

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



FILTROS ACTIVOS EN LA COMPENSACIÓN REACTIVA

EN USUARIOS DE BAJA TENSIÓN

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELÉCTRICISTA

PRESENTADO POR:

JOSÉ AGUSTÍN MUNAYCO CORONADO

PROMOCIÓN

2006 – I

LIMA – PERÚ

2012

**FILTROS ACTIVOS EN LA COMPENSACIÓN REACTIVA
EN USUARIOS DE BAJA TENSIÓN**

Este trabajo lo dedico:
A Dios por ayudarme en todas mis metas propuestas,
A mis padres por su empuje que me brindan,
Y todas las personas que confiaron y ayudaron
de alguna manera en esta meta.

SUMARIO

El presente trabajo nos comentara sobre las definiciones teóricas, fuentes de generación, efectos, normativa técnica que lo regula, tipos de filtros, equipos de medición referente a los Armónicos.

Este trabajo tiene por objetivo evaluar el comportamiento de los Filtros Pasivos y Activos para una Planta industrial con presencia de cargas no lineales, así mismo dar alcances de la aplicación de Filtros Activos en una Planta industrial en una red de baja tensión de un caso practico, así como comparar las ventajas y desventajas entre los Filtros Pasivos y Activos, en su empleo en la amortiguación de armónicos, compensación reactiva para mejorar el factor de potencia, y ante un incremento de la carga no lineal, mediante los resultados de la simulación del caso práctico, empleando el software WinHarmo y Matlab - Simulink.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
MEDICIÓN Y RESULTADOS DE ARMÓNICOS DE UNA PLANTA INDUSTRIAL	
1.1 Descripción de la Planta	3
1.2 Medición de Armónicos de la Planta	3
1.3 Resultados	7
CAPÍTULO II	
DEFINICIONES TEÓRICAS	
2.1 Definición de Armónico desde el Punto de Vista eléctrico	8
2.2 Fuentes Generadoras de Armónicas	8
2.3 Efectos de los Armónicos	16
2.3.1 Factor de Distorsión Armónica Total (THD)	16
2.3.2 Efectos en los Equipos y/o Componentes del Sistema eléctrico	16
2.3.3 Resonancia	20
2.4 Normatividad Técnica	22
CAPÍTULO III	
TIPOS DE FILTROS	
3.1 Filtro Pasivo de Conexión Paralela	25
3.2 Filtro Activo de Conexión Paralela	26
3.2.1 Esquema de Conexión de Filtros Activos	29
CAPÍTULO IV	
MEDICIÓN Y ANÁLISIS PARA LA AMORTIGUACIÓN DE LOS ARMÓNICOS	
4.1 Instrumentos de Medición	32
4.2 Simulación de Filtros Armónicos de un Caso Práctico	36
4.2.1 Descripción del Circuito del Caso Práctico	37
4.2.2 Diagrama Unifilar del Caso Práctico	37
4.2.3 Descripción del Problema encontrado en el Caso Práctico	37
4.2.4 Simulaciones utilizando Filtros para la Reducción de	38

Armónicos del Caso Práctico

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y MEJORAS DEL CASO PRÁCTICO

EMPLEANDO FILTRO ACTIVO

5.1 Resultados y Mejoras de Simulación con Banco de condensadores
empleando Filtro Activo 45

5.2 Resultados y Mejoras de Simulación ante Variación de la
Carga no lineal 46

5.3 Ventajas y Desventajas de Filtros Activos y Pasivos 47

CONCLUSIONES 49

ANEXO 50

Anexo A: Especificaciones Técnicas de Filtros Activos de Baja Tensión 51

BIBLIOGRAFÍA 55

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el incremento de los equipos electrónicos es un fenómeno, sus aplicaciones desde la menor potencia, como alumbrado con balastos electrónicos y computadoras, hasta aplicaciones de mayor potencia como variadores de velocidad, sistemas de alimentación ininterrumpida y rectificadores de corriente continua, dan una variedad de los equipos diseñados para las necesidades actuales. Los equipos electrónicos antes mencionados basan su funcionamiento en componentes de electrónica de potencia tales como diodos, tiristores, transistores, triac's y diac's. Estos componentes son los causantes, en general, de las perturbaciones eléctricas y en particular de los armónicos. Estos equipos hacen que el trabajo se simplifique, que la calidad y cantidad de la producción aumente, pero el incremento de los mismos ha venido a afectar al sistema eléctrico, ya que estas cargas no tienen un comportamiento lineal, por lo tanto han incrementado extraordinariamente la existencia de corrientes no senoidales con alto contenido de armónicos.

El incremento de estas cargas no lineales y equipamientos utilizados actualmente, están exigiendo la compensación de las perturbaciones causadas por ellos. La distorsión de la tensión debido a la circulación de las corrientes armónicas se está convirtiendo en uno de los mayores problemas para las empresas distribuidores de energía eléctrica en los niveles de distribución. La presencia de armónicas en las instalaciones eléctricas, originan inconvenientes como elevadas pérdidas en conductores y transformadores, aumento de potencia reactiva circulante, aparición de posibles resonancias, pérdida del rendimiento del equipamiento de distribución [1] [2], reducción de la estabilidad, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros [3].

En este trabajo se estudia el comportamiento de distintos filtros de armónicos de conexión paralela para la mitigación de armónicos de corriente en cargas no lineales. Conocido el espectro armónico que origina la carga, el uso de filtros pasivos sintonizados a los armónicos de interés ofrecen una solución económica al problema planteado, aunque pueden aparecer problemas de resonancia en el sistema. La utilización de filtros activos paralelos evita que aparezcan los problemas de los filtros pasivos, aunque en principio podría ser una solución de mayor coste. No obstante, en este último caso, es

posible implementar estrategias de control más completas, pudiéndose añadir a los objetivos de compensación reactiva, la corrección de potencia reactiva o el equilibrado de la carga.

CAPÍTULO I

MEDICIÓN Y RESULTADOS DE ARMÓNICOS DE UNA PLANTA INDUSTRIAL

1.1 Descripción de la Planta

En el presente capítulo se describe la Medición y resultados del Monitoreo y Registro de los parámetros eléctricos de la Calidad de energía eléctrica en la edificación de una Empresa la cual brinda soluciones de Continuidad a las Operaciones de misión crítica, este a su vez suministra y repara equipos UPS (Sistema de Protección Ininterrumpida), Rectificadores, TTA (Tableros de Transferencia automática) y de Climatización.

1.2 Medición de Armónicos de la Planta

Todas las magnitudes registradas están evaluadas en intervalos de medición de 10 minutos.

Las mediciones han sido realizadas en el Tablero General durante un día. La medición se realizó el 01 de Julio del 2011. En la fig.1.1 se muestra el Diagrama unifilar del Tablero General muestra las cargas de la Instalación eléctrica, la cual está compuesta por los siguientes circuitos:

1er Circuito: Aire acondicionado del 2do piso

2do: Área de Almacén

3er Circuito: Garita del 2do piso

4to Circuito: Tablero UPS del Taller de Pruebas

5to Circuito: Tablero general del Área Taller

6to Circuito: Aire acondicionado del Área taller y Área mantenimiento

7mo Circuito: Alumbrado de garita, Área talleres, Área Otros clientes, Área mantenimiento.

8vo Circuito: Tomacorrientes Talleres, Cafetería.

El Equipo de Medición y Registro utilizado es:

Equipo: 1735 Power Logger Analyst

Marca: Fluke

Fabricación: Estados Unidos

Precisión:

Tensión: + - (0,50% v.M)

Corriente: + - (2% v.M)

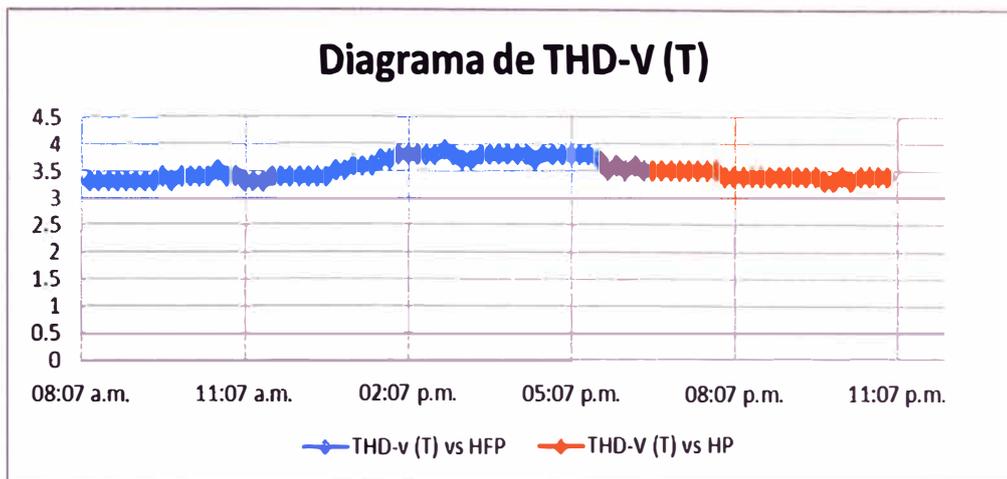


Fig.1.2: Diagrama de THD-V (%) vs Tiempo

En la figura 1.2 se puede visualizar que el máximo valor medido de THD-V en Horario Fuera de Punta (HFP) es 3,90%, y el máximo valor medido de THD-V en Horario de Punta (HP) es 3,60%. Así mismo la tendencia del diagrama THD-V en HFP a HP decrece, esto se debe por el apagado de algunas cargas eléctricas (Área de taller, taller de pruebas, equipos de acondicionado, computadoras y otros) en horario fuera de labores.

