

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN DE ARMONICOS EN VARIADORES DE  
VELOCIDAD Y CARGAS NO LINEALES**

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

**PRESENTADO POR:  
WILLMER CHANEL VASQUEZ MAGUIÑA**

**PROMOCIÓN  
2010-II**

**LIMA – PERÚ  
2014**

**TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN DE ARMONICOS EN  
VARIADORES DE VELOCIDAD Y CARGAS NO LINEALES**

Dedico el presente trabajo a mis padres, por todo el amor que me brindan, por el constante apoyo y dedicación en los años de la Universidad, les agradeceré eternamente todo el sacrificio realizado.

A mis hermanos Cristian, Henry, Joselyn y Andrés por las alegrías compartidas diariamente, gracias a ustedes día a día deseo ser mejor persona.

A mis amigos por el apoyo incondicional, por los conocimientos compartidos, por las anécdotas vividas en nuestra juventud.

## SUMARIO

El siguiente informe explica las técnicas modernas de eliminación de armónicos realizado en variadores de velocidad y cargas no lineales. El CAPITULO I presenta la descripción del informe , se presentan los objetivos y alcances del informe , el CAPITULO II contiene el marco teórico, en este capítulo se presentan los principales conceptos de distorsión armónica, se detallan sus efectos, se utiliza las series de Fourier en la descripción de cargas no lineales, se presenta las diferencias de conceptos de distorsión armónica individual y distorsión armónica total , también se detallan las principales fuentes de generación de armónicos y el marco regulatorio establecido por el estándar IEEE-519. Presentado el marco teórico se presenta la definición de términos utilizados en el informe.

En el CAPITULO III se realiza la descripción de las diferentes técnicas de mitigación de armónicos, estas técnicas son:

- Mitigación de armónicos en variadores de velocidad utilizando transformadores de aislamiento en rectificadores de 6 pulsos, 12 pulsos y 18 pulsos.
- Mitigación de armónicos a través de bobinas o reactancia en AC y DC.
- Mitigación de armónicos por filtros pasivos
- Mitigación de armónicos por técnicas de modulación PWM.

En el CAPITULO IV se analizan técnicas complementarias de mitigación de armónicos que utilizan los variadores de velocidad, cicloconvertidores y los SVC, se explican casos reales donde se observa que las técnicas de mitigación se complementan con la finalidad de mitigar los armónicos de bajo orden y alto orden, y así garantizar operar dentro de los límites establecidos el estándar de la IEEE-519, también se presenta el cálculo de parámetros de los filtros pasivos tipo Shunt realizado en Matlab.

Al finalizar el informe se expone las conclusiones y recomendaciones finales.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>01</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA</b> .....	<b>02</b>
1.1 Descripción del informe.....	02
1.2 Objetivos del informe .....	02
1.3 Evaluación del problema.....	03
1.4 Alcances del informe.....	03
1.5 Organización del informe.....	04
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b> .....	<b>05</b>
2.1 Antecedentes del problema.....	05
2.1.1 Historia.....	05
2.1.2 En el Perú.....	05
2.2 Bases teóricas.....	06
2.2.1 Armónicos.....	06
2.2.2 Series de Fourier.....	07
2.2.3 Distorsión armónica.....	09
2.2.4 Como se producen los armónicos.....	09
2.2.5 Efecto de los armónicos.....	10
2.2.6 Fuentes armónicas.....	12
2.2.7 Marco Regulatorio.....	16
2.2.8 Armónicos y componentes simétricas.....	19
2.3 Definición de términos.....	21
<b>CAPITULO III</b>	
<b>METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>23</b>
3.1 Alternativas de solución.....	23
3.1.1 Uso de rectificadores multipulsos.....	24

3.1.2	Uso de reactancias en líneas o Choke.....	34
3.1.3	Uso de filtros pasivos.....	35
3.1.3.1	Filtros Series.....	36
3.1.3.2	Filtros Shunt o paralelo.....	37
3.1.4	Uso de drives PWM.....	40
3.1.4.1.	Modulación PWM Sinusoidal.....	40
3.1.4.2.	Índice de modulación.....	42
3.1.4.3.	Eliminación de armónicos de bajo orden en la modulación SPWM.....	42
3.2.	Solución del problema.....	44
3.2.1	Técnicas de mitigación de armónicas en cargas no lineales.....	45
3.2.1.1	Eliminación de Armónicos en variadores de velocidad.....	46
3.2.1.2.	Eliminación de armónicos en cicloconvertidores.....	47
3.2.1.3.	Eliminación de armónicos en sistemas de compensación reactiva.....	51
3.3.	Recursos humanos y equipamiento.....	52
<b>CAPITULO IV</b>		
<b>ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>		<b>54</b>
4.1	Análisis descriptivo.....	54
4.2	Análisis teórico de los datos y resultados obtenidos.....	55
4.2.1	Resultados obtenido con rectificadores multipulsos.....	55
4.2.1.1	Restricción de operación de variadores de 6 pulsos.....	58
4.2.2	Consideraciones finales en los filtros pasivos tipo Shunt.....	60
4.2.2.1	Calculo de parámetros de filtros pasivos utilizando Matlab.....	62
4.2.3	Aplicaciones de las reactancias línea o choke.....	66
4.3	Apreciaciones relevantes.....	67
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>68</b>
Conclusiones.....		68
Recomendaciones.....		69
<b>ANEXOS.....</b>		<b>70</b>
Anexo A : Diagrama del proceso de molienda de Antamina.....		70
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>71</b>

## INTRODUCCIÓN

El avance de la Electrónica de Potencia permitió obtener diferentes aplicaciones de control de velocidad en los motores síncronos y asíncronos, gracias a estas aplicaciones se ha visto un gran desarrollo de las industrias en el mundo.

El uso de esta tecnología trajo consigo la contaminación de las redes eléctricas con armónicos de corriente y armónicos de voltaje, viéndose afectado la calidad de energía de las redes eléctricas.

El siguiente trabajo ha sido elaborado para describir las diferentes técnicas de mitigación de armónicos en variadores de velocidad y cargas no lineales, también se describen las consideraciones a tener en cuenta en el diseño de una nueva instalación eléctrica industrial.

Se describen cargas no lineales importantes, utilizado en las plantas mineras del Perú como los Molinos SAG, molino de bolas y variadores de velocidad de media tensión, utilizados en fajas transportadoras y bombas centrifugas.

Aplicada las consideraciones establecidas en el trabajo se espera contribuir con mejorar la disponibilidad, confiabilidad y vida útil de los equipos eléctricos instaladas en todas las plantas industriales del Perú.

## **CAPITULO I PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA**

### **1.1 Descripción del informe:**

En las últimas décadas, las empresas eléctricas y los usuarios se han visto enfrentados a la necesidad de optimizar sus procesos, la eficiencia se ha conseguido mediante la incorporación masiva de convertidores estáticos utilizados para controlar y transformar la energía eléctrica. Estos convertidores estáticos han sido en gran medida responsables de los grandes avances en la automatización de los procesos industriales sin embargo estos equipos se caracterizan porque demandan corrientes no sinusoidales de la red, originando distorsiones en las tensiones y corrientes. Esta es la razón del porqué se ha producido un gran interés en el problema de las armónicas en redes eléctricas.

En el Perú el ministerio de Energía y Minas (MINEM - DGE) presento un estudio de la demanda proyectada que el Perú tendrá que asumir entre el 2010 y 2030, esta demanda asciende a 3761 MW y estará destinada al sector minero. Las principales aplicaciones de toda esta potencia demandada serán cargas tales como: fajas transportadoras, Molinos SAG, Molino de Bolas, bombas centrifugas, todas estas cargas serán alimentadas con convertidores electrónicos tales como: variadores de velocidad, cicloconvertidores, Sistemas de Compensación Reactiva (SVC). Para el uso de todos estos convertidores será necesario tener en cuenta los niveles de distorsión armónica generada por estas cargas no lineales para planificar e implementar las técnicas de mitigación y eliminación de armónicos necesarias de tal forma que se pueda garantizar la calidad de energía en las redes eléctricas lográndose así maximizar la vida útil de los equipos eléctricos.

### **1.2. Objetivos del informe:**

El presente trabajo tiene como objetivo principal: "explicar y describir las principales técnicas de mitigación de armónicos utilizados en los variadores de velocidad y en las cargas no lineales".

Son también objetivos complementarios del informe:

- Se expone los criterios para seleccionar métodos de eliminación de armónicas complementarias que permitan mejorar la calidad de la energía de la red eléctrica en una planta industrial.
- Se expone los criterios de diseño de una instalación eléctrica industrial, con la finalidad de garantizar los límites de inyección de corriente armónica.
- Describir los diferentes equipos utilizados en el proceso de mitigación de armónicos en cargas no lineales.

### **1.3. Evaluación del problema:**

Hoy en día muchas empresas no conocen los efectos de los armónicos en sus instalaciones, no logran identificar si los armónicos tienen su origen en su propia planta industrial o bien en la red de suministro eléctrico al haber sido contaminadas por otros clientes. La presencia de armónicos en la red por encima de los límites permisibles establecidos por las normas internacionales ocasionan efectos negativos, los que pueden ser resumidos en:

- Pérdidas del proceso productivo.
- Pérdida de disponibilidad y de confiabilidad del sistema eléctrico:
- Disminución de la vida útil de equipos.

### **1.4. Alcances del informe:**

El informe expone las técnicas de mitigación de armónicos en cargas no lineales, estas técnicas serán descritas con modelos matemáticos y descripción física, también se realizará el cálculo de parámetros de los filtros pasivos a través de funciones realizadas en MATLAB, se presenta los beneficios y limitaciones de cada una de las técnicas de mitigación de armónicos.

Las cargas no lineales analizadas incluyen:

- Variadores de Velocidad
- Rectificadores multipulsos (6 pulsos - 12 pulsos – 18 Pulsos)
- Variadores de velocidad tipo AFE (Active Front End) o PWM.
- Cicloconvertidores trifásicos de 12 pulsos utilizados en los GMD (Gearless Mill Drive)
- Compensadores estáticos SVC utilizados en subestaciones eléctricas.

La norma internacional de referencia que establece los límites permisibles de armónicos de corriente y voltaje es la IEEE-519.

### **1.5 Organización del informe:**

El siguiente trabajo explicara las técnicas modernas de eliminación de armónicos realizado en variadores de velocidad y cargas no lineales.

El trabajo describe las siguientes técnicas de mitigación y eliminación de armónicos:

- Mitigación de armónicos en variadores de 6 pulsos, 12 pulsos, 18 pulsos).
- Mitigación de armónicos a través de bobinas o reactancia en AC y DC en serie.
- Mitigación de armónicos por filtros pasivos
- Mitigación de armónicos por técnicas de modulación PWM en drives.

El informe explica y demuestra los criterios utilizados en cada una de las técnicas de mitigación de armónicos.

En el trabajo se presenta las bases teóricas del estudio de armónicas en el sistema de potencia, describiéndose el origen de los armónicos, efectos, principales fuentes de generación y el marco normativo establecido por IEEE-519.

En el capítulo II se describe las principales configuraciones de variadores de velocidad, se describe a los variadores con rectificadores multipulsos y a los variadores con rectificador PWM, posteriormente en el capítulo III se analizan las técnicas de eliminación de armónicos en cada configuración.

Se analiza otros dispositivos de eliminación de armónicos tales como filtros pasivos, reactancia en línea llamadas también choques, se presentan casos de uso de estos dispositivos en variadores de velocidad, cicloconvertidores y Sistemas de Compensación Reactiva (SVC), se analizan casos reales de eliminación de armónicos en variadores de velocidad marca Rockwell, adjuntándose fotografías tomadas en el lugar de trabajo, se analizan las restricciones de operación de los rectificadores de 06 pulsos.

En el capítulo IV se realiza el cálculo de parámetros de los filtros pasivos, estos cálculos son realizados en la plataforma del Matlab.

Se presentan las conclusiones establecidas por cada método de eliminación o mitigación de armónicos, también se presentan las recomendaciones generales.

El Anexo A: presenta el diagrama de proceso de molienda de la compañía minera Antamina, donde se identifican cargas no lineales importantes como son los molinos SAG.

## CAPITULO II MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

### 2.1 Antecedentes del problema

**2.1.1. Historia:** En la década de 1980 se empezaron a introducir los tiristores GTO (Tiristor bloqueable por puerta) y los tiristores IGBT (Tiristor bipolar de compuerta asilada) a los sistemas eléctricos de potencia, así el acelerado desarrollo de la electrónica de potencia incremento el uso de cargas no lineales y como consecuencia el incremento de los niveles de contaminación armónica en las redes eléctricas, a partir de esta condición se intensificaron los estudios y las técnicas de mitigación de armónicos.

Como se ha descrito el problema de las armónicas en los sistemas eléctricos no es nuevo, ya que siempre han existido, lo notable es la cantidad y la magnitud de armónicas que se han observado en los últimos años en los sistemas eléctricos [1].

La razón principal de la distorsión armónica es la presencia cada vez mayor de las llamadas cargas no lineales, es decir, aquellas cargas, como:

- Dispositivos de arranque suave en motores.
- Variadores de velocidad de motores eléctricos.
- Dispositivos de arco eléctricos
- Hornos de arco eléctrico.
- Transformadores de potencia sobrecargados.
- Sistemas de compensación Reactiva SVC
- Computadores
- Sistemas UPS
- Convertidores DC / AC.

**2.1.2. En El Perú:** Hoy en día (2014) el desarrollo de la minería en el Perú ha incrementado el uso de cargas no lineales, ver tabla N° 2.1, esta industria utiliza diferentes cargas no lineales para el procesamiento de minerales.

**TABLA N° 2.1.** Descripción de las principales aplicaciones de las cargas no lineales

<b>Carga No lineal</b>	<b>Aplicación</b>
Variador de velocidad	Movimiento de fajas transportadoras de más de 500m
	Accionamiento de bombas centrifugas y bombas de pulpa
	Accionamiento de motores de desplazamiento positivo utilizados para el bombeo en los mineroductos.
Cicloconvertidores	Accionamiento de motores síncronos para aplicaciones en los Molinos SAG ( Estos motores tienen una potencia promedio de 20000HP)
	Accionamiento de motores síncronos para aplicaciones en los Molinos de bolas (Estos motores tienen una potencia promedio de 15000HP).
SVC	Utilizadas en las subestaciones eléctricas para garantizar la estabilidad de tensión en las líneas de transmisión.

Todas estas cargas importantes descritas en la tabla N° 2.1 se encuentran instaladas en el sistema interconectado nacional, a estas cargas se le suma el amplio uso de circuitos electrónicos, computadoras, y otras cargas no lineales ; El incremento de estas cargas genera la necesidad de mejorar la calidad de energía en el sistema eléctrico.

## **2.2 Bases teóricas**

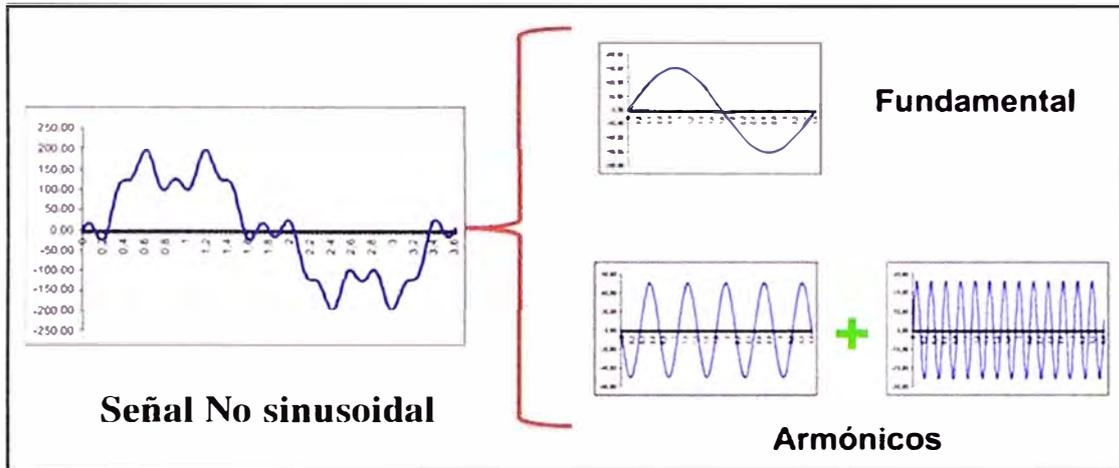
### **2.2.1 Armónicos**

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

El matemático francés Jean Baptiste Fourier determino que toda forma de onda periódica no-sinusoidal puede ser representada como la suma infinita de ondas senoidales cuyas frecuencias son enteros múltiplos de la frecuencia fundamental. Ver figura 2.1

Utilizando esta teoría tenemos:

$$\text{Señal NO senoidal} = \text{componente fundamental} + \text{armónicos}$$



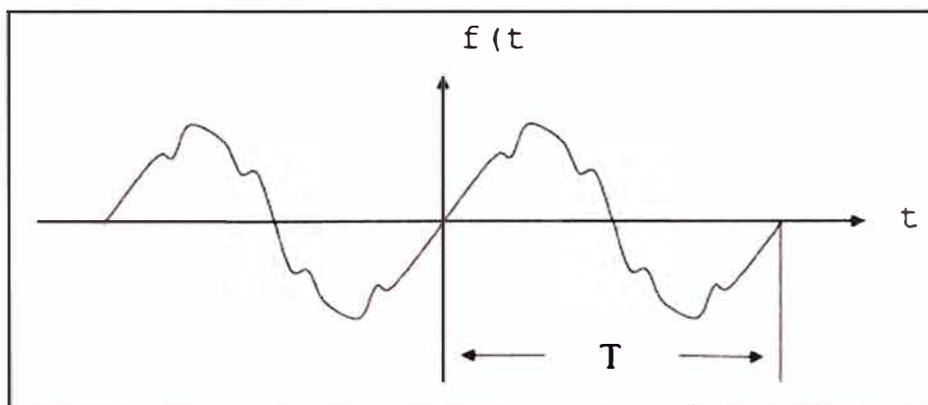
**Fig.2.1.** Descomposición de la onda periódica en su componente fundamental y sus componentes armónicas

### 2.2.2 Series de Fourier

El estudio de las series de Fourier es aplicable a las señales eléctricas siempre y cuando estas funciones sean funciones periódicas. Una función periódica se puede definir como:

$$f(t) = f(T + t) \quad (2.1)$$

Donde T se llama periodo de la función, la figura 2.2 muestra un ejemplo de función periódica.



**Fig.2.2.** Función Periódica con periodo T

La siguiente función periódica  $f(t)$  corresponde a una señal eléctrica senoidal con sus correspondientes armónicos.

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nw_0 t) + b_n \sen(nw_0 t)) \quad (2.2)$$

Donde los coeficientes son:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (2.3)$$

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

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.5)$$

Donde:  $\omega_0 = \text{frecuencia angular expresada en } \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

A continuación se muestra la obtención de la serie de Fourier de una señal periódica cuadrada ver figura 2.3. También se obtendrá el respectivo espectro de frecuencias, ver figura 2.4

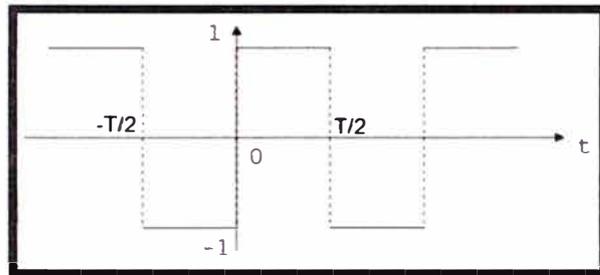


Fig.2.3. Señal de Onda cuadrada

Esta señal está definida por:

$$f(t) = \begin{cases} -1, & -T/2 < t < 0 \\ +1, & 0 < t < T/2 \end{cases}$$

Entonces calculando los coeficientes tenemos:

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=\text{impar}}^{\infty} \frac{1}{n} \text{senn}\omega_0 t = f(t) = \frac{4}{\pi} \left( \text{sen}\omega_0 t + \frac{1}{3} \text{sen}3\omega_0 t + \frac{1}{5} \text{sen}5\omega_0 t + \frac{1}{7} \text{sen}7\omega_0 t \dots \right)$$



Fig.2.4. Espectro de frecuencias de la señal de onda cuadrada

### 2.2.3 Distorsión Armónica

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental, es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales de corriente y voltaje ( I y V ). Tenemos:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.6)$$

La distorsión armónica total es la relación entre las corrientes armónicas y la demanda máxima de la corriente de carga.

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} M_h^2}}{M_L} \times 100\% \quad (2.7)$$

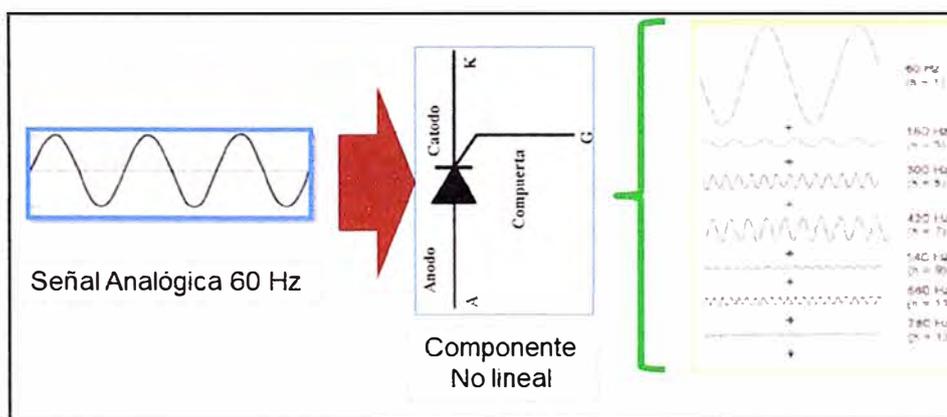
Las mediciones generalmente son usadas para estimar el contenido armónico en las formas de ondas, donde:

$M_h$  : Es el valor rms de la componente armónica h de la cantidad M que representa un voltaje o una corriente.

Para evaluar adecuadamente las condiciones de inyección de armónicos se define el TDD como parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE – 519.

### 2.2.4 Cómo se producen los armónicos

La distorsión armónica es causada principalmente por cargas no lineales, ver figura 2.5 un dispositivo no lineal también es conocido como una fuente armónica,



**Fig.2.5.** Descripción del origen de los armónicos

Los voltajes armónicos son el resultado de la presencia de una corriente armónica en la carga, ya que las impedancias de las líneas del sistema de potencia se pueden considerar

lineal, el flujo de corriente armónica a través de la red de impedancia causa la distorsión armónica de voltaje en la carga.

### 2.2.5 Efectos de los Armónicos

#### - Resonancia Paralelo

La resonancia paralela es probablemente una de las causas más importantes de los problemas armónicos. Los bancos de condensadores utilizados para corregir el factor de potencia se presentan en paralelo con la impedancia de corto-circuito del operador.

