°1, que considera la implementación de filtros LCL individuales y el banco automático de condensadores, es la más económica y rentable en el corto plazo; a su vez la solución de la alternativa N° 2 que es de mayor inversión, tiene un mayor tiempo de recuperación de 25.06 meses, siendo técnicamente más confiable y útil operativamente ante cargas adicionales futuras.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El límite de distorsión armónica total de tensión según normas corresponde al 8% según la NTCSE y el 5% según la IEEE 519; evaluando nuestro sistema, estos presentan una baja distorsión, determinando así el cumplimiento con los límites permisibles en los puntos de acoplamiento común.
2. De acuerdo al sistema analizado, la distorsión total de demanda (TDD) calculada en los diferentes puntos de acoplamiento común, presentan una mayor incidencia con un 59.21% en el convertidor AC/AC, 42.76% en la llave 2 y 34.78% en el convertidor AC/DC; superando el límite permisible del 15% por la norma IEEE519 y es por esto que se toma acción mediante soluciones para minimizar los niveles de distorsión que protejan la instalación.
3. Los armónicos individuales de corriente más críticos, presentes en la instalación en 440Vac de la planta, son los de orden 5°, 7° y 11°, superando estos los límites individuales permisibles por la norma IEEE 519.
4. La solución propuesta de filtros pasivos individuales del tipo LCL son más económicos y de absorción puntual, pero son limitantes cuando se adicionan armónicas de cargas nuevas.
5. La propuesta del uso de filtros activos podríamos decir que es la solución más completa, a pesar de su alto costo son más confiables y tienen cobertura de minimizar las armónicas de otras cargas futuras que se pueden adicionar en la instalación.
6. El impacto económico que se tendría con la propuesta adicional de instalación de un banco automático de capacitores, la reducción de costos de mantenimiento y los ahorros por horas de parada, alcanza un ahorro total de 34,542.139 \$/año; siendo favorable para la reducción de los costos operativos.
7. Los estudios de armónicos en una instalación, nos permite conocer el contenido y comportamiento del flujo de armónicos en el sistema, permitiéndonos evaluar buscando posibles soluciones que sean viables económicamente de acuerdo a las características de las fuentes de distorsión.

8. Se sugiere en el futuro cuando se instalen nuevas cargas en 440Vac, realizar un monitoreo de corrientes y tensiones armónicas para poder determinar si las distorsiones provocadas por las nuevas cargas afectan de manera considerable o no el contenido armónico presente en la instalación eléctrica.
9. Este trabajo podría contribuir como referencia para otros estudios de futuros graduandos y también como documento de consulta para otras especialidades afines.

## **ANEXOS**

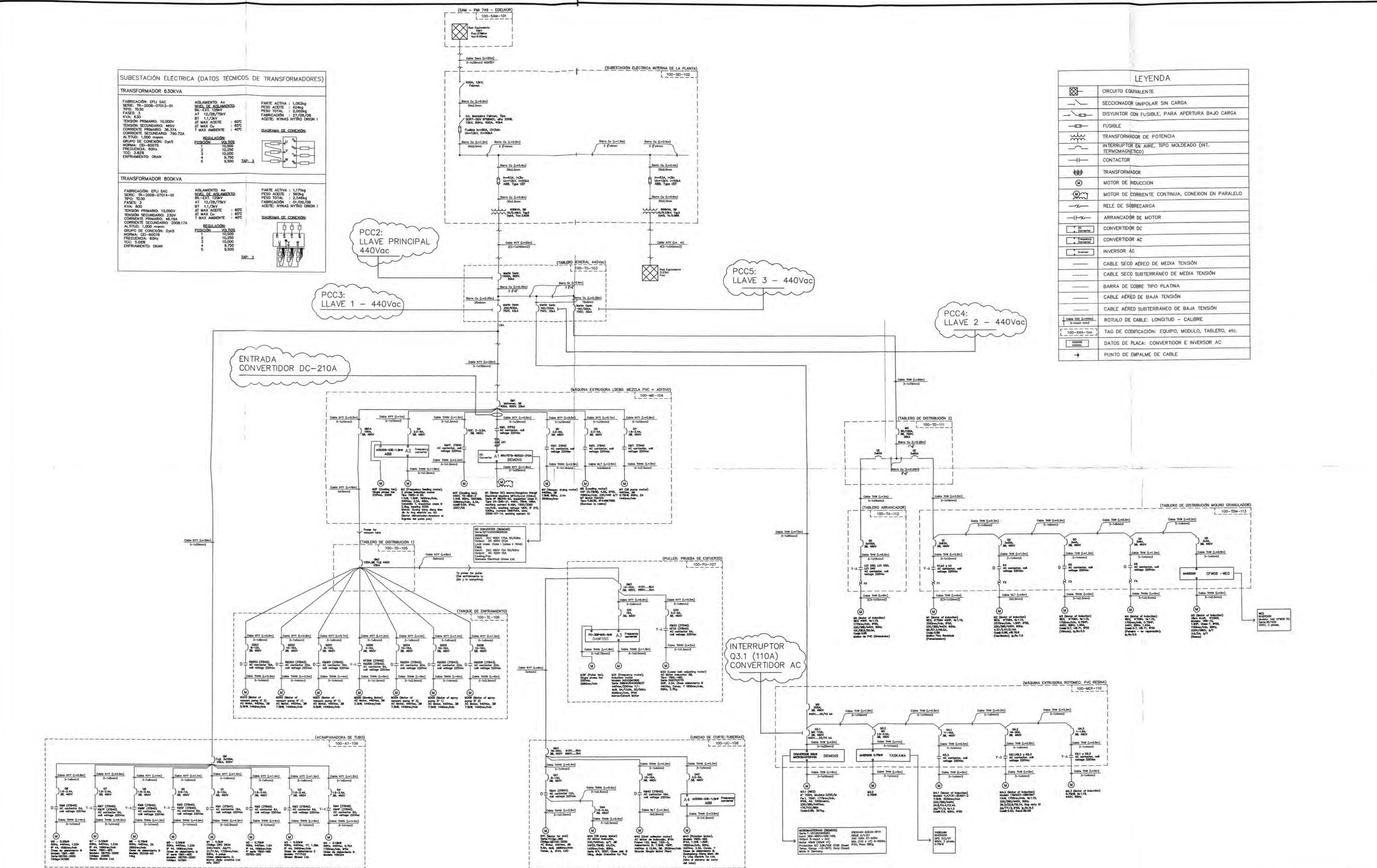
**ANEXO A:**

**Plano eléctrico unifilar general de la planta**

SUBESTACION ELÉCTRICA (DATOS TÉCNICOS DE TRANSFORMADORES)																			
<b>TRANSFORMADOR 630KVA</b>																			
FABRICACIÓN: EPLI SAC SERIE: TR-2008-0704-01 TIPO: T030 FASES: 3 KVA: 630 TENSÓN PRIMARIO: 10.000V TENSÓN SECUNDARIO: 460V CORRIENTE PRIMARIO: 36.37A CORRIENTE SECUNDARIO: 750.72A AL TUD: 1.000 mm GRUPO DE CONEXIÓN: Dyn5 NORMA: C0-60075 FRECUENCIA: 60Hz TCC: 5.0% ENFRAMIENTO: ONAN	ASLAMENTO: A0 NIVEL DE AISLAMIENTO: BL-EXT. 125kV AT: 12/25/75kV BT: 11/20V ΔT MAX ACEITE: 60°C ΔT MAX OIL: 65°C T MAX AMBIENTE: 45°C	PARTE ACTIVA: 1.062kg PESO ACEITE: 44kg PESO TOTAL: 2.002kg FABRICACIÓN: 27/09/08 ACEITE: NYNAS NYTRO ORION I																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>REGULACIÓN</th> <th>POSICIÓN</th> <th>VOLTAJE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>1</td><td>10.500</td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td>10.250</td></tr> <tr><td></td><td>3</td><td>10.000</td></tr> <tr><td></td><td>4</td><td>9.750</td></tr> <tr><td></td><td>5</td><td>9.500</td></tr> </tbody> </table>		REGULACIÓN	POSICIÓN	VOLTAJE		1	10.500		2	10.250		3	10.000		4	9.750		5	9.500
REGULACIÓN	POSICIÓN	VOLTAJE																	
	1	10.500																	
	2	10.250																	
	3	10.000																	
	4	9.750																	
	5	9.500																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>REGULACIÓN</th> <th>POSICIÓN</th> <th>VOLTAJE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>1</td><td>10.500</td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td>10.250</td></tr> <tr><td></td><td>3</td><td>10.000</td></tr> <tr><td></td><td>4</td><td>9.750</td></tr> <tr><td></td><td>5</td><td>9.500</td></tr> </tbody> </table>		REGULACIÓN	POSICIÓN	VOLTAJE		1	10.500		2	10.250		3	10.000		4	9.750		5	9.500
REGULACIÓN	POSICIÓN	VOLTAJE																	
	1	10.500																	
	2	10.250																	
	3	10.000																	
	4	9.750																	
	5	9.500																	