Tabla N° 1.2: Orden de Armónicos de Tensión

Orden de Armónico de Tensión – Tablero General											
%	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	THD
L12 Max	0,01	0,09	0,01	3,50	0,00	0,76	0,00	0,02	0,00	0,34	3,40
L23 Max	0,01	0,14	0,01	3,40	0,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,49	3,40
L31 Max	0,02	0,21	0,02	3,89	0,00	0,83	0,00	0,07	0,00	0,49	3,90

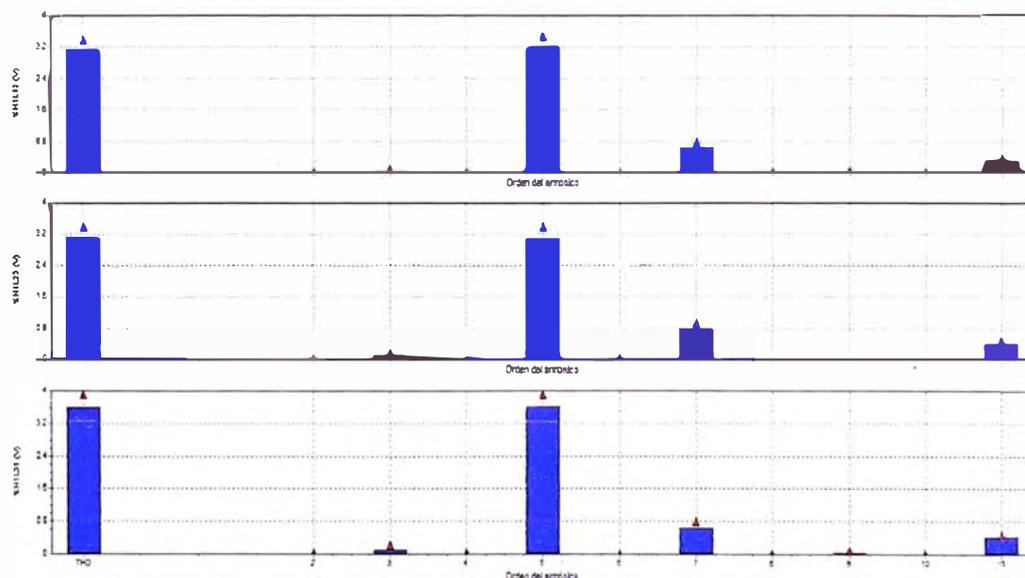


Fig.1.3: Espectro de Armónicos de Tensión THD-V (%)

En las fig.1.4, fig.1.5 siguientes se muestran los gráficos en el cual se puede observar la tendencia de los THD de Corriente durante el tiempo medido, el Espectro de Armónicos

de Corriente, así mismo la tabla N° 1.3 muestra los valores medio y máximo de THD de Corriente por fase, de la Calidad de energía medida en el Tablero General con el equipo Fluke.

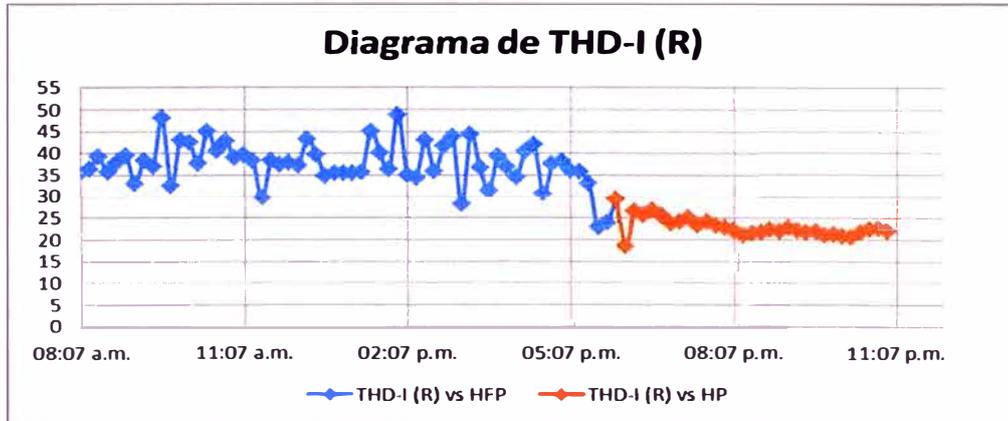


Fig.1.4: Diagrama de THD-I (%) vs Tiempo

En la figura 1.4 se puede visualizar que el máximo valor medido de THD-I en Horario Fuera de Punta (HFP) es 48,70%, y el máximo valor medido de THD-I en Horario de Punta (HP) es 26,80%. Así mismo la tendencia del diagrama THD-I en HFP a HP decrece, esto se debe por el apagado de algunas cargas eléctricas (Área de taller, taller de pruebas, equipos de acondicionamiento, computadoras y otros) en horario fuera de labores.

Tabla N° 1.3: Orden de Armónicos de Corriente

Orden de Armónico de Corriente - Tablero General											
%	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	THD
L12 Max	2,44	37,50	0,69	27,50	0,12	4,30	0,41	3,95	0,24	3,40	48,70
L23 Max	1,31	7,13	0,29	3,69	0,08	1,74	0,10	1,28	0,09	1,80	7,80
L31 Max	0,66	18,40	0,07	9,25	0,02	2,45	0,05	1,02	0,00	1,72	20,00

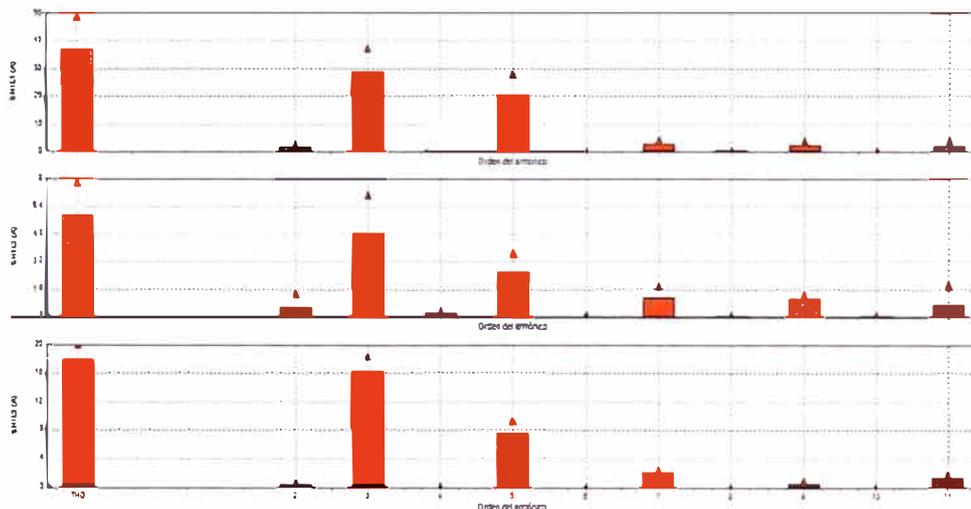


Fig.1.5: Espectro de Armónicos de Corriente THD-I (%)

1.3 Resultados

La medición estos resultados de la Calidad energía, se realizo en el Tablero General de la empresa, ya que la NTCSE en su guía metodológica hace referencia que el punto medición se realiza aguas arriba del medidor de energía, entonces aplicaremos las normas IEC-61000-3-6 y IEC-61000-3-14 para los limites tolerables de Armónicos de Tensión y Corriente respectivamente, ya que estas normas no especifican el punto de medición respecto al medidor de energía. De estos resultados podemos observar lo siguiente:

- ◆ Respecto a las distorsiones de tensión, estos se encuentran con valores por debajo de los límites tolerables de la norma IEC-61000-3-6, en dicha norma se establece como límite máximo para el THD de Tensión un 8%, en este caso los resultados están por debajo del 3,90%. El armónico 5 es el mayor en la empresa, y está dado en U31 máx. con un valor de 3,89%. Si bien dicho valor no es altamente peligroso, es importante tomar en cuenta.
- ◆ Respecto a las distorsiones de corriente, estos se encuentran con valores superiores a los límites tolerables de la norma IEC-61000-3-14, dicha norma establece límites máximos de THD de Corriente para cada orden impar de armónico, para la 3era orden establece un 4% y para la 5ta orden establece un 5%, en este caso los valores en dichas ordenes son muy superiores, para la 3era orden un 37,50% y para la 5ta orden un 27,50%.

CAPÍTULO II

DEFINICIONES TEÓRICAS

En este capítulo comentaremos la definición teórica de los armónicos, fuentes generadoras de estos y sus efectos:

2.1 Definición de Armónico desde el Punto de Vista eléctrico

Una función periódica no senoidal está compuesta por una función senoidal de frecuencia fundamental más una serie de funciones senoidales de frecuencias múltiple entero de la fundamental. Esta serie de funciones senoidales son conocidas como componentes armónicas o simplemente como Armónicos.

En el sistema eléctrico la palabra Armónico se utiliza para designar corrientes o tensiones de frecuencias múltiplos entero de la frecuencia fundamental de la fuente de alimentación. Si la frecuencia de la señal eléctrica es inferior a la fundamental, recibe el nombre de Sub-armónico, ésta podría ocasionar parpadeos luminosos, perceptibles visualmente, denominados Flicker.

Los Armónicos son distorsiones debido al uso de cargas no lineales existentes en el sistema eléctrico.

2.2 Fuentes Generadoras de Armónicas

Las fuentes de armónicas introducen corrientes distorsionadas al sistema eléctrico que al circular por las impedancias de los equipos (transformadores, conductores, generadores, etc.) que la conforman, producen caídas de tensiones armónicas que degradan la forma de onda de tensión en los puntos de suministro de energía a los clientes del sistema eléctrico.

A continuación se describe de manera resumida algunos equipos eléctricos que generan armónicos y que normalmente se encuentran en la mayoría de las instalaciones eléctricas.

a) Convertidores con Hornos de Arcos

El horno de arco fig.2.1, por ser una carga eléctrica de características no lineales, es una fuente de generación de corrientes armónicas en forma aleatoria. En este caso se producen armónicos por las variaciones aleatorias en los instantes de establecimiento del arco. Adicionalmente, las fluctuaciones de tensión debido a variaciones rápidas de la longitud del arco producen una gama de frecuencias, predominantemente en el intervalo

0.1-30 kHz a cada lado de los armónicos característicos. Este efecto es más causado durante el proceso de fusión debido al movimiento continuo de la chatarra y a la interacción de las fuerzas electromagnéticas producidas por los arcos.

Durante el proceso de refinado el arco es más estable aunque todavía existe una modulación de su longitud por las ondulaciones que se producen en las superficies de metal fundido. Los hornos de arco utilizados en la Siderurgia pueden ser de corriente alterna o de corriente continua.

Los niveles de corrientes armónicas varían en forma marcada con el tiempo y se presentan comúnmente en formas de gráficas probabilísticas. Un punto importante es que la armónica " n ", como por ejemplo la 5^{ta}, no solamente varía con el tiempo, sino con respecto a la componente fundamental. Por tal motivo los hornos de arco eléctrico son cargas que no se encuentran en estado estable.