#### - Efectos sobre las Maquinas Rotativas

Un mayor efecto de los voltajes y corrientes armónicas en las máquinas rotativas (motores de inducción y motores síncronos) incrementa el calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro a frecuencias armónicas.

Los componentes armónicos de este modo afectan la eficiencia de la máquina, y pueden entonces afectar el par desarrollado por el motor.

#### - Efectos sobre las líneas y cables conductores

Cuando circula corriente directa a través de un conductor o cable se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule  $I^2R$ . Dónde:

R : es la resistencia a corriente directa del cable

I : Es la corriente dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor.

A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable (manteniendo su valor rms igual al valor de corriente directa) disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior (figura 2.6), lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor, este fenómeno se le conoce como efecto piel.



**Fig.2.6.** Densidades de corriente en un mismo conductor, (a) a corriente directa y (b) a corriente de alta frecuencia

### - Efecto sobre los Transformadores

En el caso de transformadores, las pérdidas en el circuito magnético, denominadas también pérdidas en vacío, se deben al flujo magnético en el núcleo, que es en condiciones normales de tipo senoidal, cuando la excitación al transformador se hace con ondas distorsionadas que contienen 3ras armónicas o múltiplos de estas, 9ª, 12ª, 15ª, etc. entonces las pérdidas de vacío aumentan y se tiene un mayor calentamiento en el transformador. Con el constante aumento de cargas no lineales, se han llevado a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que suministran energía a cargas no lineales para lograr garantizar la confiabilidad del transformador. El factor  $k$  se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. La ecuación se define como:

$$factor\ k = \sum_{h=1}^{h=hmax} [I_{hpu}]^2 h^2 \quad (2.8)$$

Además, en el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor  $K$  mayor a 1. Con el valor del factor  $K$  de la corriente de la carga, se puede escoger el transformador adecuado. La tabla N° 2.2 muestra los valores comerciales de transformadores con factor  $K$ .

**TABLA N° 2.2.** Los Transformadores con factor  $K$  disponibles comercialmente

<b>K - 4</b>	<b>K-13</b>	<b>K - 30</b>
<b>K - 9</b>	<b>K - 20</b>	<b>K - 40</b>

### - Efectos sobre los sistemas de protección

Los armónicos son causantes de numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos está la operación incorrecta de fusibles, de interruptores (breakers) y sistemas digitales de protección.

Para el caso de equipos protegidos contra sobrevoltajes cuyos sistemas de protección también estén diseñados para operar con voltajes senoidales, estos consiguen operar incorrectamente ante la aparición de formas de onda no sinusoidales.

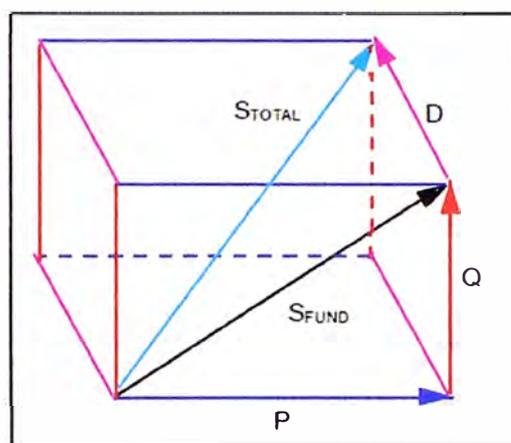
### - Efectos sobre la Potencia y el factor de Potencia

Existen tres cantidades estándares asociadas con la potencia eléctrica, la potencia aparente ( $S$ ), la potencia activa ( $P$ ), y la potencia reactiva ( $Q$ ). No existe desacuerdo sobre cómo

definir la potencia activa ( $P$ ) en el caso general o en el caso especial de señales periódicas sinusoidales y no sinusoidales. El triángulo de potencia, generalmente satisface con esta definición.

Para calcular el factor de potencia en plantas industriales con cargas no lineales es necesario definir una nueva cantidad  $D$ , para determinar la relación entre la potencia aparente, la potencia activa y la potencia reactiva (Ver figura 2.7). Donde  $D$  representa todos los productos cruzados de voltaje y corrientes a frecuencias diferentes.  $P$ ,  $Q$ ,  $D$  y  $S$  se relacionan así:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.9)$$



**Fig.2.7.** Triángulo de potencia que incluye el factor de los armónicos

$P$  y  $Q$  contribuyen a  $S$  las componentes sinusoidales tradicionales, mientras que  $D$  representa la contribución adicional a la potencia aparente debida a los armónicos.

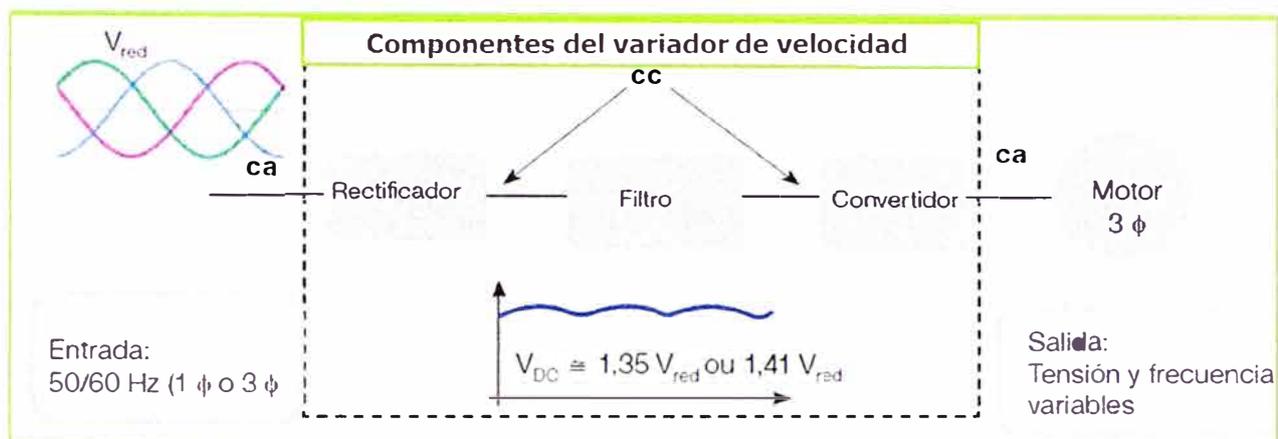
### 2.2.6 Fuentes armónicas

Las cargas no lineales emisoras de corriente armónicas son instaladas cada vez en mayores proporciones en los nuevos montajes eléctricos, dentro de este tipo de cargas se pueden enunciar los siguientes grupos.

#### - Variadores de velocidad

Un variador de velocidad es un convertidor de energía cuya misión es controlar la energía que se proporciona al motor. Estos equipos aseguran una aceleración y deceleración progresivas y permiten fijar con precisión la velocidad en las condiciones de operación

La figura 2.8 ilustra el concepto básico; donde la entrada de la señal entregada en Alterna AC es convertida en una señal DC mediante un proceso de rectificación y filtrada, luego la señal DC se somete a un proceso de inversión ajustables en magnitud y frecuencia,



**Fig.2.8.** Principio de funcionamiento de los variadores de velocidad

La utilización de variadores de velocidad actualmente comprende el método más eficiente para controlar la velocidad de los motores de inducción.

Los convertidores de frecuencia variable que actúan como interfaz entre los sistemas de suministro de energía y el motor de inducción deben satisfacer lo siguiente:

- La capacidad de ajustar la frecuencia de acuerdo a la velocidad deseada.
- La capacidad de ajustar la tensión de salida de modo que se mantenga un flujo constante del entrehierro en la región del par de torsión constante.

Los variadores transforman la tensión de la red, de amplitud y frecuencia constantes, en una tensión de amplitud y frecuencia variables.

Los componentes principales de un variador de velocidad son:

**Rectificador:** Partiendo de la red de suministro de CA trifásica, se obtiene C.C. mediante tiristores o transistores del rectificador.

**Bus de continua:** Condensadores de gran capacidad (y a veces también bobinas), almacenan y filtran la c.c. rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable, y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.

**Etapas de inversión:** Desde la tensión del bus de continua, un inversor convierte esta energía en una salida trifásica, con valores de tensión, intensidad y frecuencia variable, generalmente en esta etapa se requiere un componente electrónico de menor tiempo de conmutación, para garantizar altas velocidades de conmutación y sintetizar de mejor manera una onda senoidal con menor contenido de armónicos de bajo orden.

Los variadores de velocidad se clasifican según la configuración del rectificador e inversor, tal como se muestra en la tabla N° 2.3

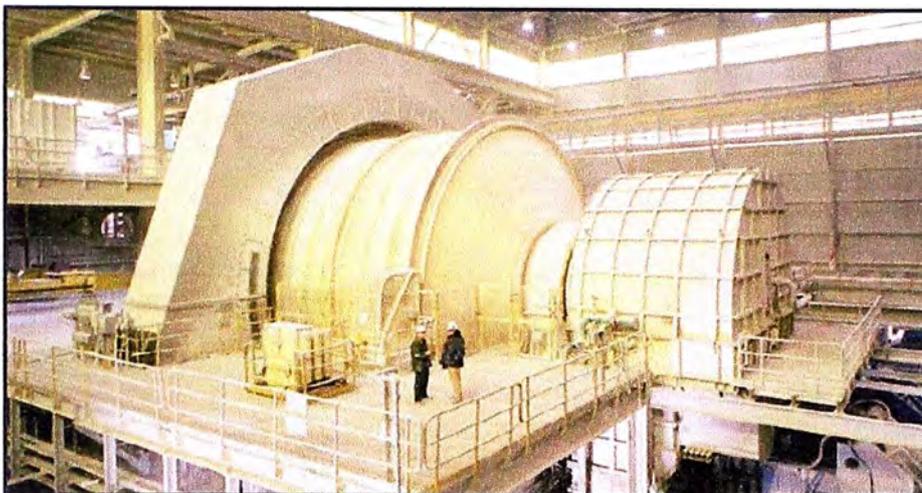
**TABLA N° 2.3.** Clasificación de variadores de velocidad según su configuración

Configuración del Variador	Según Tipo Rectificador	Por Pulsos (Utilizan Transformadores)	6 Pulsos	Conexión del transformador $\Delta$ - Y ó $\Delta$ - $\Delta$
			12 Pulsos	Conexión del transformador $\Delta$ - $\Delta$ Y
			18 Pulsos	Conexión del transformador $\Delta$ - $\Delta$ $\Delta$
		AFE (front end activo) o conocido también como Rectificador PWM		El rectificador activo necesita de un patrón de conmutación .El patrón empleado se emplea para la eliminación selectiva de armónicos (SHE), el cual elimina los armónicos 5, 7 y 11
	Según Tipo Inversor	Tipo VSI	Inversores con fuente de voltaje - Inicialmente se utilizaba para aplicaciones de BT	
	Tipo CSI	Inversores con fuente de corriente Inicialmente tuvo aplicaciones en MT		

- **Dispositivos electromagnéticos saturados:** Los dispositivos saturados incluyen transformadores y otros dispositivos electromagnéticos como los motores. Los armónicos son generados debido a las características no lineales de la magnetización del material constructivo.

- **Cicloconvertidores:** Cicloconvertidor se le designa a convertidores que transforman en forma directa señales AC de frecuencia fija a señales AC de frecuencia. Esta conversión estática de frecuencia es obtenida por las ondas de voltaje principal de entrada pero a una frecuencia mucho menor.

La principal aplicación industrial de los cicloconvertidores es alimentar al sistema GMD- Gearless Motor Drive (Motor sin engranajes también conocido como motor "wrap around" o "motor anillo"). Los polos del motor son montados directamente en la brida de la carcasa del molino, lo que significa que la carcasa se convierte en el rotor, el estator del motor está instalado alrededor del cuerpo del molino. Ver figura 2.9

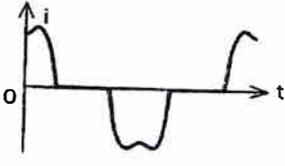
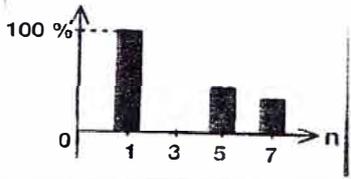
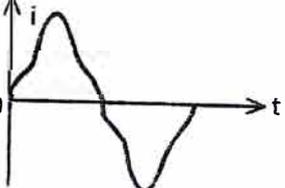
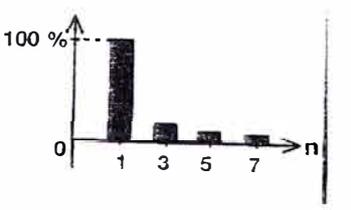


**Fig.2.9.** Los GMDs y sus aplicaciones como el Molino SAG – Imagen brindada por la Compañía minera Cerro Verde – Arequipa.

En resumen existen diversas cargas no lineales, cada una de estas cargas no lineales mencionadas cuenta con la presencia de armónicos de diferentes órdenes [1], tal como se muestra en la tabla N° 2.4

**TABLA N° 2.4.** Principales tipos de carga y formas de las corrientes absorbidas

Tipo de carga	Aparatos relacionados	Corriente absorbida	Espectro armónico
Receptor o resistivo	Hornos industriales con resistencias regulados por trenes de ondas. Lámparas incandescentes Calentadores		
Alumbrado	Tubo de Fluorescentes Lámpara de vapor de H.P		
Rectificadores trifásico con diodos y filtros	Variación de velocidad de los motores de inducción		

Rectificador Trifásico por tiristores	Variación de velocidades de motores CD, y de motores síncronos Cicloconvertidores SVC		
Motores de Inducción	Máquinas y herramientas Elevadores (Ascensores)		

### 2.2.7 Marco Regulatorio

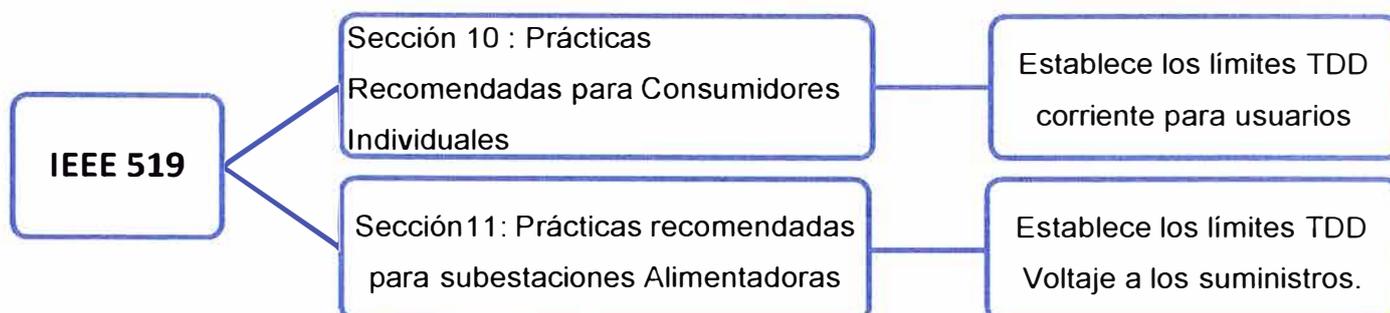
**IEEE-519 “Prácticas Recomendadas y Requerimientos para control de armónicas en sistemas de potencia”.**

Este documento establece los niveles de distorsión de voltaje aceptables en sistemas de distribución, ver tabla N° 2.5, al mismo tiempo que los límites en la distorsión armónica de corriente que los usuarios pueden “inyectar” al sistema [2].

**TABLA N° 2.5.** Contenido de los capítulos de la Norma IEEE-519

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (IEEE - Std 519-1992)	
1. Introducción , Alcance y Aplicación	8. Métodos de Análisis
2. Referencia	9. Mediciones
3. Definiciones y Símbolos de Letras	10. Practicas Recomendadas para consumidores individuales
4. Generación de Armónicos	11. Practicas Recomendadas para Subestaciones Alimentadoras.
5. Características de respuesta del sistema	12. Metodología para Evaluar Nuevas Fuentes Armónicas.
6.Efectos de los armónicos	13. Ejemplos de Aplicaciones
7. Compensación de Potencia Reactiva y Control de Armónicos.	14. Bibliografía

De las 14 secciones de IEEE519 existen 02 secciones que establecen los límites permisibles de inyección de armónicos de corriente y voltaje:



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 existente entre ellos.

La norma IEEE519 establece que los límites de distorsión que los armónicos pueden producir, se miden en la frontera de la empresa suministradora de energía y el usuario (point of common coupling - PCC). Ver figura 2.10

La tabla N° 2.6, establece los límites permisibles de distorsion de corriente establecidos en el estándar de la IEEE-519

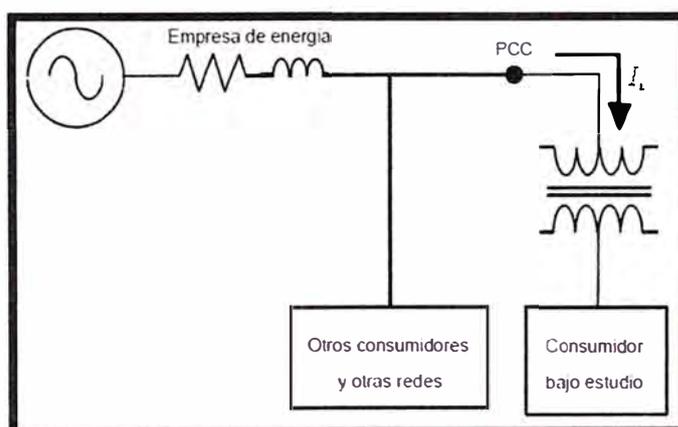


Fig.2.10. Estándar IEEE-519, Elección del punto de acople común (PCC) en lado de alta tensión del transformador.

**TABLA N° 2.6.** Practicas recomendadas para consumidores Individuales (IEEE 519)

<b>Límites de Distorsión de Corrientes para sistemas de distribución en general</b>						
<b>Desde 120V hasta 69000V</b>						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en porcentaje $I_L$						
Orden armónico Individual (Armónicos Impares)						
$I_{SC} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	<i>TDD</i>
< 20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	8.0
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

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:  
 $I_{SC}$  : Máxima corriente de cortocircuito en el PCC.  
 $I_L$  : Máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

En la tabla N°2.7 se establecen los límites permisibles de distorsión de voltaje establecidos por el estándar de IEEE-519.

**TABLA N° 2.7.** Practicas recomendadas para Subestaciones Alimentadoras (IEEE-519)

<b>Límites de Distorsión de Voltaje</b>		
Voltaje de Barra en el PCC	Distorsión de Voltaje individual (%)	Distorsión de Voltaje Total THD (%)
69kV y por debajo	3.0	5.0
69.001V a 161KV	1.5	2.5
161.001 y por encima	1.0	1.5

Generalidades: Está sección describe los límites de distorsión de tensión que son aplicados a las empresas suministradoras de energía.

Límites de Distorsión de Voltaje:

Los límites de distorsión de voltaje recomendados son los mostrados:

Donde: THD: Distorsión armónica de voltaje total en porcentaje del voltaje de frecuencia fundamental nominal.

Los límites de distorsión de voltaje 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).

### 2.2.8. Armónicos y componentes simétricas

El método de los componentes simétricos de Fortescue permite separar una red no simétrica (lo sea por las corrientes, las tensiones o las cargas) en tres redes simétricas y por tanto equivalente a un sistema monofásico [3].

Las tres redes de componentes simétricas se llaman:

- Componente de secuencia positiva o componente de secuencia directa.
- Componente de secuencia negativa o componente de secuencia inversa.
- Componente de secuencia cero o componente de secuencia homopolar.

A continuación presentaremos el modelo de componentes simétricas para lograr describir el efecto de cada armónico vinculándolo con un componente simétrico específico.

Presentamos la tabla N° 2.8 donde se asocia a cada armónico con una específica componente simétrica.

**TABLA N° 2.8.** Comparación de los armónicos con las componentes simétricas

Las armónicas múltiplos de tres son similares a la secuencia cero.	<i>Armonica (<math>\dot{3}</math>) = secuencia cero</i>
Las armónicas múltiplos de tres más uno tienen son similares a la secuencia positiva.	<i>Armonica (<math>\dot{3} + 1</math>) = secuencia positiva</i>
Las armónicas múltiplos de tres más dos son similares a la secuencia negativa	<i>Armonica (<math>\dot{3} + 2</math>) = secuencia positiva</i>

Estas equivalencias son obtenidas a través de una demostración matemática.

- Las terceras armónicas y los múltiplos de tres se comportan de una manera similar a las componentes de secuencia cero. Esto se aprecia en la siguiente ecuación:

$$ia_3 = I_3 \sin(3wt)$$

$$ib_3 = I_3 \sin(3wt - 3.120^\circ) = I_3 \sin(3wt - 360^\circ) = I_3 \sin(3wt)$$

$$ic_3 = I_3 \sin(3wt - 3.240^\circ) = I_3 \sin(3wt - 720^\circ) = I_3 \sin(3wt)$$

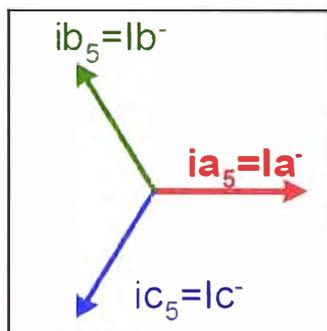
$$\therefore ia_3 = ib_3 = ic_3 = i_0$$

- Las quinta armónica y en general las armónicas múltiplos de 3 menos 1 se comportan como componente de secuencia negativa: Esta consideración se aprecian en las siguientes ecuaciones y en la figura 2.11 :

$$ia_5 = I_5 \sin(5wt)$$

$$ib_5 = I_5 \sin(5wt - 5 \cdot 120^\circ) = I_5 \sin(5wt - 600^\circ) = I_5 \sin(5wt + 120^\circ)$$

$$ic_5 = I_5 \sin(5wt - 5 \cdot 240^\circ) = I_5 \sin(5wt - 1200^\circ) = I_5 \sin(5wt - 120^\circ)$$



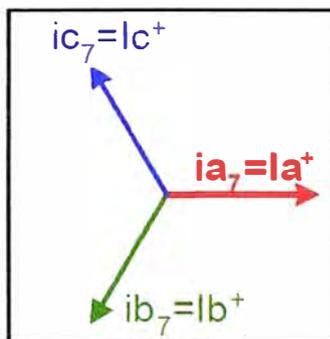
**Fig.2.11.** La 5ª armónica y su comportamiento como secuencia negativa

- Las séptima armónica y en general las armónicas múltiplos de 3 más 1 tienen un comportamiento similar a las componentes de secuencia positiva. Esto se aprecia en las siguientes ecuaciones y en la figura 2.12

$$ia_7 = I_7 \sin(7wt)$$

$$ib_7 = I_7 \sin(7wt - 7 \cdot 120^\circ) = I_7 \sin(7wt - 840^\circ) = I_7 \sin(7wt - 120^\circ)$$

$$ic_7 = I_7 \sin(7wt - 7 \cdot 240^\circ) = I_7 \sin(7wt - 1680^\circ) = I_7 \sin(7wt + 120^\circ)$$



**Fig.2.12.** La 7ª armónica y su comportamiento como secuencia positiva

Cabe señalar que la comparación efectuada para las armónicas 5ª y 7ª armónica se puede efectuar para las armónicas de orden 11 y 13 para encontrar que las de orden 11 se comportan como componentes de secuencia negativa y las de orden 13 se comportan como

componentes de secuencia positiva. A través de la demostración realizada se logra resumir la tabla N° 2.9

**TABLA N° 2.9.** Resumen de la secuencia de los armónicos.

	Secuencia Cero	Secuencia positiva	Secuencia Negativa
COMPARACIÓN DE ARMÓNICAS CON COMPONENTES DE SECUENCIA SIMETRICA	3°	4°	5°
	6°	7°	8°
	9°	10°	11°
	12°	13°	14°
	15°	16°	17°

Las características de secuencia armónica es importante para analizar sus efectos:

- En sistemas trifásicos, los armónicos de orden  $3n$  de corriente solo pueden propagarse cuando es posible un retorno por el neutro, debido a su característica similar a la componente de secuencia cero
- Los armónicos de orden  $(3n+1)$  en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental, esta característica se debe a su comportamiento similar a la componente de secuencia positiva.
- Los armónicos de orden  $(3n-1)$  en tensión generan en los motores un campo giratorio en sentido contrario al generado por la componente fundamental, estas componentes producirán antipares – par opuesto al nominal - en los motores, esta característica se debe a su comportamiento similar a la componente de secuencia negativa.

