

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA EN UN CIRCUITO ELECTRICO CON ALTOS INDICES DE ARMONICOS**

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

**PRESENTADO POR:  
ERNESTO ESTUARDO BERNAZA ZAVALA**

**PROMOCIÓN  
2004-II**

**LIMA-PERÚ  
2010**

**EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA EN UN  
CIRCUITO ELECTRICO CON ALTOS INDICES DE  
ARMONICOS**

Agradezco a mis padres  
por todo el apoyo brindado

## SUMARIO

El problema de contaminación armónica en la red de baja tensión es una realidad que afecta de manera directa al equipamiento convencional utilizado en la industria que es materia de estudio. En el presente trabajo se basa en el estudio de las variables eléctricas donde se han encontrado presencia de armónicos los cuales que han obligado al cliente realizar un mantenimiento constante de los equipos de protección, se han realizado una serie de simulaciones y encontrado la solución a sus problemas. Actualmente la planta posee dos sistemas uno a 460VAC y otro a 220VAC suministrados por dos transformadores ubicados en las celdas de transformación de la planta, con transformadores de 400KVA 10/0.46KV y otro 400KVA 10/0.23KV respectivamente, los circuitos alimentados por el circuito de 230VAC poseen cargas menores, oficinas, etc. las cuales no poseen mayor incidencia en el problema, el circuito de 460VAC es el complejo y el que posee cargas especiales, para tal efecto se ha planteado la realización de mediciones de parámetros eléctricos y armónicos en lado de baja tensión del transformador de 460V dado que aguas abajo se presentan los problemas de contaminación armónica de mayor incidencia por la presencia de los variadores de velocidad y el banco de condensadores automático para la compensación de la energía reactiva.

Con los datos registrados por el equipo multifunción o analizador de redes eléctricas se logra detectar la presencia de los armónicos con mayor incidencia; una vez detectado el origen del problema se plantea la solución para mitigar la presencia armónica, representando al todo el circuito de 460V mediante un circuito Thevenin equivalente para realizar la simulación de posibles soluciones y en conclusión plantear la solución más adecuada.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>DESCRIPCION DEL PROBLEMA</b> .....	2
1.1 Objetivo del trabajo.....	2
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Problemas de origen eléctrico en la planta.....	2
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b> .....	4
<b>2.1 CONCEPTO DE ARMONICOS</b> .....	4
2.1.1 Introducción .....	4
2.1.2 Definición de armónicos .....	4
2.1.3 Análisis de Fourier .....	5
2.1.4 Concepto de secuencia de los armónicos .....	7
2.1.5 Armónicos y factor de potencia.....	9
<b>2.2 FUENTES DE ARMONICOS</b> .....	11
2.2.1 Transformadores .....	11
2.2.2 Máquinas rotativas .....	12
2.2.3 Hornos de arco .....	12
2.2.4 Luz fluorescente .....	13
2.2.5 Nuevas fuentes de armónicos.....	14
2.2.6 Futuras fuentes de armónicos.....	21
<b>2.3 EFECTOS DE LOS ARMONICOS</b> .....	21
2.3.1 Efectos sobre los cables .....	21
2.3.2 Efectos sobre los transformadores .....	22
2.3.3 Efecto sobre los capacitores .....	23
2.3.4 Efecto sobre los motores.....	23
2.3.5 Efecto sobre otros equipos.....	24
<b>2.4 ANALISIS Y SOLUCIONES</b> .....	25
2.4.1 Medición de armónicos .....	25
2.4.2 Norma IEEE 519 sobre control de armónicos .....	26

2.4.3	Índices para la medición de armónicos.....	30
2.4.5	Medidas propuestas para el control de armónicos.....	34
<b>CAPITULO III</b>		
<b>MEDICIONES REALIZADAS .....</b>		
3.1	Gráfico de tensiones en L1, L2 y L3 .....	38
3.2	Gráfico de corrientes en L1, L2 y L3 .....	39
3.3	Potencia activa en las líneas L1, L2, L3 y trifásica .....	39
3.4	Potencia inductiva en las líneas L1, L2, L3 y trifásica .....	40
3.5	THD de tensión y corriente.....	40
3.6	Orden de tensión de los armónicos de tensión y corriente .....	41
3.7	Formas de onda de tensión y corriente .....	41
3.8	Mediciones adicionales para el análisis de los generadores de armónicos .....	42
3.8.1	Gráfico de tensiones en L1, L2 y L3 .....	42
3.8.2	Gráfico de corrientes en L1, L2 y L3.....	42
3.8.3	Gráfico de potencias activas en L1, L2 y L3 y trifásica .....	43
3.8.4	Gráfico de potencias inductivas en L1, L2 y L3 y trifásica .....	43
<b>CAPITULO IV</b>		
<b>INTERPRETACION Y MODELAMIENTO.....</b>		
4.1	Modelamiento de circuitos para la simulación .....	44
<b>CAPITULO V</b>		
<b>SIMULACION DE POSIBLES SOLUCIONES.....</b>		
5.1	Modelamiento de simulación N° 1.....	47
5.2	Modelamiento de simulación N° 2.....	48
5.3	Modelamiento de simulación N° 3.....	49
5.4	Modelamiento de simulación N° 4.....	50
5.5	Diagramas de las variaciones de las variables armónicas según las simulaciones 1, 2, 3 y 4.....	50
5.5.1	Diagrama de variación del THDV según las simulaciones 1, 2, 3 y 4.....	51
5.5.2	Diagrama de variación del $I_h / I_n$ % según las simulaciones 1, 2, 3 y 4 .....	51
5.5.3	Diagrama de variación del $I_h$ (A) según las simulaciones 1, 2, 3 y 4.....	52
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		
<b>ANEXO A: REGISTRO FOTOGRAFICO .....</b>		
<b>ANEXO B: NORMAS IEEE 519 .....</b>		
<b>ANEXO C: DIAGRAMAS UNIFILARES; DIAGRAMA UNIFILAR DE PLANTA ACTUAL Y DIAGRAMA UNIFILAR PROPUESTO PARA CORRECCION DEL PROBLEMA .....</b>		
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		

## INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo tiene como propósito medir y analizar los efectos de la contaminación armónica en una planta industrial y plantear soluciones para mitigar el efecto colateral que ellos producen. Con el análisis y estudio de dichos efectos producidos por la contaminación armónica se pretende demostrar que las cargas no lineales que generan armónicos deben ser tratadas de manera muy especial desde el punto de vista topológico, de protección y control, para evitar su amplificación en cargas de baja impedancia como son los bancos de condensadores entre otros. Para esto se ha utilizado un método de estudio binario realizando las **mediciones** en circuitos críticos de alta incidencia de armónicos y realizando el **análisis** de los parámetros eléctricos y armónicos registrados por un analizador de redes eléctricas.

El estudio y tratamiento de la contaminación armónica del presente informe de sustentación de tesis se circunscribe al ámbito de una planta en particular donde las cargas predominantes son equipos de congelado como son los motores compresores, cámaras de frío, hidrocólers, chiller, variadores de velocidad entre otros. Por lo tanto no pretende generalizar el análisis a otro tipo de industrias pues depende de la naturaleza de sus cargas y al entorno de trabajo de las mismas. El contenido del presente informe está dividido en seis capítulos:

El primer capítulo está dedicado a la introducción del informe donde se plantea el objetivo de la tesis, los antecedentes y una breve descripción de los problemas de origen eléctrico en la planta.

En el segundo capítulo se desarrolla el fundamento teórico de del tema principal en estudio: los armónicos describiendo los conceptos básicos, las cargas que generan armónicos, efectos de contaminación armónica y el análisis y soluciones para mitigar la presencia de los mismos.

El tercer capítulo muestra las mediciones realizadas en el circuito de 460V.

En cuarto y quinto capítulos se realiza la interpretación y modelamiento del circuito en estudio.

El quinto capítulo está dedicado a la simulación de posibles soluciones.

Finalmente en el sexto capítulo se realiza las conclusiones que son materia de estudio y las recomendaciones generales.

# **CAPÍTULO I**

## **DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

El creciente uso de las cargas no lineales y el consiguiente incremento de la generación de armónicos como producto de su utilización, acarrear un costo adicional a la industria nacional, de modo que está obligada a hacer el mantenimiento constante de equipos de protección, equipos sensibles a la contaminación armónica tales como tarjetas de control y las pérdidas por efecto Joule en conductores eléctricos entre otros no citados.

Lo manifestado ha motivado el estudio de los armónicos en una planta industrial para plantear las soluciones con la tecnología disponible y mitigar el efecto de la contaminación armónica en las redes eléctricas de baja tensión del circuito en estudio.

### **1.1 Objetivo del trabajo**

Realizar el estudio de la contaminación armónica en una planta industrial específica a fin de determinar las características e índices de severidad de los armónicos presentes y plantear la solución de contaminación armónica mediante la simulación de un circuito Thevenin equivalente e implementar una solución real con la tecnología actual existente en el mercado nacional.

### **1.2 Antecedentes**

La planta industrial materia de estudio pertenece a la empresa Inca Frut S.A. y se encuentra ubicado en el km 87 de la carretera Panamericana Norte en el distrito de Chancay provincia de Huaral y departamento de Lima.

Se toma como modelo de estudio a esta planta industrial porque presenta problemas como los sobrecalentamientos de interruptores termo-magnéticos mal funcionamiento de tarjetas de control, averías en los variadores de velocidad, entre otros.

### **1.3 Problemas de origen eléctrico en la planta**

Los problemas existentes en las instalaciones eléctricas de la planta industrial son:

- Fallas en los variadores de velocidad.
- Inutilización de tarjetas de los sistemas de cómputo.
- Fallas en motores eléctricos como producto del recalentamiento de los mismos.



- Fallas en el sistema de circuito cerrado de televisión (distorsión de la señal de video).
- Salida de servicio de la red de Edelnor.
- Mal funcionamiento de un regulador para el banco de condensadores de 230V
- Pago de energía reactiva en el recibo de luz no obstante tienen bancos de condensadores sobredimensionados.
- Sistemas de aterramiento con resistencias de dispersión eléctrica muy por encima de los valores recomendados por el Código Nacional Eléctrico y especificaciones técnicas de equipos dados por el fabricante.
- Problemas de origen topológico de las cargas pues no tienen una distribución adecuada

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEORICO

#### 2.1 Conceptos de armónicos

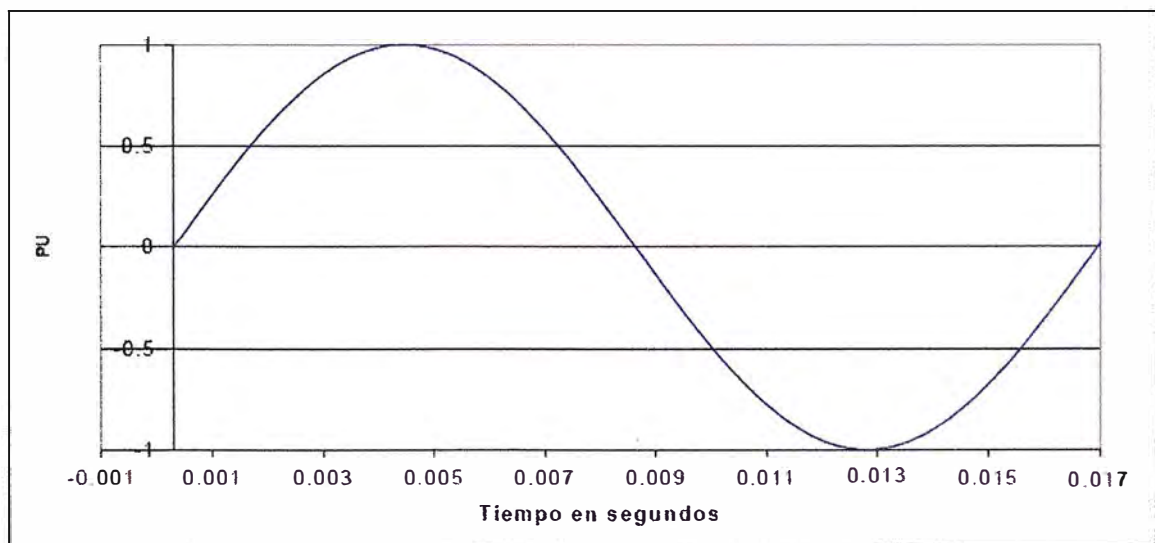
##### 2.1.1 Introducción

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

Los armónicos son un fenómeno que genera problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red.

##### 2.1.2 Definición de armónicos

Para definir este concepto es importante definir primero la calidad de la onda de tensión la cual debe tener amplitud y frecuencia constantes al igual que una forma sinusoidal. La Figura 2.1 representa la forma de la onda sin contenido de armónicos, con una frecuencia constante de 60Hz y una amplitud constante de 1pu.



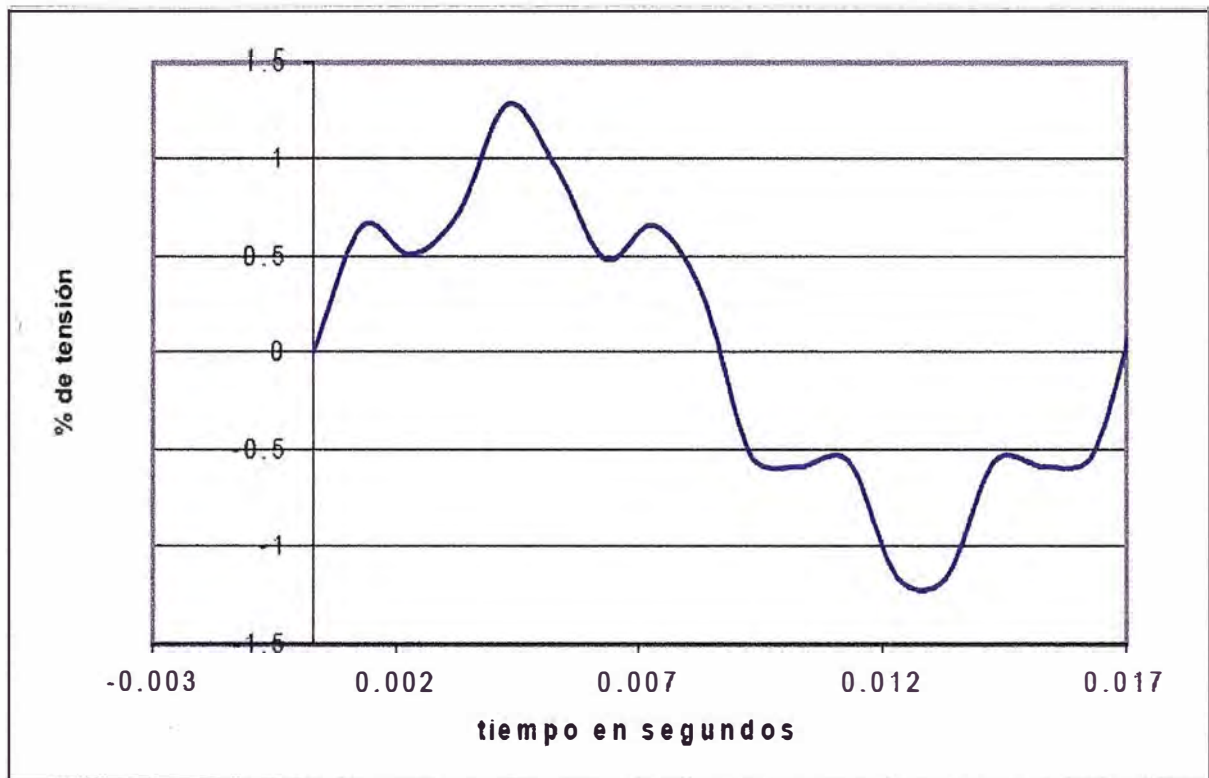
**Figura 2.1 Onda sin contenido armónico**

Cuando una onda periódica no tiene esta forma sinusoidal se dice que tiene contenido armónico, lo cual puede alterar su valor pico y/o valores RMS causando

alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometidos a esta tensión

La frecuencia de la onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de esta frecuencia.

La Figura 2.2 muestra una onda de tensión con un contenido del 30% del 5º armónico.



**Figura 2.2 Onda con contenido armónico**

Como puede observarse, el contenido armónico de esta onda ha aumentado en un 30% su valor pico.

### 2.1.3 Análisis de Fourier

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, mediante la aplicación de la serie de Fourier, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función  $F(x)$  con periodo  $2p$  tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Y = F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \operatorname{sen}(nx) + B_n \operatorname{cos}(nx)] \quad (2.1)$$

En donde:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx \quad (2.2)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \text{sen}(nx) dx \quad (2.3)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \text{cos}(nx) dx \quad (2.4)$$

$$[A_n \text{sen}(nx) + B_n \text{cos}(nx)] = R_n \text{sen}(nx + \Phi_n) \quad (2.5)$$

$$R_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (2.6)$$

$$\Phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{B_n}{A_n} \right) \quad (2.7)$$

Con  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

Con el uso de las ecuaciones anteriores se pueden encontrar los armónicos de las ondas más comunes en los sistemas de potencia, de distribución o industriales que se presentan en la Tabla 2.1

**Tabla 2.1 Armónicos de las ondas más comunes**

CLASE DE ONDA	DESCOMPOSICIÓN ARMÓNICA
Onda seno	$Y = a \text{sen } \theta$
Rectificación de media onda	$Y = a/\pi + 0.5 \text{sen } \theta - (2/1.3) \text{cos } 2\theta - (2/3.5\pi) \text{cos } 4\theta \dots$
Rectificación de onda completa	$Y = 2a/\pi + (2/1.3) \text{cos } 2\theta - (2/3.5\pi) \text{cos } 4\theta - (2/5.7) \text{cos } 6\theta \dots$
Rectificación de M fases	$Y = (am/\pi) \text{sen } \pi\theta/m + (2/(m^2-1)) \text{cos } m\theta - (2/(4m^2-1)) \text{cos } 2\theta + (2/(9m^2-1)) \text{cos } 3m\theta \dots$
Onda triangular	$Y = 8a/\pi^2 [ \text{sen } \theta - (1/9) \text{sen } 3\theta + (1/25) \text{sen } 5\theta + (1/49) \text{sen } 7\theta \dots$
Onda rectangular	$Y = 4a/\pi [ \text{sen } \theta - (1/3) \text{sen } 3\theta + (1/5) \text{sen } 5\theta + (1/7) \text{sen } 7\theta \dots$
Onda de tres niveles	$Y = 3.4641a/\pi [ \text{cos } \theta - (1/5) \text{cos } 5\theta + (1/7) \text{cos } 7\theta + (1/11) \text{sen } 11\theta \dots$

### 2.1.4 Concepto de secuencia de los armónicos

Para los sistemas trifásicos balanceados en condiciones normales, las ondas de corriente o tensión tienen un desfase entre sí de  $120^\circ$ , y su secuencia de fases es positiva (A, B, C). Los armónicos de cada una de las fases, dado que su frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental, presentan unos ángulos de desfase diferentes a las formas de onda fundamentales, por lo cual estos pueden presentar diferentes secuencias de fase.

Dado un sistema trifásico en el cual las ondas fundamentales forman un sistema balanceado y las tres fases tienen la misma forma de onda podemos realizar el siguiente análisis.

Si tomamos como referencia la componente fundamental de la fase A, tenemos que las componentes fundamentales las están dadas por:

$$V_A = A \angle 0^\circ \quad V_B = A \angle -120^\circ \quad V_C = A \angle 120^\circ \quad (2.8)$$

A: Amplitud de la componente fundamental.

Para el armónico de orden k su desfase  $\varphi_k$  respecto a la fundamental es igual para las tres fases, esto es indispensable para que las formas de onda sean iguales. Por lo tanto las componentes armónicas de orden k están dadas por:

$$V_{Ak} = A_k \angle \varphi_k \quad V_{Bk} = A_k \angle (\varphi_k + \varphi_{AB}) \quad V_{Ck} = A_k \angle (\varphi_k + \varphi_{AC}) \quad (2.9)$$

$A_k$ : Amplitud del armónico

$\varphi_{AB}$ : Angulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y B expresado en grados del armónico k

$\varphi_{AC}$ : Angulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y C expresado en grados del armónico k.

Un periodo de la componente fundamental es igual a k periodos del armónico de orden k, lo cual permite expresar en grados del armónico k los desfases dados en grados de la componente fundamental utilizando la ecuación:

$$\varphi_k = k\phi \quad (2.10)$$

$\varphi_k$ : Ángulo de desfase dado en grados del armónico k

$\phi$ : Ángulo de desfase dado en grados de la componente fundamental

De donde se tiene que las componentes armónicas de orden k están dadas por:

$$V_{Ak} = A_k \angle \varphi_k \quad V_{Bk} = A_k \angle (\varphi_k + k(-120^\circ)) \quad V_{Ck} = A_k \angle (\varphi_k + k(120^\circ)) \quad \text{Pal} \quad (2.11)$$

armónicos de orden  $3n$  (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n)} = A_{(3n)} \angle \varphi_{(3n)} \quad (2.12)$$

$$V_{B(3n)} = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n) * (-120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n * (-360^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)}) \quad (2.13)$$

$$V_{C(3n)} = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n) * (120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n * (360^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)}) \quad (2.14)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases se encuentran en fase entre sí, y por consiguiente, los armónicos de orden  $3n$  son de secuencia cero.

Para los armónicos de orden  $(3n + 1)$  (con  $n$  entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle \varphi_{(3n+1)} \quad (2.15)$$

$$V_{B(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n+1) * (-120^\circ)) = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n * (-360^\circ) - 120^\circ) = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} - 120^\circ) \quad (2.16)$$

$$V_{C(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n+1) * (120^\circ)) = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n * (360^\circ) + 120^\circ) = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + 120^\circ) \quad (2.17)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de  $120^\circ$  con la misma secuencia seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden  $(3n + 1)$  son de secuencia positiva.

Para los armónicos de orden  $(3n - 1)$  (con  $n$  entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle \varphi_{(3n-1)} \quad (2.18)$$

$$V_{B(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n-1) * (-120^\circ)) = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (-360^\circ) + 120^\circ) = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + 120^\circ) \quad (2.19)$$

$$V_{C(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n-1) * (120^\circ)) = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (360^\circ) - 120^\circ) = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} - 120^\circ) \quad (2.20)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de  $120^\circ$  con una secuencia contraria a la seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden  $(3n - 1)$  son de secuencia negativa.

La Tabla 2.2 muestra la regla que sigue la secuencia de fases de los diferentes armónicos.