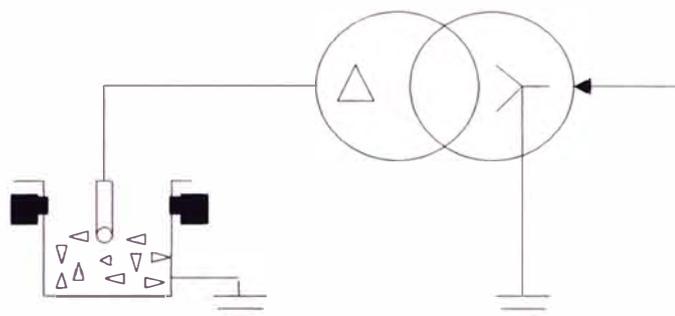


Fig.2.1: Configuración típica de Horno de Arco [4]

b) Transformadores

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

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

Al des-energizar un transformador, es posible que tenga flujo magnético residual en el núcleo. Cuando se re-energiza la unidad, la densidad de flujo puede alcanzar niveles de

pico de hasta tres veces el flujo de operación normal. Esto puede llevar al núcleo del transformador a niveles extremos de saturación y producir amperes-vuelta excesivos en el núcleo.

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

El decremento de esta corriente con el tiempo es función principalmente de la resistencia del devanado primario. Para transformadores muy grandes, esta corriente puede permanecer por muchos segundos, debido a su baja resistencia.

Los transformadores y máquinas rotativas modernas bajo operación en estado estable no ocasionan por sí mismas distorsión significativa en la red. Sin embargo, durante disturbios transitorios y cuando operan en rangos fuera de su estado normal, entonces pueden incrementar su contenido en forma considerable.

c) Máquinas Rotativas

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

Como resultado del contenido armónico de la distribución de la f.m.m. se producen armónicas en el tiempo que son dependientes de la velocidad. Estas armónicas inducen una f.e.m. (fuerza electromotriz) en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda.

d) Variador de Velocidad

Los variadores de velocidad son equipos que sirven para el control de motores y son utilizados en todos los sectores de la producción.

El circuito del variador de velocidad se representa en la fig 2.2:

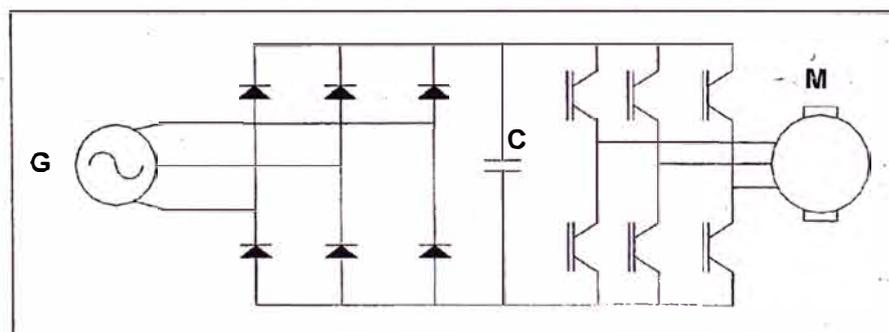


Fig.2.2: Circuito de Variador de velocidad [4]

La figura 2.3 muestra la forma de la onda típica de corriente y tensión que genera un variador de velocidad. (La forma de onda varía según el número de pulsos del rectificador que tiene el variador el cual puede ser 6, 12, 18, etc.)

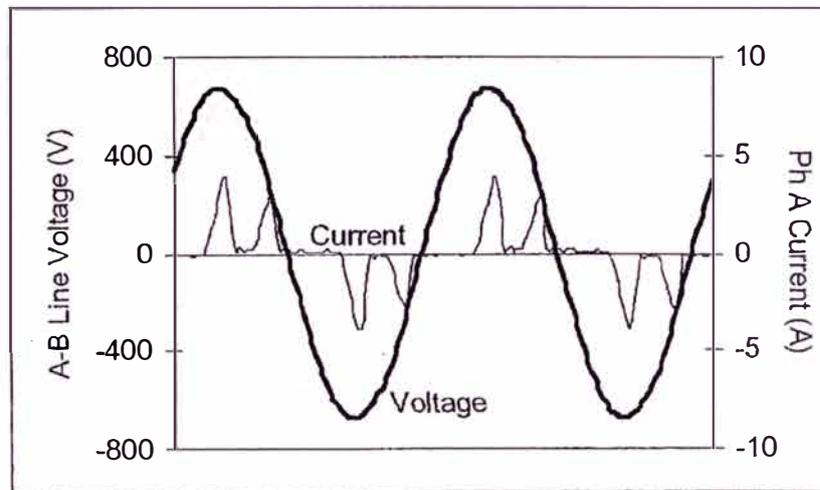


Fig.2.3: Ondas de Corriente y Tensión de un Variador de Velocidad [4]

La figura 2.4 muestra la forma de onda de corriente generado por un variador de velocidad de 6 pulsos.

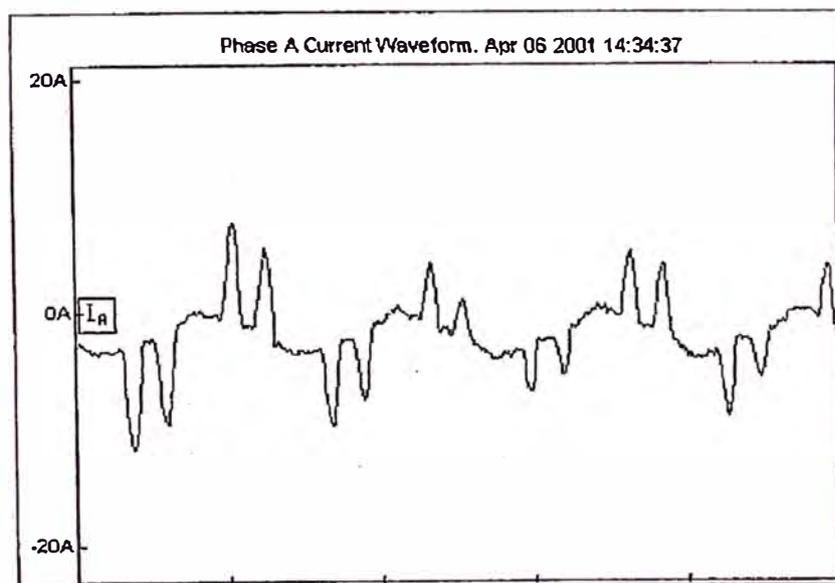


Fig.2.4: Ondas de Corriente por un Variador de Velocidad de 6 pulsos [4]

Analizando el espectro de armónicos (Fig.2.5) se observa que el THD de Corriente es de 85,34%, lo que nos da una idea de lo altamente contaminante que es esta carga, que en ocasiones llega a perturbar a su propio control electrónico. También se puede observar la magnitud de los armónicos individuales es elevada comenzando por el quinto, el cual tiene un valor de 62,70% de la corriente fundamental, seguido del séptimo con 50,68%, el décimo primero con 21,37%. Además hay que resaltar el elevado factor de cresta, que

provoca una corriente de pico muy elevada e inestable debido a las corrientes de arranque y paradas. (El FC de la onda es de 3,25).

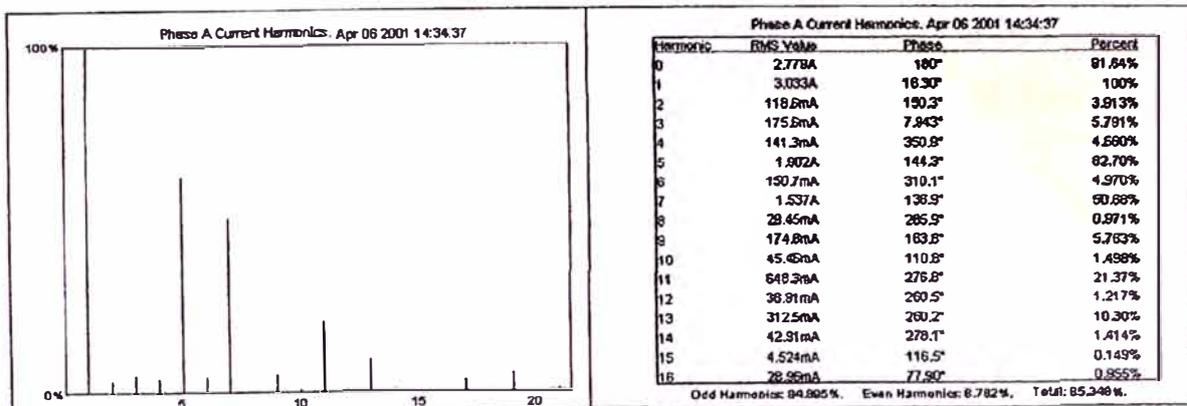


Fig.2.5: Espectro de Armónicos de Corriente [4]

e) Armónicos causados por Lámparas de Arco

En las instalaciones modernas normalmente se utilizan el alumbrado con las lámparas de descarga y tubos fluorescentes, las cuales son fuentes de corrientes armónicas. El porcentaje individual del armónico del 3er orden puede incluso sobrepasar fluocompactas modernas, y por tanto hay que prestar una atención especial en el cálculo de la sección y la protección del neutro que transporta la suma de las corrientes armónicas del 3er orden de las tres fases, lo que implica un riesgo de calentamiento.

La figura 2.6 muestra el circuito básico de una lámpara fluorescente conectada en estrella.

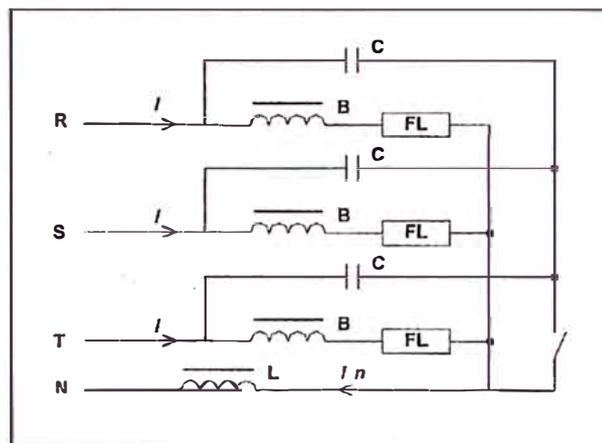


Fig.2.6: Circuito básico de una Lámpara fluorescente [4]

La iluminación por lámparas de descarga tiene características altamente no lineales y da lugar a la generación de corrientes armónicas de orden impar. Este efecto está claramente representado en la forma de onda de tensión y corriente (fig.2.7, fig.2.8, fig.2.9 y fig.2.10) que se genera en cada fase y el neutro de un sistema eléctrico con una

configuración estrella.