TRANSFORMADOR 800KVA																			
FABRICACIÓN: EPLI SAC SERIE: TR-2008-0704-01 TIPO: T030 FASES: 3 KVA: 800 TENSÓN PRIMARIO: 10.000V TENSÓN SECUNDARIO: 230V CORRIENTE PRIMARIO: 46.18A CORRIENTE SECUNDARIO: 2008.17A AL TUD: 1.000 mm GRUPO DE CONEXIÓN: Dyn5 NORMA: C0-60075 FRECUENCIA: 60Hz TCC: 5.0% ENFRAMIENTO: ONAN	ASLAMENTO: A0 NIVEL DE AISLAMIENTO: BL-EXT. 125kV AT: 12/25/75kV BT: 11/20V ΔT MAX ACEITE: 60°C ΔT MAX OIL: 65°C T MAX AMBIENTE: 45°C	PARTE ACTIVA: 1.171kg PESO ACEITE: 56kg PESO TOTAL: 2.246kg FABRICACIÓN: 07/09/08 ACEITE: NYNAS NYTRO ORION I																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>REGULACIÓN</th> <th>POSICIÓN</th> <th>VOLTAJE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>1</td><td>10.500</td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td>10.250</td></tr> <tr><td></td><td>3</td><td>10.000</td></tr> <tr><td></td><td>4</td><td>9.750</td></tr> <tr><td></td><td>5</td><td>9.500</td></tr> </tbody> </table>		REGULACIÓN	POSICIÓN	VOLTAJE		1	10.500		2	10.250		3	10.000		4	9.750		5	9.500
REGULACIÓN	POSICIÓN	VOLTAJE																	
	1	10.500																	
	2	10.250																	
	3	10.000																	
	4	9.750																	
	5	9.500																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>REGULACIÓN</th> <th>POSICIÓN</th> <th>VOLTAJE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>1</td><td>10.500</td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td>10.250</td></tr> <tr><td></td><td>3</td><td>10.000</td></tr> <tr><td></td><td>4</td><td>9.750</td></tr> <tr><td></td><td>5</td><td>9.500</td></tr> </tbody> </table>		REGULACIÓN	POSICIÓN	VOLTAJE		1	10.500		2	10.250		3	10.000		4	9.750		5	9.500
REGULACIÓN	POSICIÓN	VOLTAJE																	
	1	10.500																	
	2	10.250																	
	3	10.000																	
	4	9.750																	
	5	9.500																	

LEYENDA	
	CIRCUITO EQUIVALENTE
	SECCIONADOR UNIPOLAR SIN CARGA
	DISYUNTOR CON FUSIBLE, PARA APERTURA BAJO CARGA
	FUSIBLE
	TRANSFORMADOR DE POTENCIA
	INTERRUPTOR EN AIRE, TIPO MOLDEADO (INT. TERMOMAGNETICO)
	CONTACTOR
	TRANSFORMADOR
	MOTOR DE INDUCCION
	RELE DE SOBRECARGA
	ARRANCADOR DE MOTOR
	CONVERTIDOR DC
	CONVERTIDOR AC
	INVERSOR AC
	CABLE SECO AÉREO DE MEDIA TENSIÓN
	CABLE SECO SUBTERRÁNEO DE MEDIA TENSIÓN
	BARRA DE COBRE TIPO PLATINA
	CABLE AÉREO DE BAJA TENSIÓN
	CABLE AÉREO SUBTERRÁNEO DE BAJA TENSIÓN
	ROTULO DE CABLE: LONGITUD - CALIBRE
	TAG DE CODIFICACION: EQUIPO, MODULO, TABLERO, etc.
	DATOS DE PLACA: CONVERTIDOR E INVERSOR AC
	PUNTO DE EMPALME DE CABLE



REV.	DESCRIPCION	EMITIDO PARA	DISEÑADO POR	REVISADO POR	INGENIERO DE PROYECTO	GERENTE DE PROYECTO	FECHA
1	ESQUEMA UNIFILAR ELÉCTRICO SISTEMA 440Vac	APROBACIÓN	L.B.D.R.	L.B.D.R.	L.B.D.R.	L.B.D.R.	15/05/09
0	ESQUEMA UNIFILAR ELÉCTRICO SISTEMA 440Vac	REVISIÓN	L.B.D.R.	L.B.D.R.	L.B.D.R.	L.B.D.R.	21/04/09

NO.	Nº DE PLANO	PLANOS DE REFERENCIA
6		
5		
4		
3		
2		
1		

LA INFORMACION CONTENIDA EN ESTE PLANO Y LA CONTENIDA EN EL INFORME DEL QUE FORMA PARTE, HA SIDO PREPARADO A SOLICITUD DE NUESTRO CLIENTE PARA UN PROYECTO ESPECIFICO. POR LO QUE TIENE EL CARACTER DE CONFIDENCIAL, SU EMPLEO PARA CUALQUIER OTRO PROPOSITO REQUIERE DE LA AUTORIZACION EXPRESA Y POR ESCRITO DEL CLIENTE Y DE L.B.D.R.

GERENTE DE PROYECTO: L.B.D.R. ABR. 2009  
INGENIERO DE PROYECTO: L.B.D.R. ABR. 2009  
APROBADO POR: L.B.D.R. ABR. 2009  
REVISADO POR: L.B.D.R. MAY. 2009  
DISEÑADO POR: L.B.D.R. ABR. 2009  
DIBUJADO POR: L.B.D.R. ABR. 2009

**Luis Blanco Del Rosario**



Nº PROYECTO:	PROYECTO: ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS SISTEMA DE 0.44KV
TÍTULO:	DIAGRAMA UNIFILAR ELÉCTRICO PLANTA DE PRODUCCIÓN DE TUBERIAS DE PVC COMERCIAL MATUSITA S.A.C.
Nº DE PLANO:	IE-001
ESCALA:	S/E
FECHA:	MAY. 2009
REV.	1

**ANEXO B:**  
**Características de analizador de redes CIRCUTOR AR-5L**



# ANALIZADORES DE REDES PORTÁTILES Y ACCESORIOS



## INTRODUCCIÓN

**CIRCUTOR** dispone de una gama de instrumentos portátiles, que han sido pensados para solucionar los principales problemas eléctricos con los que se encuentran los responsables de mantenimiento de industrias o compañías eléctricas, los instaladores, etc.

Podríamos decir que la mayoría de las aplicaciones con instrumentos portátiles lo que buscan es medir para:

a) Ahorrar

- Detectar y prevenir el exceso de consumo (kW·h)
- Analizar curvas de carga para ver donde se produce la máxima demanda de energía
- Dimensionar baterías de condensadores que compensen la reactiva (consumo de kvar)
- Detectar fraude en los contadores de energía

b) Prevenir

Nuestros equipos son ideales para realizar mantenimientos periódicos del estado de la red eléctrica tanto en baja como en media tensión, ver curvas de arranque de motores, detectar posibles saturaciones del transformador, cortes de alimentación, pobre calidad de suministro, etc.

c) Solventar

Poder analizar donde tenemos un problema en una red eléctrica para poder solucionar problemas de disparos intempestivos, fugas diferenciales, calentamiento de cables, resonancias de la batería con el transformador, armónicos, perturbaciones, *flicker*, desequilibrios de fases, etc. Al mismo tiempo, nos permite diseñar los tamaños adecuados para los filtros activos o pasivos de armónicos, filtros para variadores de velocidad, etc.