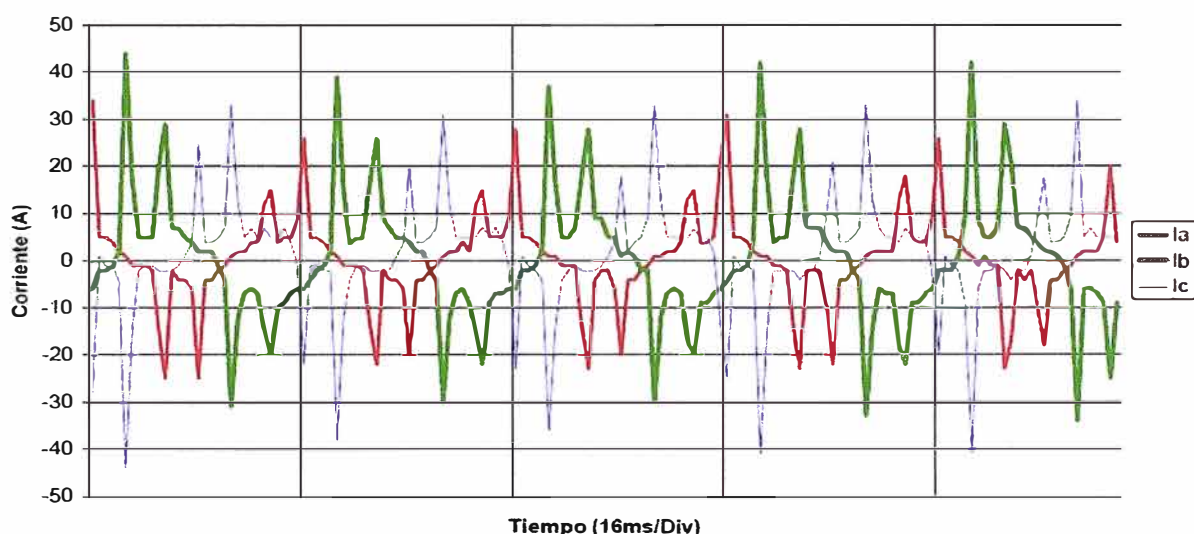
**Tabla 2.2 Secuencia de los armónicos**

No.armónico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

La secuencia seguida por los armónicos es importante para analizar sus efectos, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- En sistemas trifásicos, los armónicos de orden  $3n$  de corriente solo se pueden propagar cuando es posible un retorno por neutro.
- Los armónicos de orden  $(3n + 1)$  en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental.
- Los armónicos de orden  $(3n - 1)$  en tensión generan en los motores un campo giratorio en sentido contrario al generado por la componente fundamental.

Debe tenerse en cuenta que las conclusiones sobre secuencia de los armónicos solo son válidas cuando el sistema trifásico está balanceado y las formas de onda de las tres fases son idénticas. En la práctica, pueden encontrarse diferencias entre las tres fases del sistema, tal como se muestra en la Figura 2.3. Lo anterior conduce a que los armónicos puedan tener componentes de diferentes secuencias a las obtenidas en el caso ideal planteado.



**Figura 2.3. Sistema trifásico con diferentes formas de onda**

### 2.1.5 Armónicos y factor de secuencia de los armónicos

La presencia de rectificadores distorsiona las lecturas de factor de potencia e incrementa la lectura de potencia aparente sobre todo en contadores de tipo electrónico.

El factor de potencia es un concepto que aparece aplicado en sistemas a 60 Hz y su manejo en presencia de armónicos depende del tipo de medidor. En términos generales el efecto de los armónicos sobre el factor de potencia es el de disminuirlo ya que aumenta la potencia aparente total. El factor de potencia en presencia de armónicos está dado por:

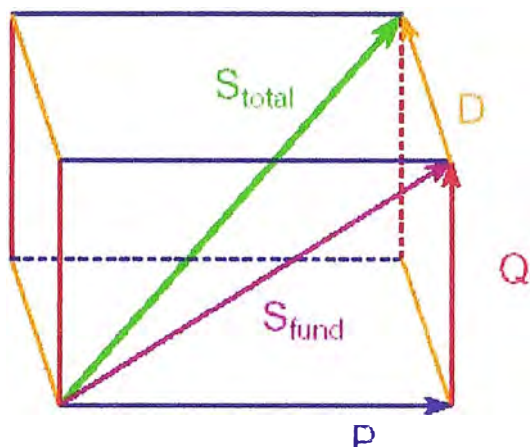
$$F.P = \frac{P}{S} = \frac{P}{V \times I_{RMS}} = \frac{P}{V \times \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots I_n^2}} \quad (2.21)$$

En la Figura 2.4 se muestra la representación gráfica del factor de potencia en presencia de armónicos. La potencia reactiva  $Q$  está dada por las componentes



fundamentales de corriente y tensión, mientras que los contenidos armónicos generan la componente D. En este caso:

$$S_{total}^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.22)$$



**Figura 2.4. Factor de potencia en presencia de armónicos**

Si las cargas son importantes frente a todo el tamaño de la planta se debe analizar cuál es el peor punto de trabajo del rectificador respecto al factor de potencia a compensar ya que la proporción kW/kvar se reduce sustancialmente en el rectificador para puntos de trabajo cercanos a la mitad de la capacidad nominal en muchos de los casos.

Si el tamaño del rectificador es pequeño (menor del 20%) de la carga total de la planta, y dado que siempre el mayor consumo de kvar ocurrirá en puntos de trabajo cercanos a la carga nominal del rectificador, los cálculos de compensación del factor de potencia se deben hacer para estas condiciones.

El enfoque del estudio de compensación reactiva en estos casos se sugiere hacerlo teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Punto de trabajo con peor factor de potencia (dato del fabricante).
- Ciclo de trabajo (no siempre se trabaja en esos puntos de mal factor de potencia) para no sobrecompensar.
- Ubicación de condensadores cercanos a la carga a compensar con el fin de reducir pérdidas, pero teniendo en cuenta que los armónicos no sobrecarguen los condensadores.
- Combinación compensación - filtros buscando aprovechar en algunos casos los condensadores como filtros y en otros casos buscando rechazar los armónicos para que no afecten los condensadores.
- La no compensación en los puntos de ubicación de la carga final trae consigo un incremento fuerte de las pérdidas y la sobrecarga de transformadores mientras



que la compensación en el punto de carga, si no es adecuadamente verificada, traerá consigo la sobrecarga de condensadores.

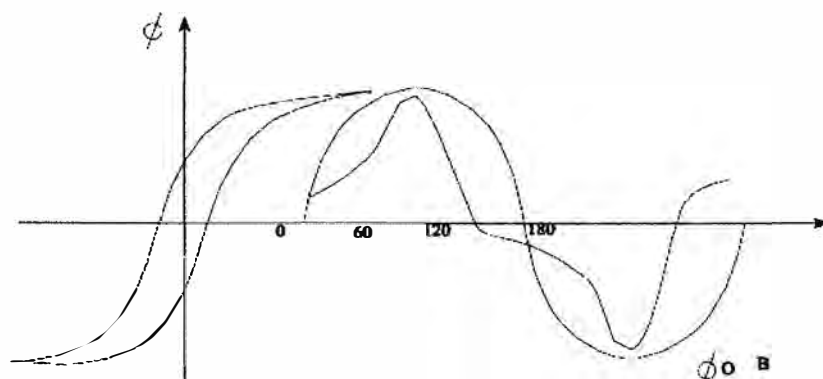
## 2.2 Fuentes de armónicos

Antes del desarrollo de los convertidores estáticos, la distribución armónica se asociaba con el diseño y la operación de máquinas eléctricas y transformadores. De hecho la principal fuente de armónicas en esos días. De hecho la principal fuente de armónicas en esos días era la corriente de magnetización de los transformadores de potencia.

Los transformadores y máquinas rotatorias modernas bajo operación en estado estable no ocasionan por sí mismas distorsión significativa en la red. Sin embargo, durante disturbios transitorios y cuando operan en rangos fuera de su estado normal, entonces pueden incrementar su contenido en forma considerable. Otras dos cargas lineales que conviene considerar debido a su contribución armónica son los hornos de arco y la luz fluorescente.

### 2.2.1 Transformadores

En un núcleo ideal sin pérdidas por histéresis, el flujo magnético y la corriente de magnetización necesaria para producirlo están relacionados entre sí mediante la curva de magnetización del acero utilizado en las laminaciones. Aún en estas condiciones, si graficamos la corriente de magnetización vs. el tiempo para cada valor de flujo, la forma de onda dista mucho de ser senoidal. Cuando se incluye el efecto de histéresis, esta corriente magnetizante no senoidal no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión que se observa se debe a las armónicas triples (3a., 9a., 12a., etc.), pero principalmente a la 3a. Por lo que para mantener una alimentación de voltaje necesario proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples, lo que generalmente se logra con el uso de devanados conectados en delta.



**Figura 2.5. Formas de onda de magnetización, flujo y corrientes en un transformador**

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

Al desenergizar un transformador, es posible que tenga flujo magnético residual en el núcleo.

Cuando se re-energiza la unidad, la densidad de flujo puede alcanzar niveles de pico de hasta tres veces el flujo de operación normal.

Esto puede llevar al núcleo del transformador a niveles extremos de saturación y producir amperes-vuelta excesivos en el núcleo.

Este efecto da lugar a corrientes de magnetización de 5 a 10 p.u. de la corriente nominal (comparada con la corriente de magnetización nominal de apenas el 1% ó 2% de la corriente nominal).

El decremento de esta corriente con el tiempo es función principalmente de la resistencia del devanado primario.

Para transformadores muy grandes, esta corriente puede permanecer por muchos segundos, debido a su baja resistencia.

### **2.2.2 Máquinas rotativas**

Si tomamos el devanado trifásico de una máquina rotatoria suponiendo un entrehierro constante y la ausencia de saturación del acero, en un análisis de Fourier de la distribución de la fuerzas magnetomotrices (f.m.m.'s) se observa que la f.m.m. fundamental es una onda viajera moviéndose en la dirección positiva, las armónicas triples están ausentes; y la quinta armónica es una onda viajera en la dirección negativa, la 7a. armónica viaja en la dirección positiva, etc.

Como resultado del contenido armónico de la distribución de la f.m.m. se producen armónicas en el tiempo que son dependientes de la velocidad.

Estas armónicas inducen una f.e.m. (fuerza electromotriz) en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda

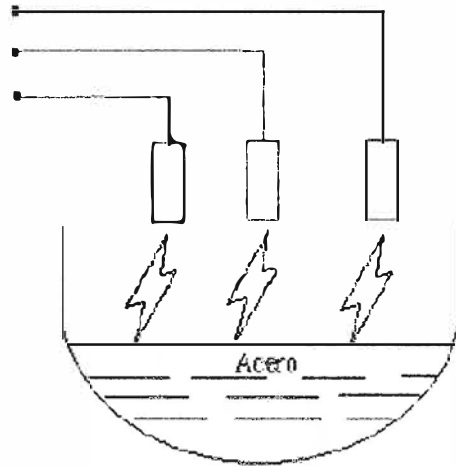
### **2.2.3 Hornos de arco**

El sistema de potencia contiene una gran cantidad de aparatos que funcionan por medio de la descarga de arco. Algunos ejemplos de ellos son: los hornos de arco, las soldadoras de arco y las lámparas fluorescentes.

De todos los aparatos que producen arco eléctrico en un sistema de potencia, son los hornos de arco eléctrico los que pueden causar los problemas más severos, porque representan una fuente armónica de gran capacidad concentrada en un lugar específico.

Un horno de arco eléctrico es mostrado en la figura, estos equipos según sus características de diseño pueden fundir acero, minerales y en general material de

desecho metálico y el método de fundición consiste en la producción de un arco de gran energía que permite fundir el acero.



**Figura 2.6. Hornos de arco eléctrico**

Una combinación del retraso en la ignición del arco con las características altamente no lineales de la curva voltaje del arco vs. corriente, introduce armónicas de la frecuencia fundamental.

Adicionalmente, los cambios de voltaje ocasionados por alteraciones en la longitud del arco producen una gama de frecuencias, predominantemente de 0.1 a 30 khz, este efecto se hace más evidente en la fase de la fundición, en la interacción de las fuerzas electromagnéticas entre los arcos.

**Tabla 2.3 Características del horno de acero eléctrico**

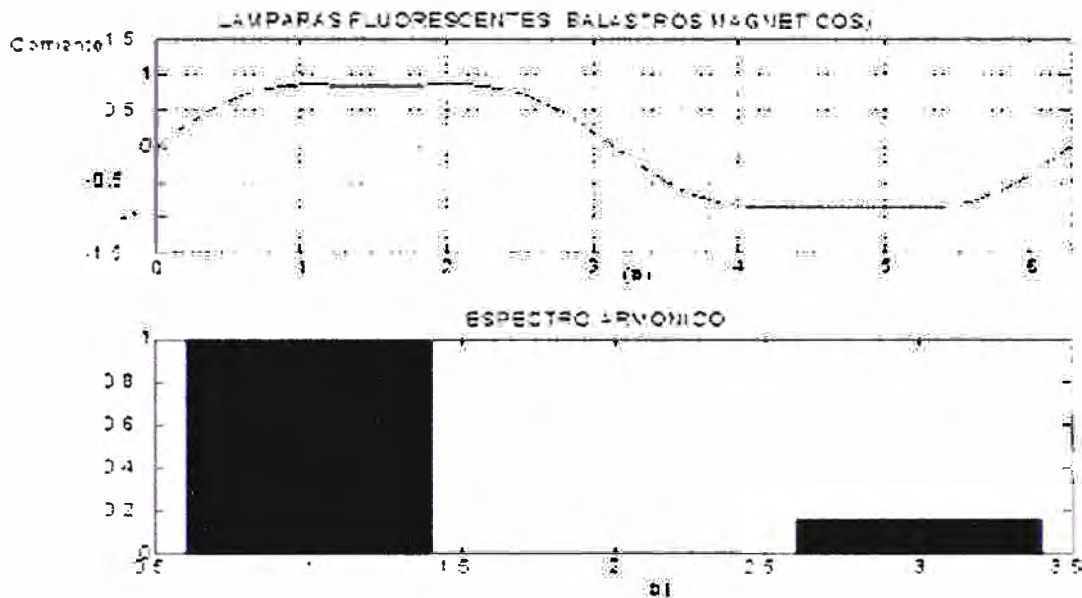
Proceso	% de la Corriente Fundamental				
	2	3	4	5	7
Al inicio de la fundición (arco activo)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refinamiento (arco estable)	0.0	2.0	0.0	2.1	0.0

Los niveles de corrientes armónicas varían en forma marcada con el tiempo y se presentan comúnmente en formas de gráficas probabilísticas. Un punto importante es que la armónica "n", como por ejemplo la 5a., no solamente varían con el tiempo, sino con respecto a la componente fundamental. Por tal motivo los hornos de arco eléctrico son cargas que no se encuentran en estado estable, por lo general estos hornos inyectan armónicas del orden mostradas en la tabla 2.3.

#### 2.2.4 Luz fluorescente

Los tubos de la luz fluorescente son altamente no-lineales y dan lugar a corrientes armónicas impares de magnitud importante. En una carga trifásica de 4 hilos, las armónicas triples básicamente se suman en el neutro, siendo al 3a. la más dominante, en la figura se muestra el espectro típico de una lámpara fluorescente con balastro magnético.

Los circuitos de iluminación involucran frecuentemente grandes distantes y tienen muy poca diversidad de carga. Con capacitores individuales para corrección de factor de potencia, el circuito complejo LC se puede aproximar a una condición de resonancia en la 3a. armónica. Una solución para eliminar esto es aumentar la reactancia del neutro y aislar el punto de la estrella en el capacitor (banco flotante) o conectarlo en delta. Los bancos de capacitores se deben situar adyacentes a las otras cargas y no instalarlos como compensación individual de las lámparas.



**Figura 2.7 Lámparas fluorescente, a) forma de onda típica de corriente b) espectro armónico**

### 2.2.5 Nuevas fuentes de armónicos

Las principales fuentes de corriente armónicas en la actualidad son los inversores y rectificadores con control de ángulo de fase. Estos se pueden agrupar en las siguientes áreas:

- Grandes convertidores de potencia
- Convertidores de mediano tamaño
- Rectificadores de baja potencia de fuentes monofásicas

#### a) Grandes convertidores de potencia

Las fuentes más grandes de armónicas son los convertidores como los utilizados en la industria metálica y transmisión en HVDC. Su potencia nominal se especifica en MW y generalmente tiene mucha más inductancia en el lado de C.D. que en el lado de C.A., por lo que la corriente directa es prácticamente constante y el convertidor actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado de C.D. y como una fuente de corriente armónica en el lado de C.A.; Más aún, con un sistema perfectamente simétrico, las corrientes resultantes son iguales en todas las fases.

## b) Terminales HVDC

Una aplicación común de los grandes convertidores estáticos de potencia es en los grandes sistemas de transmisión de corriente HVDC.

Por ejemplo, grandes grupos de sistemas utilizados en los E.U. y Canadá son conectados en HVDC para hacer más fácil la operación de todos los sistemas en sincronismos. En algunos casos la instalación del HVDC podría estar “espalda con espalda” con distancia pequeña o no, entre el rectificador y el inversor, ambos son convertidores de 6 o 12 pulsos.

El espectro típico de un convertidor no incluye componentes armónicas de orden par, las armónicas  $n = 1, 5, 9$  son de secuencia positiva y las de orden 3, 7, 11 son de secuencia negativa. En el caso de convertidores de seis pulsos se pueden hacer las siguientes observaciones:

- No existen armónicas triples
- Existen armónicas de orden  $6k + 1$  para valores enteros de “k”.
- Los valores armónicos de orden  $6k + 1$  son de secuencia positiva.
- Las armónicas de orden  $6k - 1$  son de secuencia negativa.
- La magnitud  $rms$  de la  $n$  armónica es:

La figura 2.8 muestra la forma onda y el espectro típico de un convertidor de 6 pulsos.

Existen también convertidores de 12 pulsos que básicamente consisten de dos convertidores de 6 pulsos alimentados de dos transformadores trifásicos en paralelo, con igual voltaje fundamental y un desfase de  $30^\circ$ .

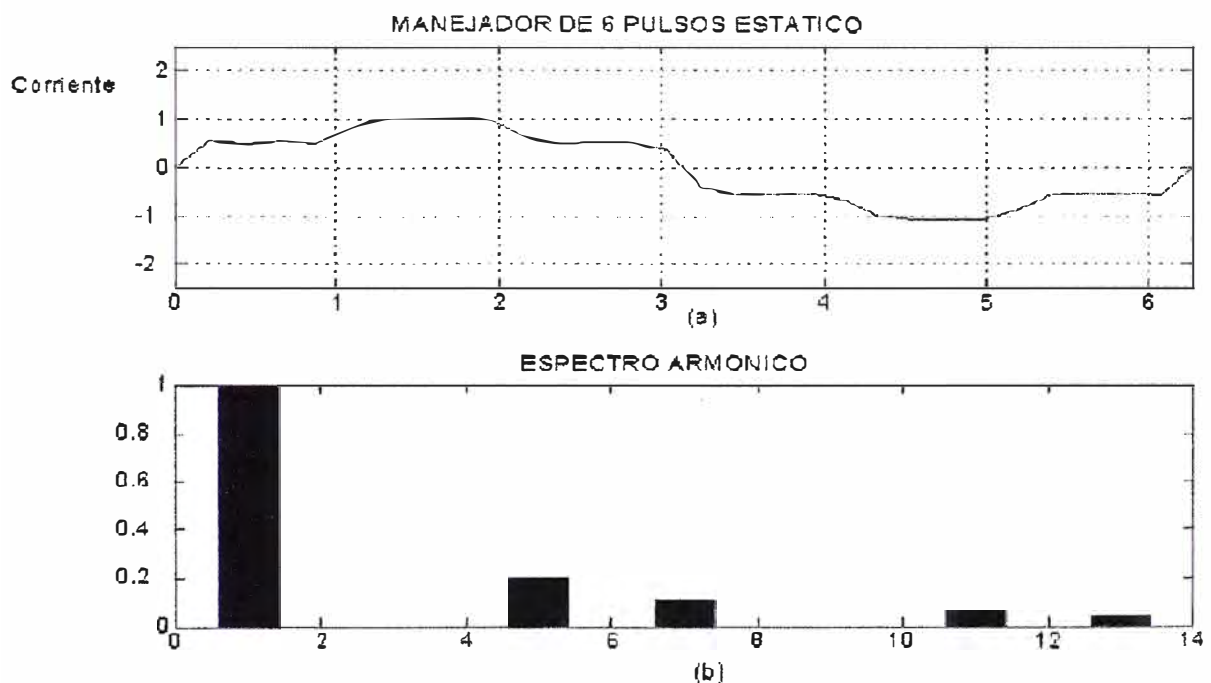


Figura 2.8 , a) Manejador de 6 pulsos, b) Espectro armónico

Este tipo de convertidores sólo tienen armónicas de orden  $12k \pm 1$ . Las corrientes armónicas de órdenes  $6k \pm 1$  con  $k$  impar ( $k=5,7,17,19$ , etc.) circulan entre los dos transformadores convertidores pero no penetran la red de c.a. Otra observación importante al hacer un análisis de Fourier en estos convertidores es que la inclusión de la impedancia del sistema reduce el contenido armónico de la forma de onda de la corriente, siendo el efecto mucho más pronunciado en el caso de una rectificación sin control. Con ángulos de disparo grandes, los pulsos de corriente prácticamente no se ven afectados por la reactancia del sistema de c.a.

### c) Hornos de inducción

Los hornos de inducción son utilizados en la industria manufacturera. Este horno consiste en un rectificador e inversor, el cual controla la frecuencia de alimentación de una bobina. De esta manera la bobina mediante la inducción hace que se calienten las piezas metálicas (como si fuera el núcleo de la bobina).

**Tabla 2.4 Características de un Horno de Inducción**

			Voltaje	Corriente
Frecuencia	59.98	RMS	481.2	84.62
Potencia		Pico	647.2	146.38
KW	1.2	Dc Offset	-0.2	-0.24
KVA	40.7	Cresta	1.34	1.73
KVAR	37.5	THD Rms	8.88	38.15
KW pico	-67.9	THD Fund	8.92	41.27
Fase	87 retrasado	Hrms	42.7	32.28
PF total	0.03	K factor		6.21
DPF	0.05			

### d) Convertidores de mediano tamaño

El número de convertidores de tamaño mediano (de decenas de miles de kW) está creciendo rápidamente en las industrias.

Las primeras aplicaciones se basan en el control de velocidad para motores de c.d., que aún representa el mayor mercado para este tipo de convertidores.

Sin embargo, el énfasis se está inclinando hacia la utilización de inversores y motores de inducción. Más aún, el uso de transistores de potencia y de tiristores GTO (gate turn off) gradualmente están ganando adeptos en el área de control de motores de c.a.