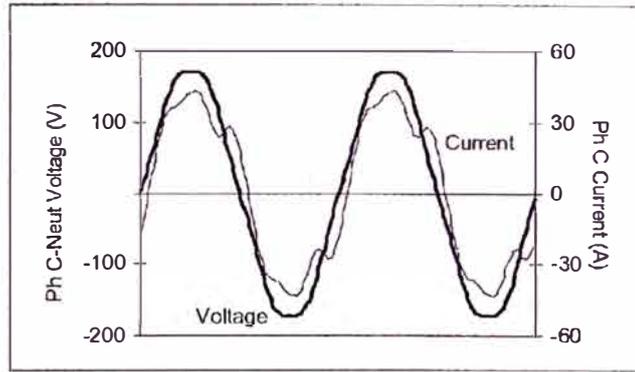


Fig.2.7: Tensión de fase vs Corriente de línea (con balasto magnetico) [4]

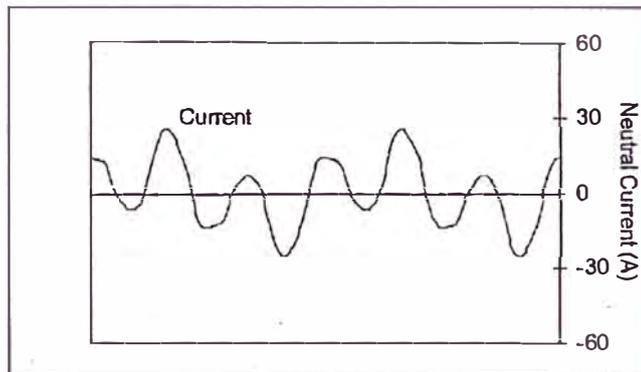


Fig.2.8: Corriente en el Neutro (con balasto magnetico) [4]

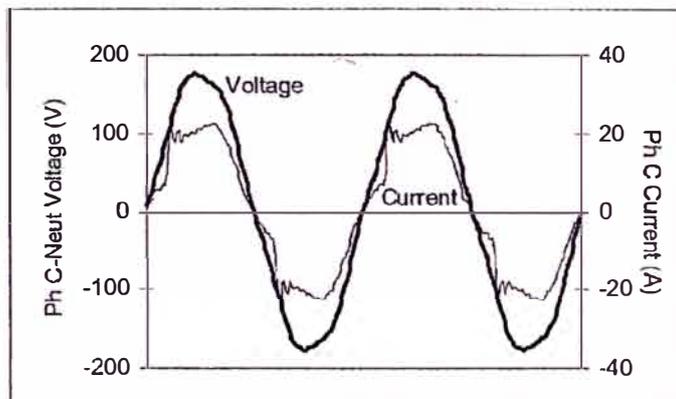


Fig.2.9: Tensión de fase vs Corriente de línea (con balasto electronico) [4]

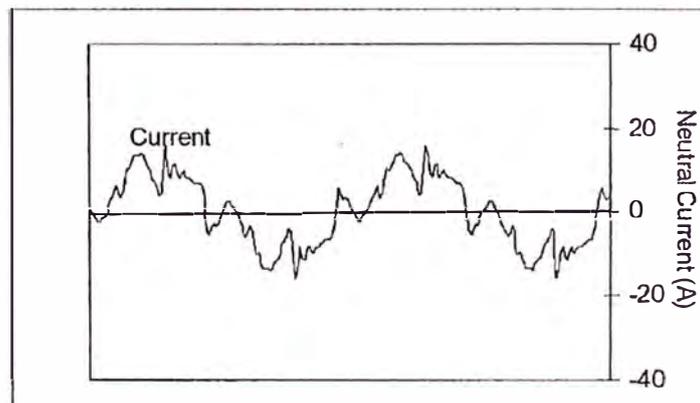


Fig.2.10: Corriente en el Neutro (con balasto electronico) [4]

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

En una instalación trifásica 4 hilos, los armónicos múltiplos de 3 se suman al neutro y el tercer armónico es el dominante. De las figuras 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10 mostradas se obtiene la tabla N° 2.1 siguiente, el cual muestra los porcentajes individuales de cada armónico.

Tabla N°2.1: Resultado de armónicos de las fig.2.7, fig.2.8, fig.2.9 y fig.2.10. [4]

Armónicos	Balastro magnético		Balastro electrónico	
	Fase (%)	Neutro (%)	Fase (%)	Neutral (%)
THD de Corriente	12,8	171,2	16,3	44,0
3ro	10,6	169,8	3,6	11,9
5to	6,7	16,6	11,7	31,6
7mo	1,6	3,3	5,2	3,7
9no	0,8	12,7	3,9	20,1
THD de Tensión	2,7		3,7	

f) Convertidores Estáticos en la Red Trifásica

Los puentes rectificadores y en general los convertidores estáticos (Diodos y tiristores), son generadores de corrientes armónicas. Por ejemplo, en un puente de Graetz (fig.2.11), la corriente continua consumida hace aparecer una corriente no senoidal, que cuando la carga es muy inductiva tiene forma escalonada (fig.2.12), o tiene unos picos cuando el puente de diodos se conecta un condensador (fig.2.13), como en el caso:

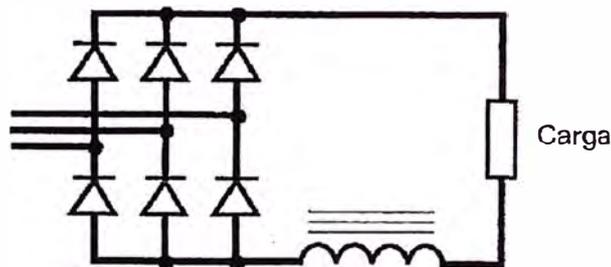


Fig.2.11: Puente de Graetz. [4]

Las componentes armónicas características generadas de las crestas de la corriente de alimentación de los rectificadores son del orden 'n', donde:

$$n = (k.p) \pm 1 \quad (2.1)$$

Donde:

k: 1, 2, 3, 4, 5

p: Numero de ramas del rectificador

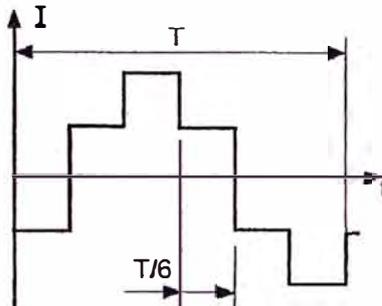


Fig.2.12: Corriente Alterna aguas arriba de un rectificador de Graetz que produce corriente continua perfecta sobre una carga muy inductiva [4]

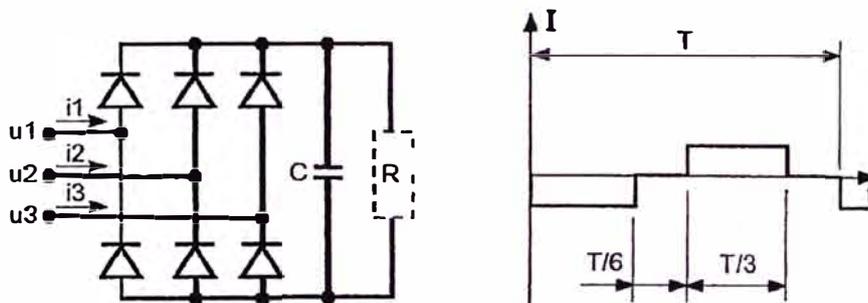


Fig.2.13: Corriente Alterna aguas arriba de un Rectificador [4] en puente de Graetz seguido de un condensador

Los puentes mixtos (diodos-tiristores) son generadores de armónicos de orden par. Su empleo se limita a pequeñas potencias ya que el armónico de orden 2 es muy molesto y difícil de eliminar.

Los otros convertidores de potencia tales como los graduados (reguladores), los ciclo-convertidores, etc. tienen espectros variables y mayor nivel de armónicos que los rectificadores. Destaquemos que se van sustituyendo por los rectificadores de técnica PWM (Modulación de ancho de pulso) que trabajan con una frecuencia de corte de unos 20kHz y que están diseñados para producir un nivel de armónicos muy bajo.

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

Así como en televisores, radios, estéreos y otros artículos que emplean corriente directa, los cargadores de baterías producen corrientes de secuencia cero de armónicas triples, las cuales sobrecargan al circuito neutro. Para empeorar las cosas, la luz fluorescente también produce armónicas triples con la misma relación de fase. Más aún, el ángulo de

fase de la tercera armónica no varía lo suficiente como para sumar cancelación de armónicas al operar varios cargadores de baterías, de tal manera que las terceras armónicas se suman casi algebraicamente.

g) Fuentes de Poder en modo de conmutación.

La mayoría de los equipos electrónicos tales como computadores personales, máquinas copadoras y fax, cuentan con una fuente regulada por conmutación (switch-mode power supply). Estas fuentes demandan corriente en un pulso corto de cada medio ciclo. Cuando la tensión se encuentra cerca de su valor máximo. La corriente demandada por estas fuentes tiene una alta distorsión armónica total y un alto contenido de tercera armónica.

2.3 Efectos de los Armónicos

Los armónicos de tensión y de corriente superpuestos a la onda fundamental conjugan sus efectos sobre los aparatos y equipos utilizados, con:

- Efectos Instantáneos: Son efectos producidos en el mismo instante en que los dispositivos electrónicos están operando, por ejemplo las tensiones armónicas pueden perturbar los dispositivos de regulación.
- Efectos retardados: Produce fatiga mecánica en las maquinas eléctricas, conductores, etc., debido a las vibraciones, el efecto más importante a largo plazo producido por los armónicos, es el calentamiento.

Es evidente la necesidad de limitar los armónicos producidos e inyectados por los usuarios en el sistema eléctrico para que los problemas antes mencionados sean eliminados o reducidos a niveles aceptables por normas reconocidas.

2.3.1 Factor de Distorsión Armónica Total (THD)

Determina el grado de distorsión de una señal periódica con respecto a la senoidal y se define en términos de la amplitud de los armónicos.

THD para Tensión (THD-v)

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \quad (2.2)$$

THD para Corriente (THD-I):

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (2.3)$$

2.3.2 Efectos en los Equipos y/o Componentes del Sistema eléctrico

a) Transformadores

Los efectos de las armónicas en los transformadores son:

1. Incremento en las pérdidas del cobre
2. Incremento en las pérdidas del hierro
3. Posible resonancia entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea

4. Esfuerzos de aislamiento

b) Motores Asíncronos

La circulación de corrientes armónicas por los devanados del motor provoca calentamiento en el mismo, lo que puede poner en peligro el aislamiento térmico del arrollamiento. En ciertos casos se puede llegar a provocar cortocircuitos y llegar a destruir el motor.

Por otra parte, los armónicos pueden provocar que el motor tienda a ir más rápido o más lento de lo que debiera, ver fig.2.14 (debido a campos magnéticos del mismo sentido que la componente fundamental o de sentido contrario producido por los armónicos), esto provoca una pérdida de rendimiento, se fuerza al motor, se reduce la vida efectiva del mismo.