### 2.3 Definición de Términos:

- **Armónico:** Una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental.

NOTA: Por ejemplo, en una componente, cuando la frecuencia es el doble de la fundamental es llamada segundo armónico.

- **Armónico característico:** Aquellos armónicos producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. En un convertidor de seis pulsos, los armónicos característicos son los armónicos impares diferentes a los múltiplos de tres, por ejemplo, los 5th, 7th, 11th, 13th, etc. Se cumple

$$h = kq \pm 1 \quad (2.10)$$

k: Algún número entero, q: número de pulso del convertidor.

- **Convertidor:** Un dispositivo que cambia la energía eléctrica de una forma a otra. Un convertidor semiconductor es un convertidor que usa semiconductores como elementos activos en el proceso de conversión.
- **Distorsión Demanda Total (TDD):** La suma de la raíz cuadrada total de las distorsiones de corriente armónica en porcentaje de la máxima corriente de carga demandada (15 o 30 demanda min).
- **Factor de Calidad:** Dos veces n la relación de la máxima energía guardada a la energía disipada por ciclo a una determinada frecuencia. Una definición equivalente aproximada es que el factor de calidad es:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.11)$$

- **Filtro:** Un término genérico usado para definir aquellos tipos de equipos cuyo propósito es reducir el flujo de corriente ó voltaje armónico en ó aplicado a las partes específicas de un sistemas de potencia eléctrica, o en ambos.
- **Filtro Sintonizado:** Un filtro que generalmente consiste de combinaciones de condensadores, inductores, y resistores que se han seleccionado de tal manera que presenten una impedancia mínima (máxima) relativa a una o más frecuencias específicas. Para un filtro paralelo (serie), la impedancia es un mínimo (máximo).
- **Filtro Amortiguado:** Un filtro que generalmente consiste de combinaciones de condensadores, inductores, y resistores que han sido seleccionados de tal manera que se presente una impedancia baja en un ancho rango de frecuencias. El filtro usualmente tiene una relatividad baja Q (X/R).
- **Filtro Paralelo:** Un tipo de filtro que reduce los armónicos proporcionando un camino de baja impedancia para desviar los armónicos lejos de la fuente.
- **Filtro Pasa Alto:** Un filtro que tiene una banda de transmisión sencilla extendida desde alguna frecuencia de corte, diferente de cero, hasta la frecuencia infinita.
- **Filtro en Serie:** Un tipo de filtro que reduce los armónicos colocando una impedancia alta en serie entre la fuente armónica y el sistema a ser protegido.
- **Número de Pulsos:** El número total de conmutaciones no simultáneas sucesivas ocurridas dentro del circuito convertidor durante cada ciclo cuando se opera sin el control de fase. También es igual al orden del armónico principal en la tensión directa, que es, el número de pulsos presentes en la salida de tensión DC en un ciclo de la tensión de suministro.

**CAPITULO III  
METODOLOGIA PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA**

**3.1 Alternativas de solución:**

Para mitigar los armónicos en los sistemas de transmisión, sistemas de distribución y sistemas de utilización (industrial y comercial) es necesario utilizar técnicas de mitigación de armónicos , ver tabla N° 3.1, que permitan alcanzar un nivel de calidad de energía en las barras principales (fuentes) aceptables. Actualmente, en la industria se utilizan las siguientes alternativas para disminuir las corrientes armónicas inyectadas por variadores de velocidad y cargas no lineales:

**TABLA N° 3.1:** Descripción de las técnicas de eliminación de armónicos

<b>Técnica de Mitigación de Armónicos</b>	<b>Descripción de la técnica de eliminación</b>
<p>1. Mitigación de armónicos a través del diagrama de conexión del transformador- utilizando rectificadores multipulsos :</p> <p>Rectificador de 06 pulsos.            Rectificador de 12 pulsos.            Rectificador de 18 pulsos.            Rectificador de 24 pulsos.</p>	<p>Se actúa por cancelación armónica al interactuar dos o más rectificadores de seis pulsos, la cancelación de los armónicos se logra a través del diagrama de conexión de los transformadores. Cada transformador utiliza la configuración Delta – estrella o Delta – delta, o Zigzag, esto depende del número de pulsos del rectificador. Con esta técnica logra eliminar por cancelación, armónicos menores de orden impar como 3, 5,7, 11, 13, 17,19...</p>
<p>2.Mitigación de armónicos utilizando :</p> <p>Bobinas de corriente alterna CA.            Bobinas de corriente continua</p>	<p>Estos dispositivos son conocidos como choke o reactancias en líneas AC o DC, se utilizan principalmente en drives del tipo PWM.</p>

3. Mitigación de armónicos por Filtros Pasivos	A través de ramas R, L, C, resonantes y se desvían las corrientes armónicas evitando la circulación por el sistema eléctrico, utiliza reactancias en Línea y Capacitores en Paralelo, estos circuitos son sintonizados para la eliminación específica de un armónico.
4. Mitigación de armónicos por técnicas de modulación PWM en drives.	Se reconoce que la existencia de corrientes armónicas en la rectificación CA/CC, es debido al uso de diodos o tiristores de muy baja frecuencia de conmutación (conmutan una vez por período a frecuencia fundamental). Luego, la reducción armónica se realiza utilizando llaves semiconductoras de alta frecuencia de conmutación, a través de estos se utiliza un patrón de eliminación selectiva de armónicos SHE. Para esta técnica se utilizan los SGCT, IGBT y se logran eliminar las armónicas menores como 5°, 7°, 11°...
5. Mitigación de armónicos por Filtros Activos	Utiliza sistemas de filtros avanzados que permiten eliminar armónicos de diferentes ordenes

Se presentaran los conceptos teóricos, las demostraciones matemáticas y simulaciones que permitan validar cada una de las técnicas de mitigación de armónicos indicadas:

### 3.1.1 Uso de rectificadores multipulsos

El uso de rectificadores multipulsos es una de las alternativas más empleadas para la disminución de las corrientes armónicas, Los rectificadores multipulsos pueden ser configurados en un número de pulsos múltiplos de seis: 6 pulsos – 12 pulsos – 18 pulsos – 24 pulsos – 30 pulsos. (Ver figura 3.1). La incorporación del transformador de aislamiento sirve para mitigar los armónicos originados por las cargas no lineales a las cuales alimentan.

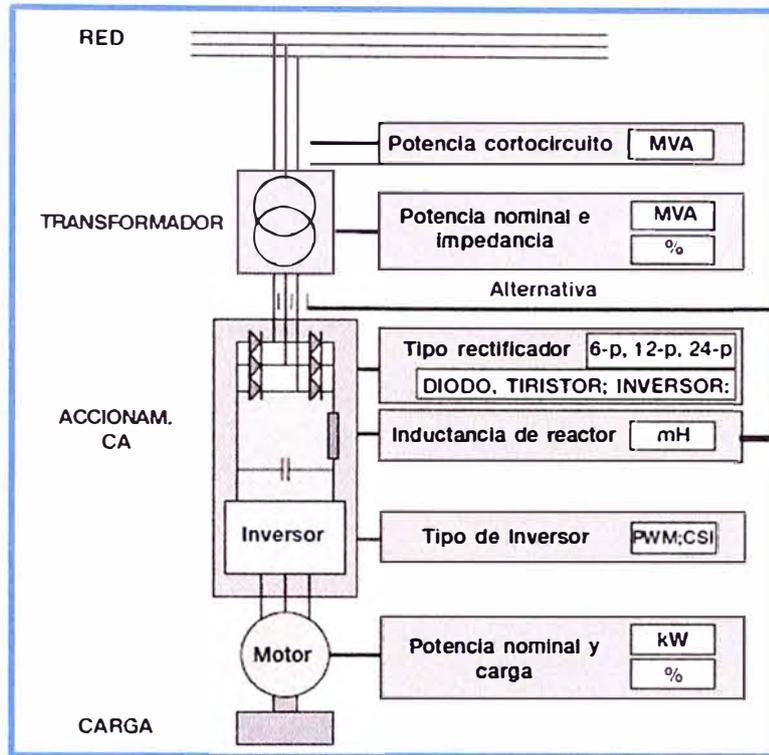


Fig.3.1. Configuración de diferentes tipos de rectificadores

Si se asume que los transformadores tienen una relación de vueltas igual a "n", entonces existen 30° de desfase entre las corrientes de línea de primario y secundario, tal como se muestra en la figura 3.2 (b) y (c), este desfase depende de la secuencia de las corrientes. En el caso de secuencia negativa es en sentido antihorario.

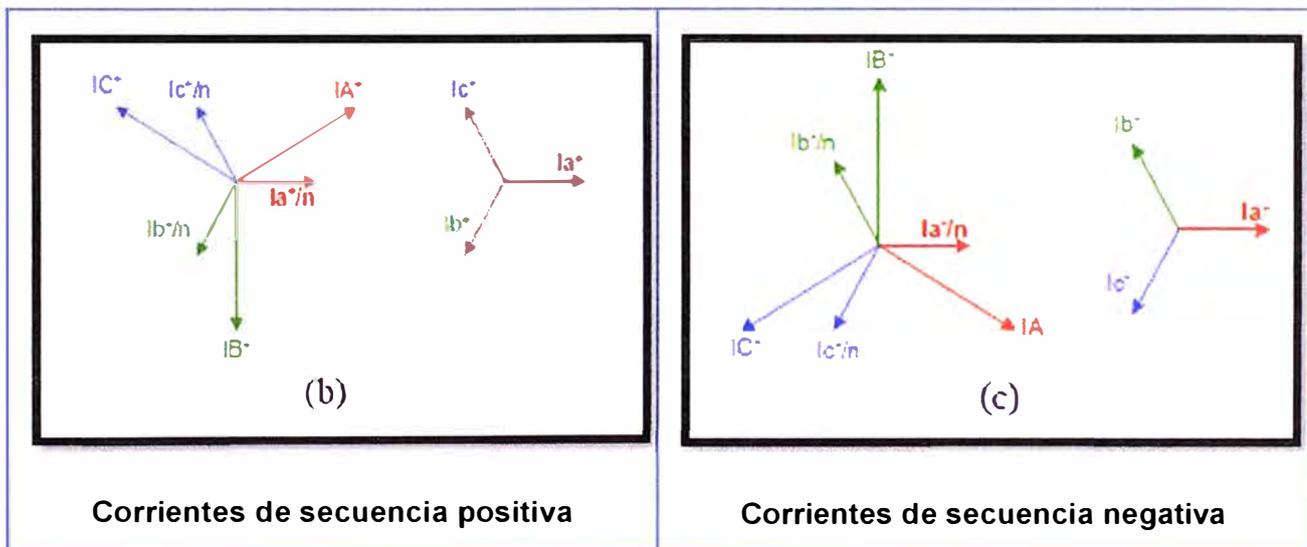


Fig.3.2. Desfasaje en el lado primario de un transformado de conexión D-Y

Para analizar la eliminación de armónicos en rectificadores de 6 pulsos utilizaremos el circuito de potencia del rectificador puente trifásico totalmente controlado, el que emplea 6 tiristores. Este convertidor es conocido también bajo el nombre de rectificador de 6 pulsos, porque el voltaje que genera en la carga contiene 6 pulsos en un período de la tensión de la red. Esta descripción se muestra en la figura 3.3.

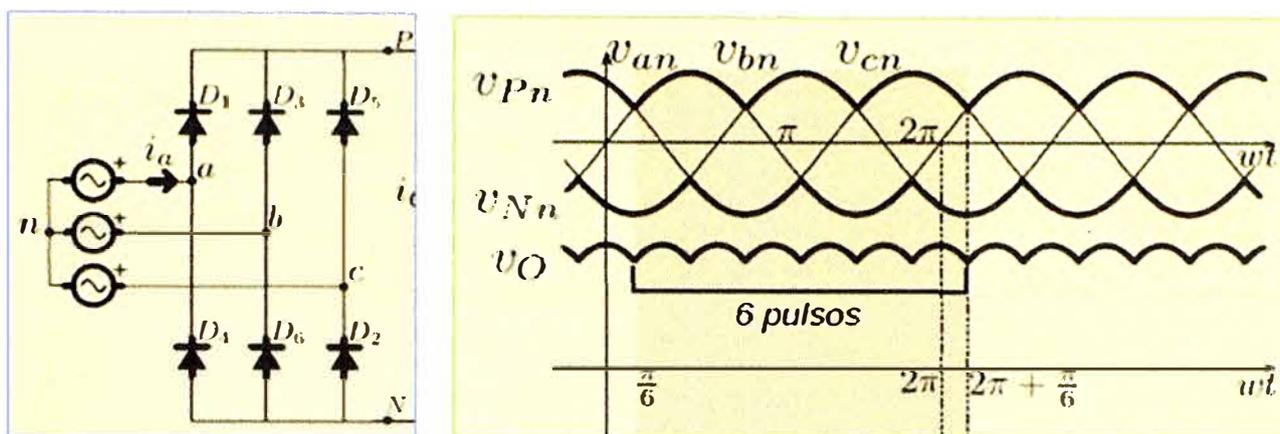


Fig.3.3. Descripción del rectificador de 6 pulsos

El transformador en conexión delta-estrella mostrada en la figura 3.4 tiene un rectificador puente trifásico alimentado por un transformador con conexión estrella en el secundario y conexión triángulo en el primario

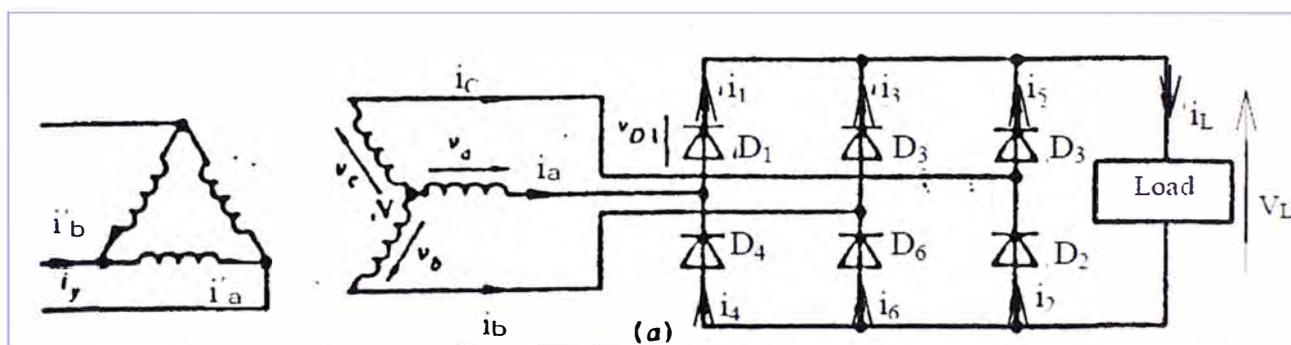


Fig.3.4. Transformador de aislamiento utilizado en un rectificador de 6 pulsos

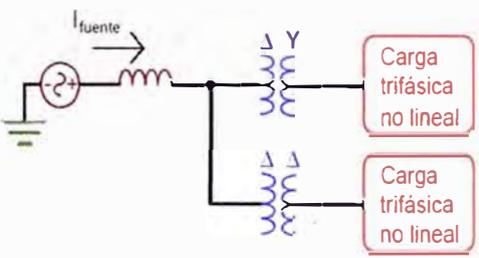
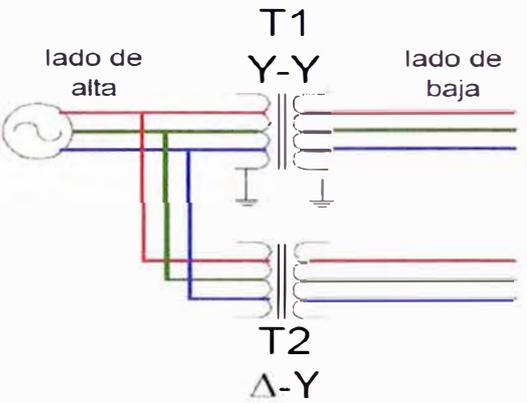
Utilizando las series de Fourier, las armónicas presentes en las corrientes de entrada (corrientes de la red) de un rectificador trifásico puente es expresada en la ecuación (3.1), este rectificador cuenta con un transformador en conexión delta-estrella (o estrella - delta):

$$i_a(t) = Id \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \dots \right] \quad (3.1)$$

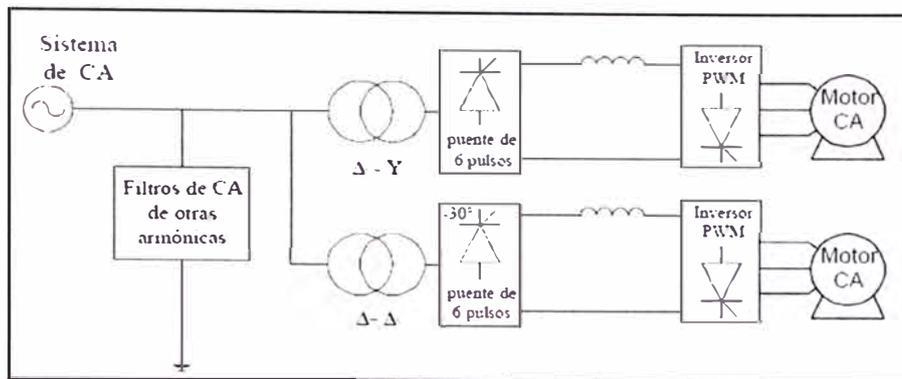
Al analizar la corriente en el primario de un transformador que alimenta a un rectificador de 6 pulsos, se puede observar la presencia de 5ª armónica (5 $\omega t$ ), 7ª armónica (7 $\omega t$ ), etc.

A continuación la figura 3.5 describe las consideraciones para mitigar estos armónicos.

**Fig.3.5.** Resumen de los criterios de eliminación armónicos de la 5° y 7° Armónica

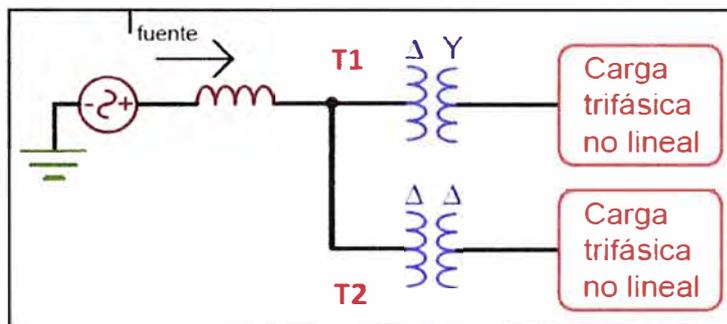
Eliminación de armónicos	Criterio Utilizado	Esquema
<p>Quinta Armónica y 17° Armónica</p>	<p>Es necesario utilizar dos transformadores en paralelo con cargas no lineales similares. Las conexiones de los Transformadores en paralelo pueden ser:</p> <p><math>\Delta</math>-<math>\Delta</math> con <math>\Delta</math>-Y  Y-Y con <math>\Delta</math>-Y  Y-Y con Y-<math>\Delta</math></p>	
<p>Séptima Armónica y 19° Armónica</p>	<p>Es necesario utilizar dos transformadores en paralelo con cargas no lineales similares. Las conexiones de los Transformadores en paralelo pueden ser:</p> <p><math>\Delta</math>-<math>\Delta</math> con <math>\Delta</math>-Y  Y-Y con <math>\Delta</math>-Y  Y-Y con Y-<math>\Delta</math></p>	

La configuración para lograr mitigar la inyección de armónicos hacia la fuente, se muestra en la figura 3.6, en esta se verifica que el uso de 02 rectificadores de 06 pulsos, este sistema de 02 rectificadores de 06 pulsos en paralelo con transformadores de aislamiento con conexión delta – estrella y delta-delta funciona como un sistema equivalente a un rectificador de 12 pulsos, siempre en cuando las cargas no lineales alimentadas tengan el mismo espectro de frecuencias [4].



**Fig.3.6.** Dos Variadores de velocidad de 06 pulsos ubicados en paralelo

Eliminación de la quinta armónica ,se sabe que la quinta armónica se comportan como una componente de secuencia negativa, de esta manera tenemos un transformador T1 en conexión Δ-Y, un transformador T2 en conexión Δ-Δ, cuyos primarios están en paralelo. Los secundarios alimentan a cargas no lineales iguales. Asíumase que sólo existe distorsión de corrientes y que sólo existen armónicas impares, además de la componente fundamental (Ver figura 3.7)



**Fig.3.7.** Dos transformadores cuyos primarios están en paralelos con conexión DY – DD

Si las magnitudes de las corrientes en los primarios de T1 y T2 son iguales, entonces la suma de corrientes de los transformadores en el primario se cancelan, (Ver tabla N° 3.2) debido a que tienen el mismo valor en magnitud pero con sentido opuestos.

$$\begin{aligned}
 I_{A-T2} \angle \alpha &+ I_{A-T1} \angle \alpha + 180^\circ = 0 \\
 I_{B-T2} \angle \beta &+ I_{B-T1} \angle \beta + 180^\circ = 0 \\
 I_{C-T2} \angle \gamma &+ I_{C-T1} \angle \gamma + 180^\circ = 0
 \end{aligned}$$

**TABLA N° 3.2.** Análisis del desfasaje en el primario y secundario del transformador

Conexión del transformador	Desfasaje en el secundario en la fundamental	Desfasaje en el secundario para 5° armónico	Desfasaje en el primario
$\Delta - \Delta$	0°	0°	0°
$\Delta - Y$	-30°	-150°	-180°

De esta manera la quinta armónica se cancela y no fluye a la fuente o barra de alimentación principal. La tabla N° 3.3 es obtenida al generalizar la técnica de desplazamiento de fases para diferentes órdenes de armónicos cuyo comportamiento sea similar a la componente de secuencia negativa.