### e) Controladores de motores c.d.

Las corrientes armónicas requeridas del sistema por este tipo de control de velocidad ajustable de c.d. son las mismas que las generadas por los diversos rectificadores de 6 pulsos. Las armónicas predominan en las corrientes del sistema de CA.

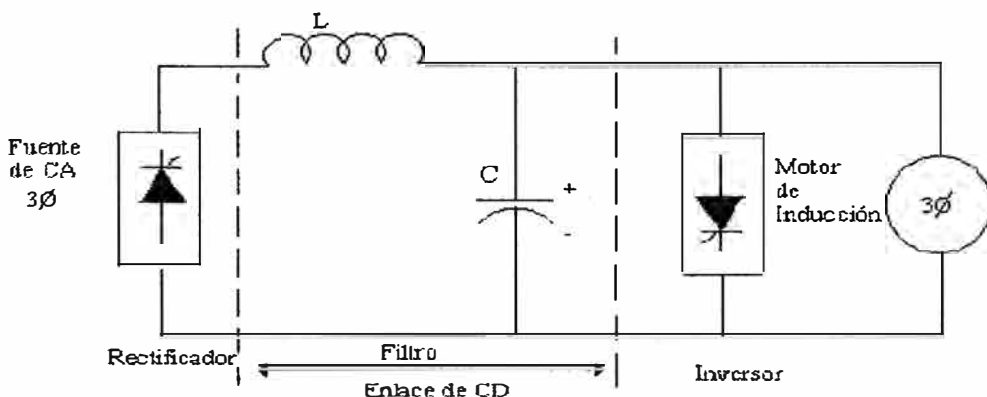
En el caso de trenes eléctricos, es común utilizar un control individual en cada puente convertidor. Durante el período de aceleración inicial, con corriente máxima en el motor de c.d., el puente rectificador produce las peores corrientes armónicas y opera con un factor de potencia bajo. Para aliviar esta situación a bajas velocidades uno de los puentes se evita mientras que al otro se le aplica control de fase.

#### f) Controladores de motores c.a.

Los controladores de motores de c.a. de velocidad ajustable son también usados en la industria. De hecho, los motores de inducción trifásicos son los más frecuentes encontrados. Mientras que los motores de CA son empleados en aplicaciones de alta velocidad como son bombas, compresores y ventiladores. Estos motores de inducción típicamente operan a velocidades de 1200, 1800 y 3600 r.p.m. o más. Además los motores de c.a. son generalmente más robustos, requieren menos mantenimiento y son menos caros que los motores de c.d.

La velocidad de un motor de c.a. es usualmente controlada por ajustes en el voltaje y en la frecuencia. Estos se puede realizar con un convertidor conocido como "controlador de voltaje-ajuste, frecuencia ajustable". En la figura se muestra un controlador que consiste de un rectificador trifásico de 6 pulsos y un inversor, conectado por enlace de c.d., un inductor de aplanamiento y un filtro capacitivo son incluidos en el enlace de cd. Esto proporciona un voltaje constante para la sección inversora. El rectificador se conecta a la línea de alimentación trifásica y el inversor se conecta a los devanados de la armadura en el estator del motor de inducción trifásico. Este tipo de convertidor controlado es a menudo conocido como convertidor de "enlace de c.d."

El voltaje ajustable lo proporciona el puente rectificador, mientras que la frecuencia variable proviene de la porción inversora. El inversor es capaz de generar su propia frecuencia de c.a. por tratarse de un inversor de conmutación forzada. Todos los elementos necesarios para la conmutación están incluidos en el propio inversor.



**Figura 2.9 Arreglo de un controlador de voltaje ajustable, frecuencia ajustable, monofásico**

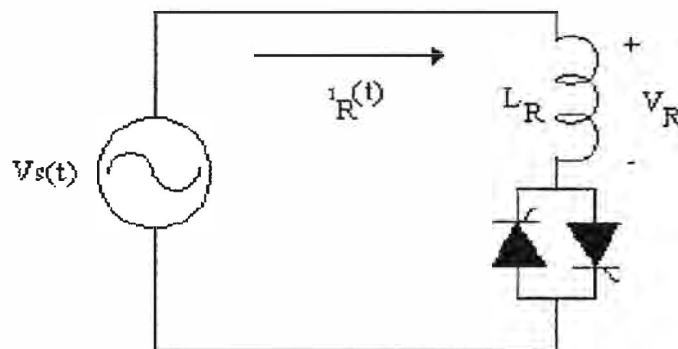
### g) Compensador estático de VARs

Un compensador estático de vars se emplea para compensar potencia reactiva usando un control de la magnitud del voltaje en un bus particular de un sistema eléctrico de potencia.

Anteriormente los condensadores síncronos, los cuales eran capacitores o inductores conmutados mecánicamente y reactores saturados habían sido aplicados al control del voltaje del sistema.

Después de los años 60's, los reactores controlados por tiristores (TCR), consistentes de capacitores fijos o tiristores conmutando capacitores han sido utilizados para inyectar o absorber potencia reactiva.

El TCR inyecta diferentes armónicas dependiendo del ángulo de disparo ( $3a, 5a, 7a, 9a$ ). Algunas armónicas (múltiplos de tres) se pueden eliminar si se tiene un TCR trifásico conectado en delta. La figura muestra el modelo de un TCR monofásico.



**Figura 2.10 TCR monofásico**

### h) Compensador estático de VARs

Es necesario considerar dos tipos de carga debido a su contribución a la distorsión armónica. Una de ellas, la televisión; que ha sido ya un problema por algún tiempo. La segunda, los cargadores de baterías.

### i) Cargadores de baterías

Las armónicas individuales que generan el circuito en un cargador de baterías dependen del voltaje inicial en la misma y el contenido armónico global varía de acuerdo al tiempo e involucra probabilidad aleatoria.

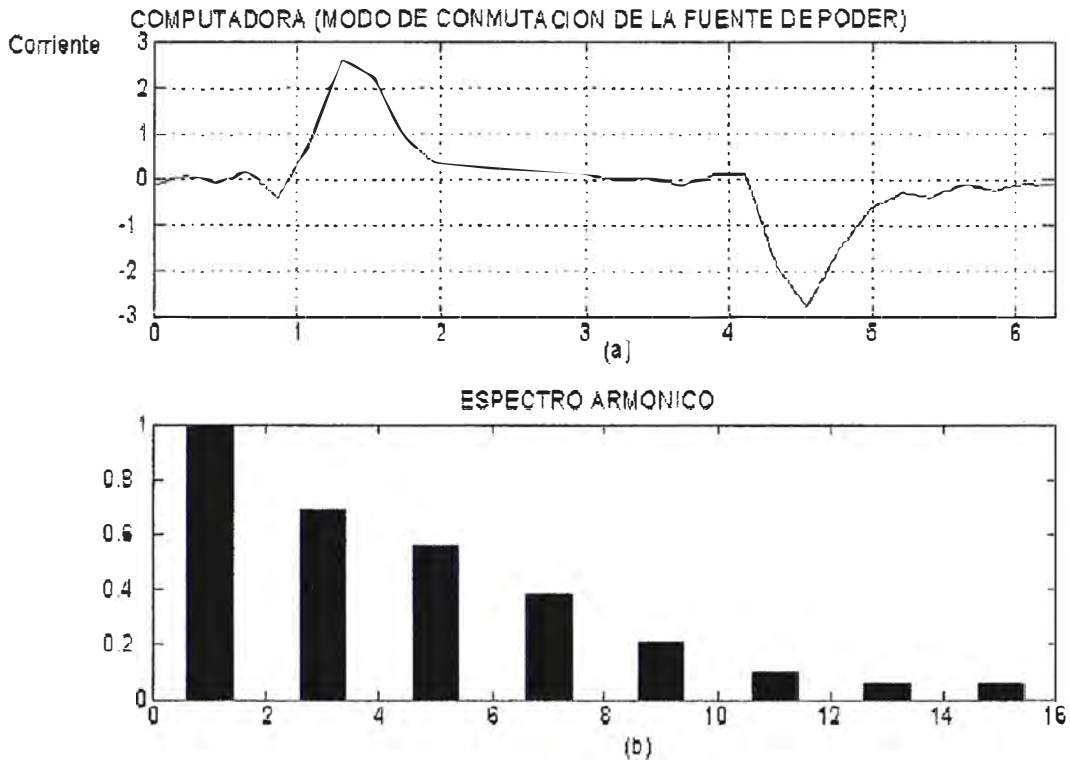
Así como en televisores, radios, estéreos y otros artículos que emplean corriente directa, los cargadores de baterías producen corrientes de secuencia cero de armónicas triples, las cuales sobrecargan al circuito neutro. Para empeorar las cosas, la luz fluorescente también produce armónicas triples con la misma relación de fase. Más aún, el ángulo de fase de la tercera armónica no varía lo suficiente como para sumar cancelación de armónicas al operar varios cargadores de baterías, de tal manera que las terceras armónicas se suman casi algebraicamente.



### j) Fuentes de poder de modo conmutación

La mayoría de los equipos electrónicos tales como computadores personales, máquinas copiadoras y fax, cuentan con una fuente regulada por conmutación (switch-mode power supply). Estas fuentes demandan corriente en un pulso corto de cada medio ciclo.

Cuando el voltaje se encuentra cerca de su valor máximo. La corriente demandada por estas fuentes tienen una alta distorsión armónica total y un alto contenido de tercera armónica. La figura muestra las formas de onda de corriente de una fuente en modo de conmutación empleada en computadoras, así como su espectro típico.



**Figura 2.11 Fuente de poder de computadora a) Corriente b) Espectro armónico**

El espectro típico de frecuencias de la fuente en modo de conmutación se muestra en la tabla 2.5

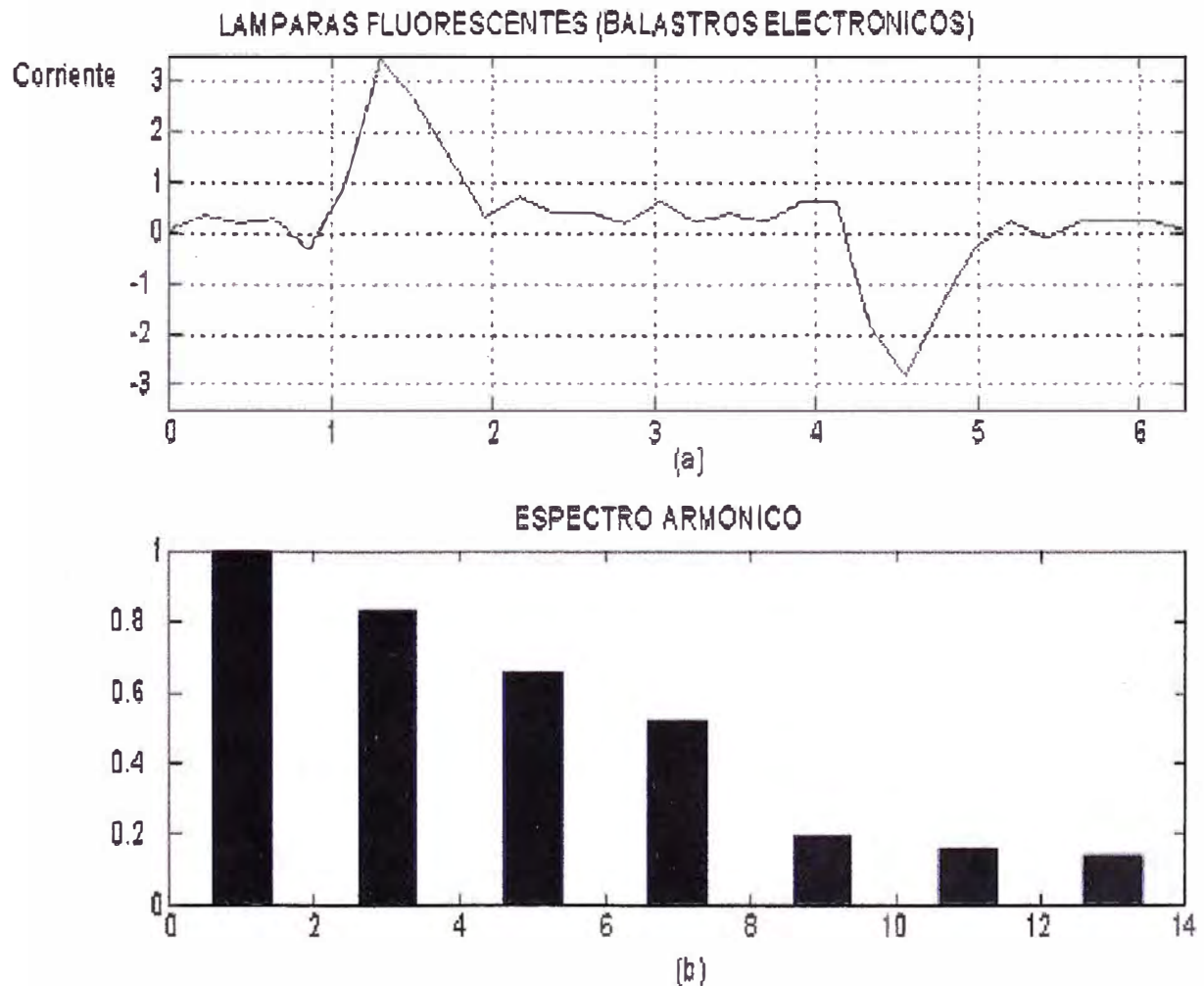
Orden de la armónica (secuencia)	Valor en p.u.
1(+)	1.0
3(0)	0.810
5(-)	0.606
7(+)	0.370
9(0)	0.157
11(-)	0.024
13(+)	0.063
15(0)	0.079

**Tabla 2.5 Espectro armónico de fuentes conmutadas**

El símbolo que aparece entre paréntesis en la tabla anterior proporciona la secuencia de la armónica. Las armónicas con secuencia (+) tienen la misma rotación de fases que el voltaje trifásico aplicado. Aquellas con secuencia negativa (-) tienen rotación de fases opuestas, mientras que las de secuencia cero (0) son llamadas armónicas triples. Si se conectan cargas idénticas en cada fase se tiene un sistema balanceado, y en ausencia de componentes de secuencia cero se logra cero corriente en el hilo neutro. Sin embargo, las componentes de secuencia cero de cargas idénticas con voltajes balanceados tienen la misma magnitud y ángulo de fase, de tal manera que se suman en el hilo neutro y se producen componentes de secuencia cero iguales al triple de las componentes de cada fase.

### k) Lámparas fluorescentes

Las lámparas fluorescentes son otro tipo de carga que genera armónicas, estas armónicas son generadas por el efecto de los balastos y los dispositivos no lineales y electrónicos que utilizan para su funcionamiento. La figura muestra la forma de onda y el espectro típico de la corriente para lámparas de este tipo.



**Figura 2.12 Lámpara fluorescente con balastro electrónico a) Corriente b) Espectro armónico**

**Tabla 2.6 Datos de Lámparas Comerciales**

Tipo de Lámpara	Factor de Potencia	%THD <sub>I</sub>	Precio (Libras)
Phillips 23W (Electronic choke)	0.6	113.6	12.99
Phillips 23W (reactor type choke)	0.6	12.7	5.99
B&Q 9w (electronic choke)	0.5	141.5	4.99
Ring 9W (electronic choke)	0.5	153	9.99
Omega 60W (Tungsten)	1.0	2.5	0.13

### 2.2.6 Futuras fuentes armónicas

- Autos eléctricos que requieren de rectificación de grandes cantidades de potencia para cargar sus baterías.
- El uso potencial de dispositivos de conversión directa de energía, como baterías de almacenamiento y celdas de combustible.
- Fuentes no convencionales de potencia, como viento, energía solar, celdas de combustible y baterías avanzadas.

## 2.3 Efectos de los armónicos

### 2.3.1 Efectos sobre los cables

La distribución de la corriente a través de la sección transversal de un conductor solo es uniforme cuando se trata de corriente directa.

En corriente alterna, a medida que la frecuencia aumenta, la no uniformidad de la distribución de corriente es más pronunciada.

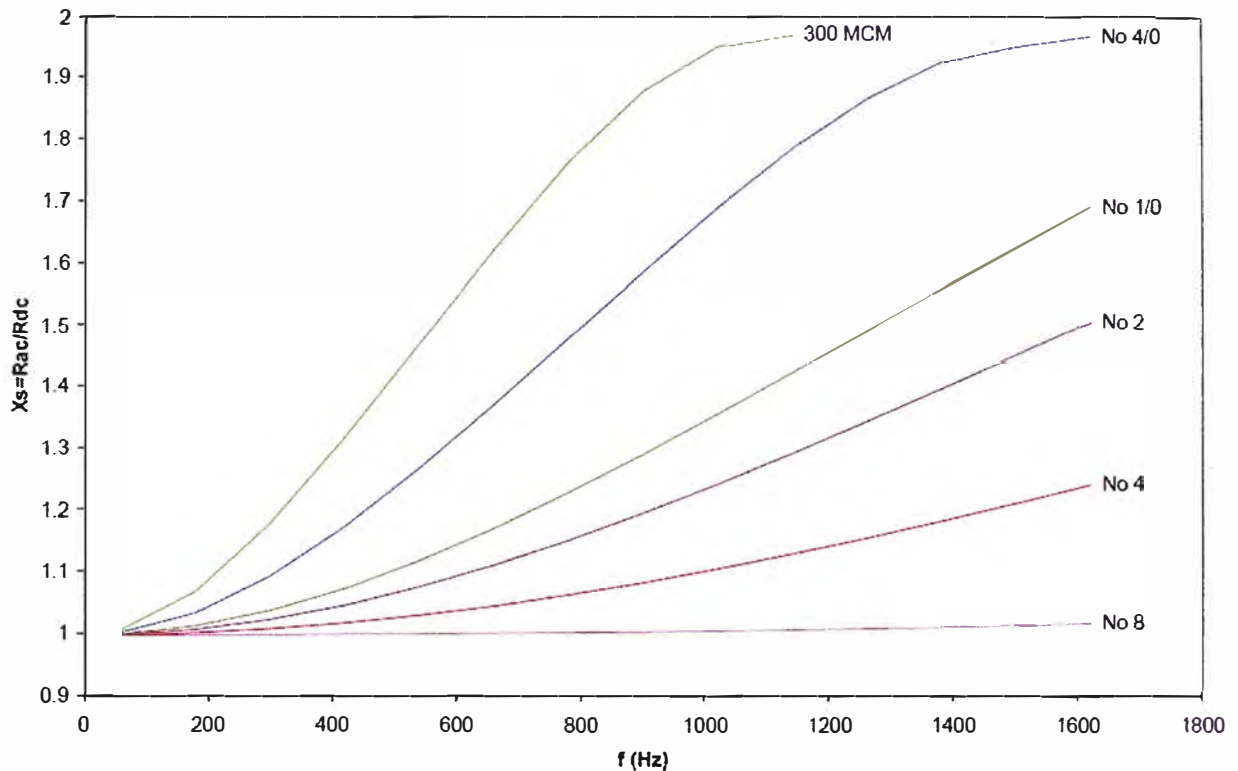
En conductores circulares la densidad de corriente aumenta del centro a la superficie. Las capas externas son menos ligadas por el flujo magnético que las internas, esto significa que con corriente alterna es inducido más voltaje longitudinalmente en el interior del conductor que en la superficie, por lo tanto la densidad de corriente va en aumento del interior, a las capas externas del conductor, este fenómeno es denominado *efecto skin*.

La Figura 2.13 muestra la variación de la relación  $r_{ac}/r_{dc}$  con la frecuencia para algunos calibres de conductores utilizados en instalaciones eléctricas.

La gráfica muestra como a mayor calibre (menor  $r_{dc}$ ) el efecto *skin* se hace más acentuado.

Alcanzan temperaturas muy altas y después pasan a ser moldeadas.

La tabla 2.4 muestra las características de un horno de inducción cuando se mide un sólo conductor de 4 que tienen por fase.



**Figura 2.13 Valor de la relación  $X_s$  en función de la frecuencia**

### 2.3.2 Efectos sobre los transformadores

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

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas  $I^2R$ , pérdidas por corrientes de eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro. De manera individual, el efecto de los armónicos en estas pérdidas se explica a continuación:

- Pérdidas sin carga o de núcleo: producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada sinusoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no sinusoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicos, éstos son muy pequeños comparados con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.
- Pérdidas  $I^2R$ : si la corriente de carga contiene armónicos, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto piel.

- Pérdidas por corrientes de eddy: estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no sinusoidal (y por lo tanto en también en su temperatura).
- Pérdidas adicionales: estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia.

### **2.3.3 Efectos sobre los capacitores**

Cuando en un sistema de potencia se tienen capacitores instalados existe la posibilidad de encontrar resonancia entre estos y el sistema. Este efecto produce voltajes y corrientes de magnitud considerablemente más alta que en el caso de no haber resonancia.

Dado que la reactancia de los capacitores decrece con el aumento de la frecuencia, este se comportará como un “sumidero” para corrientes con alta frecuencia armónica. Este efecto incrementa el esfuerzo dieléctrico y el calentamiento dentro del capacitor. El calentamiento no es ningún problema debido a que existen capacitores diseñados con películas y laminillas que reducen considerablemente las pérdidas. Por otro lado el esfuerzo dieléctrico es importante tenerlo en cuenta ya que los voltajes en los capacitores son aditivos al pico de voltaje de la fundamental. A pesar de que el diseño laminado del dieléctrico de los capacitores permite altos voltajes, estos producen disminución en su vida útil y fatigan el dieléctrico cuando es sometido a sobretensiones por largos periodos de tiempo.