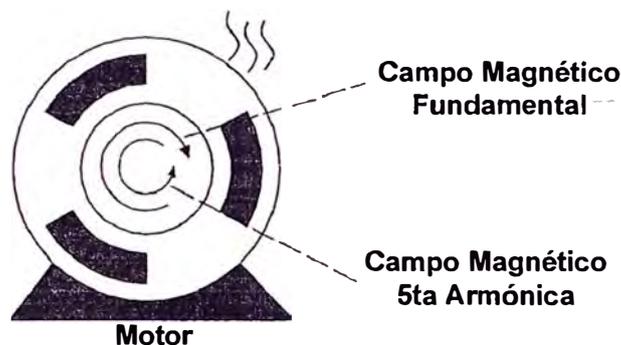


Fig.2.14: Campo magnético del 5to armónico [4]

c) Alternadores

Como en los transformadores, los armónicos producen pérdidas adicionales en los bobinados y en el circuito magnético y acoplamientos pulsantes que provocan vibraciones y calentamientos adicionales en los amortiguadores.

d) Calentamiento en Conductores, Neutros y Otros Equipos

El calentamiento es uno de los efectos más importantes de los armónicos. Se puede producir en los devanados de los transformadores, motores, conductores en general y especialmente en el conductor neutro.

Debido al efecto 'Skin', a medida que la frecuencia de la tensión o corriente aumente, la corriente tiende a circular por el exterior del conductor desaprovechando parte de la sección, lo que significa que aumenta la resistencia del cable. Esta mayor resistencia, unida a la circulación por el exterior provoca un aumento en la temperatura del cable, con el consiguiente peligro de dañar el aislamiento del mismo y llegar, en ciertos casos, a quemar; siempre y cuando el cable no está protegido, contra el fuego. Además, en el caso de motores, este calentamiento y deterioro del aislamiento puede provocar cortocircuitos en los devanados reduciendo el tiempo de vida de este y para la instalación.

Este efecto en los conductores neutros son los más perjudicados, ya que la mayoría de estos conductores están diseñados a tener una sección igual a la mitad de la sección de los conductores de fase, por la razón de que cuando el sistema está equilibrado la corriente por el neutro debería ser cero. Existe un tipo de armónicos que se caracteriza por circular por el neutro, independientemente si el sistema está o no equilibrado. Esto provoca que la frecuencia de la corriente del neutro pueda ser 150hz (3er armónico) y que su valor eficaz pueda tener un valor elevado; en particular este tipo de corrientes es la suma de las corrientes armónicas que circulan por las fases.

e) Sistemas de Protección

Las señales de armónicos pueden tener un valor de corriente eficaz RMS muy pequeño y, sin embargo, alcanzar un valor pico muy grande. Este efecto hace que muchos equipos de protección diferenciales y de imagen térmica actúen en cualquier momento sacando fuera de servicio cargas importantes.

Los equipos de protección térmicos saltan porque, aunque la corriente eficaz está dentro de los márgenes, los armónicos provocan calentamientos, lo que supone un aumento de temperatura y por lo tanto su disparo.

En lugares con muchos ordenadores, fotocopiadoras e impresoras es fácil que se pongan de manifiesto estos efectos; el que se repitan con mayor o menor frecuencia dependerá del número, del tipo de elementos conectados, si son o no del mismo fabricante y cuál es la distribución eléctrica de estos equipos.

f) Equipos de Medición

Los medidores e instrumentos son afectados por la presencia de tensiones y corrientes armónicas. Aparatos de disco de inducción, tales como vatímetros y relevadores de sobre-corriente son diseñados y calibrados solamente para la corriente y tensión fundamental.

La presencia de corrientes y tensiones armónicas generan un par electromagnético adicional en el disco causando operaciones erróneas. La distorsión debe ser severa (mayor del 20%) para que se detectan errores importantes.

g) Vibraciones y Acoplamientos

Las frecuencias altas de los armónicos y las subidas y bajadas rápidas de las señales distorsionadas provocan interferencias electromagnéticas que pueden ser radiadas o conducidas. Las interferencias electromagnéticas pueden provocar vibraciones en tableros eléctricos y transformadores y/o acoplamientos en redes de comunicación como las de telefonías o redes de ordenadores. En comunicaciones telefónicas este ruido supone un deterioro en la calidad de la comunicación, impidiendo la percepción nítida con nuestro interlocutor. En comunicación de datos, como la que se produce en las redes de

ordenadores, este ruido puede provocar errores en la información y, en casos extremos, que esta comunicación no sea posible, teniendo que utilizar cables especiales apantallados para que la transmisión sea fiable.

h) Deterioro de la Forma de Onda de Tensión

Cuando la instalación eléctrica tiene una gran cantidad de armónicos de corriente, estas pueden provocar una deformación de la forma de onda de tensión, llegando a presentar achatamientos o aplanamiento en la parte superior e inferior de la forma de onda, ver fig.2.15. Este aplanamiento hace que la señal no alcance el valor pico adecuado, provocando el mal funcionamiento de los puentes de diodos, ver fig.2.16, que se encuentran en fuentes de alimentación o convertidores de frecuencia, que consumen corriente cuando la señal de tensión alcanza su valor máximo.

Esto hace que los diodos no trabajen en condiciones de operación nominales teniendo como consecuencia reducción del tiempo de vida o provocando paradas intempestivas en los variadores de velocidad, discos duros quemados ó re-iniciaciones de las computadoras, parpadeo de la iluminación, etc.

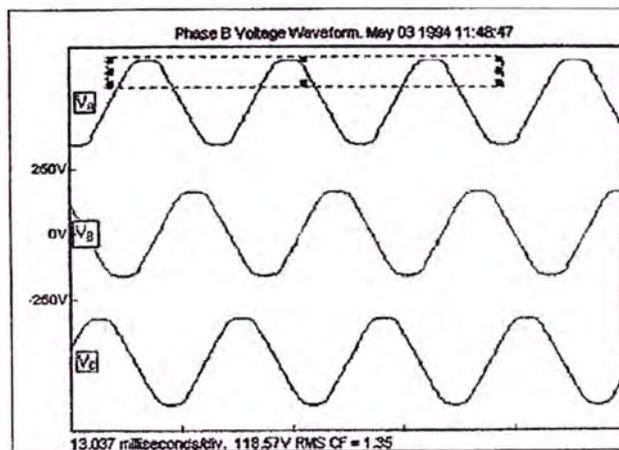


Fig.2.15 Forma de Onda de Tensión Achatada [4]

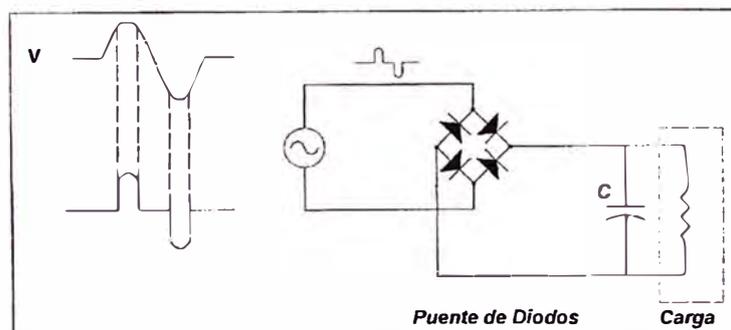


Fig.2.16: Esquema de operación de los diodos [4]

i) Tensión entre Neutro y Tierra distinta de Cero

La circulación de corriente por el conductor del neutro, ver fig.2.17, provoca una caída de tensión entre neutro y tierra, ya que la resistencia del cable no es cero.

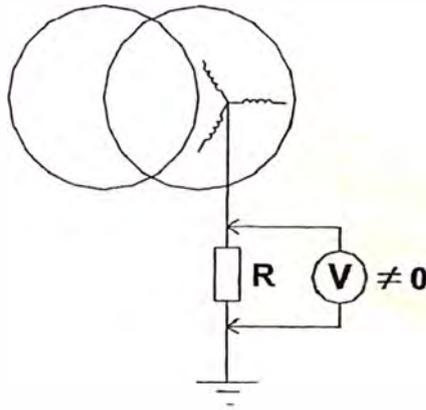


Fig.2.17: Circulación de corriente por el neutro [4]

Estas tensiones perjudican la calidad de la red y pueden tener efectos sobre las redes de ordenadores, comunicaciones digitales, etc. Por ello no solo conviene mantener la tensión entre neutro y tierra cerca de 0 voltios sino que es recomendable que las instalaciones tengan un buen sistema puesta a tierra y que cada equipo o maquina vaya conectado independientemente a tierra, sin formar lazos entre equipos que favorezcan no solo la circulación de corrientes parasitas sino que aumente el riesgo de daños en los equipos.

j) Condensadores

Los condensadores disminuyen su impedancia con la frecuencia, es decir, a mayor frecuencia mayores posibilidades que se generen corrientes parasitas, acoplamiento entre cables, mal funcionamiento de los dispositivos de protección, etc. El efecto sobre los condensadores es una sobrecarga que puede llegar a quemarlos.

Por otra parte, las existencias de inductancias en algún punto de la instalación tiene el riesgo de que se produzca condiciones de resonancia en los condensadores.

2.3.3 Resonancia

La resonancia es el fenómeno que se produce en un circuito, en el que existen elementos reactivos (X_L y X_C), cuando es recorrido por una corriente alterna de una frecuencia tal que hace que la reactancia equivalente se anule (resonancia serie) o se haga máxima (resonancia paralela).

La presencia de capacitores y reactores para compensación del factor de potencia puede originar resonancias las cuales a su vez producen corrientes o tensiones excesivas que afectan los equipos del sistema.

a) Resonancia Paralelo

En una resonancia paralela resulta una impedancia muy alta en el sistema a la corriente armónica correspondiente a la frecuencia de resonancia. Puesto que la mayoría de cargas generadoras de armónicos pueden ser consideradas como fuentes de corriente, el

fenómeno da como resultado elevadas tensiones y corrientes armónicas en las ramas de la impedancia paralela.