	Medida en verdadero valor eficaz
	Medida de más de 50 parámetros eléctricos
	Dispone de Protección <i>password</i> para el <i>setup</i> (según tipo)
	Precisión en tensión y corriente de 0,5 %
	Protector de display para el ahorro de energía (según tipo)

	Medida en 4 cuadrantes
	Medida en 2 cuadrantes
	Almacena en memoria los valores máximos y mínimos medidos
	Medida de THD en V y A
	Medida de armónicos hasta el 15 ó 50 (según tipo)

## ANALIZADORES DE REDES AR.5 / AR5L



- Analiza todas las magnitudes eléctricas de la red
- Con 4 canales de tensión y 4 de corriente (AR5L)
- *Autotrigger* con opción a configurarlo según las magnitudes que se desee
- Idiomas español e inglés
- Display retroiluminado LCD de gran tamaño
- CAT III 600 V EN 61010. Certificado UL
- Visualización de hasta 30 parámetros eléctricos en pantalla
- Pequeño tamaño y reducido peso, sólo 0,8 kg
- Ficheros independientes para cada medida
- Incluye potente *software* de análisis: **POWERVISION**
- Configurable mediante menú
- Posibilidad de trabajar sin alimentación externa con una autonomía de hasta 10 horas
- Capaz de realizar diferentes tipos de registro: armónicos, perturbaciones, comprobación de contadores, transitorios, *flicker*, etc.
- Equipo multifunción con instalación de *software*
- Comunicación con PC
- Autodetección del tipo de pinza
- Autoselección de parámetros a guardar
- Cálculo del tiempo restante hasta llenado de memoria
- Memoria lineal / memoria rotativa



Analizadores de redes			
Entradas corriente	Memoria interna	Tipo	Código
3	1 MB	AR.5	M80103
4	1 MB	AR5L	M80111



Kits		Analizador	Pinzas	Programa	Bolsa de transporte	Software Power-Visión
Tipo	Código					
Kit 3 AR.5	M80711	AR.5	3 x CPR-1000	AR.5-AR5L-ARI	Si	Si
Kit 4 AR.5	M80721	AR.5	3 x CP-2000/200	AR.5-AR5L-ARI	Si	Si
Kit 5 AR.5	M80732	AR.5	3 x CP-2000/200, 3 x CP-5	AR.5-AR5L-ARI AR.5-AR5L-CL	Si	Si
Kit 9 AR.5-RBT	M80781	AR.5	3 x CPR-500	AR.5-AR5L-ARI	Si	Si
Kit 3L AR5L	M80811	AR5L	3 x CPR-1000, 1 x CPR-500	AR.5-AR5L-ARI	Si	Si
Kit 4L AR5L	M80821	AR5L	3 x CP-2000/200, 1 x CPR-1000	AR.5-AR5L-ARI	Si	Si
Kit 5L AR5L	M80832	AR5L	3 x CP-2000/200, 1 x CPR-1000, 3 x CP-5	AR.5-AR5L-ARI AR.5-AR5L-CL	Si	Si
Kit 11L AR5L-RBT	M80843	AR5L	3 x C-FLEX - 45 cm 1 x CF-5	AR.5-AR5L-ARI AR.5-AR5L-CL	Si	Si
Kit 12L AR5L-RBT	M80953	AR5L	3 x C-FLEX - 80 cm 1 x CF-5	AR.5-AR5L-ARI AR.5-AR5L-CL	Si	Si

Programas		
Descripción	Tipo	Código
Actualización armónicos	Actualización AR5-AR5L-ARI	M80221
Flicker	Programa AR.5-AR5L-FL	M80223
Calidad de red, perturbaciones	Programa AR.5-AR5L-CL	M80224
Check.Meter	Programa AR.5-AR5L-CM	M80225
Arranque de motores	Programa AR.5-AR5L-Fast	M80226
Fugas	Programa AR.5-AR5L-Leak	M80229
Gráficos	Programa AR.5-AR5L-File Vision	M8022A

## ARMÓNICOS

El programa de armónicos permite:

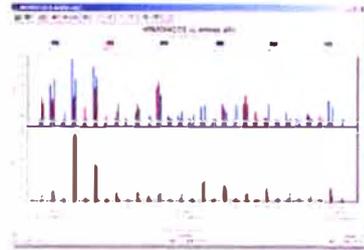
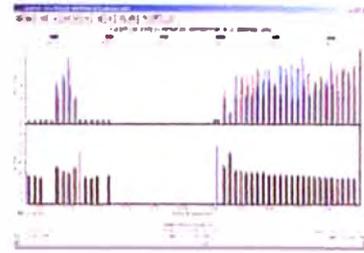
- Análisis de todos los parámetros eléctricos: tensión, corriente, potencia, energía, etc.
- Análisis de sobrecalentamientos en transformadores, condensadores, etc.
- Detección corriente de neutro
- Formas de onda mostradas en el display en tiempo real
- Realización *zoom* sobre forma de onda
- Visualización de la descomposición armónica (30 ó 50 armónicos)
- Cálculo del THD % en tensión y corriente

### Aplicaciones

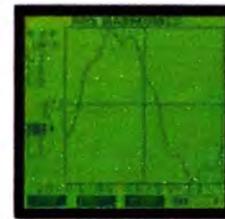
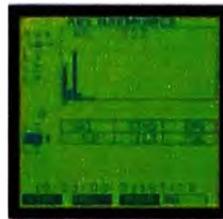
- Cálculos del diámetro del cable necesario para soportar las pérdidas debidas a los armónicos
- Estudios para aplicaciones de filtrado de armónicos
- Comparación de las medidas realizadas según norma IEC
- Estudio energético y de tarifas
- Estudio de consumos de la instalación
- Análisis de la potencia reactiva a compensar

### Representación gráfica de:

- Formas de onda y distorsión armónica
- Tasa de distorsión armónica THD %
- Descomposición armónica (hasta el orden 50)
- Valores RMS para tensión y corriente
- Permite realizar tablas y listas
- Permite ver dirección de los armónicos por *software*



Tipo	Código
Programa actualización	M80221



## CALIDAD RED - PERTURBACIONES

### Aplicaciones del programa:

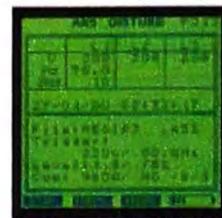
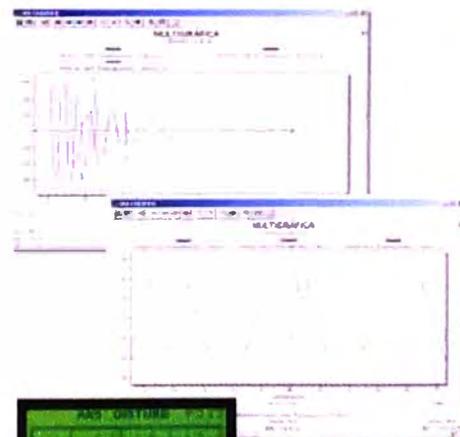
- Detección de interrupciones, huecos, microcortes, picos, etc.
- Ajuste de la sensibilidad para la captura de distintos tipos de perturbaciones
- Informa sobre el número de perturbaciones detectados

### Aplicaciones:

- Comprobar el efecto de la conmutación de una carga sobre varios puntos de la instalación
- Tomar "radiografías" de cualquier instalación mediante un AR.5 y un PC, podrá conocer todo acerca de una red de suministro:

- Evolución de la forma de onda
- Visualización de una perturbación
- Comparación de las tres fases en el momento de una perturbación

Tipo	Código
Programa Calidad de red	M80224





## FLICKER

El programa *flicker* permite:

- Estudiar el *flicker* presente en la instalación, ya sea instantáneo,  $P_{st}$  y  $P_{it}$  (éste último vía *software*)
- Realizar las mismas operaciones que en el programa de energía
- Configuración de los tiempos para el cálculo de *flicker* y energía
- Parámetros *flicker* en una sola pantalla

**Aplicaciones:**

- Determinar el nivel de molestia visual que puede provocar una disminución del rendimiento de los trabajadores.
- Estudiar las fluctuaciones de tensión

Tipo	Código
Programa FL	M80223



## ARRANQUE MOTOR

El programa *Fast Check* permite:

- Realizar estudios en redes monofásicas o trifásicas capturando tensión, corriente, potencia y factor de potencia en periodos a nivel de ciclo
- Capturar transitorios de corta duración (p.e.: arranque de motores, máquinas de soldadura, etc.)
- Posibilidad de grabación mediante el disparo de un *trigger*
- Memoria fija o rotativa

**Aplicaciones:**

- Realizar estudios sobre curvas de arranque en motores y transitorios en general
- Ideal para instalaciones con maquinaria de soldadura
- Estudio de maquinaria con maniobras de conexión y desconexión frecuente y rápida

Tipo	Código
Programa Fast	M80226



## CHECK-METER

El programa permite:

- Verificar la medida en contadores electrónicos y mecánicos
- Realizar la prueba sin cortes de energía
- Pruebas de tan sólo 30 segundos
- Determinar el error en contadores de energía activa o reactiva
- *Set-up* programado y porcentaje de error en una sola pantalla
- Posibilidad de realizar hasta 4.000 registros
- Tabla numérica
- Exportación a formato (.bmp) o al portapapeles

**Aplicaciones:**

- Realizar estudios de verificación de contadores, crear informes detallados de cada punto de medida
- Detectar errores superiores al 1 % (\*) en los contadores eléctricos
- Detectar posibles fraudes

**Lector Óptico**

- Para contadores electrónicos o con LED de verificación
- Manguera de fibra óptica para verificación de contadores
- Cable de comunicación y alimentación que lo conecta al AR.5
- Mide impulsos con duración superior a 1  $\mu$ s
- Plástico Anti-*shock*
- Dimensiones reducidas : 64 x 41 x 26 mm (Incluye captador, shunts, programa y software)

(\*) Con el conjunto calibrado AR5L - shunts



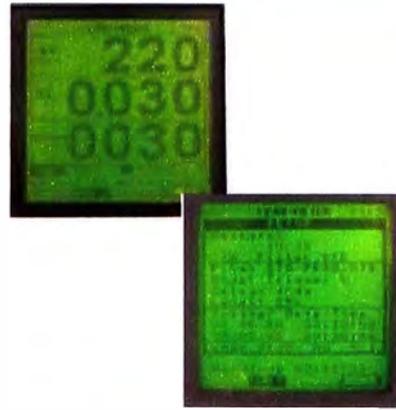
Tipo	Código
Programa CM (Incluye captador, shunts, programa y software)	M80225

## LEAK (AR5L)

- Medición de corrientes de fugas, de hasta 10 A, mediante transformador
- Medición a través de una pinza amperimétrica
- Medición a través de transformador diferencial
- Escalas de medición con pinza de 2 mA a 1A y otra de 20 mA a 10 A
- Filtrado de altas frecuencias para evitar el efecto de sistemas de conmutación
- Medición del valor eficaz (RMS ) en cada periodo (20 ms)
- Medición continua con registro cada periodo de tiempo programado
- Periodo de registro programable entre 1 s y 100 s
- Detección del momento de disparo por caída de tensión
- Detección del momento de disparo según el nivel de fugas programado

### Aplicaciones

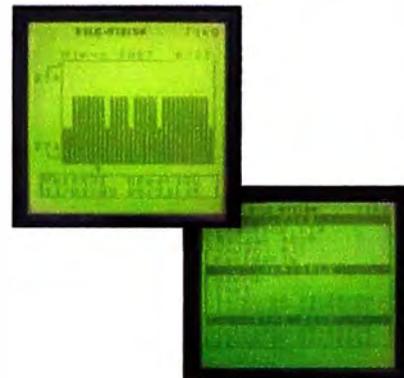
- Detección del nivel de disparo de los relés de protección
- Comprobación de fugas sin necesidad de realizar el análisis en persona



Tipo	Código
Programa Leak	M80229

## FILE VISION (AR5L)

- Verificación de los registros in situ
- Visualización de los registros, sin necesidad de PC
- La pantalla dispone de un cursor que indica en cada posición el valor, en magnitud y tiempo de registro, de la variable seleccionada
- Eje de la magnitud auto escalable (adaptado al máximo y mínimo de la totalidad de los registros)
- Visualización de 32 registros por pantalla permanente
- Indicación del máximo y mínimo valor de registro
- La navegación entre registros es fácil y rápida
- Variables representadas en los distintos programas:
  - Armónicos: Vpp,Vpn, A, W, var L, var C, PF, Hz, V·A,  $I_n$ , KW·h
  - Chek-Phase: Vpp,Vpn, A, W, var L, var C, PF, Hz, V·A,  $I_n$ , KW·h
  - Flicker: Vpp,Vpn, A, W, var L, var C, PF, Hz, V·A,  $I_n$  KW·h.,  $P_{st}$
  - Fast-Check: Vpp,Vpn, A, W, var L, var C, PF, Hz, V·A,  $I_n$



Tipo	Código
Programa File-Vision	M8022A

## ACCESORIOS



**Kit Check Optic**, incluye: captador, programa *Check\_Meter* y software *POWER-VISION* M806B3

**Alimentador, cargador e interfaz (RS-232)**

**Conjunto shunt AR.5, AR5L** M89925

**Adaptador conector C-FLEX AR.5, AR5L** M89928

**Estuche para AR.5, AR5L** M89901

**Estuche para pinzas AR5L** M89921

**Bolsa transparente AR.5, AR5L** M89905

**Maleta 1000** M89913

**Maleta 1000L** M89923

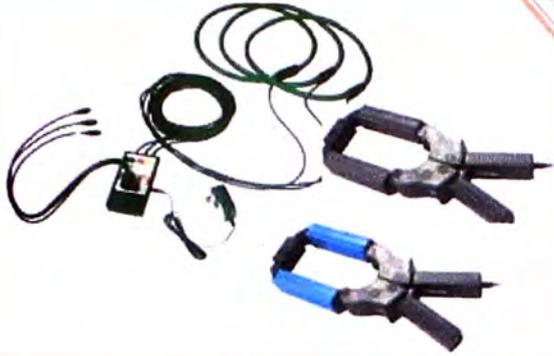
**Maleta 2000** M89914

**Maleta 2000L** M89924

## CARACTERÍSTICAS

	AR.5	AR5L
<b>Circuito de alimentación</b>		
A través de alimentador externo	100 V c.a. - 240 V c.a. / 12 V c.c.	
Frecuencia	50...60 Hz	
Consumo	15 V·A	
Temperatura de trabajo	0 °C / + 40 °C	
Altitud	≤ 2 000 m	
Humedad de funcionamiento	80 % para temperaturas inferiores a 31 °C, disminuyendo linealmente hasta 50% a 40 °C	
Circuito de medida	Trifásico (3 hilos)	Trifásico (3 / 4 hilos)
Seguridad	Categoría III - 600 V, según EN 61010	
Grado de contaminación	2	
<b>Circuito de tensión</b>		
Rango de medida	20 a 500 V c.a. (fase-neutro)	
Cambio de escala	Automático	
Otras tensiones	A través de transformadores de tensión	
Frecuencia	45 ... 65 Hz	
<b>Medida de corriente</b>		
Rango de medida	Según pinza de 0,01 A hasta 20 kA	
Relaciones de transformación de tensión y corriente	Programable	
Unidades de medida	Cambio de escala automático	
Memoria interna	1 Mb	
<b>Clase de precisión (*)</b>		
Corriente	0,5 % de la lectura ± 2 dígitos	
Tensión	0,5 % de la lectura ± 2 dígitos	
Potencia activa	1,0 % de la lectura ± 2 dígitos	
Potencia reactiva	1,0 % de la lectura ± 2 dígitos	
(*) Precisiones dadas con las siguientes condiciones de medida: Exclusión de los errores aportados por las pinzas y transformadores de tensión externos, con rango de temperaturas de 5 a 45° C y factor de potencia 0 a 1.		
Dimensiones	220 x 60 x 130 mm	
Conectores para pinzas amperimétricas	3	3 / 4
Teclado / display	En panel frontal	
Peso	800 g	
Reloj interno y batería recargable	Sí	
Display	LCD 160 x 160 píxeles (retroiluminado)	
Salida RS-232	Salida serie	
<b>Normas</b>	<b>EN 60664 , EN 61010 , EN 61036 , VDE 110 , UL 94</b>	
<b>Emisión electromagnética</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- EN 61000-3-2 (1995), Armónicos.</li> <li>- EN 61000-3-3 (1995), Fluctuaciones de tensión.</li> <li>- EN 61000-6-4 (2002), Emisión industrial. <ul style="list-style-type: none"> <li>- EN 55011 (1994): Conducida (EN 55022 - Clase B).</li> <li>- EN 55011 (1994): Radiada (EN 55022 - Clase A).</li> </ul> </li> </ul>	
<b>Immunidad electromagnética</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- EN 61000-6-2 (2002), Inmunidad industrial.</li> <li>- EN 61000-4-2 (1995), Descarga electrostática.</li> <li>- ENV 50140 (1993), Campo radiado EM de RF.</li> <li>- EN 61000-4-4 (1995), Ráfagas de transitorios rápidos.</li> <li>- ENV 50141 (1993), RF en modo común.</li> <li>- EN 61000-4-8 (1995), Campo magnético a 50 Hz.</li> <li>- EN 61000-6-1 (2002), Inmunidad doméstica. <ul style="list-style-type: none"> <li>- EN 61000-4-5 (1995), Onda de choque.</li> <li>- EN 61000-4-11 (1994), Interrupciones de alimentación.</li> </ul> </li> </ul>	
Simbolos de la carcasa	¡Atención! Máxima tensión de entrada 500 V	
	Aislamiento reforzado	