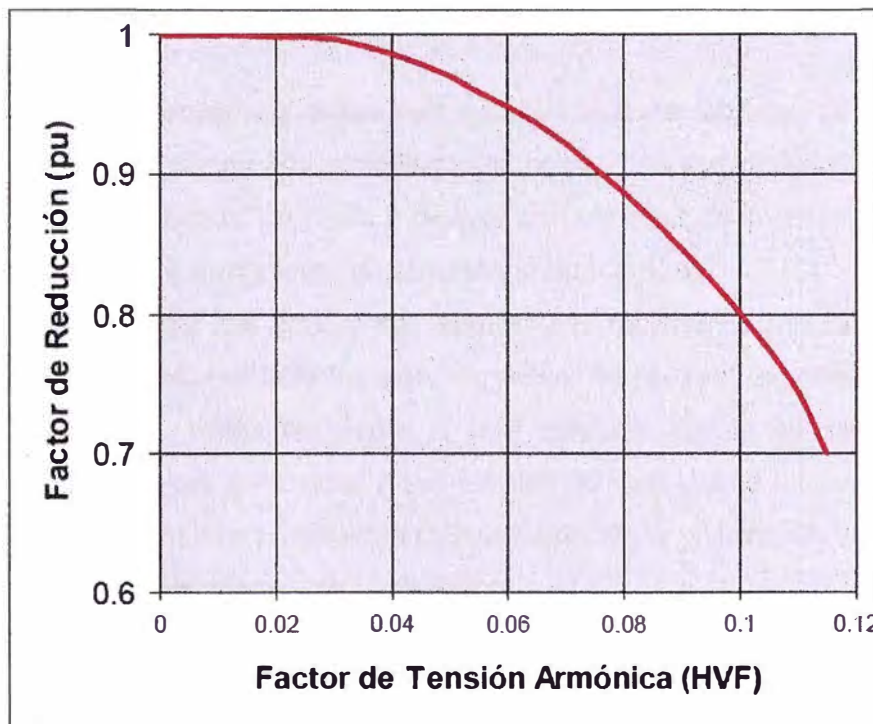
### **2.3.4 Efectos sobre los motores**

El mayor efecto que tienen los armónicos de voltaje en la maquinas rotativas sincrónicas y en los motores de inducción es el incremento de calor debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre a altas frecuencias, por lo tanto, los armónicos afectarán tanto la eficiencia de la máquina como el torque desarrollado.

Los armónicos de corriente en motores pueden aumentar la emisión de ruidos audibles comparado con la excitación sinusoidal. También pueden producir distribuciones de flujo resultante en el gap de aire las cuales pueden causar o aumentar el fenómeno llamado “cogging” (la negativa al arranque suave) o el llamado “crawling” (alto deslizamiento) en los motores de inducción.

Los armónicos de corriente en pareja tales como el quinto y el séptimo tienen el potencial de producir oscilaciones mecánicas en la combinación turbina – generador o en

sistemas motor carga. Estas resultan cuando el torque oscila y es causado por una interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental. Por ejemplo, el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una torsión en el rotor del generador a la frecuencia del sexto armónico. Si existe una resonancia mecánica de frecuencia cercana a la eléctrica, altas fuerzas mecánicas pueden ser desarrolladas en algunas partes del motor. Debido a que las corrientes armónicas se combinan y afectan el flujo giratorio de la máquina es necesaria más corriente para producir el mismo trabajo, por lo tanto la eficiencia disminuye. Cuando se trabaja con motores alimentados con tensiones no sinusoidales, debe tenerse en cuenta que no pueden operar a su capacidad nominal. La Figura 2.14 muestra el factor de reducción de la capacidad del motor de acuerdo con el factor de tensión armónica.



**Figura 2.14 Factor de reducción para motores en redes con armónicos**

Donde:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V_n)^2}{n}} \quad (2.23)$$

### 2.3.5 Efectos sobre otros equipos

Los equipos electrónicos sensibles son susceptibles a operación incorrecta a causa de los armónicos. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa

del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda del mismo, por lo que condiciones de distorsión pueden afectar su operación adecuada.

En lo que respecta a equipo de medición e instrumentación, estos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si se tienen condiciones de resonancia que causen altos voltajes armónicos en los circuitos. Para el caso de medidores se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas.

## **2.4 Análisis y Soluciones**

### **2.4.1 Medición de armónicos**

En general es bastante difícil predecir problemas de armónicos sin realizar mediciones dado que el flujo y las respuestas del sistema pueden variar sustancialmente de un sistema a otro con pequeñas desviaciones tales como tolerancias de los equipos, desbalances, etc.

La solución de problemas existentes debidos a la sensibilidad de equipos, altas perdidas, distorsiones grandes etc., manifestados como disparos persistentes, quema de fusibles, errores en la medida de Kw-h y destrucción de equipos pueden ser afrontados con un estudio de flujo de armónicos fundamentado en medidas.

Muchos problemas de armónicos pueden ser fácilmente resueltos reubicando equipos, instalando filtros, o limitando algunos pasos de la compensación del factor de potencia. Sin embargo, antes de llegar a una solución viable se deben identificar plenamente las distorsiones armónicas y sus fuentes, lo cual puede hacerse con base en modelos de flujo de armónicos o midiendo directamente en la instalación.

#### **a) Sitios donde debe realizarse el registro**

Se deben escoger los sitios donde se encuentren cargas generadoras de armónicos o se tengan instalados elementos pasivos tales como condensadores que puedan estarse convirtiendo en sumideros para los armónicos generados en otros sitios.

El conocimiento de estas características facilita la determinación de los sitios donde se deben efectuar medidas, el tipo de medidas que debe hacerse y los resultados que se esperan.

#### **b) Selección del tipo de equipo a utilizar**

Dependiendo de la aplicación se pueden utilizar los siguientes equipos:

- Osciloscopios
- Analizadores de espectro
- Registradores: pueden reunir en algunos casos las características de osciloscopios y analizadores de espectro, además, tienen la capacidad de almacenar los datos tomados.



Actualmente se dispone de analizadores de armónicos muy sofisticados equipados con software y hardware que permiten una fácil adquisición de datos y un confiable análisis matemático de la información.

El uso de osciloscopios digitales con memoria permite también obtener la información necesaria para los estudios, aunque el software de análisis debe utilizarse por aparte.

En la Tabla 2.7 se muestran las principales características de los equipos más utilizados para la medición de armónicos.

**Tabla 2.7 Características de los equipos para medición de armónicos**

Característica	Osciloscopio	Analizador de Espectro	Analizador de Redes
Canales	dos	generalmente 1	4 corriente y 3 tensión
Frecuencia de muestreo	> 10 Mhz	128, 256, 512 muestras por ciclo	
Memoria	Algunas formas de onda	generalmente no	Almacenamiento de múltiples variables

Característica	Osciloscopio	Analizador de Espectro	Analizador de Redes
			durante varios días
Tipo de medición	Puntual	Puntual	Puntual, periódica o por evento
Captura formas de onda	Sí	No	Opcional
Captura otros eventos de calidad de energía	Picos de tensión	No	

#### 2.4.2 Norma IEEE 519 sobre control de armónicos

Los límites de distorsión que los armónicos pueden producir se miden en la frontera entre la empresa suministradora de energía y el usuario (point of common coupling - PCC).

La distorsión que el usuario produce a la empresa de energía depende de las corrientes armónicas que le inyecte y de la respuesta de impedancia del sistema a estas frecuencias. En ese sentido se ha establecido que los límites de distorsión armónica permitidos a los usuarios se midan en corrientes.

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

##### a) Límites aplicables al usuario

En general el usuario debe verificar que:



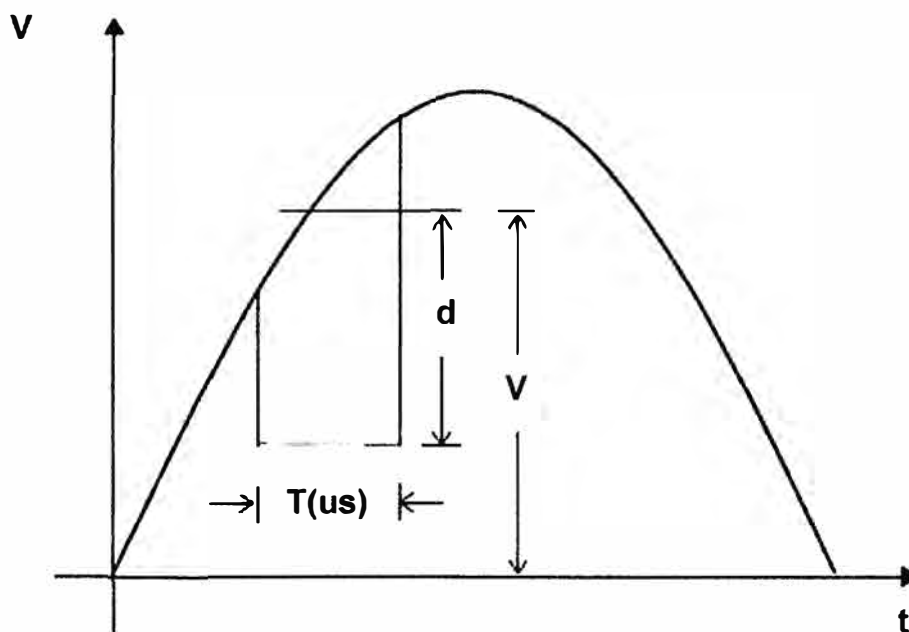
- No existan sobrecargas en capacitores dentro de la planta.
- No ocurran resonancias series o paralelo a las frecuencias generadas.
- El nivel de armónico en el punto de frontera con la empresa de energía no sobrepase los límites establecidos.

La filosofía de establecer límites de distorsión armónica al usuario, busca:

- Limitar la inyección de armónicos de cada usuario individual para que no produzca distorsiones inaceptables de la tensión en funcionamiento normal.
- Evitar que el efecto producido por dicha inyección se refleje en otros usuarios a través de una onda de tensión distorsionada.
- Evitar que entre todos los usuarios se vaya presentando un efecto acumulativo de distorsión de la forma de onda de tensión inaceptable.

Los índices armónicos aplicables a los usuarios recomendados por la norma ANSI/IEEE-519 de 1992, son:

Profundidad de las hendiduras y área total de las hendiduras del voltaje de la barra donde se conectan cargas conmutadas (aplicable en baja tensión). Este concepto se ilustra en Figura 2.15



**Figura 2.15 Hendidura en una onda de tensión**

% profundidad de la hendidura =  $d/v * 100$

$AN = td [=] \text{ ms.volt}$

donde AN = Área de la hendidura

Este índice se sugiere aplicable en bajas tensiones donde el área de la hendidura es fácilmente medible con un osciloscopio.

La Tabla 2.8 muestra los límites permitidos por la norma ANSI/IEEE para este índice.

**Tabla 2.8 Límites de distorsión y clasificación de sistemas de baja tensión para usuarios**

	<b>Aplicaciones Especiales</b>	<b>Sistemas Generales</b>	<b>Sistemas dedicados</b>
Profundidad de la hendidura	10%	20%	50%
THD (voltaje)	3%	5%	10%
Área de la hendidura ( $A_N$ ) (V.µs)	16400	22800	36500

Nota: El valor de  $A_N$  para tensiones diferentes de 480 V se obtiene multiplicando los valores de la tabla por  $V/480$ .

Distorsión individual y total de voltaje. La Tabla 2.9 ilustra los límites de dicha distorsión en sistemas que pueden caracterizarse por una impedancia equivalente de cortocircuito.

**Tabla 2.9 Límites de distorsión individual de tensión para usuarios**

<b>I<sub>cc</sub>/I<sub>n</sub></b>	<b>Máxima tensión Armónica (%)</b>	<b>Suposición relacionada</b>
10	2,5 - 3,0	Sistema dedicado
20	2,0 - 2,5	1 ó 2 grandes usuarios
50	1,0 - 1,5	Pocos grandes usuarios
100	0,5 - 1,0	5 a 20 medios usuarios
1000	0,05 - 0,10	Muchos pequeños usuarios

NOTA:  $I_{cc}/I_n$  es la relación entre la corriente de cortocircuito del sistema y la corriente nominal de la carga, en el punto de frontera.

Los límites de distorsión total armónica máxima son iguales para usuarios como para suministradores y se muestran en la Tabla 2.10

**Tabla 2.10 Límites de distorsión armónica total para usuarios y suministradores**

<b>Tensión en la frontera</b>	<b>Distorsión individual de tensión %</b>	<b>Distorsión armónica de Tensión THD (%)</b>
69 kV o menos	3,0	5,0
69 a 161 kV	1,5	2,5
Más de 161 kV	1,0	1,5

Distorsión armónica individual y total de corriente, las cuales son una medida de la cantidad de armónicos que el sistema debe absorber por causa del usuario. Las plantas de generación son consideradas también en estos límites.

Los límites de distorsión armónica de corriente se presentan en la Tabla 2.11, Tabla 2.12 y Tabla 2.13.

**Tabla 2.11 Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución (120 V a 69 kV)**

$I_{sc}/I_L$	Armónicos Individuales (%)					TDD
	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

**Tabla 2.12 Límites de distorsión de corriente para sistemas de subtransmisión (69 kV a 161kV)**

$I_{cc}/I_L$	Armónicos Individuales (%)					TDD
	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100<1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

**Tabla 2.13 Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión (> 161kV)**

$I_{sc}/I_L$	Armónicos Individuales (%)					THD
	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

En la mayoría de las industrias las tablas aplicables corresponden a la Tabla 2.11 y Tabla 2.12, es decir, que el índice a evaluar es el TDD y no el THD.

Para comprender mejor las diferencias entre el TDD y el THD se tienen las siguientes consideraciones:

La mayoría de los medidores que se consiguen en el mercado no miden realmente el TDD sino el THD, ya que las medidas son instantáneas con corrientes a frecuencia fundamental diferentes del promedio de los últimos 12 meses (TDD). Por esa razón las medidas deben llevarse de porcentajes a amperios y posteriormente dividirlos por  $I_L$  para convertirlas.

La solución para calcular el TDD consiste en llevar las mediciones de armónicos en porcentaje a amperios, y luego dividir por la corriente demandada.

### 2.4.3 Índices para la medición de armónicos

Para analizar los efectos producidos por los armónicos se utilizan generalmente unos índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas. Para el análisis los índices son comparados con valores límites dados por las normas o con valores de soportabilidad de los equipos. A continuación se presentan las definiciones de los índices más utilizados.

#### a) Índices para armónicos de corriente

Para corriente se tienen dos tipos de índices, los de distorsión armónica individual y los de distorsión armónica total.

El índice de distorsión armónica individual se define mediante la siguiente ecuación:

$$D_i = \frac{I_i}{I_n} \times 100\% \quad (2.24)$$

$D_i$ : Distorsión armónica individual de corriente.

$I_i$ : Corriente de cada armónico.

$I_n$ : Corriente nominal del alimentador.

Los índices de distorsión armónica total se definen como:

$$\text{THD}_I = \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_i)^2} \times 100\% \quad \text{TDD} = \frac{1}{I_d} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_i)^2} \times 100\% \quad (2.25)$$

#### b) Índices para armónicos de tensión

El índice de distorsión armónica individual de tensión se define mediante la siguiente ecuación:

$$D_v = \frac{V_i}{V_n} \times 100\% \quad (2.26)$$

$D_v$ : Distorsión armónica individual de tensión.

$V_i$ : Tensión de cada armónico.

$V_n$ : Tensión nominal del alimentador.

El índice de distorsión armónica total de tensión se define como:

$$\text{THD}_v = \frac{1}{V_n} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2} \times 100\% \quad (2.27)$$

### c) Índices de armónicos para condensadores

El análisis del contenido de armónicos en los bancos de condensadores, exige un tratamiento especial, dado que su impedancia disminuye con el aumento de la frecuencia, lo cual conduce a que por ellos circule gran parte de las corrientes armónicas. Se han propuesto y aceptado tres índices sobre contenido de armónicos para los bancos de condensadores. Estos índices son los siguientes:

Para tensiones:

$$\frac{U}{U_c} = \frac{1}{U_c} \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_i^2} \leq 1.1 \quad (2.28)$$

Para corrientes:

$$\frac{I}{I_n} = \frac{f_n U_n}{f_c U_c} \sqrt{1 + \sum_{i=2}^{\infty} (i^2 - 1) \left[ \frac{U_i}{U_n} \right]^2} \leq 1.3 \quad (2.29)$$

Para potencia reactiva:

$$\frac{Q}{Q_c} = \frac{f_n \left[ \frac{U_n}{U_c} \right]^2 \left\{ 1 + \sum_{i=2}^{\infty} (i-1) \left[ \frac{U_i}{U_n} \right]^2 \right\}}{f_c} \leq 1.35 \quad (2.30)$$

Donde :

$U_n, f_n$ : Tensión y frecuencia de servicio.

$U_c, f_c$ : Tensión y frecuencia nominales del capacitor.

### d) Índices de armónicos para transformadores

La norma ANSI/IEEE C57.110 DE 1986 establece los criterios de cargabilidad de transformadores de potencia que alimentan cargas no lineales. Se tiene un índice de la máxima corriente de carga del transformador, el cual está dado por:

$$I_{max}(pu) = \left[ \frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + \left[ \left( \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} f_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} f_h^2} \right) \cdot P_{EC-R}(pu) \right]} \right]^2 \quad (2.31)$$

$I_{max}(pu)$ : Corriente rms máxima de carga en por unidad de la corriente nominal

$P_{LL-R}(pu)$ : Pérdidas con carga para condiciones nominales, en por unidad de las pérdidas en el cobre ( $I^2R$ )

$f_h$ : Corriente del armónico  $h$  en por unidad de la corriente fundamental

$h$ : número del armónico

$P_{EC-R}$ : Pérdidas por corrientes de eddy en los devanados, en por unidad de las pérdidas en el cobre ( $I^2R$ )

#### 2.4.4 Modelación de elementos para análisis de armónicos

Para realizar los análisis de armónicos es indispensable un modelamiento correcto de los elementos que más influyen en el fenómeno. Algunos programas de computador especializados para este tipo de análisis ya tienen incorporados estos modelos.

##### a) Modelos para fuentes

Los generadores y máquinas rotativas se pueden modelar como una inductancia en paralelo con una resistencia. La inductancia puede obtenerse de la reactancia de secuencia negativa. Hasta el momento no se conoce una recomendación concreta sobre el valor de la resistencia.

##### b) Modelos para cargas generadoras de armónicos

Las cargas generadoras de armónicos tales como puentes rectificadores, inversores, etc., pueden modelarse siguiendo alguna de las siguientes alternativas:

- Es posible realizar un modelo detallado del elemento generador de armónicos: puentes rectificadores, inversores, etc. Estos modelos pueden utilizarse en programas como el EMTP.
- Pueden utilizarse los modelos propios de los programas de simulación especializados.
- La mayor parte de las cargas generadoras de armónicos se comportan como fuentes de corriente. Este modelo es muy útil para trabajar con mediciones realizadas en la carga. El modelo consiste simplemente en utilizar una fuente de corriente del valor medido para cada uno de los armónicos.

##### c) Modelación de conductores

Para los conductores se pueden utilizar los siguientes modelos:



A medida que el orden del armónico crece, se debe afectar este valor, de tal forma que para el quinto armónico se usa  $1.3 R$  y para el décimo se usa  $2R$ .

Segundo Método: La resistencia asociada a la carga se calcula con el método anterior pero se le asocia una inductancia en paralelo. Esta inductancia se calcula usando una estimación del número de motores en servicio su potencia instalada y su reactancia, multiplicada por el orden del armónico.

Tercer Método: Es obtenido de resultados experimentales, de los cuales se estableció que entre los ordenes 5 y 20 de los armónicos se pueden representar las cargas por una reactancia  $X_s$  en serie con una resistencia  $R$ , y este arreglo en paralelo con una reactancia  $X_p$ .

$$R = \frac{U_n^2}{P_n} \quad (2.34)$$

$$X_s = 0.073 nR \quad (2.35)$$

$$X_p = \frac{nR}{6.7 \tan \phi - 0.74} \quad (2.36)$$

$$\tan \phi = \frac{Q_n}{P_n} \quad (2.37)$$

$V_n$ ,  $Q_n$ ,  $P_n$  Tensión, potencia reactiva, potencia activa nominales

#### 2.4.5 Medidas remediales para el control de armónicos

Los problemas de flujo de armónicos se ven agravados por la presencia de condensadores que introducen polos y ceros a la función  $Z(w)$ , amplificando el efecto de los armónicos.

Si el análisis de armónicos demuestra que tales eventos suceden, se pueden considerar varias alternativas.

##### a) Reubicación

Muchas veces reubicar bancos de condensadores en otros sitios, modificar distancias de cables, alimentar rectificadores desde otros transformadores etc., pueden ser una eficiente solución para problemas de amplificación armónica. La adopción de estas medidas debe estar adecuadamente apoyada en simulaciones.

##### b) Cancelación de pasos de compensación reactiva

Para la compensación de factor de potencia, es usual utilizar controles que ponen en servicio unidades de acuerdo con los requerimientos. En alguno de los pasos de compensación se pueden producir resonancias importantes, las cuales si son adecuadamente identificadas en el estudio pueden resolverse cambiando el tamaño de

los condensadores (si se descubre en el proceso de planeación) p sencillamente evitando el paso correspondiente en el control.

### c) Instalación de filtros

La utilización de filtros R-L-C previstos para absorber las corrientes armónicas producidas por un equipo, resulta ser la solución técnica más completa, pero a la vez la más costosa.

El dimensionamiento de filtros puede ser tal que los condensadores del filtro sirvan también como parte de la compensación del factor de potencia. No existen realmente reglas determinísticas únicas para el diseño de filtros y es en gran parte la experiencia y el ensayo y error los métodos que ofrecen un mejor resultado.

Los filtros se pueden colocar para resolver problemas de distorsión armónica de tensión o para resolver problemas de grandes corriente armónicas inyectadas al sistema. Las corrientes armónicas se pueden dominar de las siguientes formas:

- Usando una alta impedancia en serie para bloquear su paso.
- Derivarlas por medio de un camino de baja impedancia.

Los filtros en serie llevan toda la corriente de carga y se deben aislar a la tensión de línea, mientras que los filtros paralelos llevan únicamente una fracción de la corriente de carga.

Dado que los filtros serie son más costosos y que los paralelos pueden ser usados para compensar el factor de potencia a la frecuencia fundamental, los filtros más usados son los paralelos.

Existen dos tipos generales de filtros, los sintonizados y los amortiguadores. El filtro sintonizado de la manera más sencillo es el de sintonía simple (single tuned) mientras que el amortiguador más importante es el pasa alta (high pass). Los sintonizados se usan cuando se deban filtrar una o varias frecuencias, mientras los amortiguadores se usan para filtrar una banda más ancha.

#### c.1) Filtros de sintonía simple

La Figura 2.17 ilustra este tipo de filtro.