Una resonancia paralelo puede ocurrir donde exista un capacitor conectado al mismo barraje que una fuente de armónicos. Considerando la figura 2.18, la impedancia equivalente del Barraje A a tierra es la formula 2.4:

$$Z_{eq} = \frac{X_{th}X_c}{X_{th}+X_c} \quad (2.4)$$

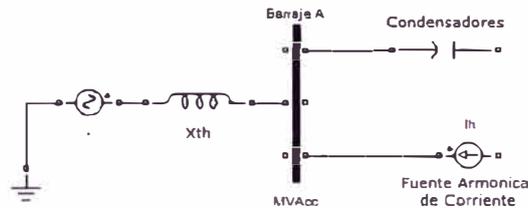


Fig.2.18 Resonancia Paralelo en el Barraje 'A' [5]

La condición de resonancia paralelo ocurre cuando el denominador de la expresión anterior se reduce a cero:

$$\begin{aligned} X_{th} + X_c &= 0 \\ X_{th} &= -X_c \end{aligned} \quad (2.5)$$

Las reactancias a la frecuencia angular de resonancia (ω_n) se expresan así:

$$X_{th} = \omega_n L \quad \text{y} \quad X_c = -\frac{1}{\omega_n C} \quad (2.6)$$

Además, con base en la impedancia a la frecuencia angular fundamental (ω):

$$\omega L = \frac{V^2}{MVA_{cc}} \quad \frac{1}{\omega C} = \frac{V^2}{MVA_{cap}} \quad (2.7)$$

Despejando valores para L y C y reemplazando en la condición de resonancia, se obtiene:

$$\omega_n \frac{V^2}{\omega MVA_{cc}} = \frac{\omega V^2}{\omega_n MVA_{cap}}$$

Resolviendo para la frecuencia de resonancia paralelo f_p ($\omega_n = 2\pi f_p$), se obtiene:

$$f_p = f \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{MVA_{cap}}} \quad (2.8)$$

Donde:

f_p : Frecuencia de resonancia paralelo (Hz)

f : Frecuencia fundamental (Hz)

MVA_{cc} : Capacidad de cortocircuito del barraje

MVA_{cap} : Capacidad de los capacitores del barraje a la frecuencia fundamental.

b) Resonancia Serie

Bajo condiciones de resonancia serie fig 2.19, el sistema ofrece una impedancia muy baja a tensiones armónicas de frecuencia igual a la de resonancia. Por lo tanto, pequeños tensiones armónicas en el sistema pueden originar elevadas corrientes armónicas en los equipos.

Como se explicará más adelante, los filtros de armónicos tienen por función introducir una resonancia serie en un barraje dado del sistema. De esta forma, corrientes armónicas inyectadas por cargas deformantes, pueden ser fácilmente drenadas a tierra.

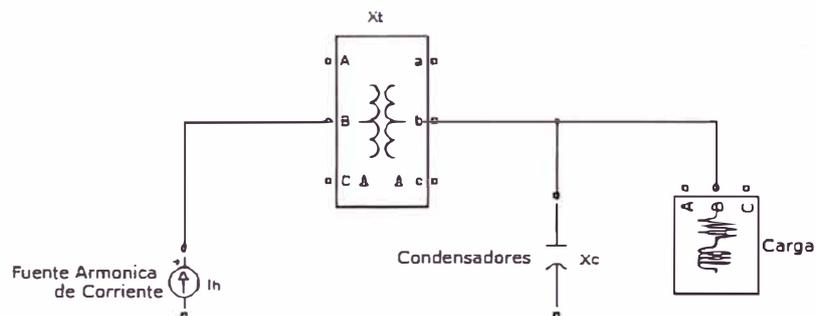


Fig.2.19: Cargas resonantes en Serie [4]

2.4 Normatividad Técnica

En nuestro País se tiene la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), la cual fue aprobada mediante el Decreto Supremo N° 020-97 –EM con el fin de garantizar a los usuarios un suministro eléctrico continuo, adecuado, confiable y oportuno. La NTCSE ha tenido modificaciones por los Decretos Supremos N° 099-99 –EM, N° 013-2000 –EM, N° 017-2000 –EM y N° 040-2001 –EM.

El Control de la Calidad toma en cuenta los aspectos de Calidad del Producto (tensión, frecuencia, flicker y armónicas de tensión), la calidad de suministro (interrupciones), calidad de servicio comercial (trato al cliente, medios de atención), y calidad de alumbrado público. Se fijan tolerancias y las respectivas compensaciones y/o multas por incumplimiento. Así mismo todo cliente es responsable ante el suministrador por aquellas perturbaciones que inyecte al sistema eléctrico que excedan las tolerancias establecidas en la NTCSE.

Respecto a las Tensiones armónicas la NTCSE indica el siguiente párrafo y tabla N° 2.2 [6]:

Los valores eficaces (RMS) de las Tensiones Armónicas Individuales (V_i) y los THD, expresado como porcentaje de la tensión nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i' y THD') indicados en la siguiente tabla. Para efectos de esta Norma, se consideran las armónicas comprendidas entre la dos (2^o) y la cuarenta (40^o), ambas inclusive.

Tabla N° 2.2: Valores de Tolerancias de Tensiones armónicas, según NTCSE

ORDEN (n) DE LA ARMÓNICA ó THD	TOLERANCIA V _r ó THD' (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Alta y Muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
(Armónicas Impares no múltiplos de 3)		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	0.1 + 2.5/n	0.2 + 12.5/n
(Armónicas impares múltiplos de 3)		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
(Pares)		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8

• Tabla según D.S. N° 009-1999-EM, publicado el 1999. 04. 11

En las tablas N° 2.3 y N° 2.4 siguientes se indica los límites tolerables de las normas IEC normas IEC-61000-3-6 y IEC-61000-3-14 para los Armónicos de Tensión y Corriente en Redes de Baja Tensión (BT) respectivamente:

Tabla N° 2.3: Valores de Tolerancias de Tensiones armónicas, según IEC-61000-3-6

Orden h	Orden Impar ≠ 3k			Orden Impar = 3k			Orden Par				
	Armónico Tensión (%)			Orden h	Armónico Tensión (%)			Orden h	Armónico Tensión (%)		
	BT	MT	AT		BT	MT	AT		BT	MT	AT
5	6	5	2	3	5	4	2	2	2	1,60	1,50
7	5	4	2	9	1,50	1,20	1	4	1	1	1
11	3,50	3	1,50	15	0,30	0,30	0,30	6	0,50	0,50	0,50
13	3	2,50	1,50	21	0,20	0,20	0,20	8	0,50	0,40	0,40
17	2	1,60	1	> 21	0,20	0,20	0,20	10	0,50	0,40	0,40
19	1,50	1,20	1					12	0,20	0,20	0,20
23	1,50	1,20	0,70					> 12	0,20	0,20	0,20
25	1,50	1,20	0,70								
> 25	0,20 + 1,3*25/h	0,20 + 1,3*25/h	0,20 + 1,3*25/h								
THD-V: 8% en BT, 6,50% en MT, 3% en AT											

Tabla N° 2.4: Valores de Tolerancias de Corrientes armónicas, según IEC-61000-3-14

Orden	Armónico
h	Corriente (%)
	BT
3	4
5	5
7	5
9	1
11	3
13	3
> 13	$500/n^2$

CAPÍTULO III

TIPOS DE FILTROS

Según el tipo de armónicos a eliminar, se han propuesto diferentes esquemas de compensación, desde filtros pasivos y/o activos conectados en paralelo.

La comparativa realizada en este trabajo se centra en propuestas de acondicionadores de conexión paralela, usados para la compensación de cargas de tipo fuente de corriente. En la fig.3.1 se muestran las dos soluciones ensayadas: Un filtro pasivo con ramas LC sintonizadas a los armónicos de mayor magnitud de la carga, figura 3.1a, un filtro activo de conexión paralela, figura 3.1b.

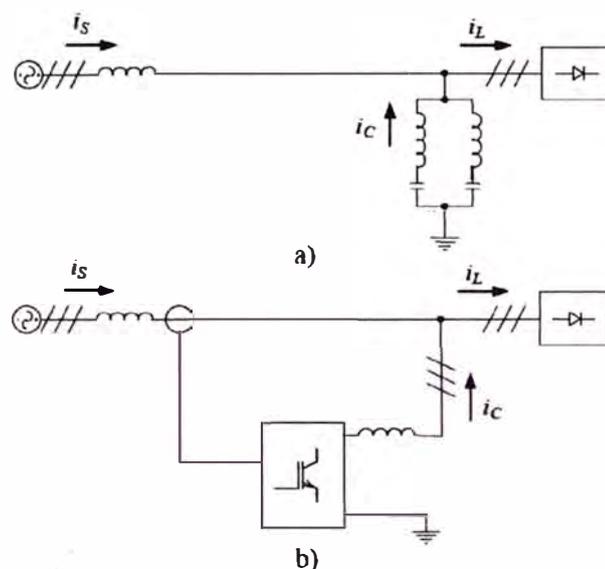


Fig.3.1: Esquemas de compensación paralela [7]
a) Con filtro pasivo. b) Con filtro activo

3.1 Filtro Pasivo de Conexión Paralela

En cargas no muy fluctuantes, es posible emplear distintas ramas LC conectadas en paralelo con la carga y sintonizadas a las frecuencias de los armónicos de corriente que se deseen retirar del sistema, figura 3.1a.

A partir del espectro de la intensidad de la carga que se desea compensar, se escogen los armónicos más relevantes. Para compensar cada uno de ellos, por ejemplo el de orden n , se eligen valores de L_n y C_n que satisfagan la ecuación (3.1), donde f es el valor de la frecuencia fundamental, 60 Hz en este trabajo.

$$w_n = 2\pi f n = \frac{1}{\sqrt{L_n C_n}} \quad (3.1)$$

La ecuación (3.1) implica una sola restricción para los valores L y C de cada rama. Se puede añadir como restricción adicional para la elección de esos parámetros que las distintas ramas suministren la potencia reactiva consumida por la carga a la frecuencia fundamental.

El filtro pasivo así diseñado presenta varias carencias. No pueden lograrse objetivos de compensación más complejos, no es posible modificar sus parámetros para ajustarse a variaciones de la carga, y pueden aparecer problemas de resonancia, como se muestra en el apartado de resultados del caso práctico estudiado en el presente trabajo.

3.2 Filtro Activo de Conexión Paralela

Un Filtro Activo Paralelo es un circuito electrónico de potencia que se conecta en paralelo con la carga actuando como una fuente de intensidad controlada, ver fig.3.2, o se conecta en serie actuando como fuente de tensión. Este circuito está diseñado para contribuir en la neutralización de los problemas de distorsión en la onda de tensión y corriente, y bajo factor de potencia, estos problemas se originan debido al aumento constante de las cargas no lineales conectadas a la red de alimentación.