## PINZAS DE CORRIENTE, B.T.



CIRCUTOR dispone de una amplia gamma de pinzas que permiten medir hasta 20 000 A con una alta precisión.

- Amplia gama de medida (0,01 A a 20 kA).
- Ancho de banda adaptado para frecuencias industriales
- Máxima precisión
- No sensible a corrientes continuas ( C-FLEX)
- Muy ligeras
- Desfase mínimo, ideal para medida de potencias
- Medida simultánea de las tres fases, con AR.5 / AR5L

	CP-5	CP-100	CPR-100	CPR-500
Código para AR.5, AR5L (Kits 3)	M81041	M81042	M81036 (*)	M81043
Código para C-80	M81031	M81032	M81036	M81033
Rango medida	0.05...5 A c.a.	1...100 A c.a.	1...100 A c.a.	1...500 A c.a.
Frecuencia nominal	48 ... 65 Hz			
Tensión salida	2 V c.a.			
Rigidez dieléctrica	5 200 V c.a. 50...60 Hz			
Error en fondo de escala	1 %	0,5 %	0,7 %	
Máximo diámetro conductor	20 mm		52 mm	
Pletina máxima	20 x 5 mm		1 de 50 x 5 mm ó 4 de 30 x 5 mm	

	CPR-1000	CF-5	CP-2000/200	CF-10
Código para AR.5, AR5L (Kits 3)	M81044	M81036 (*)	M81045	M81334
Código para C-80	M81034	M81351	M81035	-
Rango medida	1...1 000 A c.a.	0,01...5 A c.a.	1...200 10...2 000 A c.a.	de 0,2 mA hasta 10 A c.a.
Frecuencia nominal	48 ... 65 Hz			
Tensión salida	2 V c.a.			
Rigidez dieléctrica	5 200 V c.a. 50...60 Hz			
Error en fondo de escala	0,7 %	Hasta 0,1 A 1 % Hasta 5 A 0,5 %	Escala 200: 0.5 % + 70 mA Escala 2 000: 0.5 % + 100 mA	- 0,35%
Máximo diámetro conductor	52 mm		64 mm	100mm
Pletina máxima	1 de 50 x 5 mm ó 4 de 30 x 5 mm		5 de 125 x 5 mm o 3 de 100 x 10 mm	5 x 80 x 5 mm 3 x 80 x 10 mm

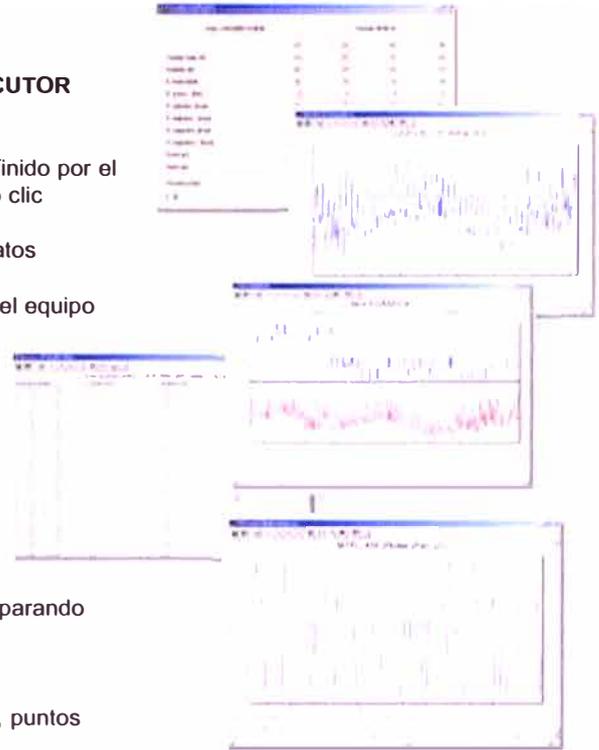
	C-FLEX
Código para AR.5, AR5L (Kits 3)	45 cm- M81141 / 80 cm - M81142 / 120 cm - M81143
Código para C-80	45 cm- M81151 / 80 cm - M81152 / 120 cm - M81153
Longitud sensor	45 cm / 80 cm / 120 cm
Escalas	200 A / 2 000 A / 20 kA
Sensibilidad en mV	10 mV / A; 1 mV / A; 0,1 mV / A
Amplitud de medida	5A ... 20 kA
Ancho de banda	10 Hz a 20 kHz
Precisión	1 %
Seguridad eléctrica	Doble aislamiento IEC 1010 – 100 V- Cat III- Grado contaminación 2

	C-FLEX
Sobretensión admisible en salida	600 V ef. (factor de pico 1,5)
Condiciones ambientales	
Temperatura	-10 / 55 ° C
Humedad	90 % HR a 50 ° C
Características constructivas	
Dimensiones	120 x 65 x 22 mm
Peso carcasa	220 g Cable señal solidario: 1 m (otras longitudes, bajo demanda)

(\*) Solo 1 pinza

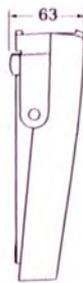
**POWER VISION**

- Comunicaciones con AR5L, AR.5, y otros equipos de CIRCUTOR
- Presentación gráfica y / o numérica de los resultados
- Impresión de los resultados del análisis
- Estudios de calidad de suministro según EN 50160 y/o definido por el usuario, en armónicos, flicker y/o nivel de tensión, con un solo clic
- Exportación de gráficos y tablas a .BMP
- Exportación de datos a archivos .txt para luego tratar los datos desde cualquier hoja de cálculo
- Estudio gráfico o mediante tablas, de los datos obtenidos del equipo
- Es posible realizar gráficas de la evolución temporal
- Gráfica de tensión
- Gráfica de corriente
- Gráfica de formas de onda por ciclo
- Gráfica de frecuencia
- Gráfica de potencia
- Gráfica de energía
- Gráfica de flicker
- Gráfica de distorsión armónica
- Gráfica de descomposición armónica
- Posibilidad aplicar filtros en las gráficas de armónicos, comparando con EN 50160 u otros niveles definidos por el usuario
- Creación automática de informes de calidad de suministro
- Análisis del fichero de perturbaciones con opción de filtro
- Gráficas configurables: color, tipo de gráfica (barras, líneas, puntos o área) etc.