**TABLA N° 3.3.** Generalización de resultados para armónicas de secuencia negativa

Armónicos de Orden Multiplo de 3 menos 1 (3n-1) Secuencia Negativa	Desfasaje en el Secundario	Análisis de Eliminación de Armónicos de orden <b>3n-1</b>					
		-270	-630	-990	-1350	-1710	-2070
2	90	-270	-630	-990	-1350	-1710	-2070
5	180	-180	-540	-900	-1260	-1620	-1980
8	270	-90	-450	-810	-1170	-1530	-1890
11	360	0	-360	-720	-1080	-1440	-1800
14	450	90	-270	-630	-990	-1350	-1710
17	540	180	-180	-540	-900	-1260	-1620

Podemos concluir que al utilizar rectificadores de 06 pulsos en una misma barra o fuente y los transformadores de aislamiento de configuraciones  $\Delta - \Delta$  y  $\Delta - Y$  de forma alternada, y estos a la vez alimenten a cargas no lineales iguales, con todas estas condiciones resueltas se logran eliminar armónicos de secuencia negativa de orden  $12n + 5$ , esta información es mostrada en la tabla N° 3.4.

**TABLA N° 3.4.** Resumen de armónicas de secuencia negativa eliminadas.

Eliminación de armónicos de orden $12n + 5$					
5	17	29	41	53	65

Eliminación de la séptima armónica, utilizamos el mismo criterio, teniendo en cuenta que la secuencia de la 7° armónica es positiva, de esta manera se logra generalizar la tabla N° 3.5, esta contiene armónicas de secuencia positiva.

**TABLA N° 3.5.** Generalización de resultados para armónicas de secuencia positiva

Armónicos de Orden Multiplo de 3 más 1 (3n+1) Secuencia Positiva	Desfasaje en el Secundario	Análisis de Eliminación de Armónicos de orden 3n+1					
		-270	-630	-990	-1350	-1710	-2070
4	90	-270	-630	-990	-1350	-1710	-2070
7	180	-180	-540	-900	-1260	-1620	-1980
10	270	-90	-450	-810	-1170	-1530	-1890
13	360	0	-360	-720	-1080	-1440	-1800
16	450	90	-270	-630	-990	-1350	-1710
19	540	180	-180	-540	-900	-1260	-1620

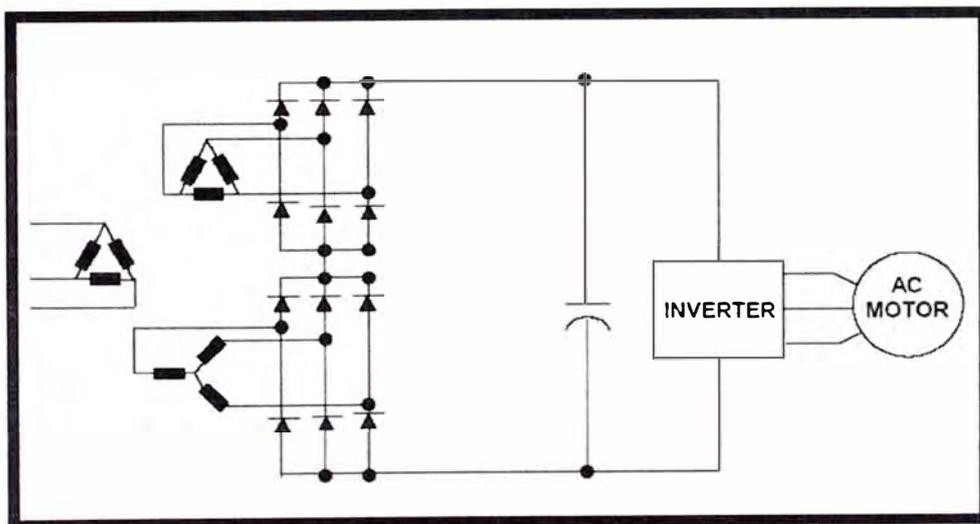
Podemos concluir que al utilizar rectificadores de 06 pulsos en una misma barra o fuente y los transformadores de aislamiento de configuraciones  $\Delta - \Delta$  y  $\Delta - Y$  de forma alternada, y estos a la vez alimenten a cargas no lineales iguales, con todas estas condiciones resueltas se logran eliminar armónicos de secuencia positiva de orden  $12n + 7$ , esta información se muestra en la tabla N° 3.6.

**TABLA N° 3.6.** Resumen de armónicas de secuencia positiva eliminadas.

Eliminación de armónicos de orden $12n + 7$					
7	19	31	43	55	67

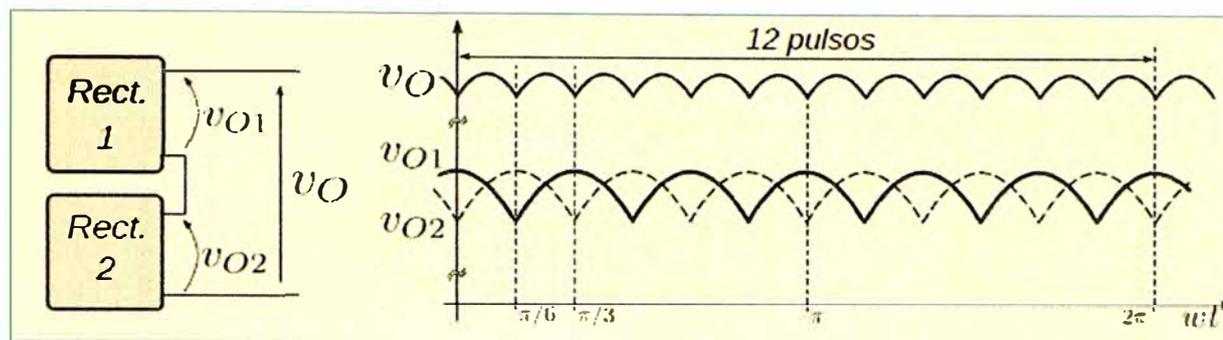
Eliminación de armónicos en rectificadores de 12 pulsos:

El rectificador de 12 pulsos es una configuración muy popular en alta potencia generalmente variadores se usa en variadores cuya potencia sea en MW. Ver figura 3.8

**Fig.3.8.** Configuración de un rectificador de 12 pulsos

El rectificador de 12 pulsos tiene conexión en serie de dos rectificadores de 6 pulsos alimentados por transformadores de diferente tipo de conexión.

Este rectificador debe su nombre al hecho de que, en un período de la tensión, genera 12 pulsos en el voltaje de la carga. Esta descripción se muestra en la figura 3.9.



**Fig.3.9.** Análisis de la señal de salida en un rectificador de 12 pulsos.

Esta topología es lograda con la utilización de un transformador con un primario y dos secundarios según la figura 3.8 (Dy11d0, Dy5d0, Yy0d11, Yy0d5, etc.).

Para eliminar el 5° y 7° armónico se utiliza el principio de desplazamiento de fases de los transformadores de aislamiento realizado en rectificadores de 06 pulsos, de esta manera las corrientes de entrada de los rectificadores de 6 pulsos con transformador en estrella y delta tienen 5° y 7° armónicas con signos opuestos por esta razón, al sumar ambas corrientes, estas armónicas se eliminan.

Con la configuración del rectificador de 12 pulsos el transformador de aislamiento puede eliminar las siguientes armónicas mostradas en la tabla N° 3.7.

**TABLA N° 3.7.** Resumen de armónicas de eliminadas

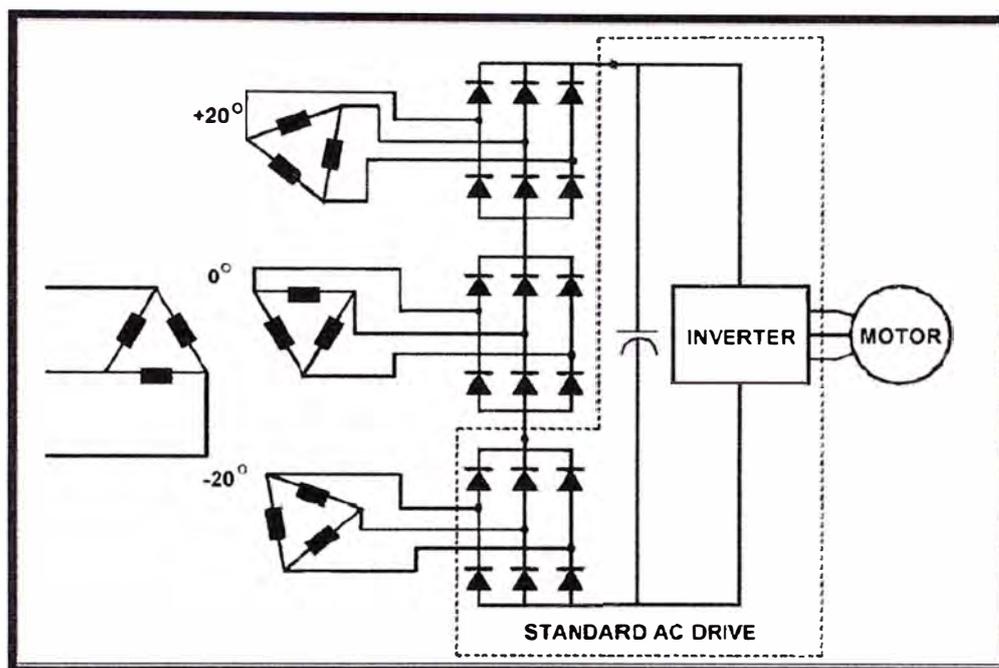
Eliminación de armónicos de orden $12n + 5$					
5	17	29	41	53	65
Eliminación de armónicos de orden $12n + 7$					
7	19	31	43	55	67

Al lograr eliminar las armónicas mostradas, la corriente en el primario del transformador queda expresada de la siguiente manera:

$$i_a(t) = 2 \left( \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{23} \cos 23\omega t - \frac{1}{25} \cos 25\omega t \dots \right] \quad (3.2)$$

Eliminación de armónicos en Rectificadores de 18 pulsos:

La figura 3.10 muestra el esquema de un rectificador de 18 pulsos. Hay tres rectificadores de seis pulsos, conectados en serie, y alimentados por un transformador trifásico con tres devanados secundarios. Estos devanados, presentan tensiones desfasadas de  $20^\circ$  entre ellos y magnitudes entre fases iguales, lo que se logra con conexiones y números de vueltas especiales.



**Fig.3.10.** Rectificador de 18 pulsos con transformador de aislamiento de tres devanados

El rectificador de 18 pulsos cuenta con un transformador de aislamiento de un devanado en el primario en configuración delta y tres devanados en el secundario de configuración delta, los desfasajes (Ver tabla N° 3.8) son diseñados para la mitigar de armónicos.

**TABLA N° 3.8.** Desfasajes del transformador de aislamiento

Devanado del Secundario	Configuración del devanado del Secundario	Desfasaje a 60Hz respecto del Lado Primario
T1	$\Delta$	$-20^\circ$
T2	$\Delta$	$0^\circ$
T3	$\Delta$	$+20^\circ$

Para poder validar la eliminación de la 5° armónica y armónicas de secuencia negativa, se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Se asume tener tres transformadores de configuración  $\Delta - \Delta$  con el desfase respectivo.
- Se sumara las tres señales obtenidas en el primario de cada transformador para obtener la señal resultante. Ver tabla N° 3.9.

**TABLA N° 3.9.** Calculo de desfases en el primario del transformador

Señal en lado primario del Transformador	Desfase a 60Hz respecto reflejado Primario	Desfase a 300Hz respecto en el Secundario	Desfase a 300Hz respecto Reflejado en el Primario
V1	- 20°	-100°	- 120°
V2	0°	0°	0°
V3	+ 20°	100°	+ 120°

Al obtener el desfase respectivo en el primario de cada transformador se procede a sumar las tres señales:

$$V_{resultante} = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_{resultante} = V_0 \text{Sen}5\omega t + V_0 \text{sen}(5\omega t - 120^\circ) + V_0 \text{Sen}(5\omega t + 120^\circ)$$

$$V_{resultante} = 0$$

Generalizando podemos concluir, que al sumar tres señales de igual magnitud desfasadas entre si 120°, se logran cancelar las señales. Realizamos una generalización para armónicas de secuencia negativa. Este cálculo se muestra en la tabla N° 3.10.

**TABLA N° 3.10.** Generalización de resultados en el rectificador de 18P.

Orden Armónico - Secuencia Negativa	5	11	17	23	29	35	41	47	53	59	65	71	77	83
-20	-120	-240	-360	-480	-600	-720	-840	-960	-1080	-1200	-1320	-1440	-1560	-1680
20	120	240	360	480	600	720	840	960	1080	1200	1320	1440	1560	1680
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Al analizar estas señales podemos concluir que con la configuración del transformador de 3 devanados en el secundario se logran eliminar las armónicas mostradas en la tabla N° 3.11.

TABLA N° 3.11. Eliminación de armónicos de secuencia negativa

Eliminación de armónicos en transformadores de rectificadores de 18 pulsos									
5	11	23	29	41	47	59	65	77	83

Se utiliza el mismo criterio y se generaliza la **eliminación de la séptima armónica** y armónicas de secuencia positiva. Esto se muestra en la tabla N° 3.12.

TABLA N° 3.12. Generalización de resultados en el rectificador de 18P.

Orden Armónico - Secuencia Positiva	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67	73	79	85
-20	-120	-240	-360	-480	-600	-720	-840	-960	-1080	-1200	-1320	-1440	-1560	-1680
20	120	240	360	480	600	720	840	960	1080	1200	1320	1440	1560	1680
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Al analizar estas señales podemos concluir que el transformador del rectificador de 18 pulsos logra eliminar las armónicas mostradas en la tabla N° 3.13.

TABLA N° 3.13. Eliminación de armónicas de secuencia positiva

Eliminación Total de armónicas en transformadores de rectificadores de 18 pulsos									
7	13	25	31	43	49	61	67	79	85

### 3.1.2 Uso de Reactancias en línea o Choke:

Una simple solución, pero a menudo con éxito, para controlar la distorsión armónica generada por los drives implica utilizar un pequeño reactor o choke, (ver figura 3.11) insertado en el lado de entrada de línea de la unidad o dentro del circuito de potencia. [5]

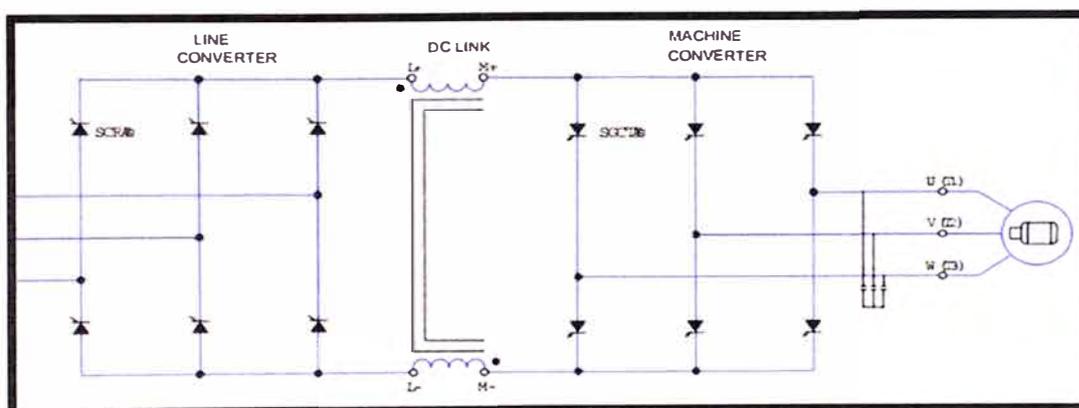


Fig.3.11.Reactancias DC en variadores de velocidad tipo CSI.

Esto es especialmente efectivo para variadores de velocidad del tipo PWM, una reactancia en serie estamos ubicando una impedancia de valor:

$$Z_n = 2\pi f_n L \quad (3.2)$$

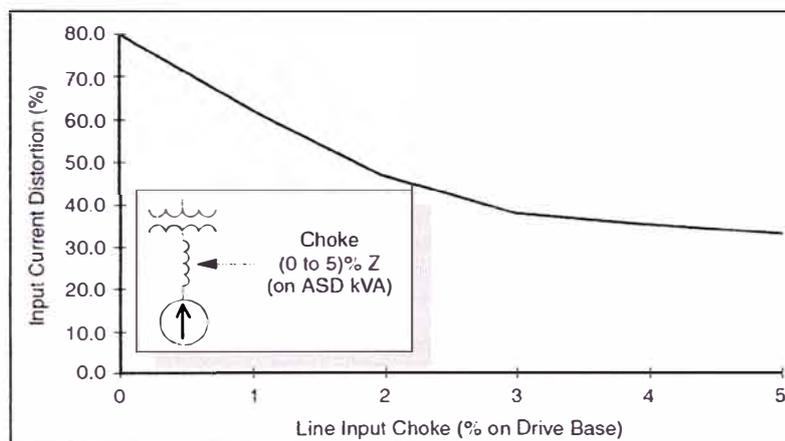
Donde: L: inductancia del reactor  $f_n$ : frecuencia del armónico de orden n

Esta impedancia logra limitar la inyección de armónicos de alta frecuencia hacia la red.

Para variadores de velocidad cuya configuración del inversor sea del tipo VSI la inductancia disminuye la velocidad a la que el condensador en el bus CC se puede cargar. El efecto neto es una corriente de magnitud inferior con mucho menos contenido armónica sin dejar de ofrecer la misma energía.

Los variadores cuya configuración del inversor sea del tipo CSI, utilizan reactores DC en el Bus CC en línea del tipo AC y DC dependiendo de la configuración del rectificador.

Un Choque típica de impedancia de entrada de 3% puede reducir la distorsión de corriente armónica para una unidad de tipo PWM de aproximadamente el 80% a 40% por ciento. Esta impresionante reducción de armónicos se ilustra en la figura.3.12.



**Fig.3.12.**Reducción de armónicos para PWM-tipo ASD

Una reducción armónica adicional es bastante limitado cuando el tamaño del choke se incrementa por encima del 3%.El efecto de la desaceleración de la carga de los condensadores de CC también hace que el choke sea muy eficaz en el bloqueo de algunos transitorios de alta frecuencias.

**3.1.3. Uso de filtros pasivos:** Los filtros pasivos son conexiones de inductancias, capacitancias y elementos de resistencia configurado y ajustado para controlar los armónicos. Son de uso general y son relativamente baratos en comparación con otros medios de mitigación de armónicos. Ver figura 3.13.

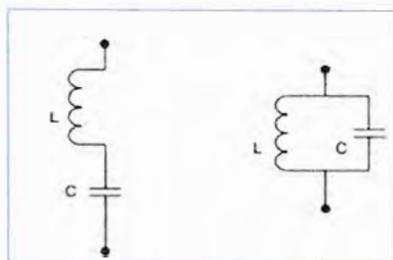


Fig.3.13. Configuraciones de un filtro pasivo

En la tabla N° 3.14 se describe los diferentes tipos de filtros pasivos, que se pueden implementar en un sistema de potencia con la finalidad de mitigar la inyección de armónicos

TABLA N° 3.14. Clasificación de los tipos de filtros pasivos.

Filtros Pasivos	Filtros Pasivos en Serie		
	Filtros pasivos Tipo Shunt	Filtros Sintonizados	Filtros Sintonizado Simple
			Filtros Sintonizado Doble
		Filtros PasaAltos O Amortiguados	Filtro 2° Orden
			Filtro 3° Orden
	Filtro tipo -C		

### 3.1.3.1 Los filtros Series

Se les denomina filtro serie ya que la implementación en el circuito se la realiza en serie con la carga lineal o no lineal.

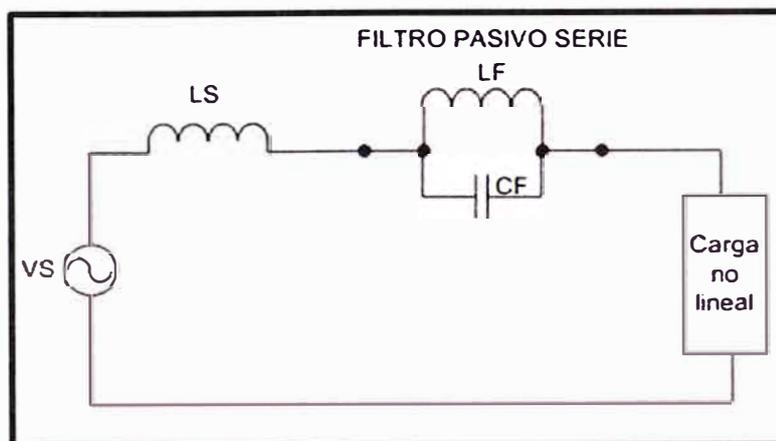


Fig.3.14. Implementación de un filtro pasivo en serie.

Estos filtros se utilizan principalmente para evitar el paso de una componente de frecuencia particular, desde una barra contaminada (debido a la presencia de armónicos) hacia algún subsistema de la planta o sistema de potencia.

El efecto de limitar el paso de la componente armónica particular se logra mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada. En la figura 3.14 se presenta una impedancia  $Z_F$  en sus terminales, la cual esta dada por la siguiente expresión:

$$Z_F = \frac{X_{LF} * X_{CF}}{X_{LF} + X_{CF}} \quad (3.3)$$

En la ecuación (3.2), si el denominador es igualada a cero, el filtro presentaría en sus terminales un valor de impedancia infinito, evitando así el paso de la perturbación.

$$X_{LF} + X_{CF} = 0 \quad (3.4)$$

De aquí llegamos a la ecuación para encontrar la frecuencia que hará resonar al filtro, para el caso del circuito LC paralelo, la resonancia presenta una resistencia infinita en sus terminales:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_n \quad (3.5)$$

De esta forma el filtro serie evita el paso de la señal que está compuesta por la frecuencia a la que el filtro se encuentra sintonizado, disminuyendo la circulación de la perturbación de la señal que se encuentra en la fuente hasta la carga.

### 3.1.3.2 Filtros Shunt o paralelo

Se le denomina filtro Shunt o paralelo ya que se realiza en paralelo con la carga no lineal. Esta descripción se muestra en la figura 3.15.