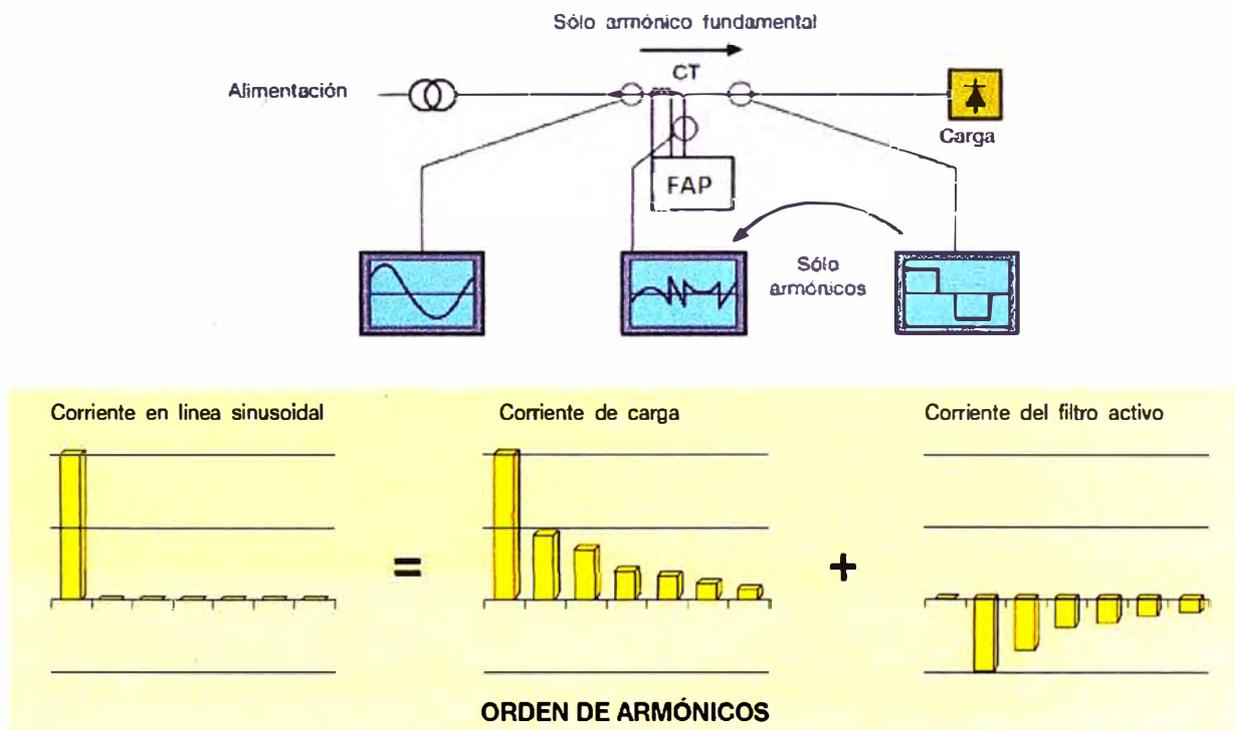


Fig.3.2: Filtro Activo de Potencia (FAP)

La estructura de un Filtro Activo, en general está compuesta por un convertidor, normalmente un inversor de tensión (VSI), un bloque de control y un sistema de medida de los parámetros de red. Además puede contar con transformadores y/o bobinas para su

conexión a la red. En la figura 3.3 se muestra el diagrama de bloques básico de un Filtro Activo en conexión paralelo.

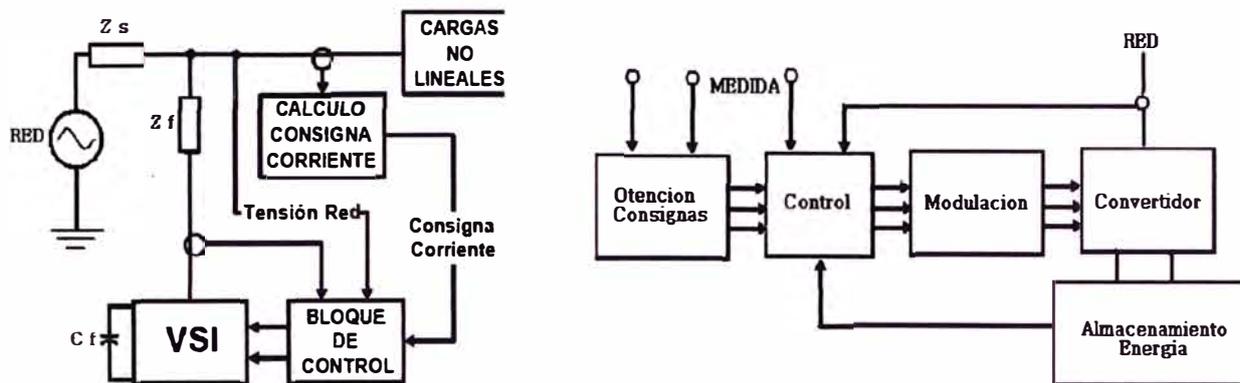


Fig.3.3: Diagrama de Bloques de un Filtro Activo Paralelo [8]

El bloque de Consignas, es el encargado de separar la componente fundamental de la corriente que absorbe la carga, de los armónicos presentes en esta corriente. Estos armónicos son los que forman la consigna aplicada al control del Filtro activo.

El bloque de Control debe actuar sobre el convertidor para que las corrientes que absorbe el filtro (armónicos) coincidan con las consignas anteriores.

El bloque de Modulación debe de transformar unas señales de tensión, variables en amplitud, procedentes del control en los tiempos de encendido y apagado de cada uno de los interruptores del Inversor de tensión. Ya que la potencia media consumida por un FAP, en un periodo de red, debe ser nula, salvo pérdidas; es necesario un elemento que almacene energía, ya que la potencia instantánea no será nula.

El Filtro Activo Paralelo, tiene las funciones de cancelación de armónicos, hacer corrección del factor de potencia, equilibrar las corrientes de línea en el caso de conexión de cargas desequilibradas y cancelar la corriente de neutro de la red, en los casos de redes con neutro. El principio de funcionamiento consiste en inyectar a la red, en este punto y en contra-fase, las corrientes armónicas generadas en la carga, de modo que queden absolutamente anuladas por suma de corrientes en el nudo formado.

Para que el rendimiento del Filtro Activo paralelo sea eficaz en todo el ancho de banda del filtro, hay dos aspectos de control esenciales:

- El uso de un sistema de control en bucle cerrado;
- El enfoque relativo al dominio de frecuencias para el procesamiento y el control de la corriente contaminada.

Para los filtros activos, la cuestión del bucle cerrado y el bucle abierto radica en el lugar en el que deban instalarse los transformadores de intensidad (CT) de medida del Filtro Activo, ver figura 3.4.

En los sistemas de bucle cerrado, se mide la corriente anterior a la carga y la conexión de

Filtro y se adoptan medidas correctoras. Cualquier medida u otras imprecisiones pueden cancelarse automáticamente y compensarse con el concepto de bucle cerrado. En los sistemas en bucle abierto, la corriente de carga se mide y se procesa, y la señal invertida resultante acciona el puente del transistor bipolar de puerta aislada (IGBT). Puesto que no hay retroalimentación, la corriente de línea resultante puede contener normalmente componentes de error que el sistema de control no detecta. En resumen, las ventajas de utilizar un sistema en bucle cerrado en lugar de abierto son: – Los sistemas en bucle cerrado permiten cancelar los errores en el bucle de control y en el comportamiento en respuesta a perturbaciones exteriores; los sistemas en bucle abierto no tienen esta función.

– Los sistemas de control en bucle cerrado pueden reaccionar con tanta rapidez como los de bucle abierto, siempre que se determinen los parámetros del bucle de control para que se comporten de este modo.

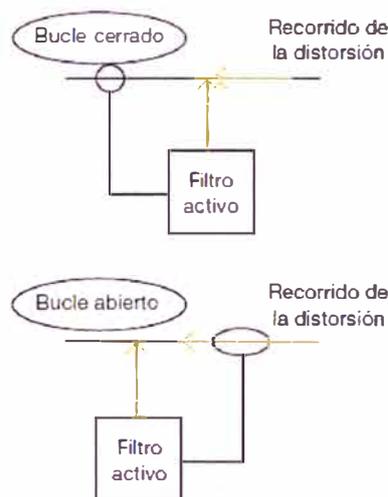


Fig.3.4: Principio de Filtro Activo de Bucle cerrado y de Bucle abierto

En el enfoque del dominio de frecuencias, cada armónico y sus correspondientes características del sistema se tratan de forma individual y el rendimiento puede optimizarse para los componentes armónicos en el ancho de banda de filtrado.



Fig.3.5: Principio del Método de Filtrado del Dominio de frecuencias

En consecuencia, se puede mantener el mismo rendimiento de filtrado (alto) en todo el ancho de banda. El principio en el que se basa el enfoque del dominio de frecuencias para el filtrado se muestra en la figura 3.5.

El mejor rendimiento de filtrado se conseguirá utilizando un filtro activo con sistema de control en bucle cerrado y un enfoque de dominio de frecuencias individual.

El mejor rendimiento de filtrado se conseguirá utilizando un filtro activo con sistema de control en bucle cerrado y un enfoque de dominio de frecuencias individual.

3.2.1 Esquema de Conexión de Filtros Activos

A continuación se describirán algunas topologías de circuito típico y lugares apropiados correspondientes del transformador de corriente (CT). Los casos considerados son los siguientes:

a) Compensación Global sin Banco de Condensadores

Este caso de configuración es el más frecuente, un transformador alimenta a varias cargas no lineales. El Filtro Activo de Potencia (FAP) está instalado en una posición central y filtra las corrientes armónicas de todas las cargas. Esta configuración se muestra en la figura 3.6:

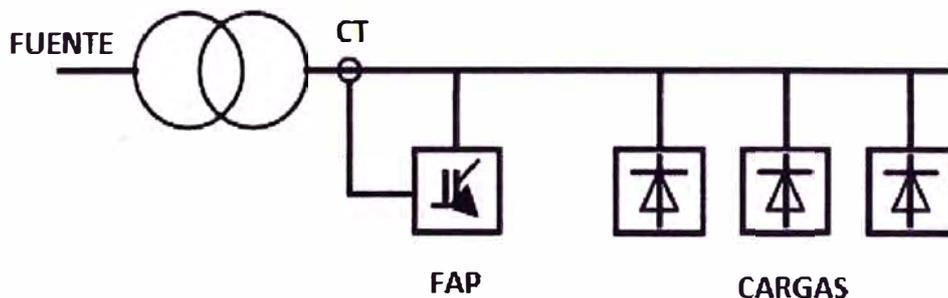


Fig.3.6: Conexión del FAP y CT para el caso de la Compensación global

b) Compensación Global con Banco de Condensadores planos presente en la red

En algunas instalaciones, los condensadores planos (sin reactores desafinados) coexisten con cargas armónicas que producen. Esta situación no es aconsejable debido a que los armónicos imponen una tensión muy alta en los condensadores como resultado de lo cual se reduce considerablemente su vida útil. Además, debido a la condición de resonancia creada (por el condensador y el transformador predominantemente inductivo y la impedancia de línea), una alta tensión de distorsión puede ser introducido, lo que puede causar en otros equipos de la planta un mal funcionamiento. También una resonancia amplifica la corriente armónica creada por las cargas como consecuencia los alimentadores y transformadores puede estar sobrecargado. Por estas razones se sugiere reemplazar el condensador plano por un banco de condensadores desafinado cuando armónicos están presentes en la red.