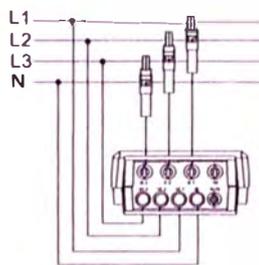


**DIMENSIONES / CONEXIÓN**

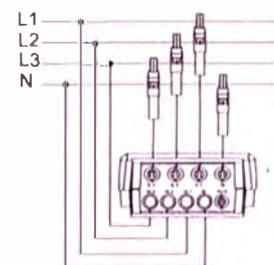
AR.5 / AR5L



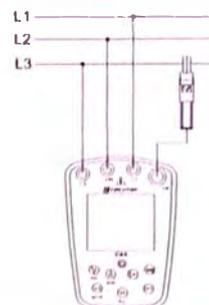
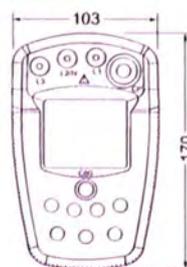
AR.5



AR5L



C-80



Vial Sant Jordi s/n  
08232 Viladecavalls  
Barcelona (Spain)  
Tel. (+34) 93 745 29 00  
Fax: (+34) 93 745 29 14  
e-mail: central@circutor.es  
web: www.circutor.com

cod. C3M081-01

CIRCUTOR se reserva el derecho a modificar el contenido de este catálogo sin previo aviso.  
CIRCUTOR no asume ninguna responsabilidad de cualquier daño causado a personas, o materiales, debido a un uso erróneo o inapropiado de estos productos.



Diseño: Comunicación • CIRCUTOR, SA

**ANEXO C:**  
**Catálogo de filtro pasivo LCL**

# R.7

Compensación de energía reactiva  
y filtrado de armónicos



Filtros de armónicos y EMI

# LCL

Filtro de armónicos para convertidores



## Descripción

Los filtros **LCL** están especialmente diseñados para eliminar los armónicos de la corriente absorbida por convertidores de potencia de 6 pulsos, tales como variadores de frecuencia para motores, **SAI**, etc.

Se trata esencialmente de filtros pasivos a base de una combinación serie-paralelo de inductancias y condensadores, adaptados a filtrar la entrada de los convertidores de potencia.

## Aplicación

- Reducción de la distorsión de la onda de corriente hacia la red y el resto de la instalación
- Cumplir con las normas **IEC 61000-3-4**, **IEC 61000-3-12**, **IEC 61800-3** e **IEEE-519**
- Ahorro de energía por la reducción de la corriente eficaz (RMS), por tanto reducimos los kV·A demandados.
- Incremento de la vida útil de equipos aguas arriba al reducir las pérdidas térmicas que se generan.
- Limita transitorios de corriente, evitando daños al convertidor y disparos por sobreten-sión que afectan procesos de producción.

## Características

<b>Circuito de alimentación</b>	230 V c.a. (-15...+10%) - Opcional (85...265 V c.a. / 95...300 V c.c.)
Consumo	5 V·A
Frecuencia	45...65 Hz
<b>Circuito de medida</b>	
Tensión nominal	300 V c.a. (fase-neutro) 520 V c.a. (fase-fase)
Frecuencia	45...65 Hz
Consumo en el circuito tensión	0,7 V·A
Consumo circuito corriente	<b>ITF 0,5 / Shunt 0,75 V·A</b>
Corriente nominal	$I_n$ .../5 A (entrada aislada en tipo ITF)
Sobrecarga permanente	1,1 $I_n$
<b>Clase</b>	
Tensión	0,5 % (± 2 dígitos)
Corriente	0,5 % (± 2 dígitos)
Potencia	1 % (± 2 dígitos)
<b>Transistor de salida</b>	Optoacoplado (colector abierto) NPN
Tensión máxima de maniobra	24 V c.c.
Corriente máxima de maniobra	50 mA
Frecuencia máx. impulso	5 imp / s
Duración del impulso	100 ms
<b>Condiciones ambientales</b>	
Temperatura de uso	-10... +50 °C
<b>Características constructivas</b>	
Tipo de caja	Plástico V0 autoextinguible
Grado protección	equipo montado (frontal) IP 51 equipo sin montar (lateral) IP 31
Dimensiones	96 x 96 x 63 mm
Peso	0,4 kg
<b>Seguridad</b>	
	Categoría III-300 V c.a. / 520 V c.a. <b>EN 61010</b> . Protección al choque eléctrico por doble aislamiento clase II
<b>Normas</b>	<b>IEC 664</b> , <b>VDE 0110</b> , <b>IEC 801</b> , <b>UL 94</b> , <b>IEC 348</b> , <b>IEC 571-1</b> , <b>EN 61000-6-3</b> , <b>61000-6-1</b> , <b>61010-1</b>

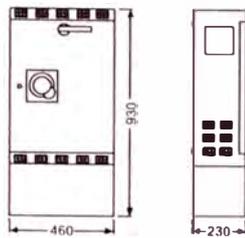
## LCL

Filtro de armónicos para convertidores

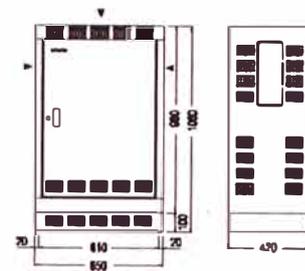


## Dimensiones

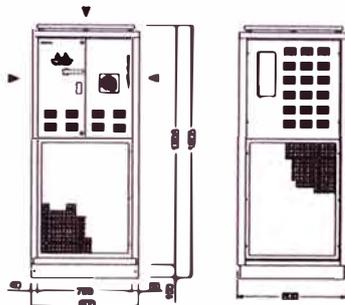
LCL A



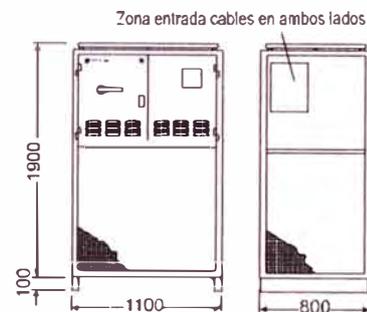
LCL B



LCL C



LCL D



## Referencias

LCL 400 - 415 V / 50 Hz

Corriente de carga $I_c$ (A)	Q (kvar)	Dimensiones (mm) ancho x alto x fondo	Armario	Tipo	Código
9	1,76	615 x 700 x 245	LCL A	LCL 35-9A-400	R73105
12	2,51	615 x 700 x 245	LCL A	LC L35-12A-400	R73106
16	3,27	615 x 700 x 245	LCL A	LCL 35-16A-400	R73107
22	4,42	615 x 700 x 245	LCL A	LCL 35-22A-400	R73108
32	6,63	615 x 700 x 245	LCL A	LCL 35-32A-400	R73109
40	8,29	615 x 700 x 245	LCL A	LCL 35-40A-400	R73110
47	9,14	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 35-47A-400	R73111
54	10,8	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 35-54A-400	R73112
64	13,26	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 35-64A-400	R73113
76	14,92	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 35-76A-400	R73114
90	18,24	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 35-90A-400	R73115
110	23,21	800 x 1900 x 800	LCL C	LCL 35-110A-400	R73116
150	29,84	800 x 1900 x 800	LCL C	LCL 35-150A-400	R73117
180	36,48	800 x 1900 x 800	LCL C	LCL 35-180A-400	R73118
220	46,42	1100 x 2000 x 800	LCL D	LCL 35-220A-400	R73119
260	53,06	1100 x 2000 x 800	LCL D	LCL 35-260A-400	R73120
320	66,32	1100 x 2000 x 800	LCL D	LCL 35-320A-400	R73121
400	79,58	1100 x 2000 x 800	LCL D	LCL 35-400A-400	R73122

Opcional otras tensiones, frecuencias y corrientes bajo pedido.