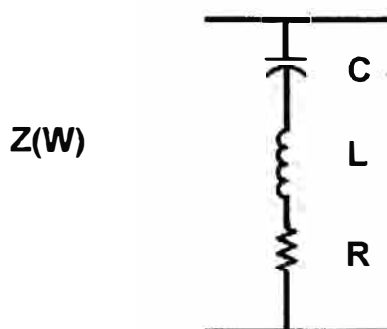
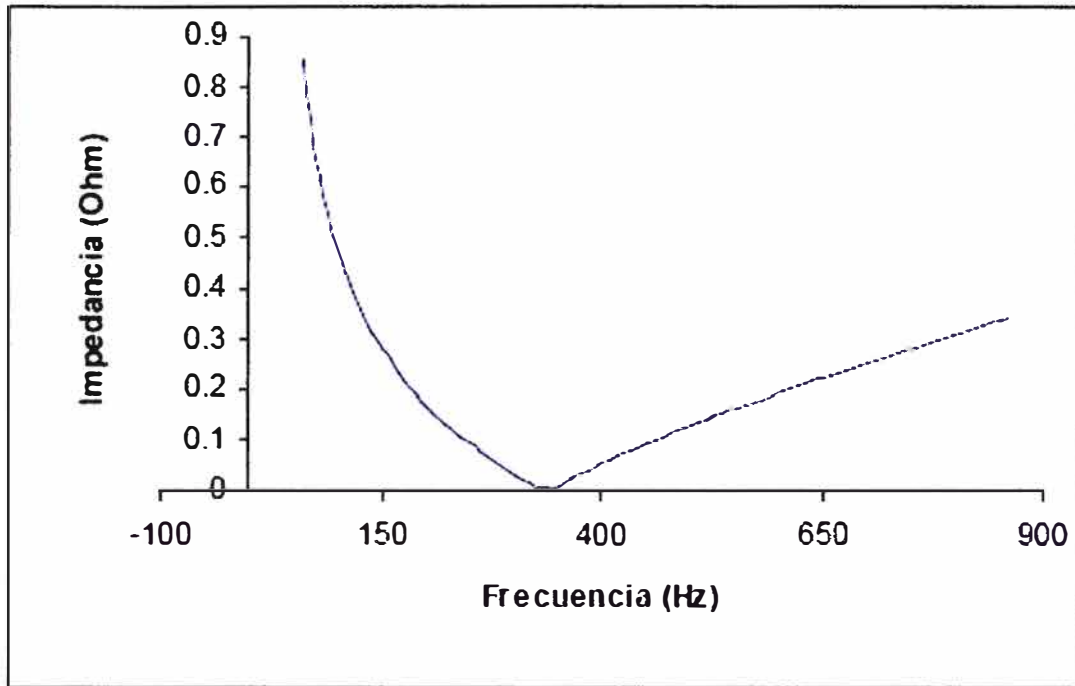


Figura 2.17 Filtro de sintonía simple



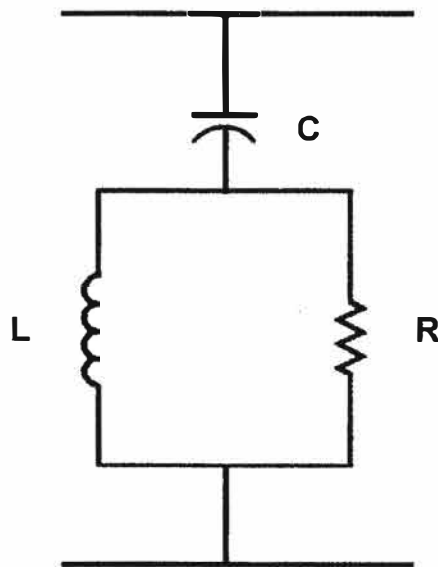
En la Figura 2.18 se muestra la respuesta en frecuencia de este filtro, como puede observarse, el filtro se convierte en una impedancia baja para un valor único de frecuencia (frecuencia de sintonía).



**Figura 2.18 Respuesta en frecuencia del filtro de sintonía simple**

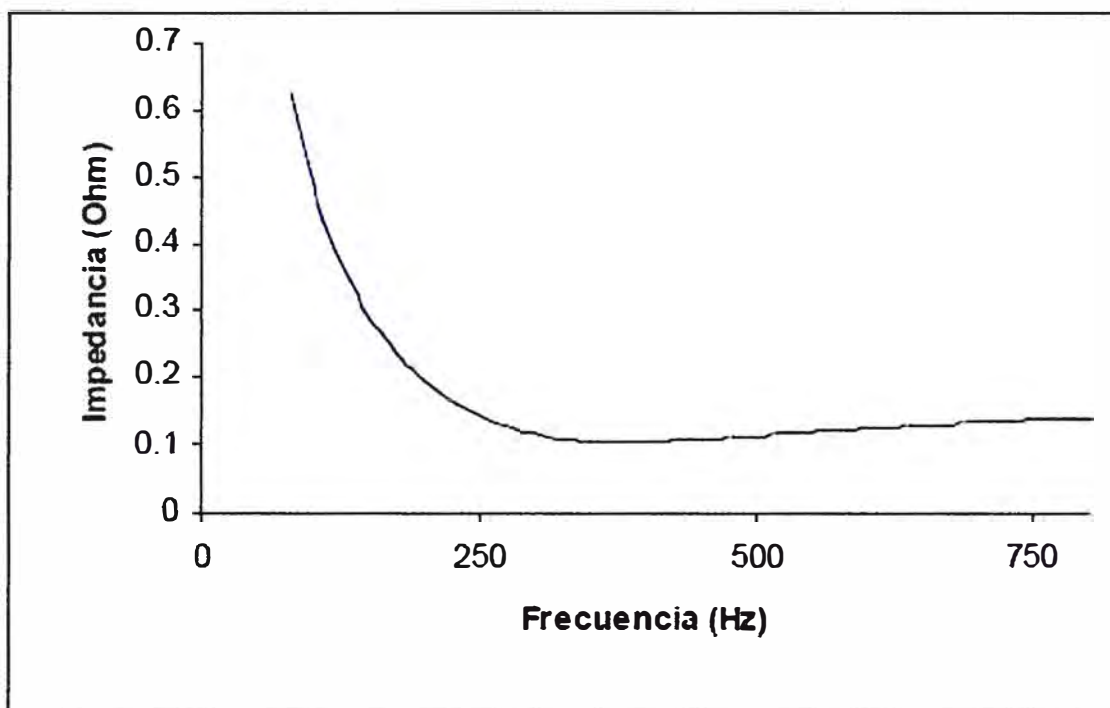
### c.2 Filtro amortiguado de segundo orden

Este tipo de filtro es muy parecido al filtro de sintonía simple, la diferencia consiste en una resistencia que se inserta en paralelo con la inductancia. Esta resistencia garantiza una baja impedancia del filtro para frecuencias altas. En la Figura 2.19 se muestra el esquema del filtro.



**Figura 2.19 Filtro amortiguado de segundo orden**

En la Figura 2.20 se muestra la respuesta en frecuencia de este filtro, como puede observarse, el filtro se convierte en una impedancia baja a partir de un valor de frecuencia, es decir que siempre filtra las altas frecuencias



**Figura 2.20** Respuesta en frecuencia del filtro amortiguado de segundo orden

### CAPÍTULO III

#### MEDICIONES REALIZADAS

Datos tomados en la planta INCA FRUT, luego que de solicitar el servicio de medición de calidad de energía al tener problemas con tarjetas de PCs y equipos que se han quemado.

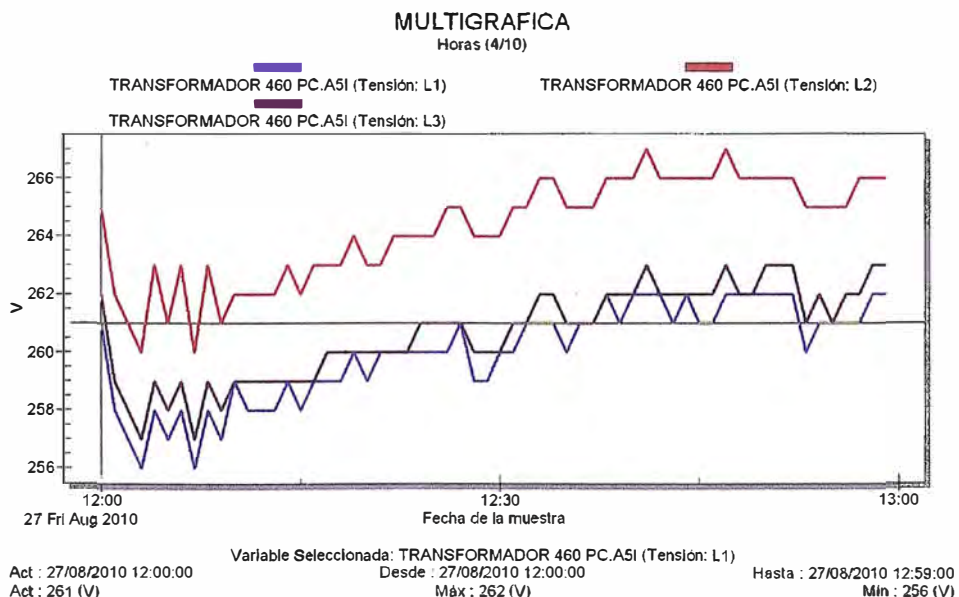
Actualmente la planta posee cargas lineales y no lineales en su sistema de alimentación de 460VAC, se muestra diagrama unifilar actual en **anexo C, Diagrama unifilar del circuito 460VAC actualmente en planta**, para nuestro análisis se tomaron las mediciones en Bornes del transformador de 460Vac, 400KVA.

Se tomo una medida representativa de los parámetros así como de los armónicos encontrados en la planta; se tomó en este punto por que la carga con incidencia de armónicos se encontraba en este transformador, existiendo otro en 220Vac de 400KVA para las cargas de los tableros de distribución al igual que las oficinas.

#### PARAMETROS TOMADOS A LAS 12:15 pm

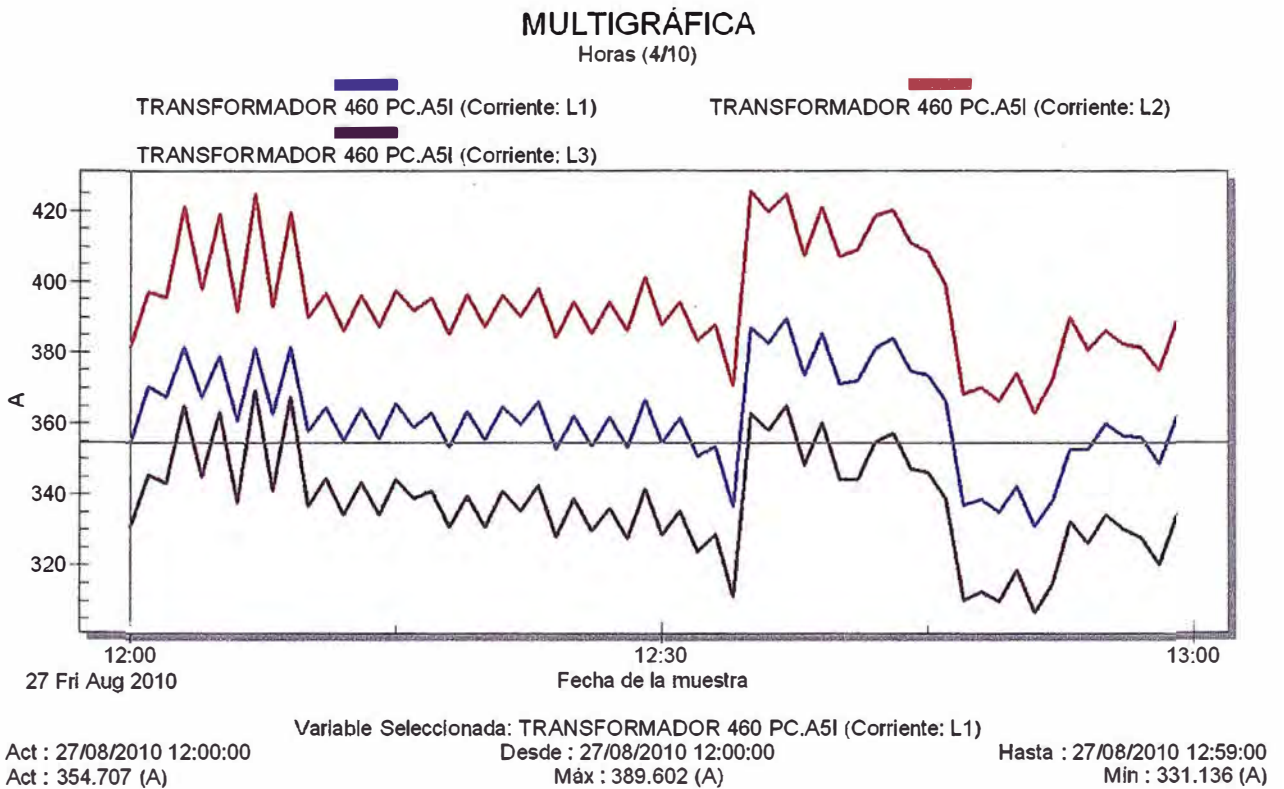
Los valores que se observaran a continuación son obtenidos por el programa **Power Visión 1.7** del equipo **AR5-CIRCUTOR**. El equipo con respecto a la tensión lo toma como si tuviera neutro, entonces las tensión de 460 se verán en las gráficas son, entonces se tendrá como referencia esta tensión.

#### 3.1 Gráfica de tensión L1-L2-L3:



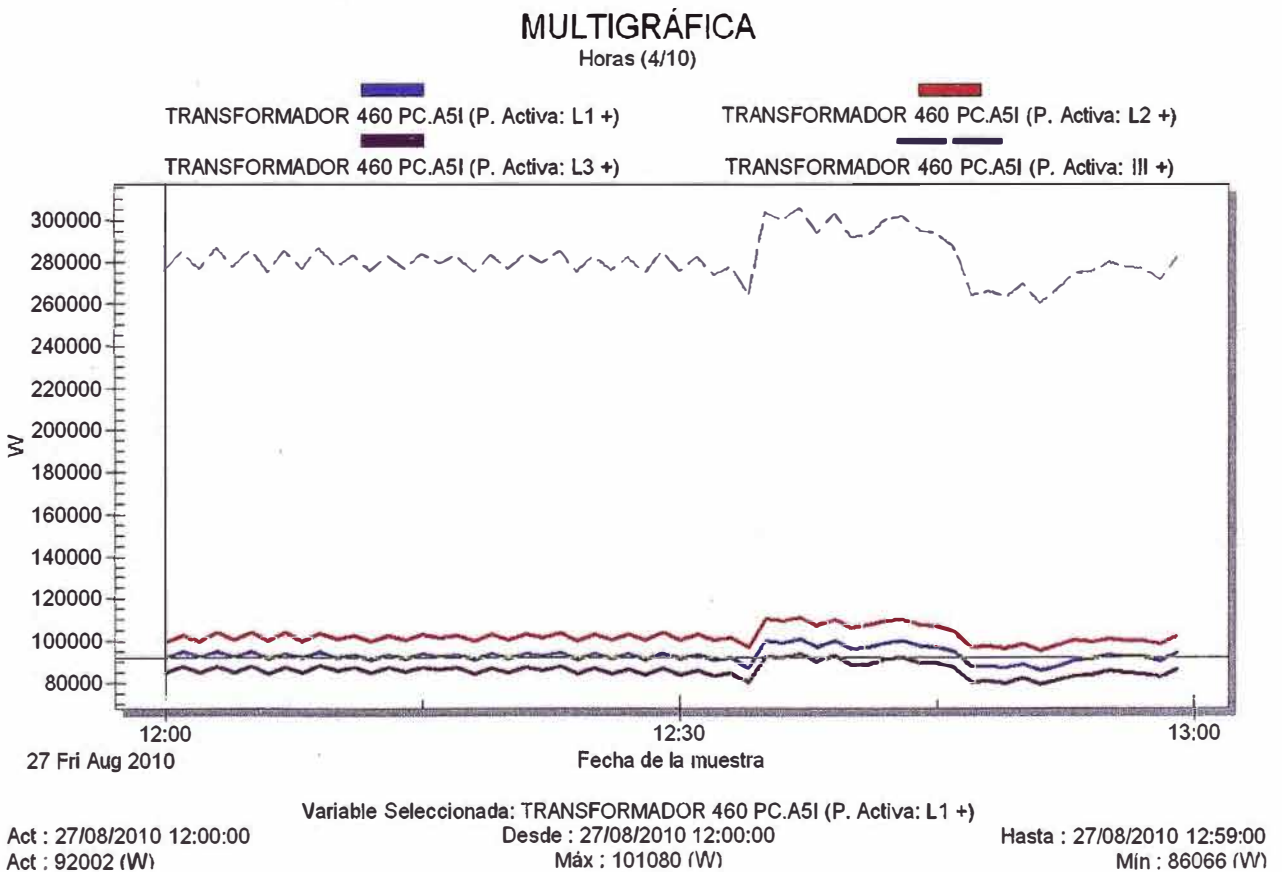
**Figura 3.1 Curva de comportamiento de tensión en L1-L2-L3**

**3.2 Gráfica de corriente L1-L2-L3:**



**Figura 3.2 Curva de comportamiento de corriente L1-L2-L3**

**3.3 Potencia activa por línea y potencia total:**



**Figura 3.3 Curva de comportamiento de la potencia activa por línea y el total**

### 3.4 Potencia inductiva por línea y potencia total:

Se observa que el nivel es inferior a lo esperado es debido a la existencia de un banco de condensadores, los picos se deben al ingreso de los pasos del banco de condensadores.

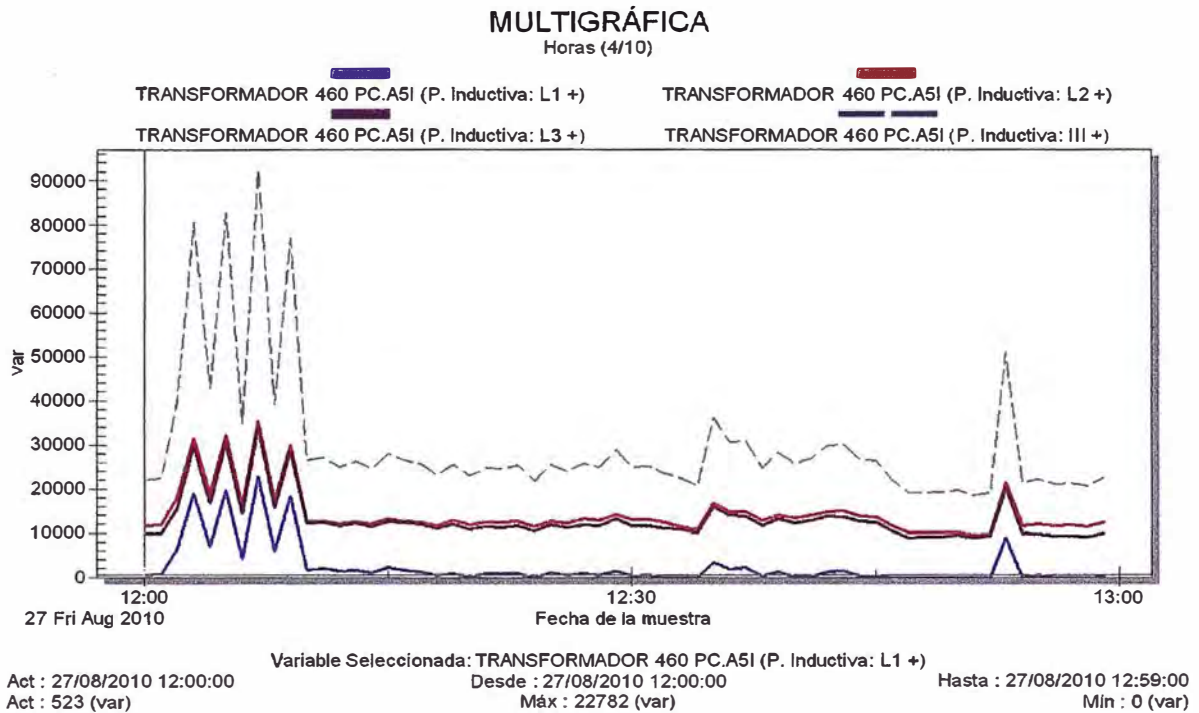


Figura 3.4 Curva de comportamiento de de la potencia inductiva por línea y el total

### 3.5 THD de armónicos de tensión y corriente:

Para este punto se tomo las mediciones considerando que la red solo alimentara al transformador 10/0.46KV-800KVA, y las demás cargas mediante grupos electrógenos.