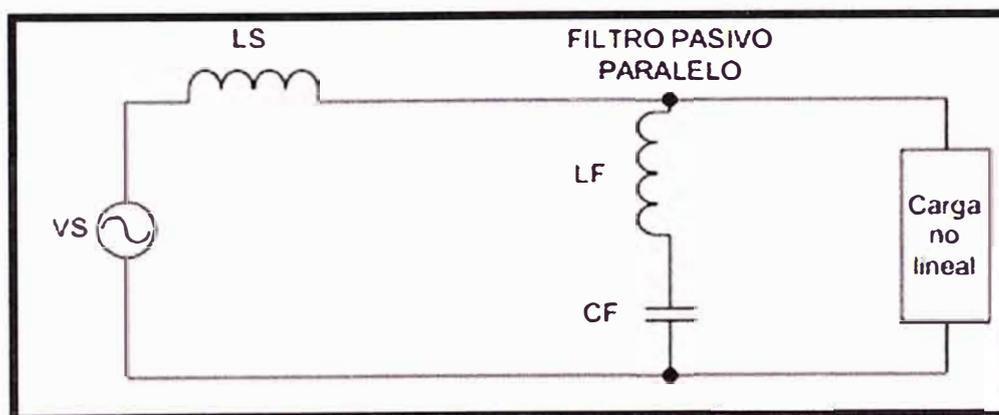


Fig.3.15. Implementación de un filtro pasivo en paralelo o shunt

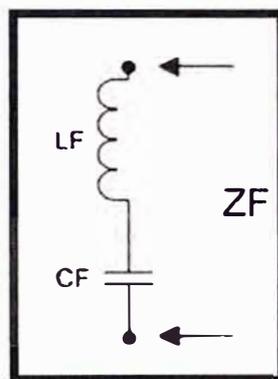
La estructura de una rama de un filtro Shunt paralelo consta de un elemento inductivo y un elemento capacitivo, ambos conectados en serie. Proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las componentes armónicas de la corriente de carga, este filtro consta de una rama resonante serie, compuesta por elementos RLC.

El filtro paralelo presenta mayores ventajas que el filtro serie porque:

- Es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado,
- Proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema.

El filtro pasivo Shunt más conocido es :

- Filtro Sintonizado Simple: Elimina una armónica determinada; consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor.



**Fig.3.16.** Arreglo de una sola rama de un filtro pasivo en paralelo

El filtro shunt paralelo presenta una impedancia:  $Z_F$  en sus terminales (ver figura 3.16), la cual está dada por la siguiente expresión:

$$Z_F = X_{LF} + X_{CF} \quad (3.6)$$

El objetivo del filtro shunt paralelo es servir como un camino de descarga hacia la tierra para las señales armónicas sintonizadas, el criterio de diseño del filtro shunt es obtener una impedancia total del filtro igual a cero para las armónicas sintonizadas, así tenemos:

$$Z_F = X_{LF} + X_{CF} = j\omega_n L - \frac{j}{\omega_n C} = 0 \quad (3.7)$$

De aquí llegamos a la ecuación para encontrar la frecuencia que hará resonar al filtro, para el caso del circuito LC serie resonara ala siguiente frecuencia

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_n \quad (3.8)$$

Cuando se logra la resonancia, el filtro presentara una resistencia mínima en sus terminales y podrá evacuar las corrientes armónicas sintonizadas fuera del sistema de potencia.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{V^2}{Q_C} \quad (3.9)$$

Donde,  $X_C$  es la reactancia capacitiva,  $Q_C$  es el valor de la potencia reactiva que el filtro va a suministrar en cada rama,  $V$  es la tensión nominal

$$C_F = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (3.10)$$

$$L_F = \frac{1}{2\pi f 60 \sqrt{C_F}} \quad (3.11)$$

$$X_{Lh} = \omega_h L_F \quad (3.12)$$

$$R_F = \frac{X_{Lh}}{Q} \quad (3.13)$$

Donde:

$Q$  es el factor de calidad del filtro.

$R$  es la resistencia interna del inductor.

El factor de calidad del filtro ( $Q$ ), determina la forma de la característica de impedancia, y hace que ésta sea más o menos estrecha o abrupta.

La impedancia de la configuración del filtro sintonizado simple es:

$$Z = R_F + j \left( \omega L_F - \frac{1}{\omega C_F} \right) \quad (3.14)$$

Filtros pasa altos-filtros amortiguados o conocidos como de segundo Orden tercer orden - Son utilizados para eliminar un amplio rango de frecuencias, y se emplean cuando las armónicas no tienen frecuencia fija. Los parámetros se calculan con las ecuaciones anteriores del (3.8) al (3.13)

La impedancia de este filtro viene dada por:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_F} + j \left( \frac{1}{R_F} + \frac{1}{j\omega L_F} \right)^{-1} \quad (3.15)$$

Este filtro, al igual que el sintonizado simple, se sintoniza a alguna frecuencia específica, pero debido a que posee una característica amortiguada producto de la resistencia en paralelo con la inductancia, presenta una baja impedancia, para las frecuencias de sintonía o superiores a esta. O sea que absorbe corriente armónicas – si existiesen – de frecuencias desde la sintonía en adelante, Para frecuencias menores a la sintonía, el filtro presenta impedancias altas.

### 3.1.4. Uso de drives PWM

En la modulación PWM la frecuencia de disparos se controla con pulsos positivos durante medio período y pulsos negativos durante el siguiente medio período.

El circuito de control establece los tiempos de activación y desactivación de los dispositivos de potencia (Tiristores, IGBT, SGCT), que de acuerdo a la estrategia utilizada, puede ser en los puntos de intersección entre una tensión sinusoidal denominada onda moduladora o de referencia y una tensión triangular llamada onda portadora. Ver figura 3.17.

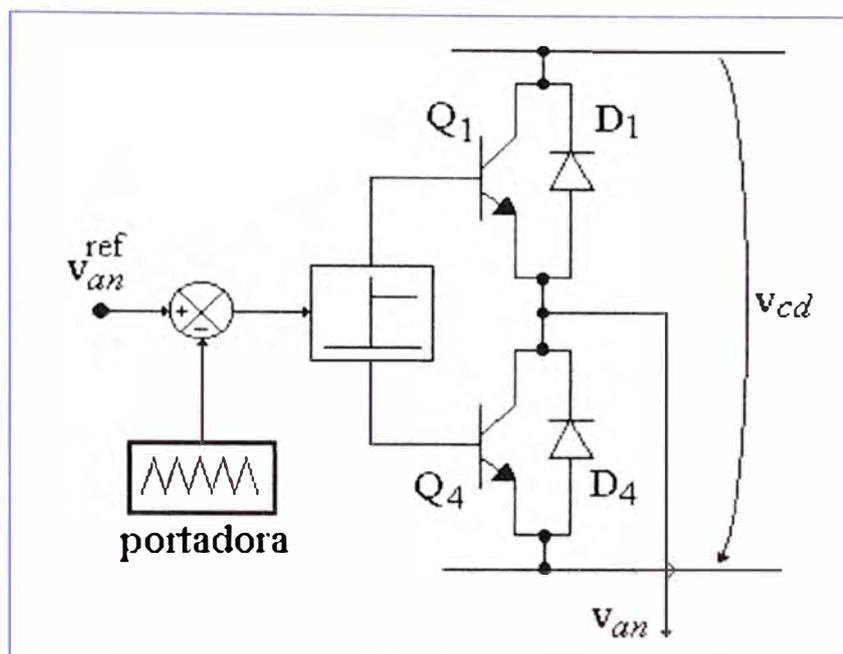


Fig.3.17. Modulación por ancho de pulso con portadora triangular

A pesar del número reducido de frecuencias armónicas bajas, se producen pérdidas suplementarias en el motor y esto se ilustra más claramente por la recomendación de los fabricantes de los convertidores PWM de procurar que los motores que están funcionando de manera continua no estén sometidos a una carga superior al 85-95% del momento nominal.

#### 3.1.4.1. Modulación PWM Sinusoidal

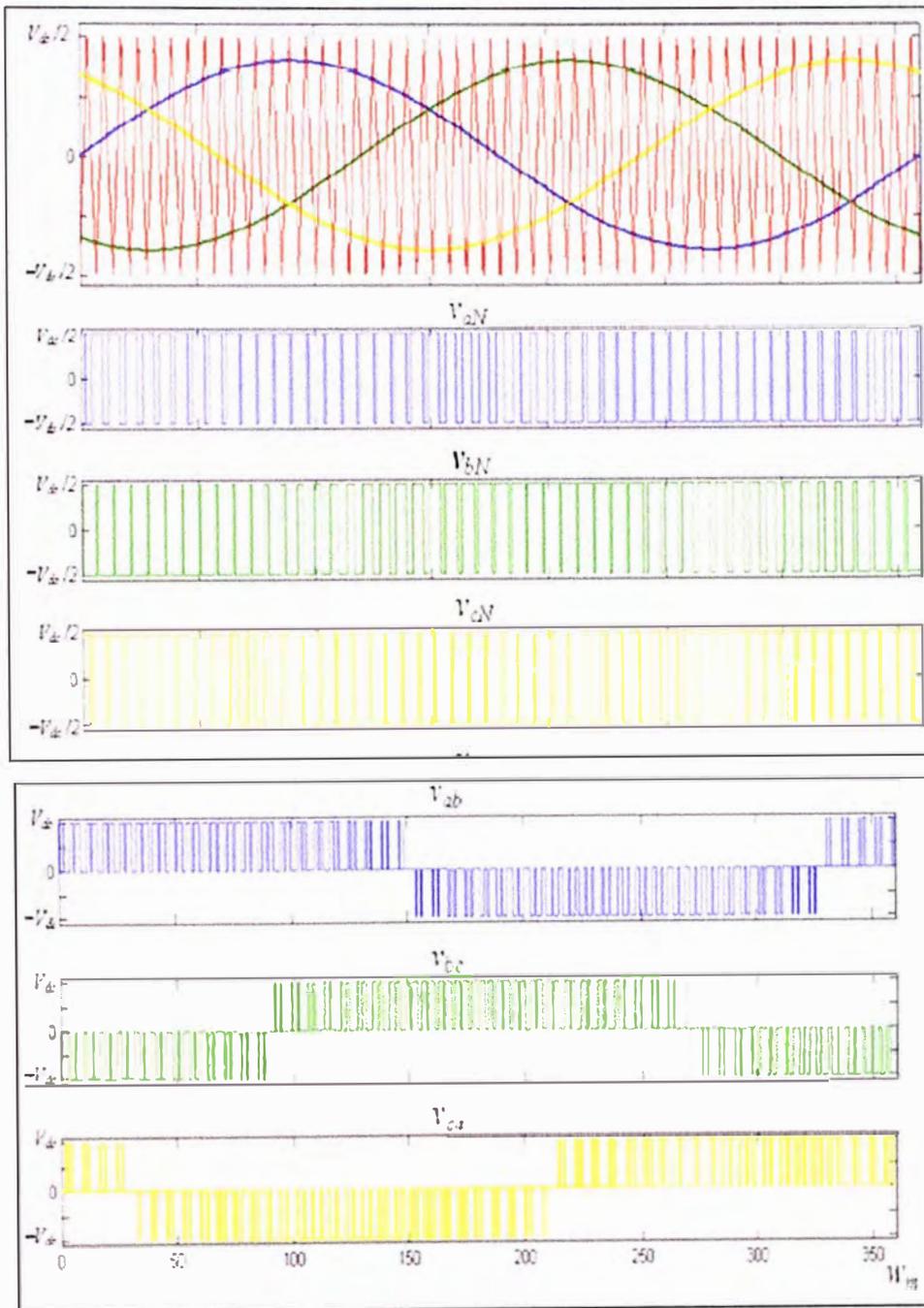
El contenido de armónicos en el voltaje de salida del convertidor puede ser reducido considerablemente usando un conjunto de pulsos en cada semiperíodo. Si esa modulación se realiza con una función sinusoidal, se obtiene una marcada reducción en el contenido de armónicos de la salida. En este método, una señal portadora triangular, se compara con una onda moduladora sinusoidal para determinar los instantes de conmutación. Ver figura 3.18.

En la modulación PWM sinusoidal (SPWM), las señales moduladoras son un conjunto trifásico sinusoidal balanceado encargado de configurar la amplitud, frecuencia y fase a la

salida del inversor. La siguiente expresión define algebraicamente el conjunto de moduladoras.

$$v_a^*(t) = A \sin(\omega_m t) \quad v_b^*(t) = A \sin\left(\omega_m t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad v_c^*(t) = A \sin\left(\omega_m t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$v_a^*(t) + v_b^*(t) + v_c^*(t) = 0$$



**Fig.3.18.** Modulación por ancho de pulso con portadora triangular

### 3.1.4.2. Índice de modulación de frecuencias (Carrier Ratio)

A la relación entre la frecuencia de la onda portadora y la frecuencia fundamental se le denomina razón de la portadora o de modulación.

$$n = \frac{f_s}{f_m} = \frac{\omega_s}{\omega_m} \quad (3.16)$$

Donde:

$f_s$  = frecuencia de la onda portadora

$f_m$  = frecuencia de la onda moduladora

Normalmente, en accionamientos eléctricos de velocidad variable  $f_m$  varía en función de la velocidad deseada mientras  $f_s$  se mantiene constante. Esto implica que el índice de modulación  $n$  es variable.

### 3.1.4.3. Eliminación de armónicos de bajo orden en a Modulación SPWM

La razón de modulación ( $n = \frac{f_s}{f_m}$ ) tiene gran importancia ya que, para disminuir el contenido de armónicas, su valor debe ser alto, esto permite obtener gran número de pulsos por período de la onda fundamental.

Por otra parte, esto aumenta la frecuencia de apagado y encendido del elemento semiconductor (switching frequency). este valor está limitado por el tipo de semiconductor utilizado. Para los tiristores esta frecuencia es baja pero para los Transistores Bipolares de potencia, MOSFET de Potencia, IGBT y MCT la frecuencia de apagado y encendido es de un valor mucho más elevado constituyendo ésta una de las ventajas fundamentales de estos dispositivos.

A continuación analizaremos la presencia de armónicos para diferentes razones de modulación:

Si se elige una relación  $n=6$

Con un ratio de  $n = 6$ , entre la frecuencia triangular y la frecuencia sinusoidal, la quinta y séptima armónica tendrán una amplitud especialmente elevada.

Si  $n=15$

Las decimoterceras ( $13^\circ$ ), decimoquintas ( $15^\circ$ ), y decimoséptimas armónicas ( $17^\circ$ ), van a ser particularmente importante.

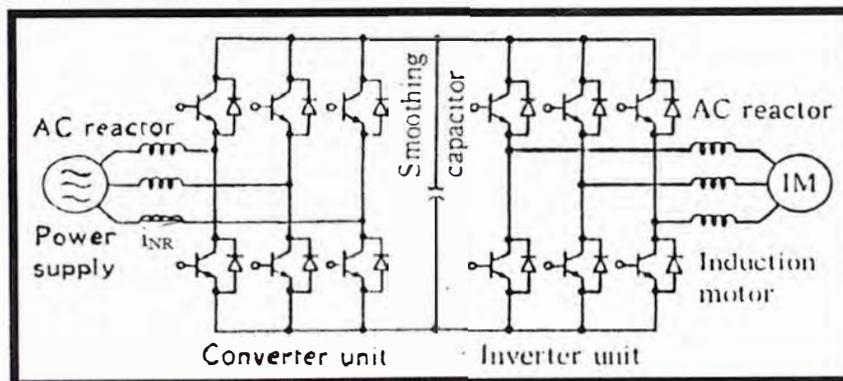
Puesto que la reactancia de los devanados del motor aumenta cuando la frecuencia sube, en razón de la autoinducción de los devanados, las frecuencias armónicas elevadas son menos importantes que las armónicas bajas.

Sin embargo, existen varios motivos para limitar el ratio de modulación  $n$ :

- Existe un límite con respecto a la velocidad a la cual los dispositivos de potencia pueden ser activados o desactivados. Además, cada desactivación forzada de un tiristor cuesta energía. Por lo tanto una relación elevada de  $n$  (frecuentes desenergizaciones) corresponde a una reducción del rendimiento del convertidor de frecuencia. Si los tiristores del inversor se sustituyen por transistores es posible reducir las pérdidas por desenergización.
- Una relación de  $n$  elevada corresponde a numerosos "agujeros" en la tensión, la cual, por tanto, no puede tomar el valor máximo; sin embargo, este valor es necesario cuando se desea obtener el par máximo a frecuencia nominal del motor.
- En algunos inversores la frecuencia de la portadora es fija, en otros varía continuamente o se modifica en función de la modulación y en algunos el usuario puede seleccionarla de acuerdo con sus necesidades y las posibles resonancias mecánicas.

El Rectificador PWM trifásico se muestra en la figura 3.19, en esta se muestra el circuito de potencia de un convertidor de frecuencia trifásico, el que en la entrada tiene una reactancia AC en línea, cuenta con un rectificador PWM trifásico, un inversor PWM trifásico.

y en la salida tiene una reactancia AC en línea.



**Fig.3.19.** Variador de velocidad de tipo PWM

En la figura 3.20 se analizar la señal de corriente de entrada, en esta imagen se muestra que la señal es prácticamente sinusoidal, se observa las señales de tensión y corriente de entrada en un rectificador PWM trifásico.

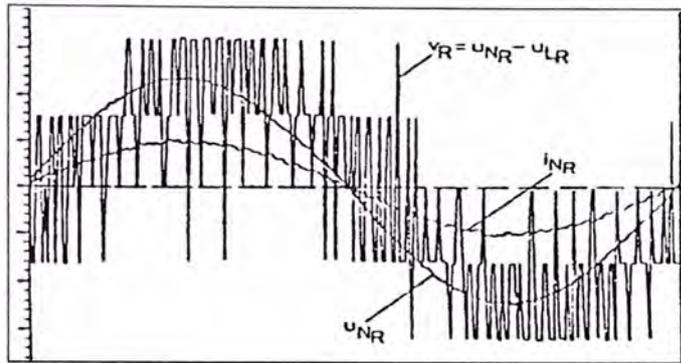


Fig.3.20. Señal de salida de la modulación PWM

### 3.2 Solución del problema.

Para lograr mitigar los armónicos en una red eléctrica, es necesario analizar las la configuración de las instalaciones eléctricas y las cargas no lineales conectadas dentro del sistema eléctrico. La tabla 3.15 resume las consideraciones a tener presente en la mitigación de armónicos.

TABLA N° 3.15. Criterios de eliminación de armónicos

Criterio de Eliminación de armónicos en fuentes de alimentación	Descripción de la técnica
Consideraciones en el diseño de una instalación eléctrica.	Implementación de las cargas perturbadoras al inicio de la red
	Agrupando cargas perturbadoras y las cargas sensibles
	Separando e independizando las fuentes de alimentación.
Técnicas de eliminación de armónicos en cargas no lineales como variadores de velocidad, cicloconvertidores, estas técnicas evitan inyectar armónicos a las fuentes de alimentación o barras principales de MT.	Uso de transformadores con conexiones especiales para rectificadores multipulsos.
	Uso de reactancias AC y DC en línea
	Uso de filtros pasivos
	Uso de modulación PWM en variadores del tipo frente activo
	Uso de filtros activos y filtros híbridos.

### 3.2.1 Técnicas de mitigación de armónicos en cargas no lineales

En los últimos años el creciente desarrollo económico del Perú ha sido sustentado por la industria minera, estas empresas cuentan con cargas no lineales importantes.

A continuación presentaremos las principales cargas no lineales, utilizadas en las diferentes empresas mineras del Perú, Cada una de las cargas no lineales han sido diseñadas con dispositivos de mitigación de armónicos, el objetivo de estos dispositivos es mitigar la inyección de armónicos hacia las fuentes, a continuación la tabla N° 3.16 presenta un resumen sobre las características de cada dispositivo.

**TABLA N° 3.16.** Descripción de técnicas de eliminación de armónicos en cargas no lineales

Técnica de mitigación de armónicos	Descripción de las técnicas
Uso de transformadores con conexiones especiales para rectificadores multipulsos.	Utilizan los variadores de velocidad cuya etapa de rectificación está dada por un rectificador multipulsos (6 pulsos, 12 pulsos, 18 pulsos, 24 pulsos),
Uso de reactancias AC y DC en línea	Las reactancias o choke en AC y DC se utilizan en variadores de velocidad para lograr mitigar armónicos de orden mayor (armónicas de altas frecuencias), el principio es lograr obtener una alta impedancia, que logre mitigar las componente armónicas de orden mayor.
Uso de filtros pasivos	Los filtros pasivos tipo shunt, su principio de funcionamiento es obtener la resonancia para valores específicos (analizada a diferentes frecuencias) con la condición de obtener la mínima impedancia.
Uso de modulación PWM en variadores del tipo frente activo	Existen variadores tipo AFE (frente activo o conocido también como variadores del tipo PWM). Utilizan la modulación PWM para generar los pulsos de disparo, al tener una alta frecuencia se logra evitar la generación de armónicos de orden menor .
Uso de filtros activos y filtros híbridos.	Estos filtros utilizan electrónica de potencia juntamente con elementos lineales, capacitores, inductancias para lograr eliminar armónicos a través de un algoritmo de eliminación de armónicos.