## LCL

Filtro de armónicos para convertidores

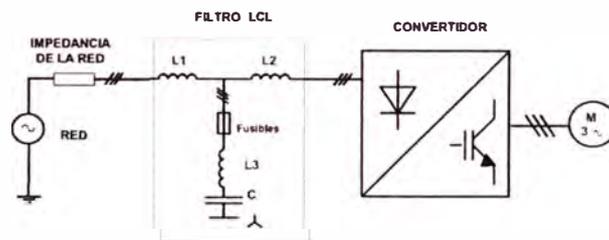


### Referencias

LCL 460 - 480 V / 60 Hz

Corriente de carga $I_c$ (A)	Q (kvar)	Dimensiones (mm) ancho x alto x fondo	Armario	Tipo	Código
9	2,73	460 x 930 x 235	LCL A	LCL 36-9A-480	R732050070000
16	4,55	460 x 930 x 235	LCL A	LCL 36-16A-480	R732070070000
22	6,21	460 x 930 x 235	LCL A	LCL 36-22A-480	R732080070000
32	7,59	460 x 930 x 235	LCL A	LCL 36-32A-480	R732090070000
40	11,38	460 x 930 x 235	LCL A	LCL 36-40A-480	R732100070000
47	15,18	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 36-47A-480	R732110070000
54	15,18	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 36-54A-480	R732120070000
64	18,97	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 36-64A-480	R732130070000
76	22,77	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 36-76A-480	R732140070000
90	26,56	650 x 1060 x 420	LCL B	LCL 36-90A-480	R732150070000
110	30,36	800 x 1905 x 800	LCL C	LCL 36-110A-480	R732160070000
150	45,53	800 x 1905 x 800	LCL C	LCL 36-150A-480	R732170070000
180	53,12	800 x 1905 x 800	LCL C	LCL 36-180A-480	R732180070000
220	60,71	1100 x 2000 x 800	LCL D	LCL 36-220A-480	R732190070000
260	68,3	1100 x 2000 x 800	LCL D	LCL 36-260A-480	R732200070000
320	91,07	1100 x 2000 x 800	LCL D	LCL 36-320A-480	R732210070000
400	121,42	1100 x 2000 x 800	LCL D	LCL 36-400A-480	R732220070000

### Conexiones



**ANEXO D:**  
**Catálogo de filtro activo AF**

# R.7

Compensación de energía reactiva  
y filtrado de armónicos



Filtros de armónicos y EMI

# AF

Filtro activo



## Descripción

Los equipos de la serie **AF** son filtros activos trifásicos / monofásicos diseñados para la compensación de armónicos.

La serie **NETACTIVE AF-3W** y **AF-4W** permite poder ofrecer diferentes soluciones de filtrado para instalaciones de 3 y 4 hilos respectivamente.

Los filtros **NETACTIVE AF-2W** están especialmente diseñados para la compensación de armónicos y reactiva en líneas monofásicas donde existen gran multitud de cargas monofásicas perturbadoras distribuidas. Normalmente suelen ser instalaciones que tienen un contenido elevado del 3º y 5º armónicos.

## Aplicación

Solución óptima para aquellas instalaciones donde se requiera el filtrado de armónicos de forma centralizada en un punto y que combinen cargas tales como SAI, variadores de velocidad, lámparas de descarga, ordenadores, etc.

## Características

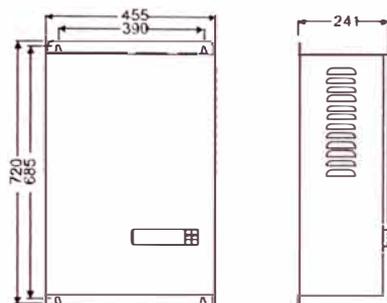
	AF-2W	AF-3W	AF-4W
<b>Circuito de alimentación</b>			
Tensión nominal	230 V c.a. (±15%)	208 / 400 / 480 V c.a (±15%)	
Frecuencia	50 Hz y 60Hz	50 Hz ó 60 Hz	
Conexión	fase-fase; fase-neutro; 230V	3 fases (3 hilos)	3 fases + Neutro (4 hilos)
Funciones disponibles	Compensación de: Armónicos hasta el rango 21º Potencia reactiva (seleccionable)		
Precisión	1% $I_n$		
Minima corriente compensable	2% $I_n$		
Frecuencia de conmutación	12,5 kHz	10 kHz	
Ensayos de EMI	<b>EN 50081-1 y 2, clase A</b>		
<b>Instrumentos de medida</b>			
Display LCD	Valores eficaces de tensión , niveles porcentuales de THD(I) y THD(U), de las componentes armónicas, hasta el armónico 21º.		
<b>Condiciones ambientales</b>			
Temperatura de uso	40 °C	35 °C	
Humedad relativa	80% sin condensación		

**AF**

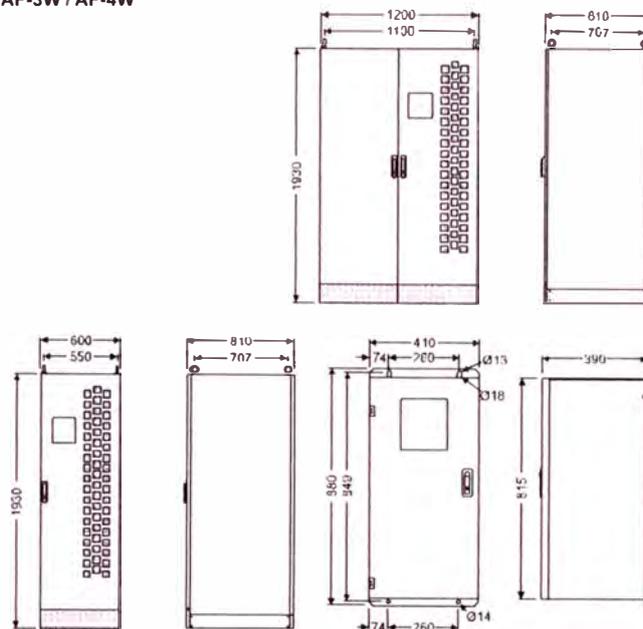
Filtro activo

**Dimensiones**

AF-2W



AF-3W / AF-4W

**Referencias**

AF-2W (2 hilos) 230 V / 50 Hz / 60 Hz

Corriente nominal por fase $I_n$ (A)	Peso (kg)	Dimensiones (mm) ancho x alto x fondo	Tipo	Código
15	40	455 X 241 X 720	AF-2W5-15-230	R7G111
30	42	455 X 241 X 720	AF-2W5-30-230	R7G113

AF-3W (3 hilos) 400 V / 50 Hz

Corriente nominal por fase $I_n$ (A)	Corriente nominal de neutro $I_n$ (A)	Peso (kg)	Dimensiones (mm) ancho x alto x fondo	Tipo	Código
25	75	55	410 X 390 X 880	AF-3W5-25-400	R7G302
50	150	70	410 X 390 X 880	AF-3W5-50-400	R7G304
100	300	240	600 X 810 X 1930	AF-3W5-100-400	R7G305
150	450	260	600 X 810 X 1930	AF-3W5-150-400	R7G306
200	600	430	1200 X 810 X 1930	AF-3W5-200-400	R7G307

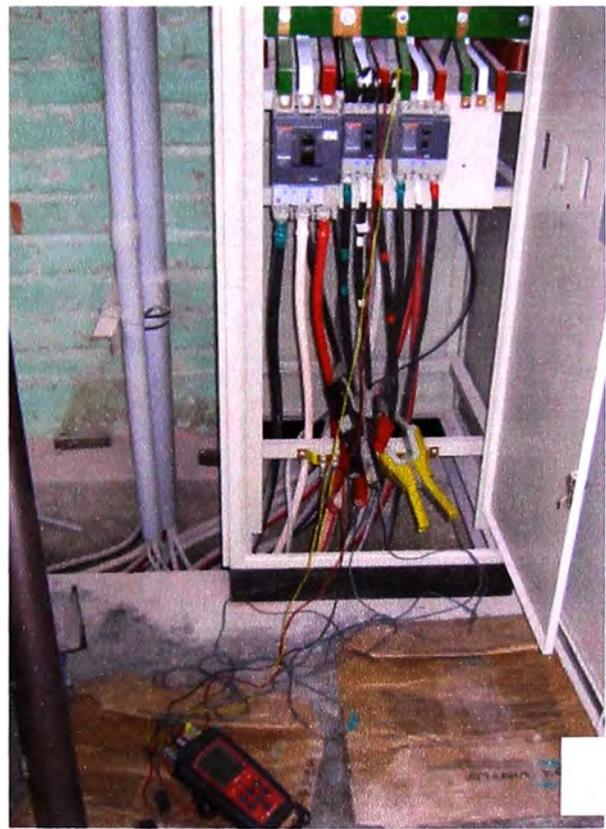
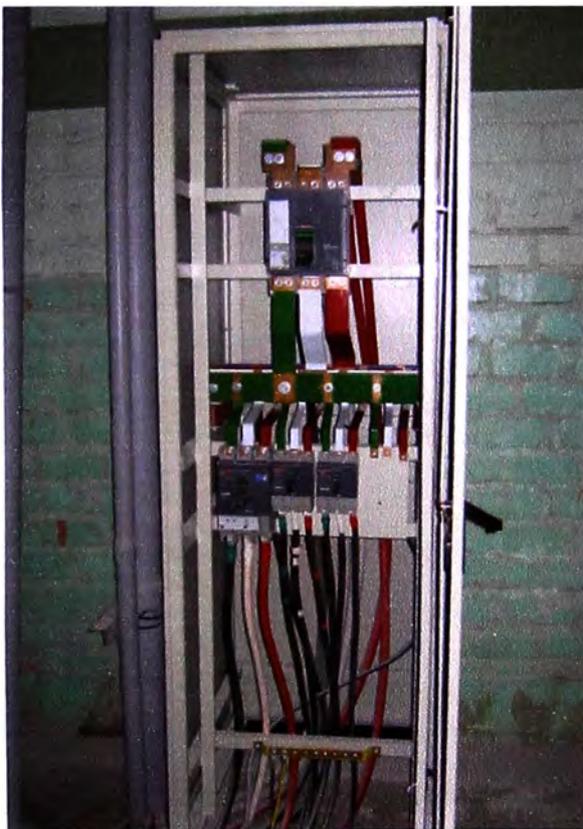
AF-4W (4 hilos) 400 V / 50 Hz