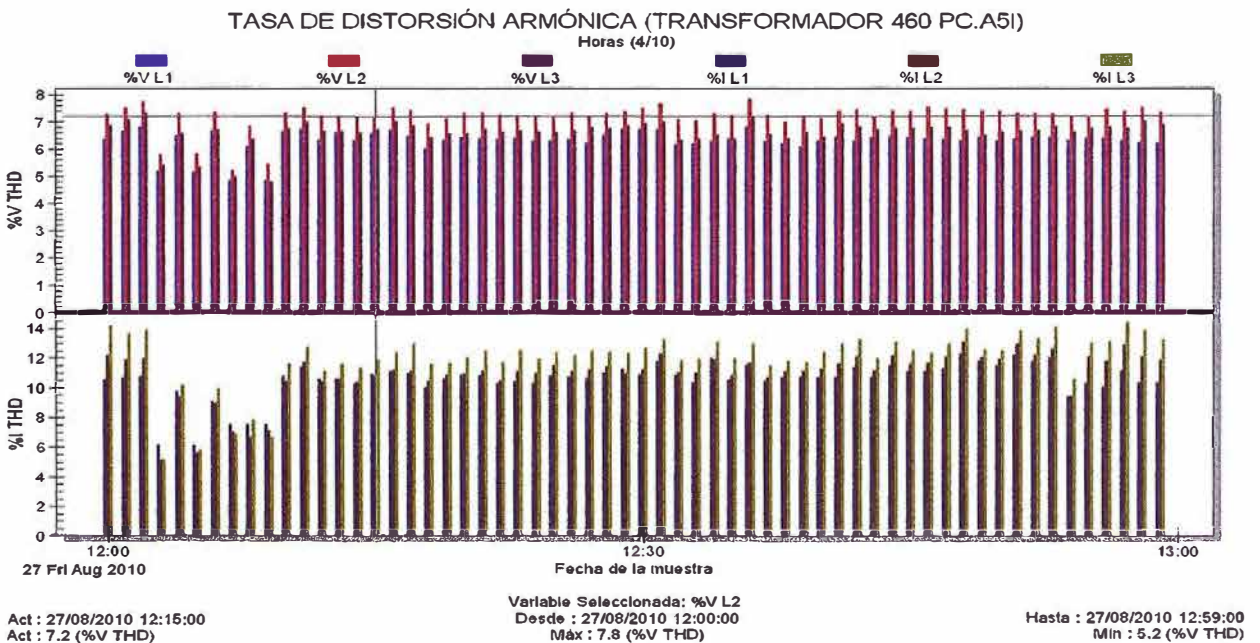
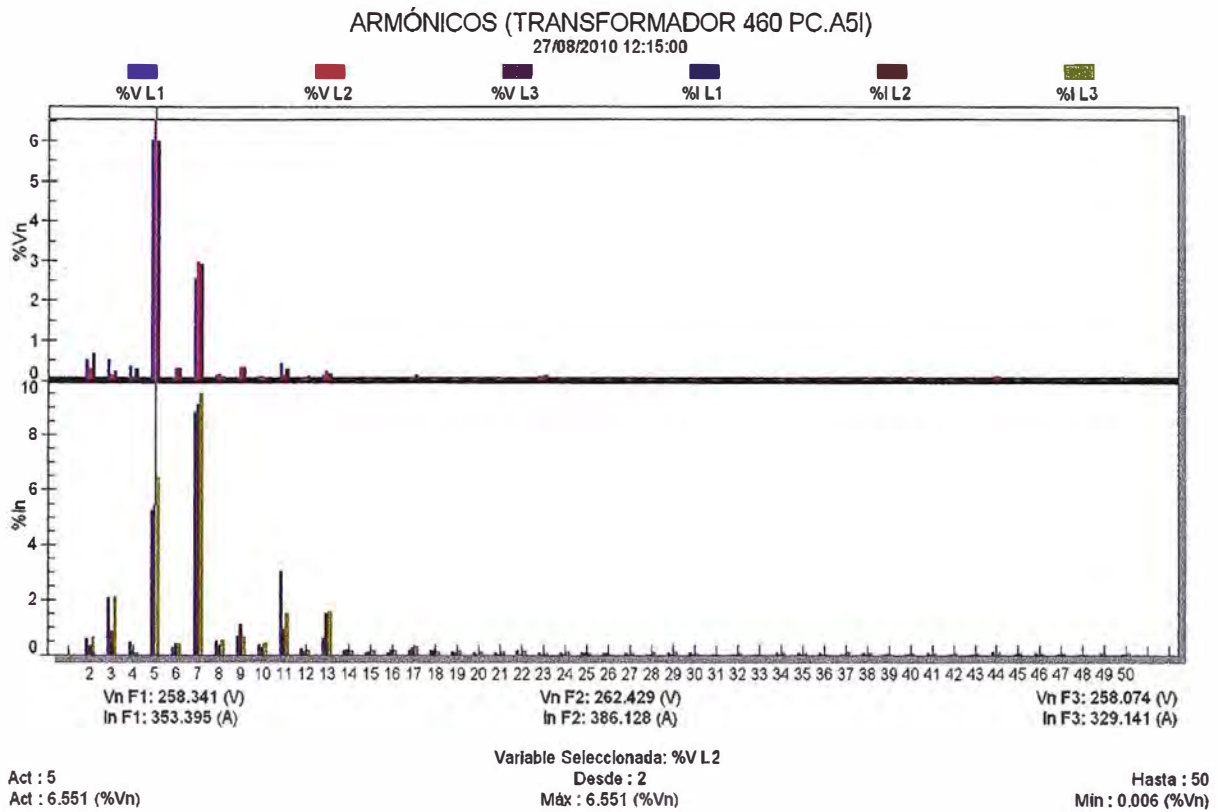


Figura 3.5 Curva de comportamiento THD de armónicos de tensión y corriente

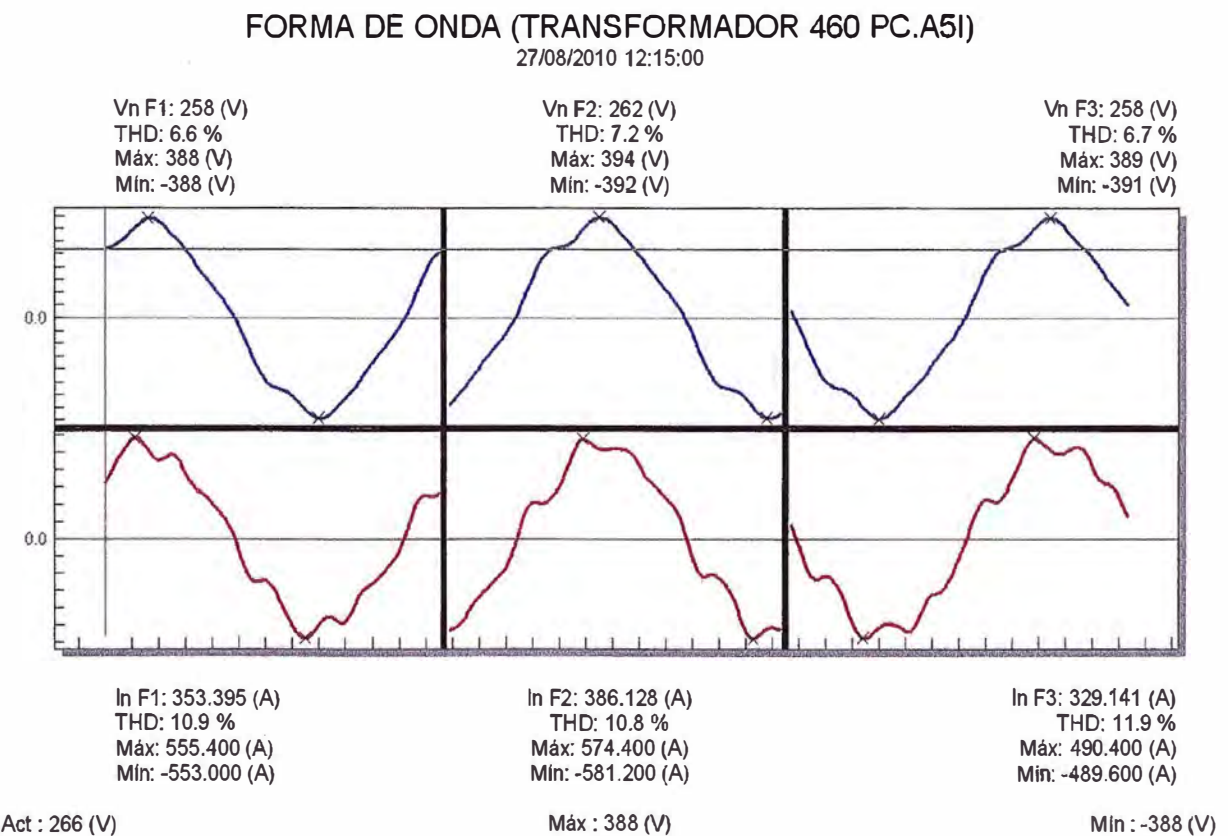


**3.6 Orden de los armónicos de tensión y corriente:**



**Figura 3.6 Orden de armónicos de tensión y corriente**

**3.7 Forma de onda de tensión y corriente:**

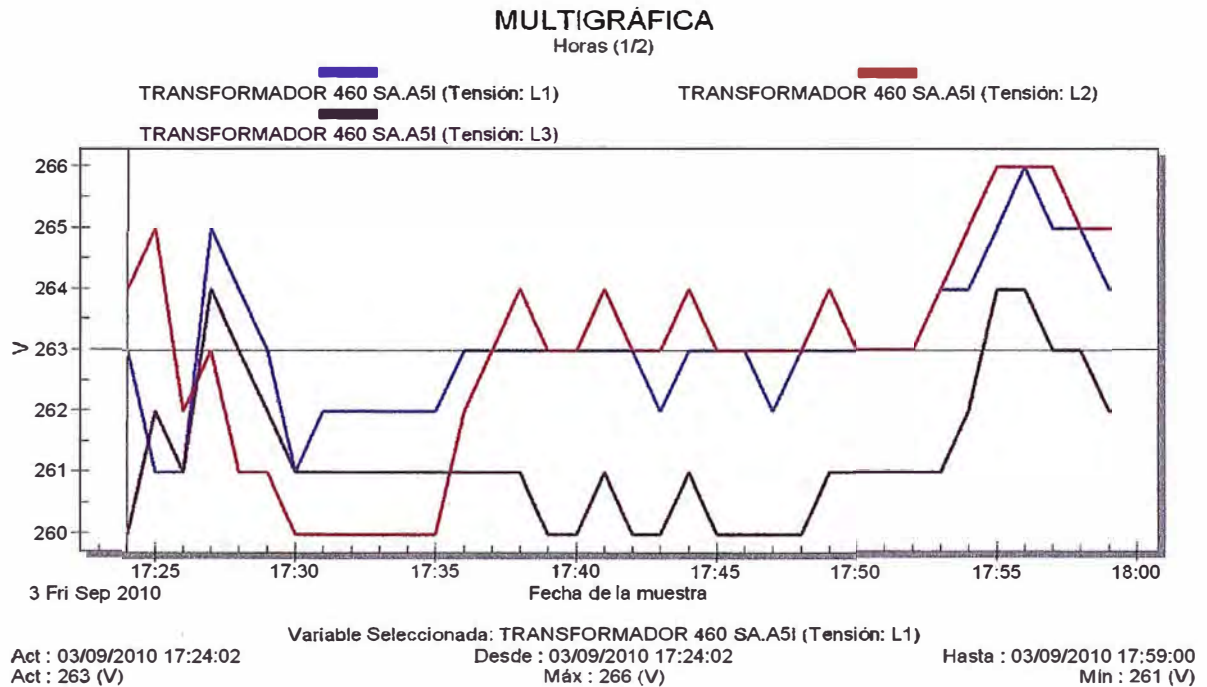


**Figura 3.7 Curva de onda de tensión y corriente**

### 3.8 Mediciones adicionales para el análisis de los generadores de armónicos

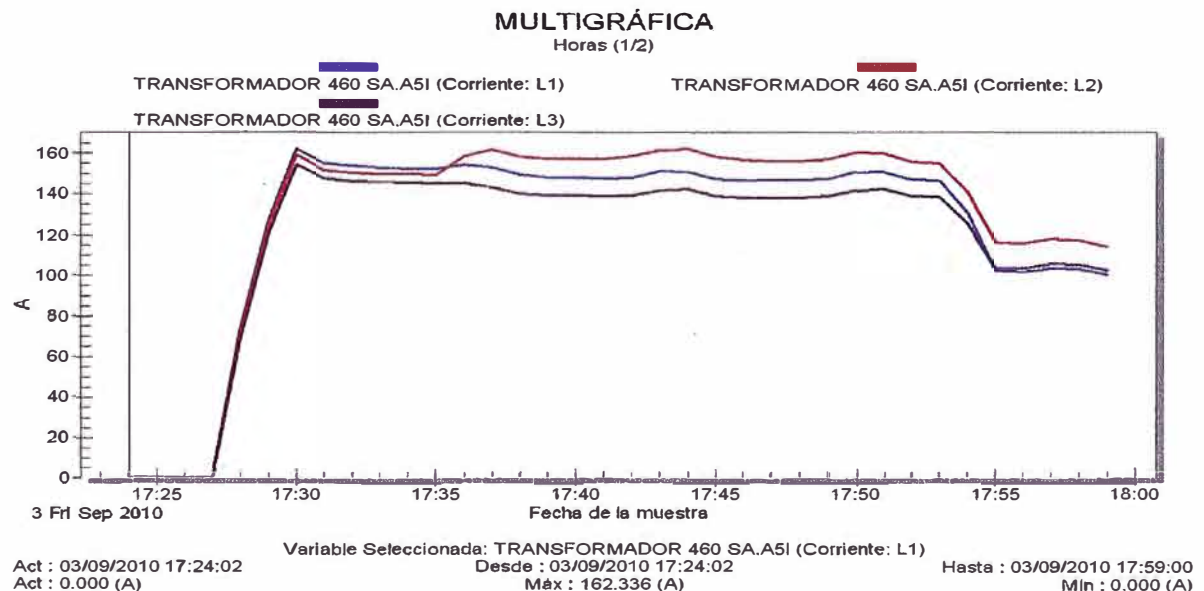
Se realizaron medidas posteriores para poder analizar los equipos que generan armónicos y los que no, se pudieron identificar motores con variadores de velocidad y arranque de estado sólido. Agrupando las cargas que no tienen muchos armónicos se obtuvieron las siguientes graficas donde se tomó mediciones sin considerar el banco de condensadores, estos gráficos nos permiten modelar una impedancia equivalente del sistema que se usara en la simulación.

#### 3.8.1 Gráfico de tensión en L1-L2-L3:



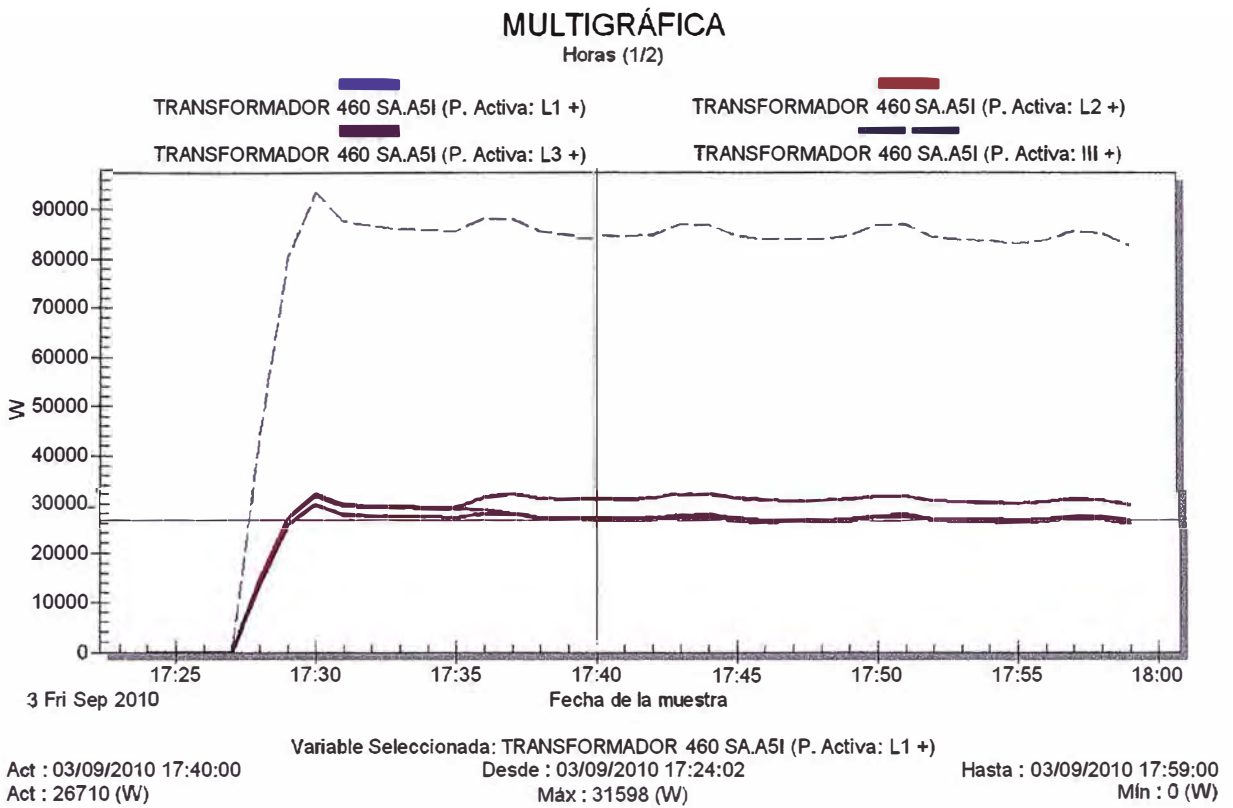
**Figura 3.8 Curva de comportamiento de tensión en L1-L2-L3**

#### 3.8.2 Gráfico de corrientes en L1-L2-L3:



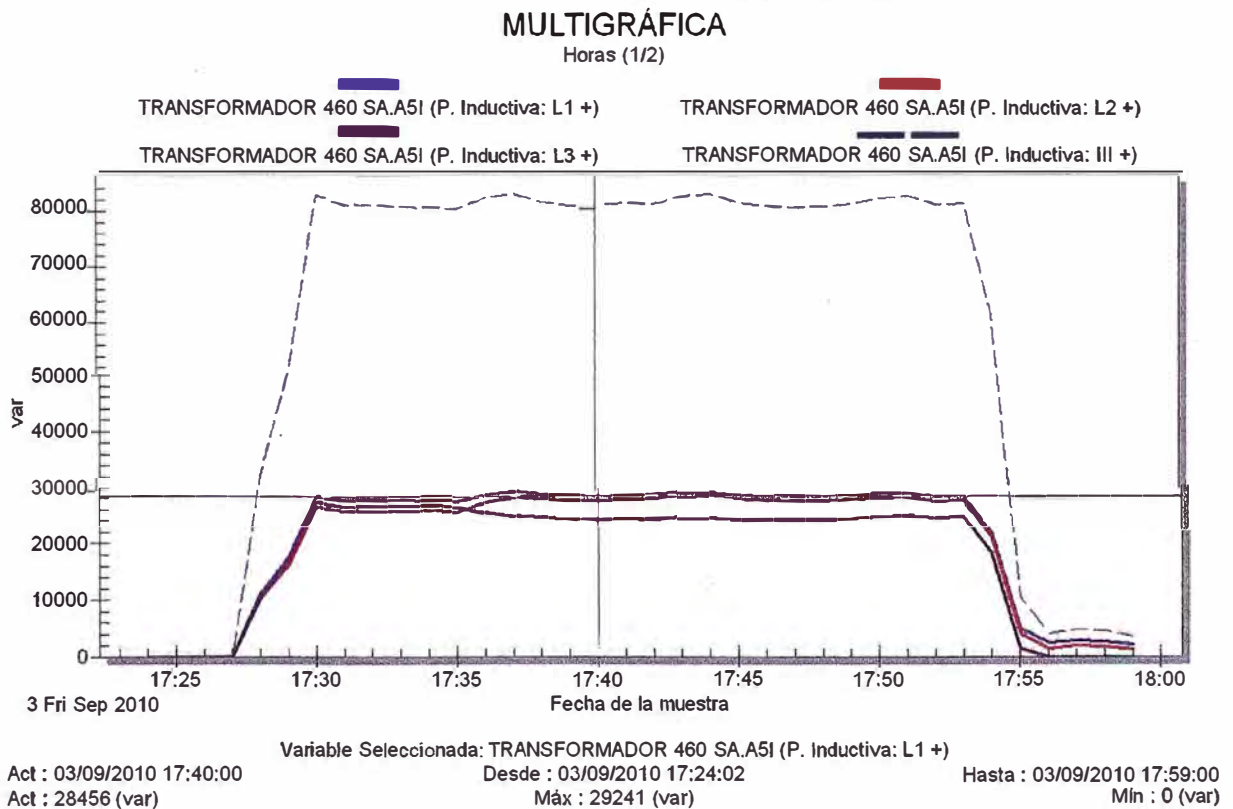
**Figura 3.9 Curva de comportamiento de corrientes en L1-L2-L3**

**3.8.3 Gráfico de potencias activas en L1-L2-L3 y el total:**



**Figura 3.10 Curva de comportamiento de potencias activas en L1-L2-L3 y el total**

**3.8.4 Gráfico de potencias inductivas en L1-L2-L3 y el total:**



**Figura 3.11 Curva de comportamiento de inductivas en L1-L2-L3 y el total**



## CAPÍTULO IV

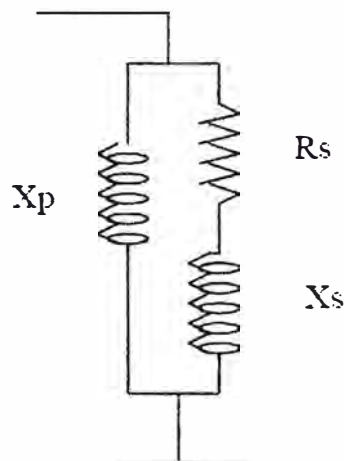
### INTERPRETACION Y MODELAMIENTO

Se puede observar en el primer grupo de gráfica figura 3.6 la presencia de armónicos entre los cuales los del 5to y 7mo orden son los que predominan y en menor medida los del 11avo orden esto es debido a la existencia de los variadores de velocidad y de los arrancadores electrónicos.

Se modelará un circuito el cual se simulará en el WinHarmony para calcular el efecto de un filtro de armónicos que para este caso será un Filtro Pasivo Shunt.

#### 4.1 Modelamiento de los circuitos para la simulación

Para el modelamiento de las cargas se tomó el siguiente equivalente en donde se necesitará los valores de kW y los kVAR para definir los parámetros



**Figura 4.1 Circuito equivalente para el modelamiento**

$$R_{s_{pu}} = \frac{P_{base}}{PL} \quad (4.1)$$

$$X_{s_{pu}} = 0.073 \times R_{s_{pu}} \times h \quad (4.2)$$

$$X_{p_{pu}} = \frac{h \times R_{s_{pu}}}{6.7 \frac{QL}{PL} - 0.74} \quad (4.3)$$

Donde los demás datos serán los ingresados en el programa WinHarmony.

Teniendo los datos de las figuras 3.10 y 3.11 se tendrá que el valor de los datos pedidos:

$$P = 86.4KW$$
$$Q = 80.5KVAR$$

La fuente de armónicos se modelará como fuentes de corriente donde los valores serán como se muestra en la figura 3.6.

$$I_p^5 = 6.43\%$$
$$I_r^7 = 9.52\%$$

Para el banco de condensadores se toma el valor de 100KVAR como inicio de cálculo para la iteración.

El filtro se escogerá probando primero con un filtro pasivo Shunt para luego hacer uso de filtros activos ambos serán para eliminar el Quinto y Séptimo armónico.