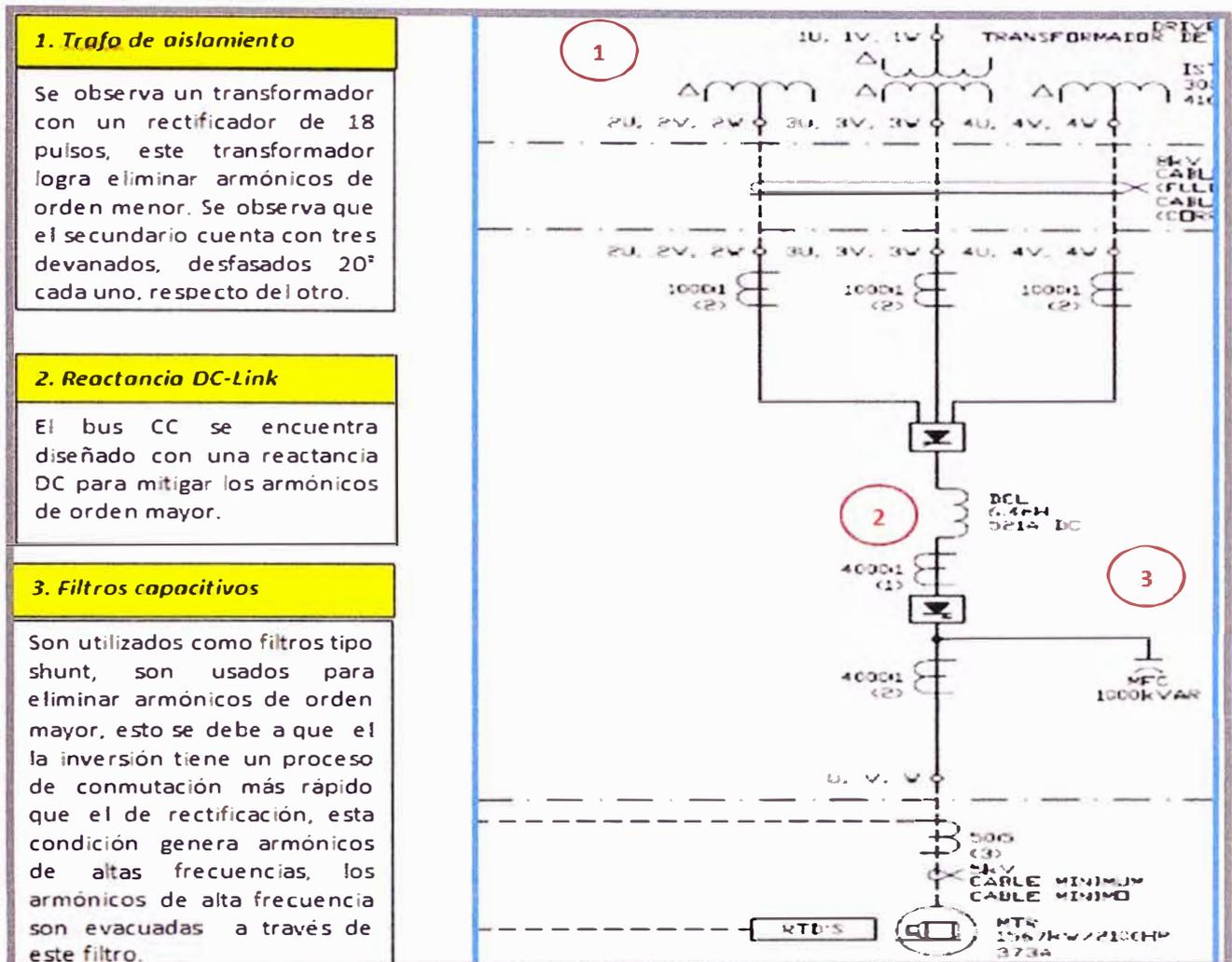
### 3.2.1.1: Eliminación de armónicos en variadores de velocidad:

Analizaremos puntualmente las técnicas de mitigación en variadores de velocidad según el tipo de rectificador que presenta el variador, en la tabla N° 3.17 se presenta un resumen sobre los tipos de rectificadores y la técnica específica a utilizar [6].

**TABLA N° 3.17.** Descripción de técnicas de eliminación en rectificadores multipulsos.

Variador multipulsos	Restricción en la operación del variador	Técnicas de mitigación utilizadas
6 pulsos	Se debe contar con cargas no lineales similares, para lograr operar como un sistema de 12 pulsos y así eliminar los armónicos de orden menor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitigación de armónicas a través de transformadores, utiliza un transformador con 1 devanado en el secundario.</li> <li>• Mitigación con choke en AC y DC</li> <li>• Mitigación con filtros pasivos tipo shunt</li> </ul>
18 pulsos	No tiene restricción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitigación de armónicas a través de transformadores, utiliza un transformador con 3 devanados en el secundario.</li> <li>• Mitigación con choke en AC y DC</li> <li>• Mitigación con filtros pasivos tipo shunt</li> </ul>
PWM	No tiene restricción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A través de las técnicas de modulación PWM, se logra realizar el proceso de conmutación a altas frecuencias, evitándose la generación de armónicos de órdenes menores.</li> <li>• Mitigación de armónicos a través de una reactancia AC , su utilidad es eliminar armónicos de orden mayor</li> <li>• Mitigación con filtros pasivos tipo shunt</li> <li>• Mitigación de armónicos a través de choke DC en el bus DC.</li> </ul>

La figura 3.21 muestra un variador de 18 pulsos marca Rockwell, modelo PF7000, en esta se logra identificar los principales dispositivos de mitigación de armónicos.



**Fig.3.21.** Identificación de técnicas complementarias de eliminación de armónicos en un variador ROCKWELL- Modelo PF7000

### 3.2.1.2: Eliminación de armónicos en cicloconvertidores:

Los cicloconvertidores son convertidores con control de fase (ángulo de disparo variable) que generan una tensión alterna de amplitud y frecuencia variables. Son empleados en el rango de alta potencia (varios Megawatt) para variar la velocidad de motores sincrónicos.

La figura 3.22 muestra el circuito de potencia de un cicloconvertidor de 12 pulsos que alimenta un motor sincrónico, en particular este motor es empleado molinos SAG y molinos de Bolas.

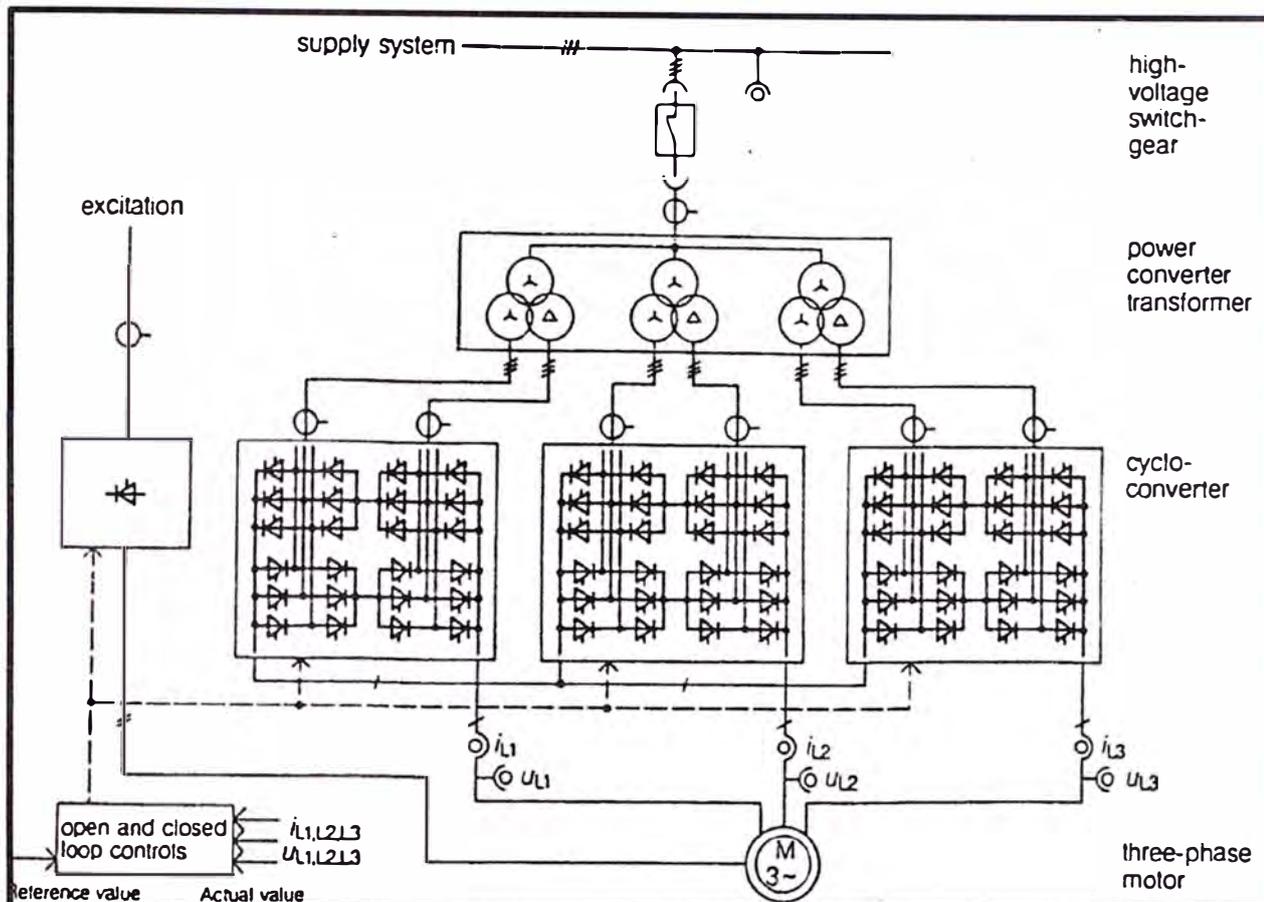


Fig.3.22. Configuración de un cicloconvertidor de 12 pulsos.

En el Perú la principal aplicación que tienen los cicloconvertidores trifásicos son los GMD (Gearless Mill Drive), a través de estos equipos se logra obtener bajas velocidades y varios Mega-watts de potencia, estos equipos son utilizados en los procesos de molienda en las plantas concentradoras de varias compañías mineras, tabla N° 3.18, principales empresas mineras que cuentan con molinos SAG

TABLA N° 3.18. Lista de empresas mineras que cuentan con molinos SAG

Empresa	Número de unidades	Potencia MW	Velocidad RPM
Cerro Verde	4 Molinos Bolas	12	11.94
Chinalco - Toromocho	1 Molino SAG	28	9.31
	2 Molinos Bolas	22	10.99
Antamina	2 Molino SAG	20	9.23
	4 Molinos Bolas	11	11.37

Las Bambas - Xstrata	2 Molino SAG	24	10
	4 Molinos Bolas	16.5	12
Constancia - Hudbay	1 Molino SAG	En proyecto	
	3 Molinos Bolas	En proyecto	

Todos estos equipos presentan cargas entre 15000HP – 20000HP y son alimentados. Estos motores síncronos son alimentados de la siguiente forma :

- Estator: Requiere Voltaje AC, esta alimentación se realiza a través de un cicloconvertidor trifásicos de 12 pulsos,
- Rotor: Requiere Voltaje DC esta alimentación se realiza a través del anillo rozante del rotor, se requiere un rectificador de 6 pulsos para obtener la señal DC.

La tabla N° 3.19 describe los 02 tipos de armónicos generados en un cicloconvertidor.

**TABLA N° 3.19.** Armónicos generados en un cicloconvertidor

Tipo de Armónico	Descripción
Armónicos Característicos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Son independientes de la configuración y del número de pulsos del cicloconvertidor</li> <li>▪ Las frecuencias de estas armónicas son dependientes de la frecuencia de salida y están dadas por la ecuación: <math display="block">f_{caracteristicos} = f_i \pm 6n f_0</math> Donde:  <i>f<sub>i</sub></i> : frecuencia de entrada <i>f<sub>0</sub></i>: frecuencia de salida</li> </ul>
Armónicos dependientes del circuito	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La frecuencia de estas armónicas depende del número de pulsos del cicloconvertidor y de la frecuencia de salida.</li> <li>▪ En un cicloconvertidor de 12 pulsos estas armónicas tienen frecuencias determinadas por la siguiente ecuación: <math display="block">f_h = (12p \pm 1) \cdot f_i \pm 6n f_0</math> Donde: <i>p</i> = 1,2,3 ... <i>n</i> = 0,1,2,3 ...</li> </ul>

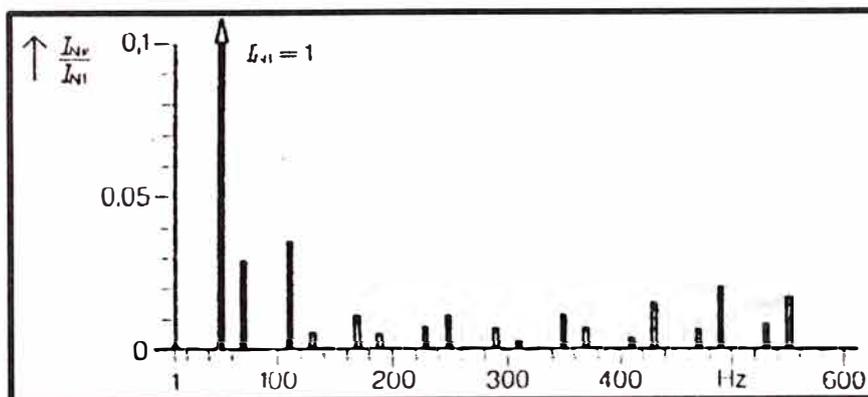
En ambos casos La amplitud de las corrientes armónicas inyectadas a la red depende de:

- Razón del voltaje de salida ( $r = V_0 / V_{0\text{máx}}$ )
- Angulo de desplazamiento de la carga

Ejemplo: Un cicloconvertidor de 15000 HP, 12 pulsos, es alimentado desde una red trifásica de  $f_i = 50\text{Hz}$  y genera, en el punto de trabajo nominal, una frecuencia de salida  $f_o = 6.53\text{Hz}$ . Análisis del contenido armónico: Las armónicas presentes en la corriente de entrada están determinadas por las dos ecuaciones precedentes (ecuación (3.16) – ecuación (3.17)) y sus correspondientes amplitudes han sido determinadas por el fabricante y se presentan en la siguiente tabla N° 3.20, en esta se realiza un resumen de Armónicas en la corriente de entrada de un cicloconvertidor de 12 pulsos con  $f_i = 50\text{Hz}$ ,  $f_o = 6,53\text{Hz}$ , posteriormente la figura 3.23 describe el espectro de frecuencias obtenida en un cicloconvertidor.

**TABLA N° 3.20.** Espectro de armónicos presente en un cicloconvertidor

Frecuencia	Hz	Orden	Amps.
$F_i$	50	1	562
$F_i + 6 F_0$	89.18	1.78	16.86
$F_i - 6 F_0$	10.82	.22	16.86
$F_i + 12 F_0$	128.36	2.57	5.62
$F_i - 12 F_0$	28.36	0.57	5.62
$11 F_i$	550	11	11.24
$11 F_i + 6 F_0$	589.18	11.78	22.48
$11 F_i - 6 F_0$	510.82	10.22	22.48
$11 F_i + 12 F_0$	628.36	12.57	5.62
$11 F_i - 12 F_0$	471.64	9.43	5.62
$13 F_i$	650	13	11.24
$13 F_i + 6 F_0$	689.18	13.78	11.24
$13 F_i - 6 F_0$	610.82	12.22	11.24
$13 F_i + 12 F_0$	728.36	14.57	11.24
$13 F_i - 12 F_0$	571.64	11.43	11.24



**Fig.3.23.** Espectro de armónicos y sub armónicos de un cicloconvertidor

Descripción de la eliminación de armónicas en el cicloconvertidor de 12 pulsos (Estator): Este equipo utiliza SCRs como elementos de disparo, el SCRs tiene una frecuencia de conmutación baja, el proceso de conmutación genera armónicos de bajo orden, estos armónicos de bajo orden son 3°, 5°, 7°, estas armónicas son eliminados por los transformadores de conexión ( $\Delta - \Delta Y$ ), la eliminación de armónicas se realiza de forma similar que los rectificadores de 12 pulsos. Ver los resultados en la figura 3.24.

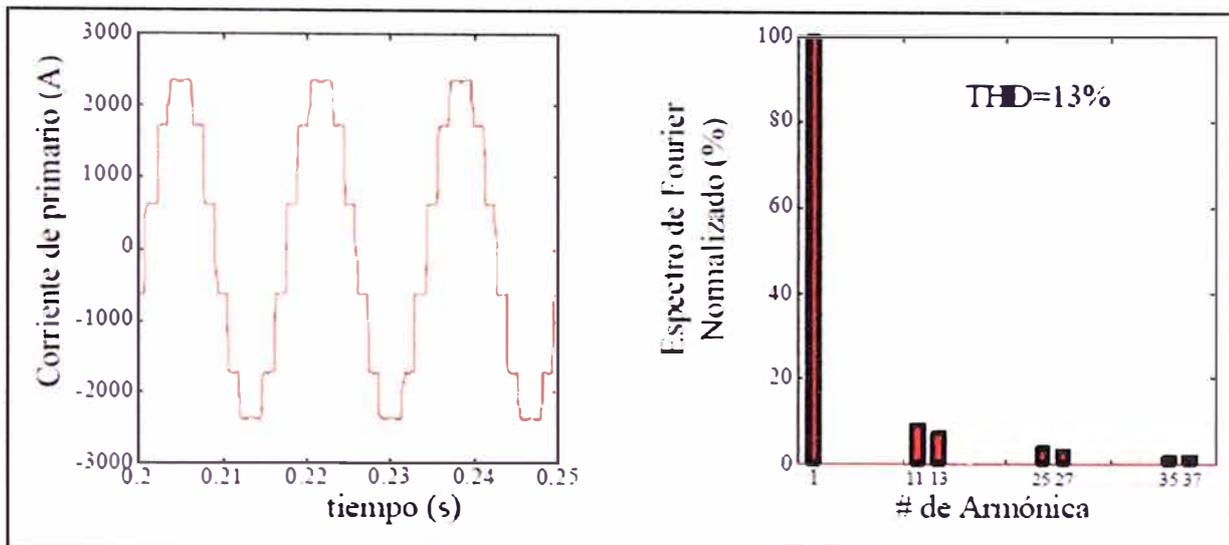


Fig.3.24. Suma de corrientes de primarios del cicloconvertidor de 12 pulsos.

### 3.2.1.3. Eliminación de armónicos en sistemas de compensación reactiva (SVC)

Son dispositivos reactivos que tienen la propiedad de generar o absorber potencia reactiva, no tiene partes fundamentales en movimiento. Un SVC puede estar conformado por un transformador, reactores, capacitores, válvulas de tiristores bidireccionales y un sistema de control.

Los esquemas más comunes de SVC consideran los dos principios de control más utilizados:

- TSC/TCR: Capacitores conmutados por tiristores/Reactor controlado por tiristores.
- TCR/FC: Reactor controlado por tiristores/ Capacitores fijos.

Desde el punto de vista de la frecuencia en ambos principios de control (TSC y TCR), el SVC puede ser considerado como una reactancia variable, el primero es una reactancia capacitiva variable por escalones y en el segundo es una reactancia inductiva continuamente variable.

Los principales componentes del SVC se muestran en la figura 3.25.

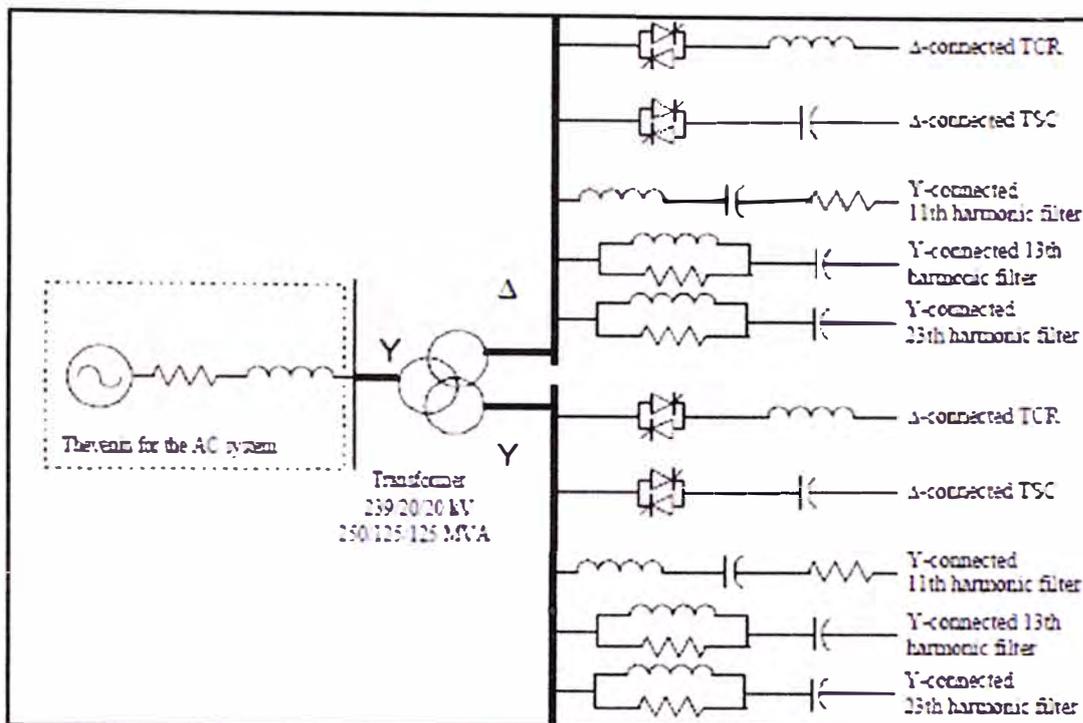


Fig.3.25. Componentes principales de un SVC

Las estrategias de control de un SVC, son:

- Control activo continuo, que disponen de un reactor controlado por tiristores (TCR).
- Control activo discontinuo, pueden incluir capacitores y reactores conmutados por tiristores (TSC y TSR).

La eliminación de armónicas en los SVC se realiza en 2 etapas:

- Las armónicas de orden menor ( $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $11^\circ$ ) son eliminadas a través del transformador cuya conexión es (Y -  $\Delta$ Y).
- Para las armónicas de orden mayor se tienen filtros sintonizados para determinadas frecuencias.

### 3.3. Recursos Humanos Y Equipamiento

Para evaluar las opciones de mejora en calidad de energía por generación de armónicos es necesario evaluar dos posibles escenarios:

- Escenario 01: La planta industrial se encuentra funcionando: No es fácil, en general, justificar económicamente la realización de un estudio de armónicas o la instalación de filtros de potencia cuando un sistema eléctrico ya está con todos sus equipos funcionando. Esto se debe a que el sistema está funcionando, con algunos problemas, pero funciona. La tabla 3.21 describe la secuencia de pasos a seguir.

TABLA N° 3.21. Descripción de pasos para el estudio de armónicos

Pasos	Descripción de actividades	Recursos
<b>Objetivos</b>	Establecer los objetivos del estudio de Armónicas.	Diagramas unifilares de la planta. Analizador de redes para medición de THD de corriente Establecer criterios de criticidad de equipos y barras principales.
<b>Simulación</b>	Modelado del sistema Modelado de elementos Análisis preliminar	Datasheet de los motores, transformadores, cables, variadores de velocidad. Información de los relés de protección Software de simulación tales como DIGSILENT, ATP, MATLAB entre otros, Computadoras y sistema operativo compatible con el software de análisis de calidad de energía.
<b>Experimental</b>	Mediciones Validación, modificación de modelos	Conocer la ubicación y el valor de las relaciones de transformación de los transformadores de corriente y transformadores de tensión Verificación de los datos de los equipos eléctricos en campo, verificar que los datos de placa de los equipos. Verificar los diagramas unifilares en campo, principalmente las ramas que alimentan a las cargas no lineales. Realizar el seguimiento a operaciones,
<b>Simulación</b>	Estudios de otros casos Modificación de modelos	DIGSILENT, ATP, MATLAB entre otros. Computadoras y sistema operativo compatible con el software de análisis de calidad de energía.