Corriente nominal por fase $I_n$ (A)	Corriente nominal de neutro $I_n$ (A)	Peso (kg)	Dimensiones (mm) ancho x alto x fondo	Tipo	Código
25	75	55	410 X 390 X 880	AF-4W5-25-400	R7G502
50	150	70	410 X 390 X 880	AF-4W5-50-400	R7G504
100	300	240	600 X 810 X 1930	AF-4W5-100-400	R7G505
150	450	260	600 X 810 X 1930	AF-4W5-150-400	R7G506
200	600	430	1200 X 810 X 1930	AF-4W5-200-400	R7G507

## ANEXO E: Álbum fotográfico



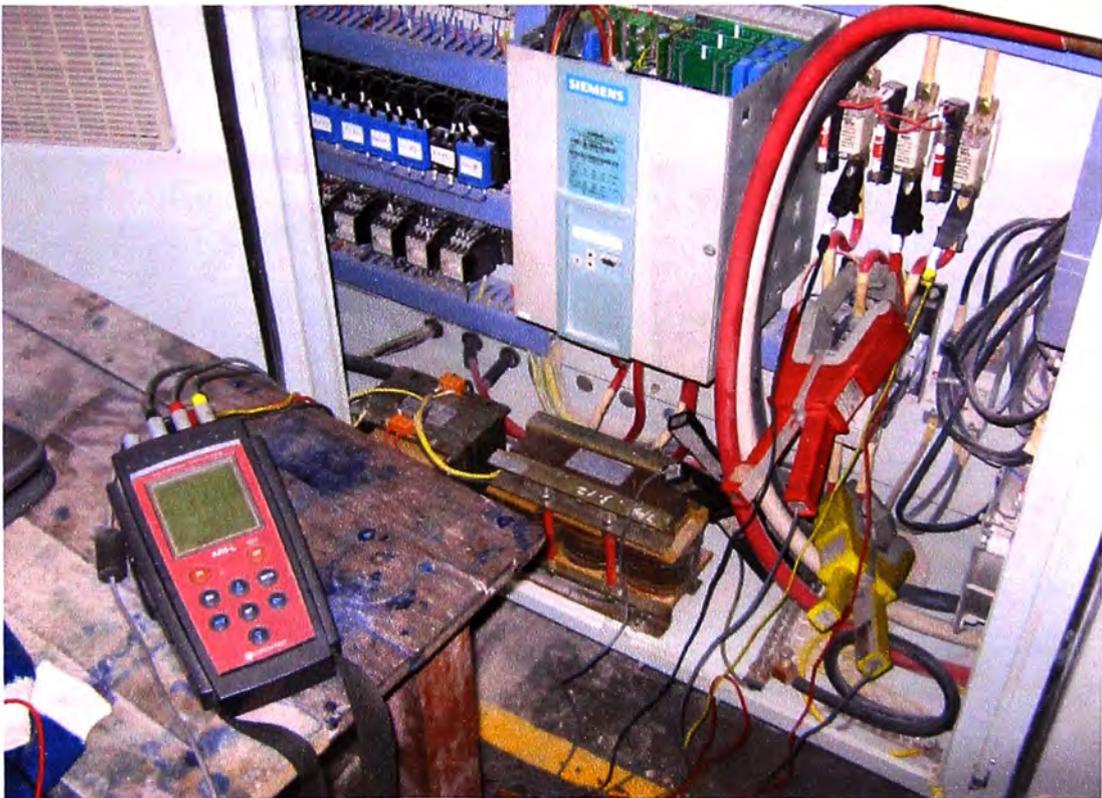
**Vista general de equipos en 440Vac de la planta**



**Medición en tablero general en 440Vac de la planta**



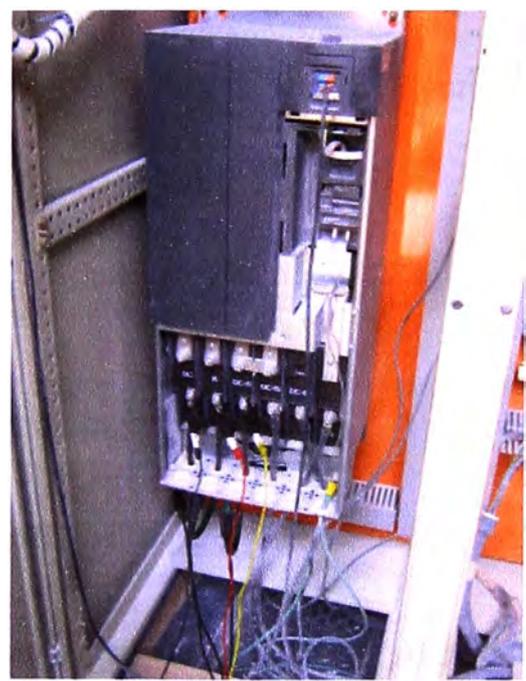
**Máquina extrusora LSE80 - 440Vac**



**Medición en la entrada de Convertidor AC/DC (Motor DC 75kW)**



**Máquina extrusora ROTOMECH - 440Vac**



**Medición en la entrada de Convertidor AC/AC (Motor AC 55kW)**

## BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", USA, 1992.
- [2] Ministerio de Energía y Minas (DGE), "Normas Técnicas de la Calidad del Servicio Eléctrico", 1997.
- [3] IEEE Standard 399-1997, "IEEE Recommended Practices for Industrial and Commercial Power Systems Analysis", USA, 1997.
- [4] Francisco C. De La Rosa, "Harmonics and Power Systems", Taylor & Francis Group, USA, 2006.
- [5] Christian Collombet, Jean-Marc Lupin, Jacques Schonek, "Cuaderno Técnico N° 152, Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento", Schneider Electric - Francia, 2000.
- [6] Eric Bettega, Jean Noel Fiorina, "Cuaderno Técnico N° 183, Armónicos: rectificadores y compensadores activos", Schneider Electric - Francia, 2000.
- [7] Augusto Abreu, "Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución", ENELVEN - Venezuela, 2005.
- [8] Leonardo Power Quality Initiative, "Guía de Calidad de la Energía Eléctrica", Comisión Europea, 2003.
- [9] Alfredo Muñoz Ramos, "Calidad de la Energía", Procobre – Chile
- [10] Rafael Vásquez, "Filtrado de armónicos", Schneider Electric - Chile, 2004.  
<http://www.emb.cl/electroindustria/archivo.mv>
- [11] Gonzalo Casaravilla, Virginia Echinope, Paper: "Desbalances – Estudio de alternativas para su estimación", Instituto de Ingeniería Eléctrica – Uruguay, 2005.
- [12] CIRCUTOR, "R.7 filtro de armónicas y EMI", catálogo de fabricante - España, 2009
- [13] Abraham Hernández Hernández, Abraham Hernández Villalobos, Alejandro Hernández Suárez, "Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión 5ª. Ed.", Thomson – México, 2005.