## CAPÍTULO V SIMULACION DE POSIBLE SOLUCION

Tomando como base el programa WinHarmony se simulará el circuito existente con los datos del capítulo anterior para obtener la solución al problema

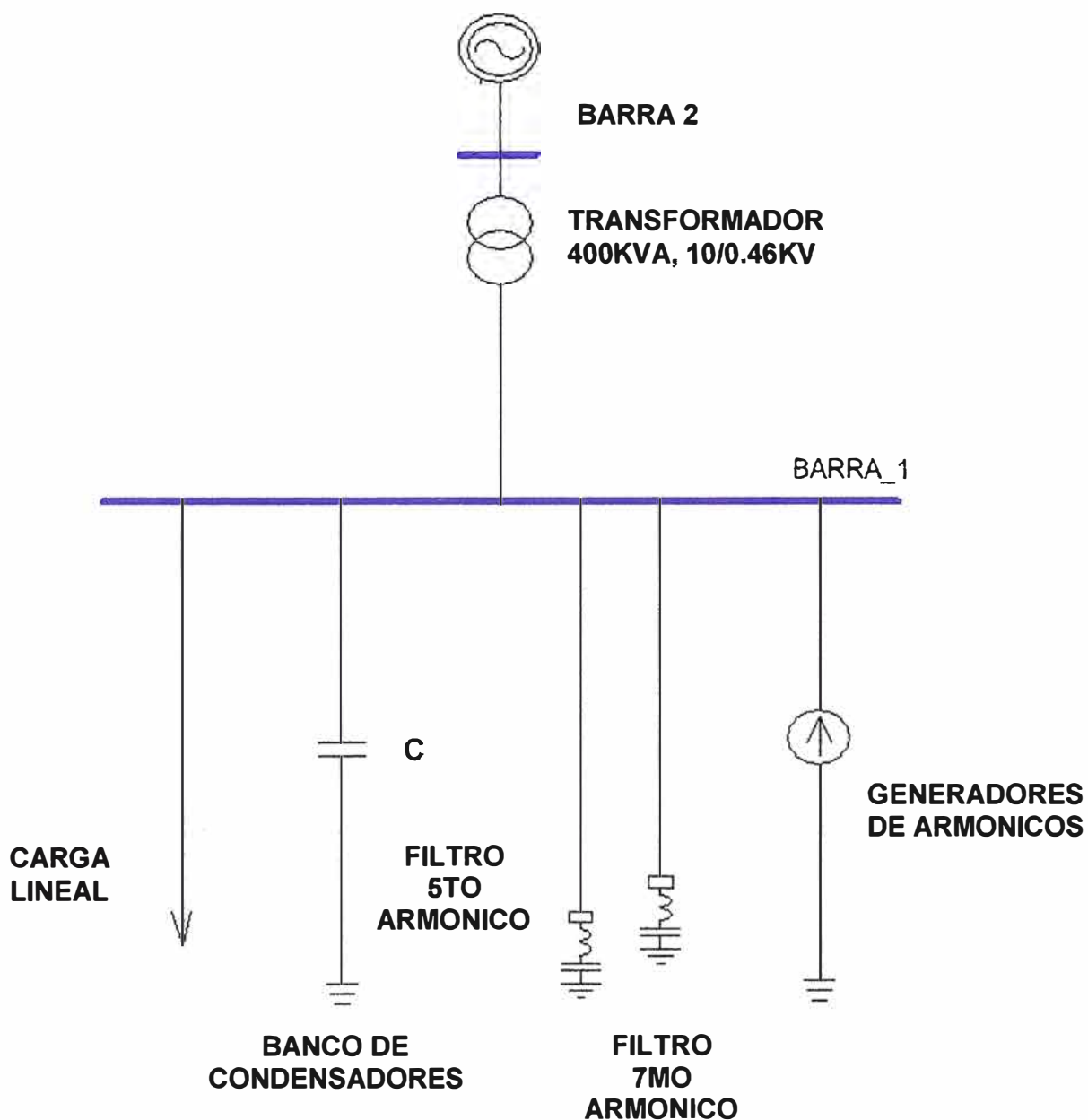


Figura 5.1 Diagrama del circuito existente modelado

### 5.1 Modelamiento de simulación N°1

se ha considerado que solo se tienen cargas lineales y cargas que generan armónicos.

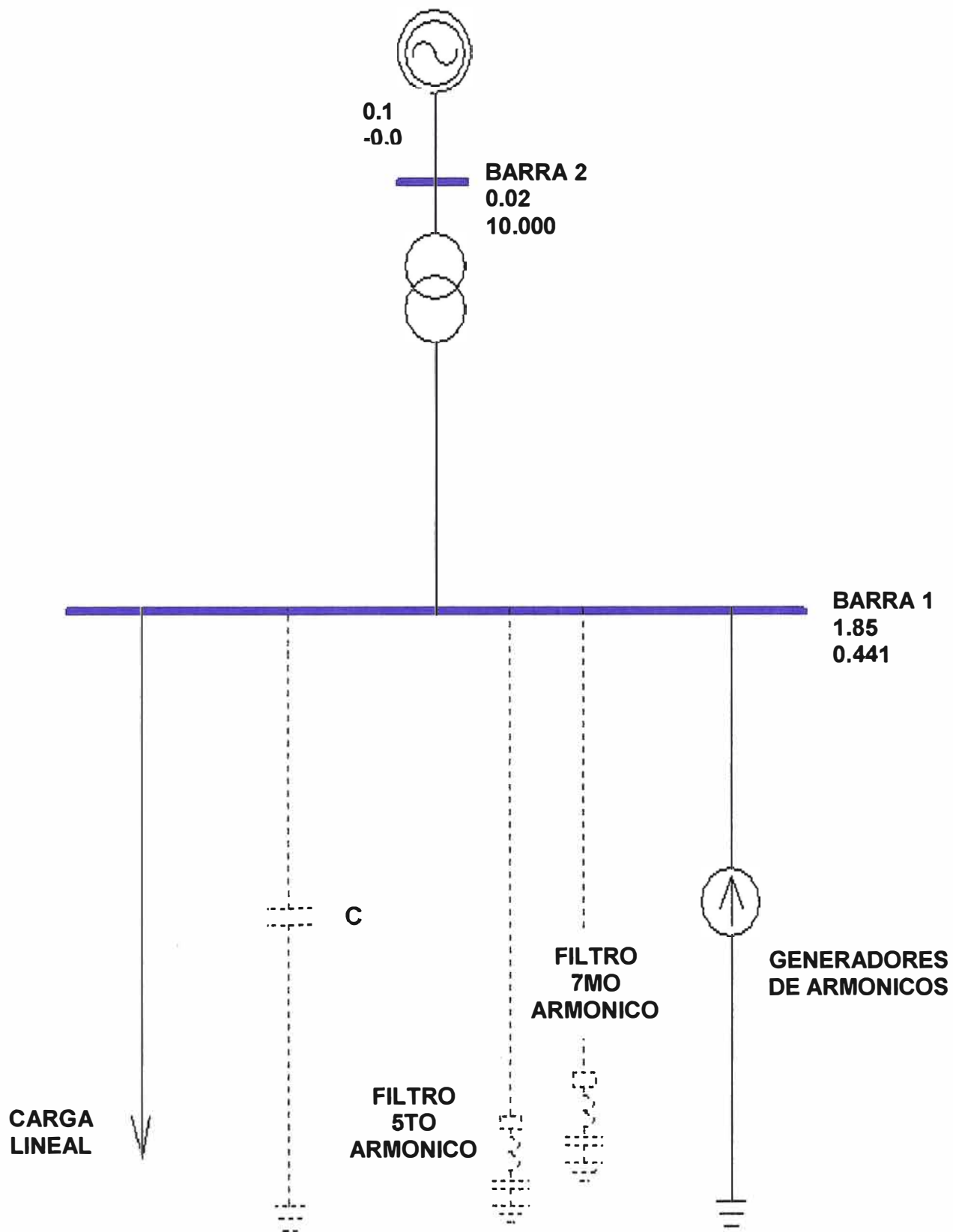


Figura 5.2 Diagrama considerado para la simulación N°1

## 5.2 Modelamiento de simulación N°2

Se ha considerado que se tienen cargas lineales, el efecto del banco de condensadores y cargas que generan armónicos.

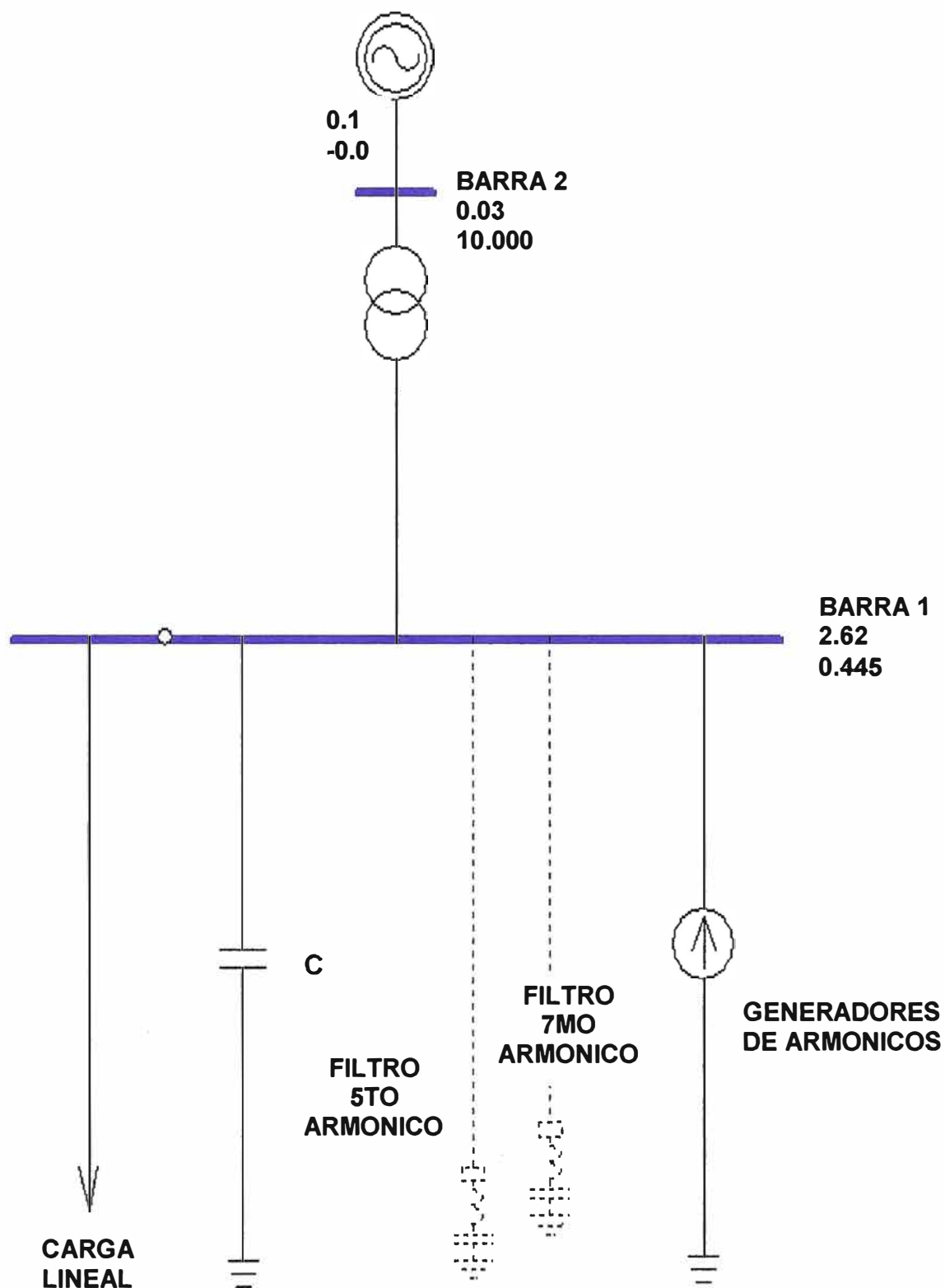


Figura 5.3 Diagrama considerado para la simulación N°2

### 5.3 Modelamiento de simulación N°3

Se ha considerado que se tienen cargas lineales, el efecto del banco de condensadores y cargas que generan armónicos; pero filtrando el armónico de quinto orden.

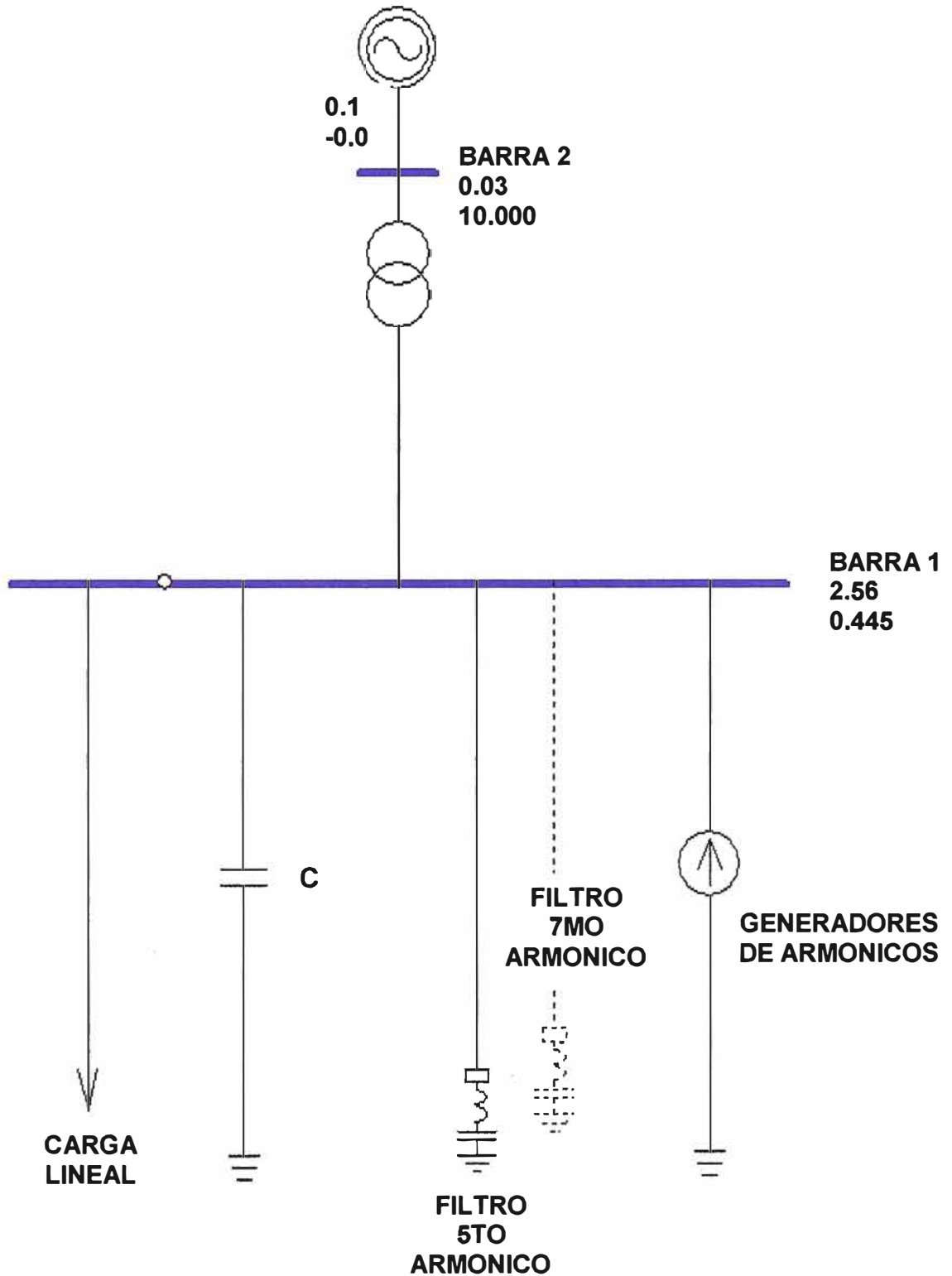


Figura 5.4 Diagrama considerado para la simulación N°3

#### 5.4 Modelamiento de simulación N°4

Se ha considerado que se tienen cargas lineales, el efecto del banco de condensadores y cargas que generan armónicos; pero filtrando los armónicos del quinto y séptimo orden.

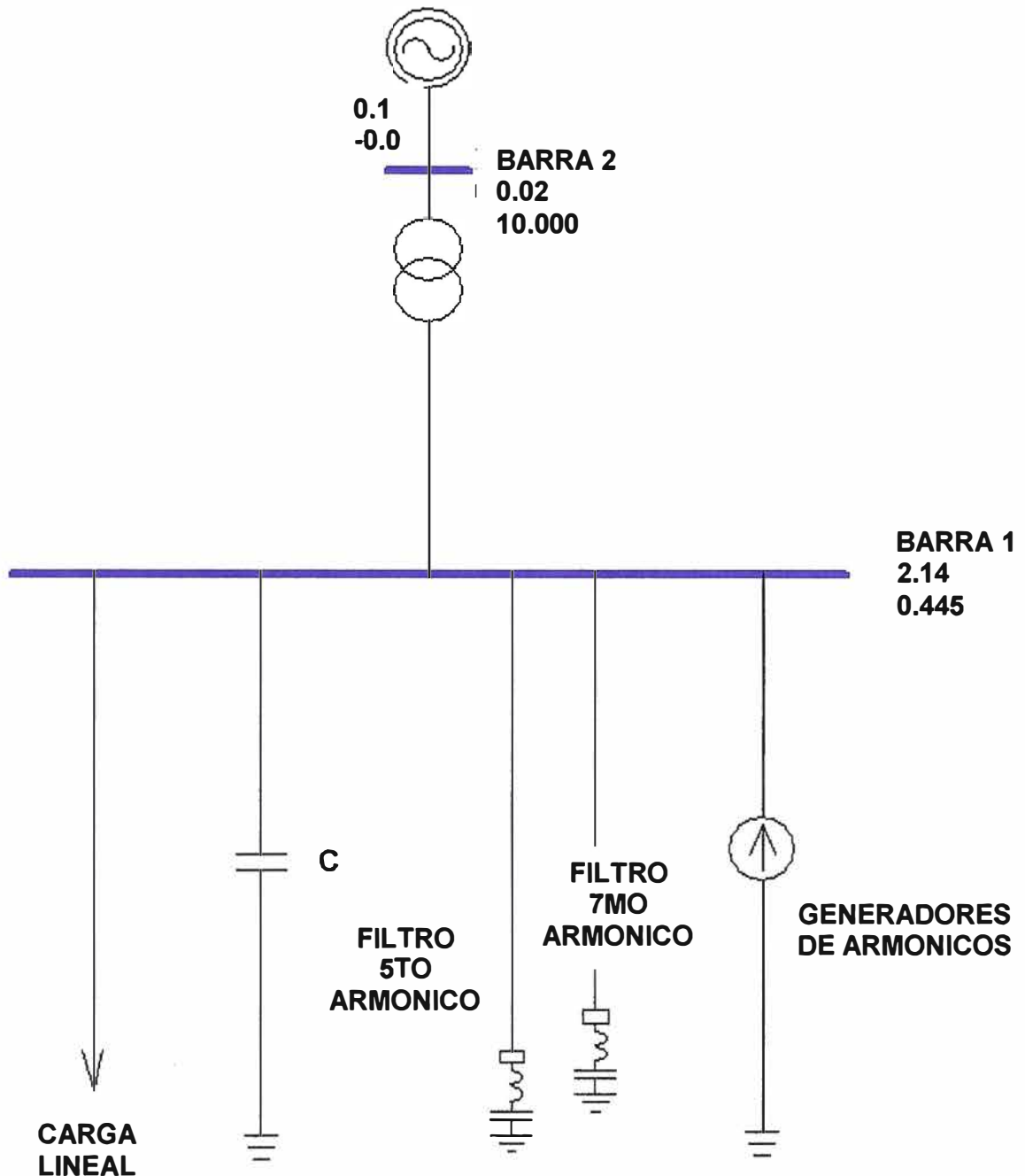


Figura 5.5 Diagrama considerado para la simulación N°4

#### 5.5 Diagramas de las variaciones de las variables armónicas según las simulaciones 1, 2, 3 y 4

De acuerdo al orden del modelamiento se tienen los diagramas de variación del nivel de armónicos en la carga y en las barras:

### 5.5.1 Diagrama de variación del THDV según las simulaciones 1, 2, 3 y 4

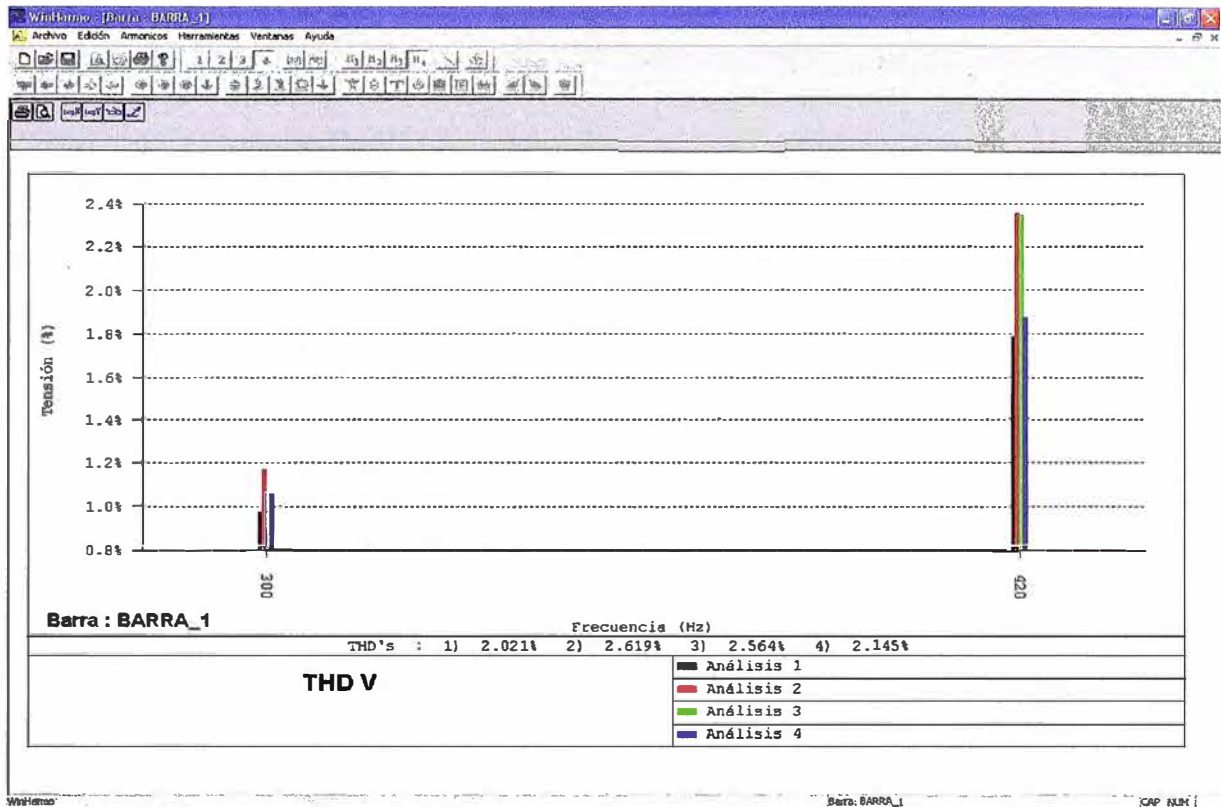


Figura 5.6 Diagrama de variación de armónicos THD V según las simulaciones 1, 2, 3 y 4 realizadas