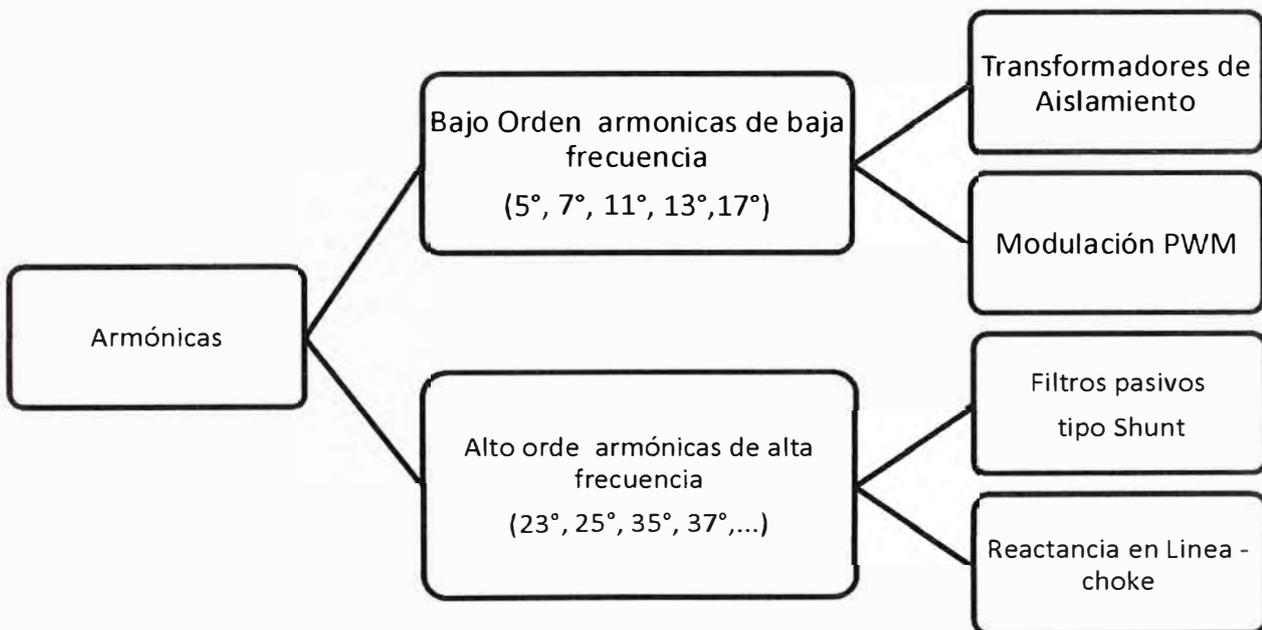
- Escenario 02: La planta está la etapa de proyecto y el cambio es más fácil justificar y realizar el estudio de armónicas cuando. En este caso, no se sabe si el sistema tendrá problemas o no frente a la adición de más cargas contaminantes, lo que justifica hacer un estudio. Además, los costos del estudio se pueden cargar al proyecto de las nuevas instalaciones.

## CAPITULO IV ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

### 4.1 Análisis descriptivo:

Para lograr eliminar los armónicos de forma eficiente en variadores de velocidad se utilizan varias técnicas de mitigación armónicas que logran complementarse.

Existen técnicas de mitigación de armónicas orientadas a eliminar armónicas de bajas frecuencias y otras técnicas de mitigación de armónicas están enfocadas a eliminar armónicas de altas frecuencias, al utilizar ambas técnicas se logran complementarse.



Esta filosofía de separar las técnicas de mitigación de armónica en 2 zonas, una de baja frecuencia y otras de alta frecuencia es utilizada en todas las cargas no lineales. Como ejemplo los variadores marca **ROCWELL** utilizado en aplicaciones industriales de minería y energía, se tiene que los variadores de velocidad utilizan las siguientes técnicas de mitigación de armónicos. Ver tabla N° 4.1

**TABLA N° 4.1.** Técnicas de eliminación de armónicos por modelo de variador.

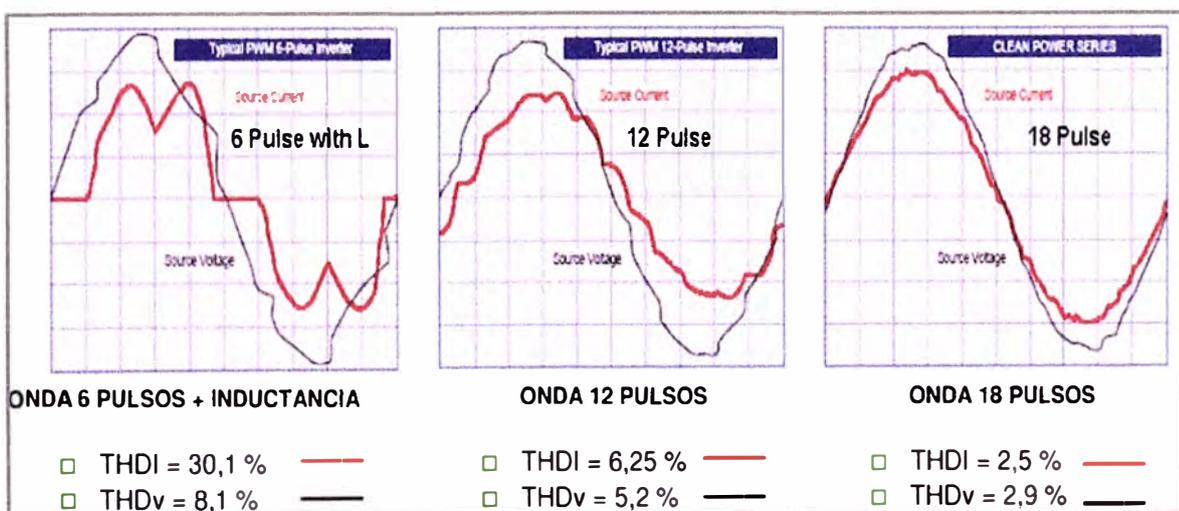
Modelo del Variador de MT	Transformador de Aislamiento	Filtros pasivos	Reactancia DC	Reactancia AC	Modulación PWM
MV1557-Allen Bradley 6 Pulsos	X	X	X		
PF7000_Modelo 18 pulsos	X	X	X		X
PF7000_Modelo Forge		X	X	X	X

Dependiendo del modelo de variador se logran ver diferentes técnicas de mitigación de armónicos, en las pruebas de fábrica se realizan pruebas para verificar que la inyección de armónicas de corriente se encuentren dentro de los límites permisibles expuestos en la norma IEEE-519.

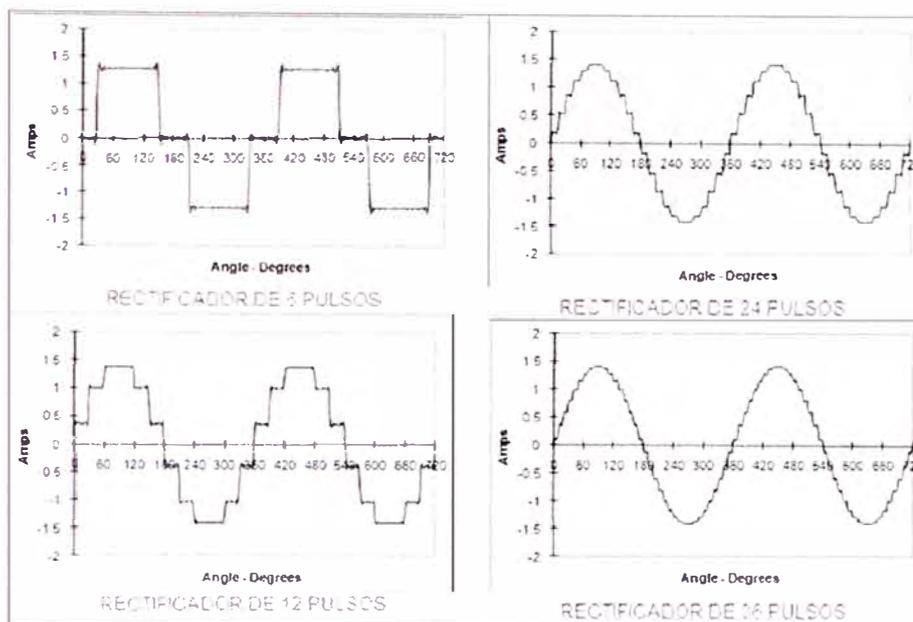
#### 4.2 Análisis teórico de los datos y resultados obtenidos en relación con las bases teóricas de la Investigación.

##### 4.2.1 Resultados obtenido con rectificadores multipulsos.

a. Se observa el uso de un mayor número de pulsos en la etapa de rectificación permite mejorar la calidad de energía en la fuente y barras principales. Ver figura 4.1 y figura 4.2.



**Fig.4.1.** Resultados del THD en los rectificadores multipulsos



**Fig.4.2.** Comparación de distorsión armónica de los rectificadores multipulsos

- b. Los transformadores de los rectificadores multipulsos, son diseñados con desplazamientos especiales entre grupos de rectificadores de 06 pulsos, a través de estos transformadores se logra la cancelación de armónicos en el lado primario del transformador, ver tabla N° 4.2 de esta manera se evita contaminar la fuente de tensión o la barra principal con armónicos producidos por la carga no lineal.

**TABLA N° 4.2.** Calculo de desfase de los transformadores multipulsos

# Pulsos	Número de grupos de 6 pulsos.	Desplazamiento de fase entre grupos de 06 pulsos: $\delta = \frac{1}{6} \times \frac{360^\circ}{\# \text{ grupos de 6 pulsos}}$
6	1	-----
12	2	$\delta = \frac{1}{6} \times \frac{360^\circ}{2} = 30^\circ$
18	3	$\delta = \frac{1}{6} \times \frac{360^\circ}{3} = 20^\circ$
24	4	$\delta = \frac{1}{6} \times \frac{360^\circ}{4} = 15^\circ$

Utilizando las series de Fourier se logra determinar que armónicas se encuentran presente para diferentes rectificadores multipulsos, en general tenemos el siguiente resumen mostrado en la tabla N° 4.3

Para obtener estas series, utilizamos la siguiente formula  $a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt$

**TABLA N° 4.3.** Resumen de serie de Fourier para señales multipulsos

# Pulsos	Expresión en series de Fourier
6	$i_a(t) = I_d \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[ \cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) \right. \\ \left. + \frac{1}{17} \cos(17\omega t) - \frac{1}{19} \cos(19\omega t) \dots \right] \text{ en Conexión } \Delta - Y$ $i_a(t) = I_d \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) \right. \\ \left. - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) \dots \right] \text{ en Conexión } \Delta - \Delta$
12	$i_a(t) = 2 \left( \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) + \frac{1}{23} \cos(23\omega t) \right. \\ \left. - \frac{1}{25} \cos(25\omega t) \dots \right] \text{ en Conexión } \Delta - \Delta Y$
18	$i_a(t) = K \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) - \frac{1}{35} \cos(35\omega t) \right. \\ \left. + \frac{1}{37} \cos(37\omega t) \dots \right] \text{ en Conexión } \Delta - \Delta \Delta \Delta$
24	$i_a(t) = K \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) - \frac{1}{47} \cos(47\omega t) \right. \\ \left. + \frac{1}{49} \cos(49\omega t) \dots \right] \text{ en Conexión } \Delta Y - \Delta Y$

Dependiendo del número de pulsos del rectificador se logra identificar la presencia de los de determinados armónicos (Ver tabla N° 4.4). Los armónicos existentes en un rectificador multipulsos son:

$$\text{Orden armonico existente} = n \times k \pm 1 \quad (4.1)$$

Donde:

n: número de pulsos del rectificador

k: número entero positivo

**TABLA N° 4.4.** Presencia de armónicos según el número de pulsos del rectificador

# Pulsos	Armónicos presentes en el rectificador multipulsos $h = kq \pm 1$ <i>donde h: es el orden del armónico, k es entero y q = #pulsos</i>
6	$h = 6k \pm 1$ Armónicos presentes: $5^\circ, 7^\circ, 11^\circ, 13^\circ, 17^\circ, 19^\circ, 23^\circ, 25^\circ \dots$
12	$h = 12k \pm 1$ Armónicos presentes: $11^\circ, 13^\circ, 23^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 37^\circ, \dots$
18	$h = 18k \pm 1$ Armónicos presentes: $17^\circ, 19^\circ, 35^\circ, 37^\circ, 53^\circ, 55^\circ, \dots$
24	$h = 24 \pm 1$ Armónicos presentes: $23^\circ, 25^\circ, 47^\circ, 49^\circ, 71^\circ, 73^\circ, \dots$

La elevación del número de pulsos mejora la calidad de la tensión de salida en el lado de CC y la calidad de la corriente de entrada en el lado de CA:

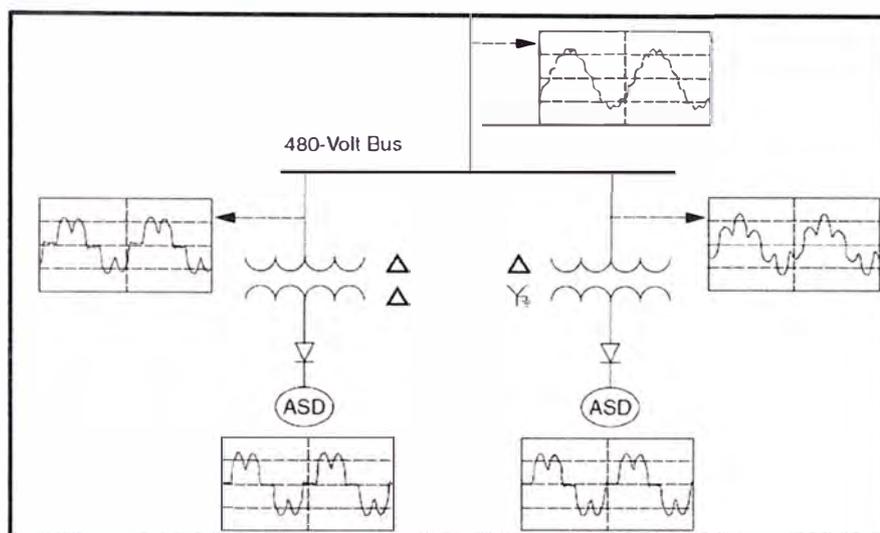
- Se mejora la calidad de señal CC, porque la tensión de salida se aplan a medida que aumenta el número de pulsos en un período de  $2\pi$ .
- Se mejora la calidad de señal de CA, porque la corriente de entrada se hace más sinusoidal al aumentar el número de escalones en un período de  $2\pi$  (un período de  $2\pi$  corresponde al período en segundos la tensión de alimentación a la entrada). Por ejemplo, en el rectificador de 18 pulsos, en un período de  $2\pi$ , la tensión de salida tiene 18 pulsos y la corriente de entrada 18 escalones.
- Rectificadores Multipulsos (6pulsos, 12 pulsos, 18 pulsos): Utilizan reactancia DC como enlace CC entre la etapa de rectificación e inversión.

#### 4.2.1.1 Restricción de operación de variadores de 6 pulsos:

Con la finalidad de garantizar no inyectar con corriente armónica las fuentes o barras principales en una planta industrial, se presenta las siguientes condiciones de operación

- El número de cargas no lineales que alimenta una barra debe ser una cantidad par.
- La configuración de cada transformador debe ser triangulo- triangulo y triangulo – estrella, de forma alternada, cada uno de estos transformadores debe alimentar cargas no lineales iguales o similares para así garantizar la eficiencia de mitigación de armónicos, cumpliendo estas características se logra obtener una eficiencia semejante a la configuración de 12 pulsos .

La figura 4.3 muestra la corriente formas de onda para dos cargas no lineales, alimentadas por variadores de seis pulsos separados. Se logra observar que el sistema no inyecta armónicos a la barra de 480V debido a que estas cargas no lineales cancelan mutuamente sus componentes armónicas en la barra de 480V por contener componentes armónicas vectorialmente opuestos, en este caso se cumplen las condiciones de operación expuestas.



**Fig.4.3.** Una configuración de 12 pulsos como un método para controlar los armónicos a partir de dos variadores de 6 pulsos.

Analizaremos un caso real de contaminación armónica: en la tabla N° 4.5 se describen las cargas no lineales de los motores de inducción utilizados en el mineroducto de la compañía minera Antamina,

**TABLA N° 4.5.** Descripción de variadores de velocidad por barra

Bus o barra principal	Motor de MT alimentado por variador de MT	Conexión del transformador	Potencia instantánea (HP)
Barra A	360 – PPP - 416	$\Delta - Y$	$x$
	360 – PPP - 417	$\Delta - \Delta$	$x$
Barra B	360 - PPP - 418	$\Delta - Y$	$y$
	360 – PPP - 419	$\Delta - \Delta$	$y$

El problema: En Antamina se presentaron problemas de recalentamiento en los transformadores de aislamiento, transformadores de control y fusibles de control debido a las siguientes condiciones de operación:

- Para una misma barra de MT, el número de motores en funcionamiento simultáneo era impar (analizando solo las cargas no lineales).
- La potencia instantánea de motores correspondientes a cargas no lineales, que se alimentan de una misma barra no eran las mismas potencias instantáneas.
- Los motores conectados en una misma barra, una era stand-by del otro motor, por la que no funcionaban simultáneamente.

La solución: Realizar la operación con un número par de variadores de velocidad por barra, con potencias instantáneas similares, también se independizó la alimentación a los circuitos de control del variador.

#### **4.2.2 Consideraciones finales en los filtros pasivos tipo Shunt:**

La utilización de un filtro como solución al problema de armónicos requiere de un análisis detallado de la respuesta en frecuencia del sistema. Entre los criterios de selección del filtro se tienen los siguientes:

- El número de armónicos del sistema a atenuar: Dependiendo del número de armónicos existentes en el sistema, se puede determinar la cantidad de filtros (filtro sintonizado o dual) que se podrían ubicar para obtener una atenuación de las componentes armónicas. Esta minimización debe estar acorde con los límites establecidos por las normas.
- Los requerimientos del filtro: Se hace referencia a la acción correctiva que se desee del filtro (compensación de reactivos, reducción de la distorsión armónica, regulación de tensión o todos). Cada requerimiento del filtro implica un diseño específico, tal que el objetivo para el cual se quiere se cumpla.
- La energía de cada armónico :La magnitud de cada armónico está directamente relacionada con las pérdidas que estas componentes armónicas ocasionan en el sistema de potencia

#### **Ubicación de Filtros Pasivos:**

Existen dos opciones para ubicar un filtro pasivo para armónicos:

El alimentador de media tensión con el fin de disminuir las pérdidas del sistema.

Cerca de la carga no lineal (baja tensión), para evitar la inyección de componentes armónicas de corriente al sistema por parte de la carga. Ver figura 4.4.

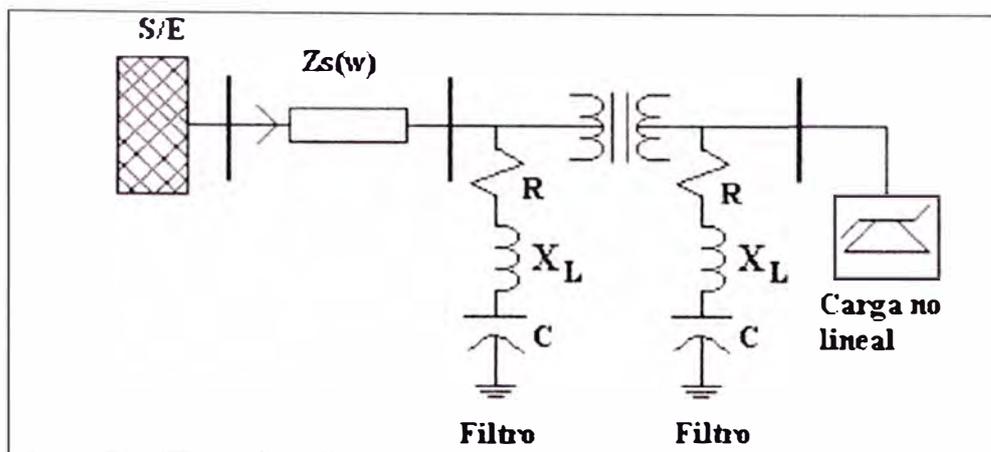


Fig.4.4. Posibles ubicaciones de los filtros pasivos

Los criterios de ubicación del filtro son:

- La existencia de cargas altamente contaminantes. Se debe ubicar el filtro en el lado de baja tensión; de esta forma el transformador de potencia sirve de amortiguador (aislante de armónicos) tanto de las corrientes armónicas provenientes de otras cargas como de las corrientes armónicas generada por la carga, lográndose aislar el problema.
- La existencia de cargas armónicas distribuidas. Los filtros deben ser ubicados en media tensión y en lugares estratégicos (óptimos) para evitar la excesiva circulación de corrientes armónicas por el sistema.

Problemas de los filtros pasivos. Uno de los mayores problemas de los filtros es que se produzca la desintonía de éstos. Los cuatro eventos más comunes que pueden dar como resultado una desintonización del filtro son:

- Deterioro de los condensadores, lo cual disminuye la capacitancia total y con esto aumenta la frecuencia a la cual el filtro fue sintonizado.
- Tolerancia de fabricación tanto en el reactor como en los condensadores.
- Variación de temperatura.
- Variación en el sistema.

Típicamente, los filtros se sintonizan aproximadamente entre un 3% y un 10% por debajo de la frecuencia deseada, Esto para tener la opción de una buena operación del filtro en un rango mayor de tiempo de vida útil.

Tal como se indicó los filtros de armónicos trifásicos tipo shunt, son usados en Sistemas de Potencia para disminuir la distorsión armónica de voltaje y corregir el factor de potencia y así logran mitigar la inyección de armónicos hacia la red es utilizar los filtros pasivos tipos Shunt.

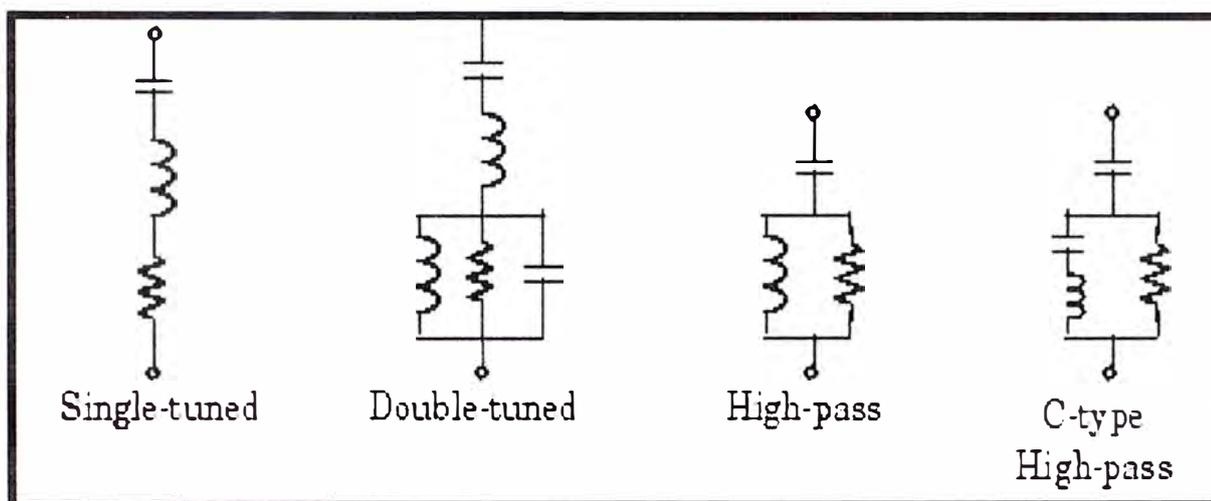
#### 4.2.2.1 Cálculo de parámetros de filtros pasivos utilizando Matlab

A continuación se presenta el cálculo de parámetros de los diferentes tipos de filtros Shunt, la herramienta de cálculo será el Matlab Versión 7.6.