### 5.5.2 Diagrama de variación del $I_h / I_n$ % según las simulaciones 1, 2, 3 y 4

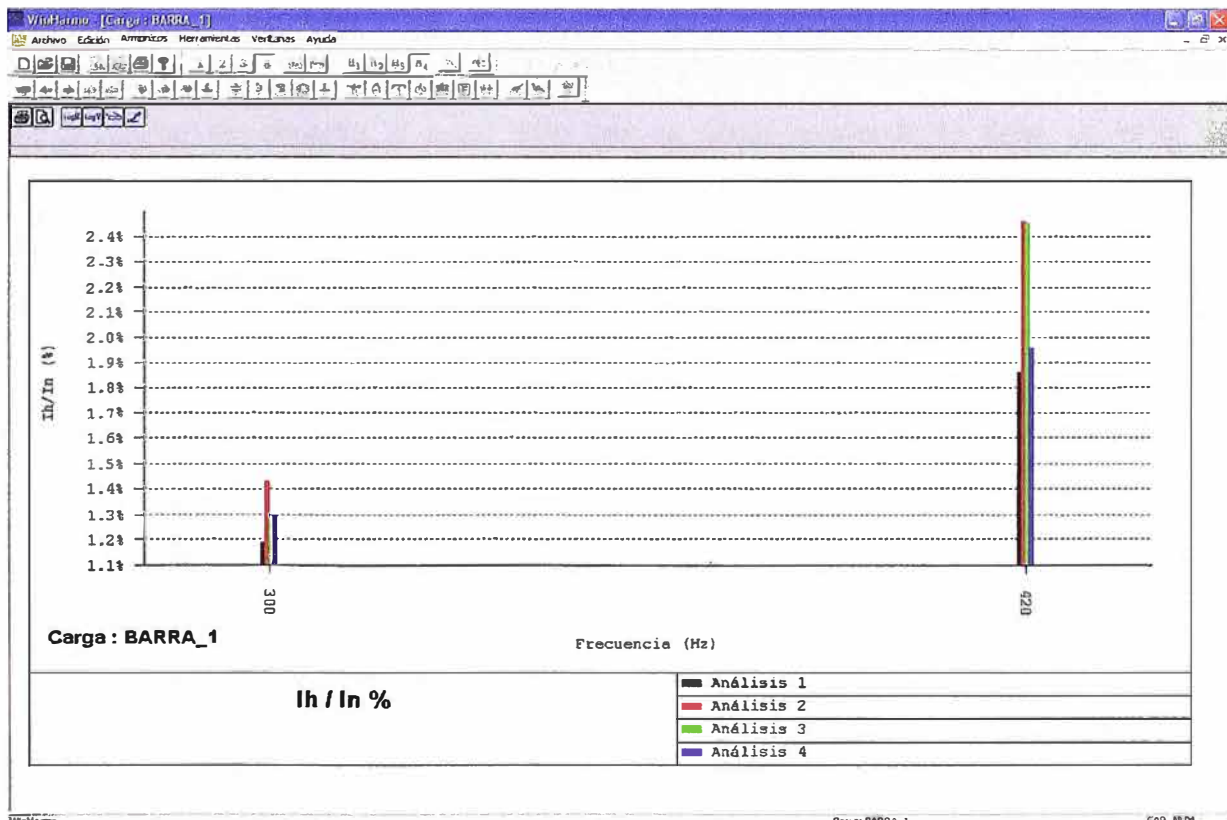
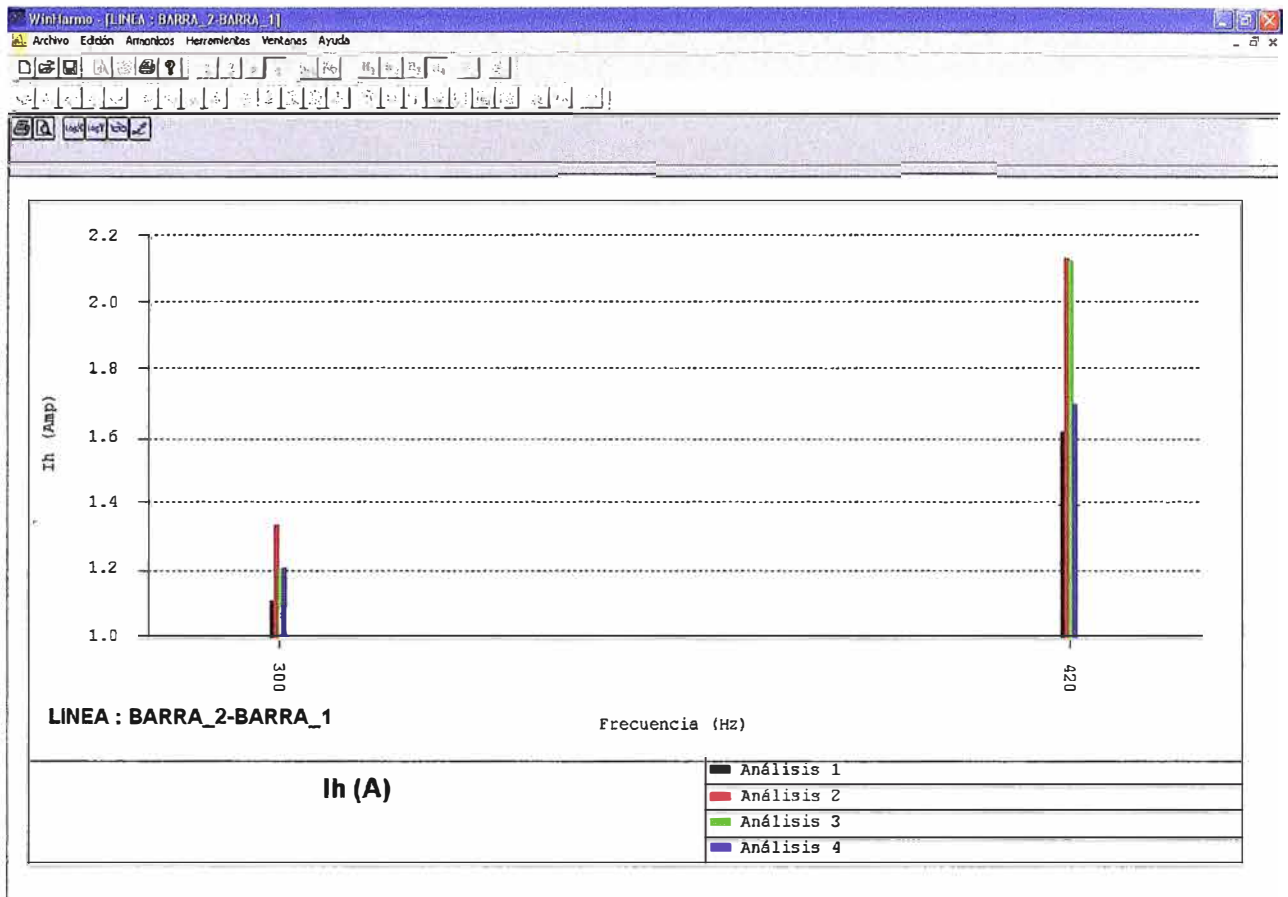


Figura 5.7 Diagrama de variación de armónicos  $I_h / I_n$  % según las simulaciones 1, 2, 3 y 4 realizadas



### 5.5.3 Diagrama de variación del $I_h$ (A) según las simulaciones 1, 2, 3 y 4



**Figura 5.8 Diagrama de variación de armónicos  $I_h$  (A) según las simulaciones 1, 2, 3 y 4 realizadas**

Como se observa al partir solo con la carga existente se tiene un nivel de armónico menor de lo esperado pero luego de agregarle el banco de condensadores el nivel de los armónicos aumenta para las dos frecuencias 300 y 420Hz, y después de agregar los filtros de armónicos del 5to y 7mo el nivel de armónicos se reduce en un 40%, porcentaje que se espera obtener al agregar filtros de este tipo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- El banco de condensadores compensa la energía reactiva de la red el cual es bueno para el circuito eléctrico pues gracias a ellos se reducen las pérdidas por efecto joule ( $I^2 \cdot R$ ) y se regula el voltaje de la red.
- 2.- Los armónicos son generados por variadores de velocidad de equipamiento de gran potencia (fuentes).
- 3.- Con la finalidad de proteger los condensadores se puede aplicar un filtro de choque en serie con el banco de condensadores con la finalidad de reducir el THD % (V), ver cuadro de límites de tensión IEEE 519.
- 4.- Hecho el análisis de corrección de armónicos para el 5to y 7mo en forma individual resulta más caro que agrupar las fuentes generadoras de armónicos y colocar un filtro dinámico que eliminará los armónicos de órdenes 3ero hasta el 21 armónico.

## ANEXO A: Registro fotográfico



Foto del tablero de la planta



Foto del banco de condensadores de la planta





Foto del banco de condensadores de la planta



Foto del Transformador de la planta



Foto de dos Variadores de velocidad deteriorados por fallas en la planta



## ANEXO B: Normas IEEE 519

### IEEE 519 Límites en la Distorsión de la Corriente.

Para condiciones con duración superior a una hora. Para períodos más cortos el límite aumenta un 50%

<b>Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes entre 120 - 69,000 volts.</b>						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
<b>Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes entre 69,000 - 161,000 volts.</b>						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
<b>Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes &gt; 161,000 volts.</b>						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<50	2.0	1.0	0.75	0.30	0.15	2.5
50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de Isc/Il. que presente						

*Donde ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.*

*IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.*

*TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.*

### **IEEE 519 Límites en la Distorsión de la tensión**

Para condiciones con duración superior a una hora. Para períodos más cortos el límite aumenta un 50%

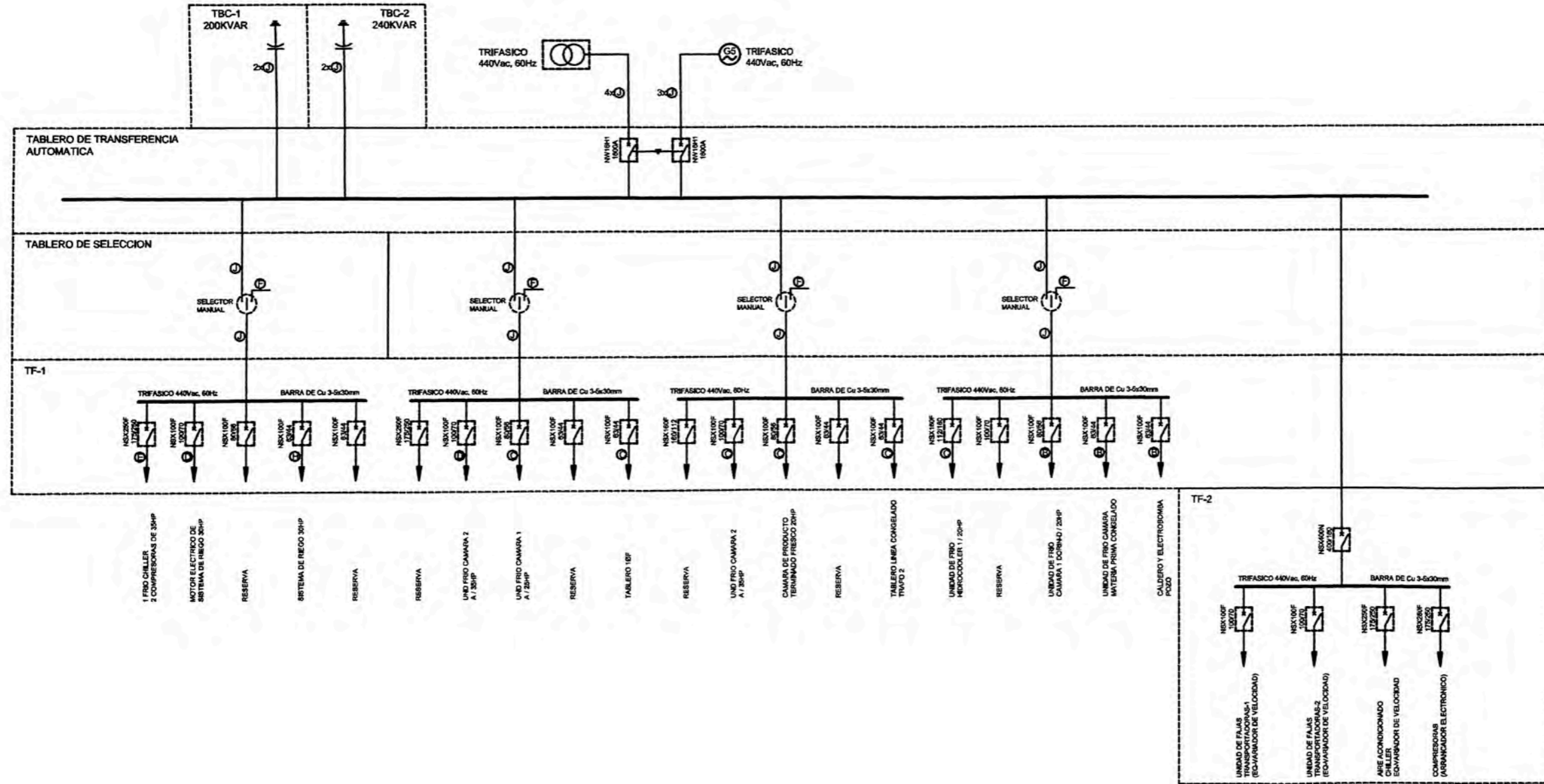
Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual de Voltaje (%)	Distorsión total del voltaje THD (%)
Hasta 69 kV	3.0	5.0
De 69 kV a 137.9 kV	1.5	2.5
138 kV y mas	1.0	1.5

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

**ANEXO C: DIAGRAMA UNIFILAR DE PLANTA ACTUAL Y DIAGRAMA UNIFILAR  
PROPUESTO PARA CORRECCION DEL PROBLEMA**



# DIAGRAMA UNIFILAR INICIAL

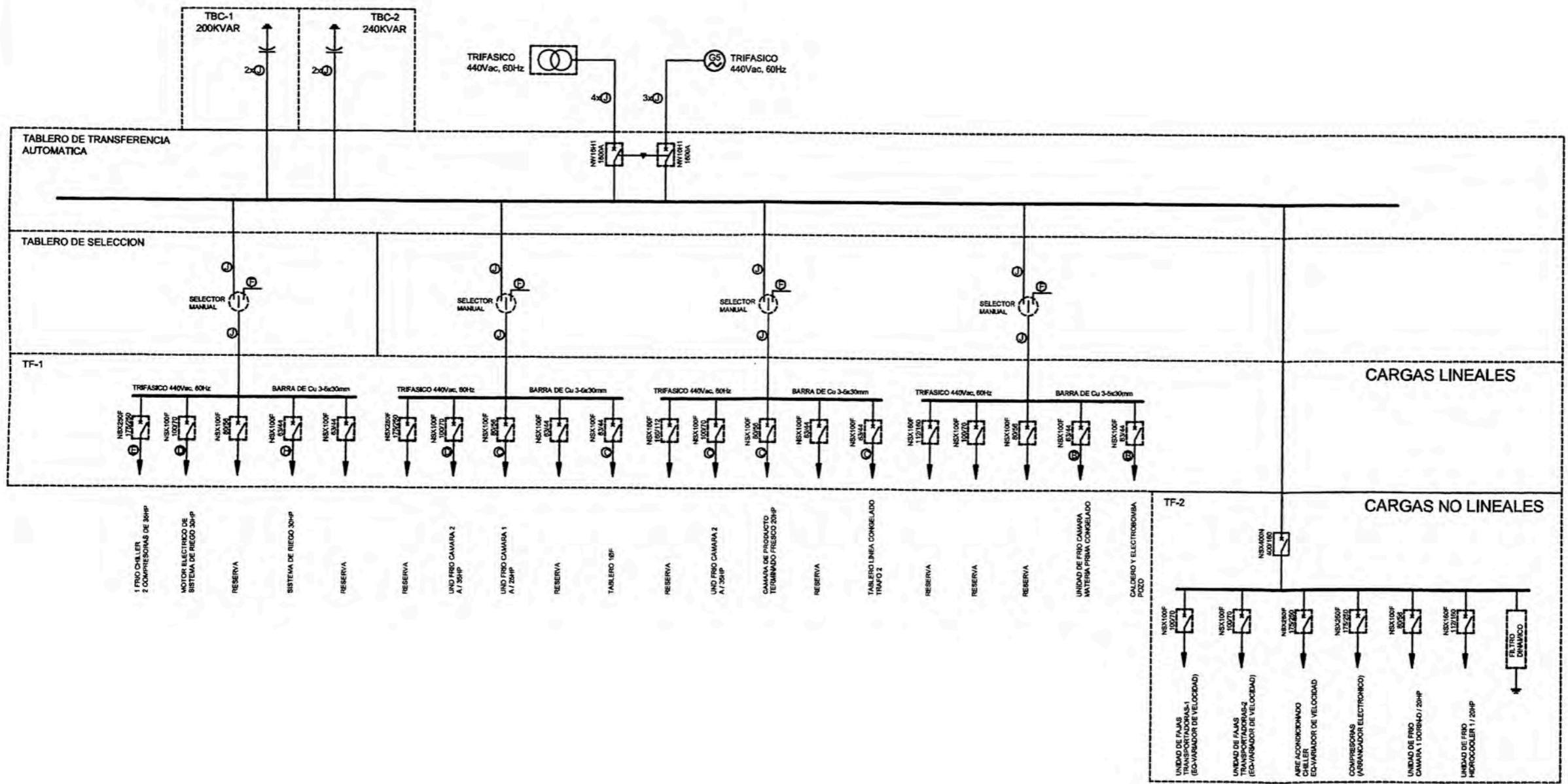


DESCRIPCION	
Ⓐ	3-1x10mm <sup>2</sup> THW
Ⓑ	3-1x16mm <sup>2</sup> THW
Ⓒ	3-1x25mm <sup>2</sup> THW
Ⓓ	3-1x35mm <sup>2</sup> THW
Ⓔ	3-1x50mm <sup>2</sup> THW
Ⓕ	3-1x70mm <sup>2</sup> THW
Ⓖ	3-1x120mm <sup>2</sup> THW
Ⓜ	1-3x10mm <sup>2</sup> NPT
Ⓝ	1-3x6mm <sup>2</sup> NPT
Ⓟ	3-1x120mm <sup>2</sup> NYY
Ⓠ	3-1x6mm <sup>2</sup> NYY
Ⓡ	1-4x4mm <sup>2</sup> NLT

DIAGRAMA UNIFILAR	
DESCRIPCION	
	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE CAJA MOLDEADA
	SELECTOR MANUAL
	ENCLAVAMIENTO MECANICO - ELECTRICO
	CELDA DE TRANSFORMACION
	GRUPO ELECTROGENO
	BANCO DE CONDENSADORES

	LDIC / 1	LDIC / 2	LDIC / 3	LDIC / 4	LDIC / 5	LDIC / 6	LDIC / 7	LDIC / 8
	<b>DIAGRAMA UNIFILAR INICIAL</b>							IEO 1
	DES	PROY	APROB	CLIENTE	ESCALA	01		DATA
DES	EBZ	EBZ	PLANTA	S/E	PLANO UNIFILAR DE PLANTA			OCT 2010

# DIAGRAMA UNIFILAR FINAL - AGRUPACION DE CARGAS



DESCRIPCION	
ⓐ	3-1x10mm <sup>2</sup> THW
ⓑ	3-1x16mm <sup>2</sup> THW
ⓒ	3-1x25mm <sup>2</sup> THW
ⓓ	3-1x35mm <sup>2</sup> THW
ⓔ	3-1x50mm <sup>2</sup> THW
ⓕ	3-1x70mm <sup>2</sup> THW
ⓖ	3-1x120mm <sup>2</sup> THW
ⓗ	1-3x10mm <sup>2</sup> NPT
ⓓ	1-3x6mm <sup>2</sup> NPT
ⓓ	3-1x120mm <sup>2</sup> NYY
ⓓ	3-1x6mm <sup>2</sup> NYY
ⓓ	1-4x4mm <sup>2</sup> NLT

DIAGRAMA UNIFILAR	
DESCRIPCION	
	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE CAJA MOLDEADA
	SELECTOR MANUAL
	ENCLAVAMIENTO MECANICO - ELECTRICO
	CELDA DE TRANSFORMACION
	GRUPO ELECTROGENO
	BANCO DE CONDENSADORES

		EDIC/1	EDIC/2	EDIC/3	EDIC/4	EDIC/5	EDIC/6	EDIC/7	EDIC/8
		<b>DIAGRAMA UNIFILAR FINAL</b> <b>AGRUPACION DE CARGAS</b>							IE02
		DES	PROY	APROB	CLIENTE	ESCALA	01		
DES	EBZ	EBZ	PLANTA	S/E	PLANO UNIFILAR PROPUESTO DE PLANTA				OCT 2010

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Albert F. Spitta – Gunter G. Seip, “Instalaciones Eléctricas”, Tomo I
- [2] Mohan, Undeland y Robbins, John Wiley y Sons, “Power Electronics: Converters, Applications and Design”, 2° Ed., New York, 1995.
- [3] Watanave E. Aredes M., “Teoría de Potencia Ativa e Reativa Instantánea e aplicacoes-Filtros Ativos”, 1998
- [4] IEEE Standard 519-92 Recommended Practices and Requirements for harmonic Control in Electric Power Systems, 1992.
- [5] Chapman SJ, “Maquinas Electric as Editorial” McGraw – Hill 2a edición
- [6] F.Z. Peng, H. Akagi, A Nabae, “A novel harmonic power filter”, in Proc. IEEE/PESC, April, 1988, pp. 1151-1159
- [7] Akagi, H., “New trends in active filters for Power conditioning, Industry Applications”. IEEE Transactions on vol. 32, Issue 6, pages 410-416-1312-1322 Nov. Dec.1996.
- [8] H. Fujita, T. Yamasaki, H. Akagi, “A hybrid active power filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, N° 2, pages 215-222, March 2000.
- [9] P. Sameron, J:C. Montano, J.R. Vasquez, J. Prieto and A. Perez, “Compensation in Nonsinusoidal, Unbalanced Three-Phase”, Tour-Wire Systems UIT Active Power-Line conditioner, IEE Trans. On Power Delivery Vol. 19 N° 4, October - 2004, pp. 1968 - 974.
- [10] D.A Gonzalez and J.C McCall, “Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems”, IEEE Trans.Ind.App., vol. IA-23, pp. 504-512, May/June/ 1987.

- [11] IEEE Std. 1531-2003: IEEE Guide for application and specifications of harmonic filters. IEEE 2003.
- [12] L. F. C. Monteiro, M. Aredes, and J A. Moor Neto, "A control strategy for unified power quality conditioner", in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron, vol. I, 2003, pp. 391-396.
- [13] European Standard EN-50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, CENELEC, 1994.
- [14] IEEE Std. 1195-1995; IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality IEEE 1995.