La tabla N° 4.6 presenta los tipos de filtros Shunt, se realizara el cálculo de parámetros de los filtros, de esta forma se calculara las capacitancias, inductancias e impedancias. En la figura 4.5 se muestra los tipos de filtros pasivos.

**TABLA N° 4.6.** Clasificación de filtros pasivos Shunt

FILTROS PASIVOS SHUNT	
Filtro sintonizado Simple	Filtro de segundo Orden
Filtro sintonizado doble	Filtro Tipo C



**Fig.4.5.** Tipos de filtros pasivos Shunt

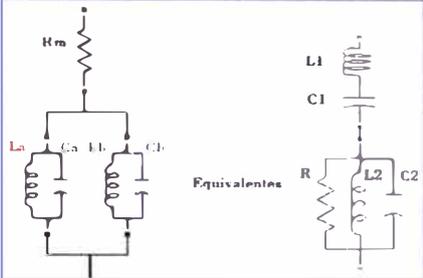
A continuación se realiza el cálculo de parámetros de los filtros pasivos Shunt del tipo de doble sintonía y de segundo orden.

#### **Filtro sintonizado Doble.:**

El filtro de doble sintonía realiza la misma función que **dos filtros sintonizados simples** aunque tiene ciertas ventajas:

El filtro de doble sintonía consta de un circuito LC en serie y un circuito RLC en paralelo dispuestos según se muestra el esquema presentado en la tabla N° 4.7

TABLA N° 4.7. Descripción de fórmulas y esquemas de un Filtro de doble sintonía

Esquema	Ecuaciones
	$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad C_1 = C_a + C_b$
	$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \quad L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)}$
	$R = \frac{1}{2} (n_a + n_b) X_{L_2} \cdot Q$

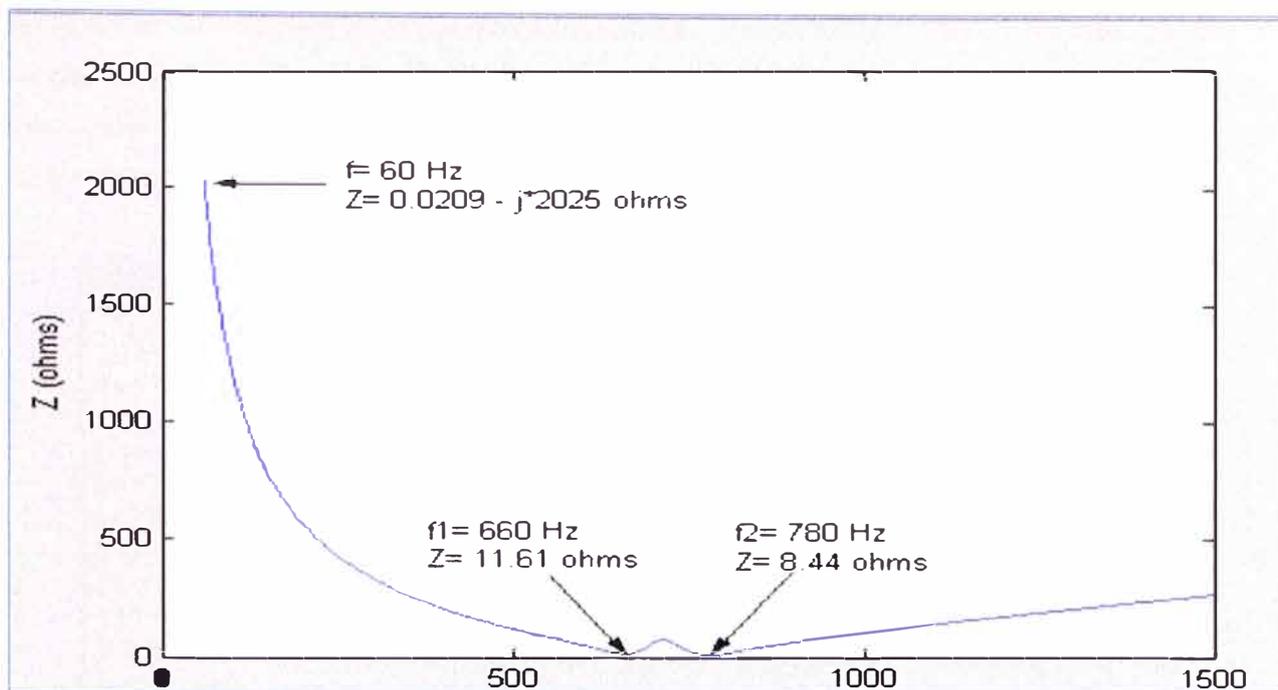
En la figura.4.6 se muestra los parámetros de entrada ingresadas al MATLAB, se observa el uso de funciones internas para calcular la impedancia final del filtro, la figura 4.7 muestra el valor final de la impedancia evaluada a diferentes frecuencias.

```

Command Window
>> [Ca, Cb, La, Lb]=Parametros_sinto2(11,13,315*10^3,49*10^6);
[C1,L1,C2,L2,R]=sintonia_doble(Ca,Cb,La,Lb,16,11,13);
fn=60:1:2500;
[a,moda]=calculo_impedanciaf2(C1,C2,L1,L2,R,fn);
plot(fn,moda)
grid on
axis([0,1500,0,2500]);
plot(fn,moda)
>> grid on
>>

```

Fig.4.6. Parámetros de entrada, para el cálculo de impedancia del filtro de doble sintonía .



**Fig.4.7.** Filtro sintonizado doble para 11° y 13° armónica; 315 kV, 49 Mvar, Q = 16 (Factor de calidad)

**Filtro de segundo orden:**

Son conocidos también como filtros amortiguados o paso alto, los más empleados son los de segundo y tercer orden y el filtro tipo C. Para este tipo de filtros se obtiene al igualar a cero la derivada del módulo de la impedancia al cuadrado con respecto a la frecuencia de sintonía n: La **tabla N° 4.8** describe el resumen de parámetros del filtro 2° Orden.

**TABLA N° 4.8.** Descripción de fórmulas y esquemas de un Filtro de segundo Orden

Esquema	Ecuaciones
	$Z = \frac{R(jX_L \cdot n)}{R + jX_L \cdot n} - \frac{jX_C}{n}$
	$X_C \approx \frac{V_n^2}{Q_1} \times \frac{1}{1 - (\sqrt{(1 + Q^2)^2 + 1} - 1) / (n^2 Q^2 + 1)}$
	$R = \frac{X_C}{n \cdot Q} \left( \frac{1}{\sqrt{(1 + Q^2)^2 + 1} - 1} \right)$
	$Q = nX_L \cdot R$

En la figura 4.8 muestra los parámetros de entrada ingresadas en el MATLAB, se utilizan funciones internas para calcular la impedancia final del filtro de segundo orden, L figura 4.9 muestra el valor final de la impedancia evaluada a diferentes frecuencias ya diferentes factores de calidad (Q). [7].

```

Command Window
>> clear
[C,P,L]=Calc_par_segundoOrden(315*10^3,49*10^6,24,10);
fn=60:60:6000;
[z,modz]=calc_Z2Orden(C,P,L,fn);
plot(fn,modz);
grid on
>> clear
[C,P,L]=Calc_par_segundoOrden(315*10^3,49*10^6,25,10);
fn=60:60:3000;
[z,modz]=calc_Z2Orden(C,P,L,fn);
plot(fn,modz);
grid on

```

Fig.4.8. Parámetros de entrada en el filtro sintonizado doble para 11°y 13° armónica; 315 kV, 49 Mvar, Q = 16 (Factor de calidad)

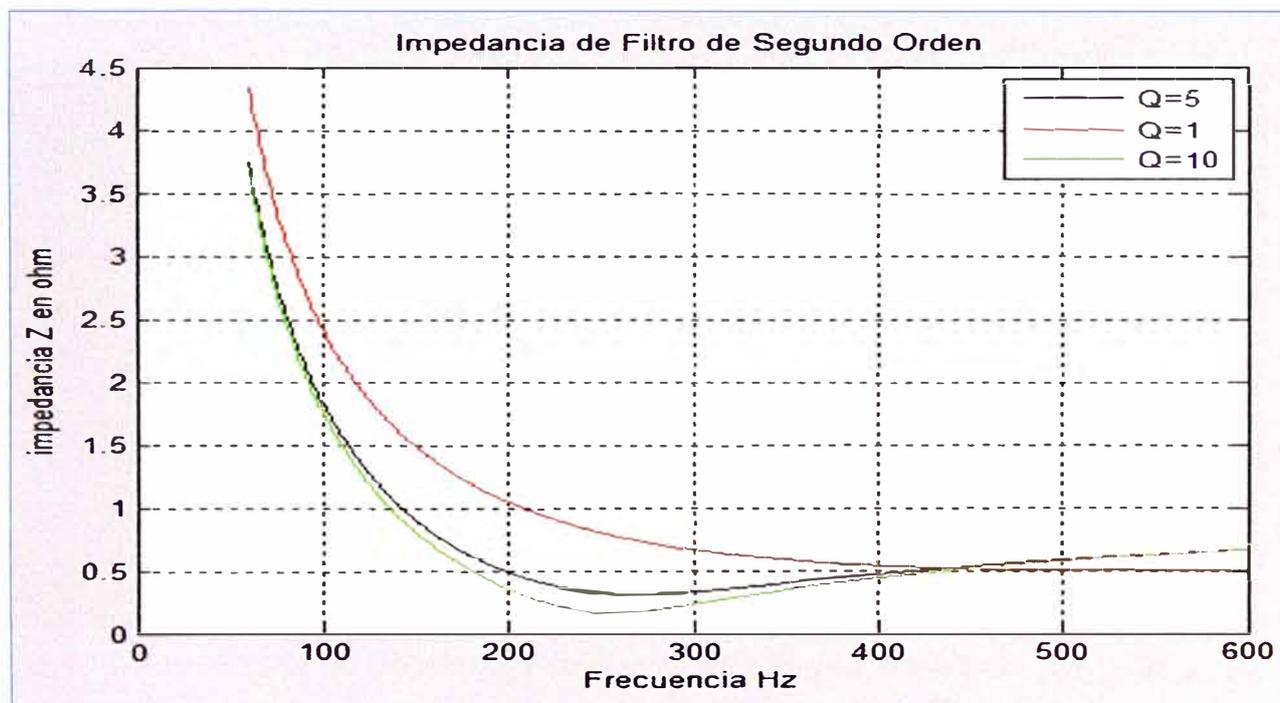


Fig.4.9. Impedancia Vs frecuencia

### 4.2.3 Aplicaciones de las reactancias línea o choke

A continuación presentamos algunas imágenes tomadas en campo en variadores de velocidad ROCKWELL. Ver figura 4.10 muestra el circuito de potencia de una variador PWM, en la figura 4.11 se muestra imágenes tomadas en un variador ROCKWELL [8].

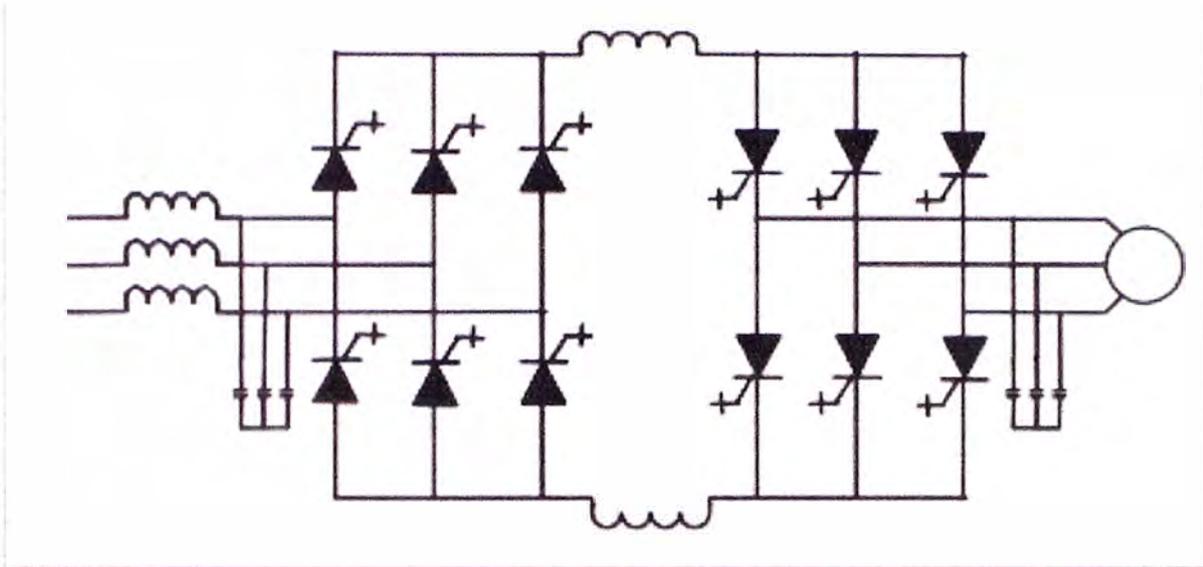


Fig.4.10. Diagrama de un variador del Tipo AFE conocido también como PWM.



Fig.4.11. A la derecha se muestra una reactancia DC conocida como DC-link, a la izquierda muestra una reactancia en AC utilizado en Drives del tipo PWM [9].

### 4.3 Apreciaciones relevantes.

Para evitar estos efectos por la presencia de armónicos es necesario conocer las diferentes técnicas de mitigación y eliminación de armónicos que existe en el mercado. Es importante tener presente que hoy en día los diferentes fabricantes de convertidores electrónicos (ABB-SIEMENS- SCHNEIDER – ROCKWELL, GENERAL ELECTRIC, etc.) fabrican drives de diferentes potencias tanto en BT como en MT, estos equipos cuentan con componentes diseñados para realizar la mitigación de armónicos, como Ingenieros Electricistas es necesario conocer estas técnicas de mitigación de armónicos, conocer estos criterios permitirá tomar decisiones acertadas en diferentes áreas: En la **tabla N°4.9** se presenta un resumen de los beneficios de conocer los criterios de eliminación de armónicos en las diferentes áreas de una empresa.

**TABLA N° 4.9.** Descripción de beneficios presentados en cada área de una empresa

ÁREA	Beneficio de conocer técnicas de mitigación de armónicos
Ingeniería y proyectos	Mejorar los criterios de diseño Eléctrico de plantas industriales. Los planos de ingeniería serán realizados tomando en consideración aislar las fuentes de armónicas, con este criterio se lograra evitar la inyección de armónicos a las fuentes o barras principales.
Mantenimiento	Se lograra identificar los componentes del drive (variador de velocidad - cicloconvertidor) asociados a la tarea de mitigación de armónicos, asignándose tareas específicas de mantenimiento y medición de parámetros.
Coordinador de Materiales	Obtener un mayor criterio en el plan de reemplazo de drives antiguos por nuevos drives, el conocimiento de las técnicas de mitigación de armónicos permitirá identificar la repercusión que tendrá la red eléctrica al realizar un cambio de tecnología en los nuevos drives.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

### Conclusiones:

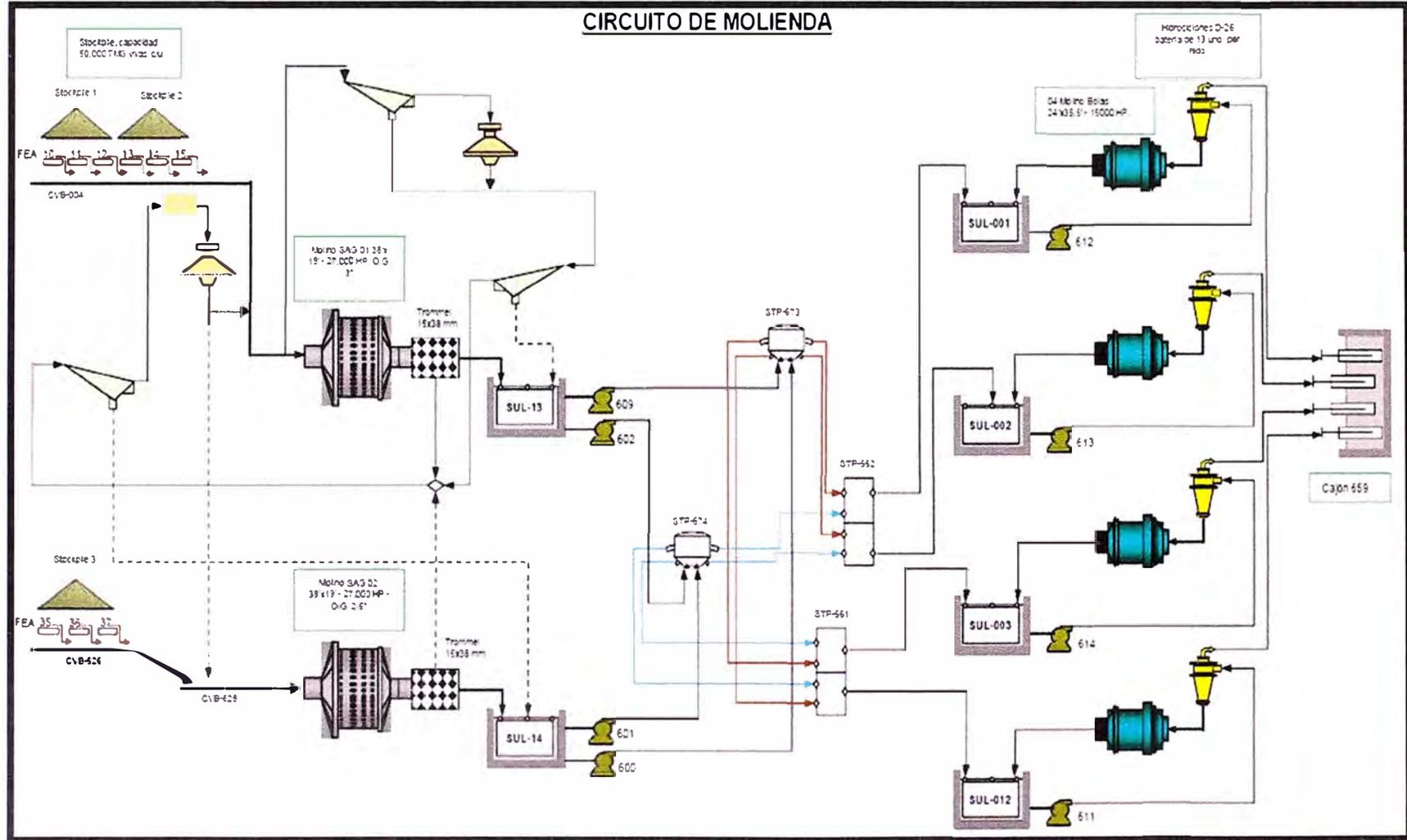
1. La mitigación de armónicos en rectificadores multipulsos consta de elementos diferenciados, los transformadores de aislamiento son utilizadas para eliminar armónicas de bajo orden (3°, 5°, 7°, 11°, 13°) la modulación PWM también tiene este mismo enfoque: “eliminar armónicas de orden menor”.
2. Mientras mayor sea el número de pulsos del rectificador mucho más eficiente es la eliminación de armónicos, sin embargo los transformadores que alimentan estos rectificadores son costosos por lo que tendrá que realizarse un balance técnico económico para la selección del tipo de rectificador.
3. Existe gran variedad de filtros pasivos, los más utilizados son los filtros tipo shunt, es importante realizar un estudio de calidad de la energía de las barras y cargas principales para lograr definir el tipo de filtro shunt.
4. El filtro sintonizado simple proporciona una máxima atenuación para una armónica individual, también puede proporcionar la potencia reactiva requerida en la red, y tiene bajas pérdidas, pero es vulnerable a la desintonía debido a la tolerancia de los elementos con la temperatura, pudiendo originar una resonancia paralela al igual que un banco de condensadores.
5. Utilizar la modulación PWM permite evitar la generación de armónicos de bajo orden (armónicos de baja frecuencia) pero origina armónicos de alto orden, por lo que será necesario mitigar estos armónicos de alta frecuencia con filtros pasivos o con reactancias en línea conocidas también como choke.
6. La modulación PWM depende del índice de modulación  $n = \frac{f_s}{f_m}$  mientras mayor sea este índice se lograra evitar la generación de armónicos de bajo orden pero aumentarían las pérdidas de conmutación del tiristor o transistor.

**Recomendaciones:**

1. Para tener un mejor manejo de los armónicos en una planta industrial se recomienda agrupar las cargas perturbadoras y las cargas sensibles, Separar e independizar las fuentes de alimentación, en la etapa de proyecto considerar todas las cargas no lineales, esta consideraciones permitirán realizar un óptimo diseño de la planta industrial.
2. El uso de rectificadores de 06 pulsos tiene que ser utilizado con las restricciones establecidas en el informe, se necesita un número par de cargas no lineales alimentadas desde una misma barra, estas cargas tienen que ser de potencias, iguales o aproximadas, cumplir estas condiciones permitirá garantizar la confiabilidad del equipo.
3. Es necesario realizar un seguimiento de las temperaturas de operación y valores de aislamiento de los transformadores multipulsos, de esta manera se lograra prevenir fallas y tomar acciones inmediatas.
4. Los variadores de velocidad tipo PWM son variadores de velocidad modernos, cuentan con un mejor control de armónicos, se sugiere realizar un proceso de reemplazo progresivo, incentivando el uso de este tipo de variadores de velocidad.

# ANEXOS

## Anexo A: Diagrama de procesos de la planta Concentradora Antamina



## BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Gilberto Enriquez Harper, "La calidad de la energía eléctrica", Editorial LIMUSA SAC. DE CV GRUPO NORIEGA EDITORES, Primera Edición México
- [2] IEEE STD 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [3] D.P. Kothari & I.J. Nagrath, "Sistemas Eléctricos de Potencia", McGraw-Hill Interamericana, tercera Edición, México.
- [4] Salvador Acevedo P. – "Conexiones de transformadores para eliminar Armónicos", - Departamento de Ingeniería Eléctrica ITESM, Campus Monterrey
- [5] Roger C. Dugan, "Electrical Power Systems Quality", McGraw Hill, Segunda edición.

### **Páginas Web:**

- [6] <http://www.slideshare.net/dante1665/teoria-completa-de-variadores>
- [7] [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012012000200006&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012012000200006&script=sci_arttext)

### **Manuales técnicos:**

- [8] ROCKWELL - PF7000, B Frame, ForGe Control\_User Manual 2013
- [9] AB - MVD1557 Manual de Usuario