En instalaciones donde condensadores planos están presentes y no se puede cambiado a bancos de condensadores desafinados, el esquema de conexión de la figura 3.7 se recomienda en comparación con el diagrama mostrado en la figura 3.8.

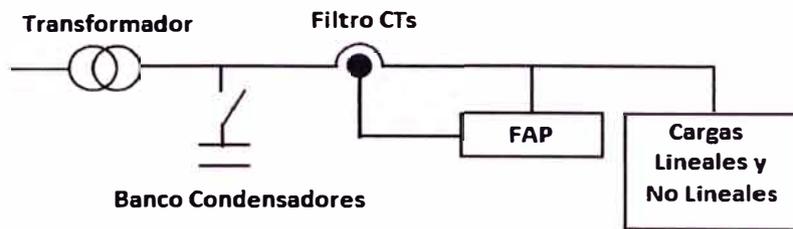


Fig.3.7: Conexión del Filtro Activo (FAP) y CT con Banco de Condensadores planos para Compensación global

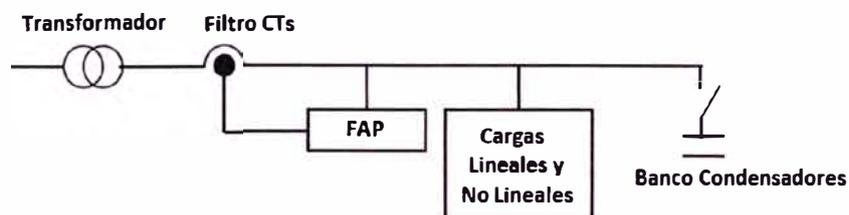


Fig.3.8: Alternativa de Conexión del FAP y CT con Banco de Condensadores planos para Compensación global

c) Compensación Global con Banco de Condensadores desafinado presente en la red

En algunas instalaciones bancos de condensadores apropiadamente desafinados se instala adyacente a las unidades de filtros activos, pero están conectadas aguas abajo de los filtros de CT. Si este es el caso y si la distorsión de fondo está presente en la red de suministro, entonces se recomienda conectar el banco de condensadores desafinados físicamente aguas arriba de las conexiones CT (ver Figura 3.7). Cuando esto no es posible una disposición del CT puede hacerse de tal manera que la corriente que fluye en el banco de condensadores desafinado se resta de la corriente total medida por los transformadores de intensidad de filtrado. Esto se ilustra en la figura 3.8:

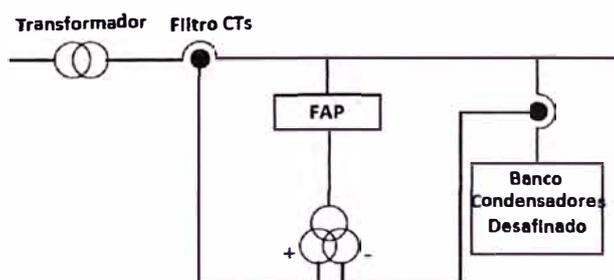


Fig.3.9: Alternativa de conexión del Banco de Condensadores desafinados instalado junto al Filtro Activo, pero aguas abajo del CT del Filtro Activo.

Al utilizar el enfoque de la figura 3.9 se asegura que el rendimiento del Filtro permanece óptimo sin la pérdida de recursos de filtro cuando la distorsión de fondo está presente en la red de suministro.

d) Compensación Global con Filtro Pasivo instalado en una misma red

En instalaciones en las que ambos Filtros Pasivos y Filtros Activos (FAP) están presentes, el esquema de conexión del CT de la figura 3.10 se debe utilizar.

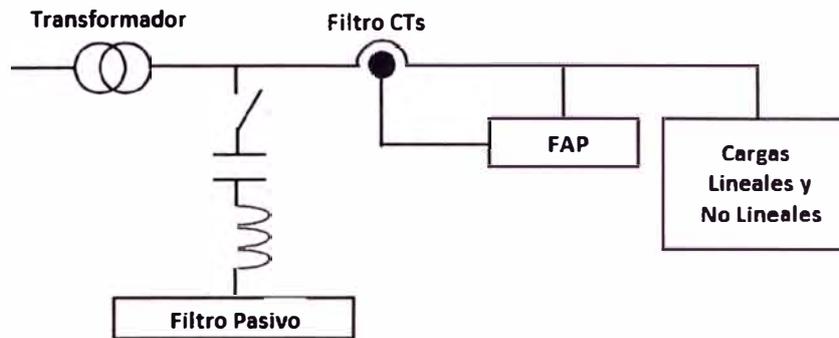


Fig.3.10: Diagrama de conexión recomendado para los Filtros Activo y Pasivo

Tenga en cuenta que en todas las condiciones cuando un Filtro Pasivo y un Filtro Activo se instalan en la misma barra de acuerdo con las pautas anteriores, no se recomienda seleccionar en el Filtro Activo los armónicos en o por debajo de la frecuencia de sintonía del Filtro Pasivo. Bajo estas condiciones, se puede dejar de filtrar los armónicos afectados temporalmente resultando en un menor rendimiento global de filtrado.

CAPÍTULO IV

MEDICIÓN Y ANÁLISIS PARA LA AMORTIGUACIÓN DE LOS ARMÓNICOS

Realizar mediciones de la calidad de energía es importante por los siguientes motivos:

- Proporciona información detallada del comportamiento eléctrico, lo cual sirve para controlar la calidad del suministro, para cuantificar la energía consumida, para controlar las puntas de consumo, conocer con detalle los eventos sucedidos en una red eléctrica, etc.
- Proporciona información detallada para planificar las redes y optimizar las instalaciones en las plantas industriales.
- Realizar un análisis de los registros obtenidos.
- Caracterizar los comportamientos de cualquier parámetro eléctrico.

4.1 Instrumentos de Medición

Para realizar un estudio de la calidad de energía, de cualquier red eléctrica, es necesario disponer de instrumentos capaces de medir y registrar los principales parámetros de la misma.

Los instrumentos industriales disponibles para la medida de los parámetros de la red va desde los modelos clásicos con indicadores de aguja, así como por los indicadores digitales hasta llegar a los de última generación, llamados 'Equipos Analizadores de Potencia', que permiten no solo medir, sino registrar datos de tensión, corriente, potencias, energía consumida, etc, y capturar las perturbaciones con sistemas de disparo 'trigger'. La posibilidad de registrar y capturar determinados eventos es esencial para disponer de datos en el momento de diagnosticar un problema.

En las fig.4.1, fig.4.2, fig.4.3, fig.4.4, fig.4.5 se muestran algunos equipos registradores de calidad de energía:

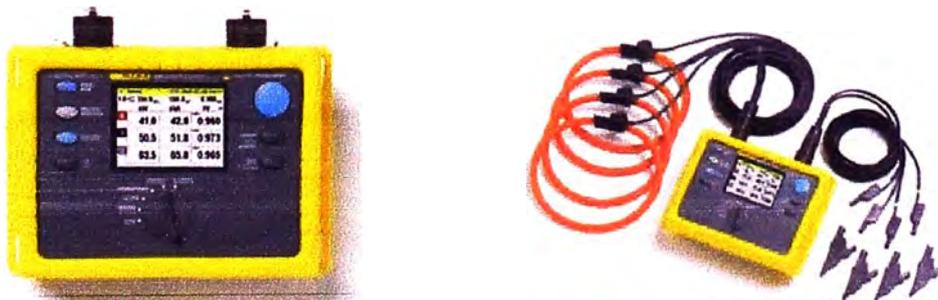


Fig.4.1: Equipo Fluke - Modelo 1735

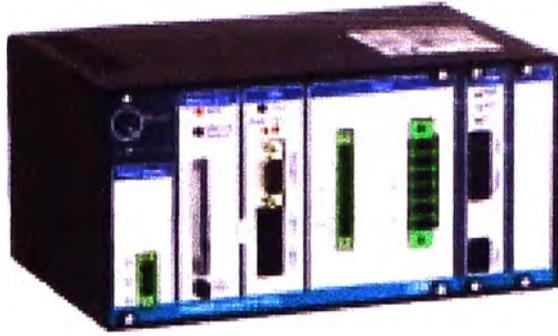


Fig.4.2: Equipo Qwave Power RTU



Fig.4.3: Equipo Dranetz - Energy Platform EP1

MEMOBOX 300 P, A

MEMOBOX 808 A



Fig.4.4: Equipo Memobox



Fig.4.5: Equipo Power Reliable Meters (RPM) 1650 Series

La instalación de estos medidores debe realizarse sin coaccionar daños al suministro normal de energía.

Las mediciones de tensión se realizan de 0 a 1000v, para rangos superiores los medidores deben utilizar transformadores de medida para reducir el nivel de tensión.

Las mediciones de corriente se realizan en mayores rangos dependiendo del rango del transductor o pinza de corriente que se tenga.

Para instalar los equipos analizadores se deben realizar los siguientes procedimientos:

- Ubicar el sistema auxiliar estabilizado (220v) para la alimentación del equipo analizador. Es recomendable que el sistema de alimentación contenga una puesta tierra de protección.
- Identificar correctamente los sistemas de medición (dirección de la corriente y secuencia de fases, diagrama fasorial) en caso los sistemas de medición de los suministros no cuenten con este detalle.
- Verificar los PT's y CT's (Transformadores de medida para tensión y corriente respectivamente) del circuito de medición, a fin de comprobar y validar los valores de reducción.
- Los equipos analizadores se instalan de acuerdo a la configuración del sistema de medición. Estas configuraciones se presentan según las fig.4.6, fig.4.7 y fig.4.8.
- Verificar si el equipo está correctamente configurado, esto se garantiza realizando una medición de prueba; por ejemplo, realizar una medición por un periodo de 5 minutos con intervalos de registro de 1 minuto, esta medición servirá para verificar los valores que muestre el contador de energía, datos de placa del transformador, medición mediante pinzas, etc.
- Luego de realizar la medición de comprobación, el equipo será configurado para que empiece a registrar.
- Aislar el equipo para evitar que sean manipulados por terceras personas.

Los analizadores digitales modernos registran componentes armónicas con frecuencias hasta de 50 veces la frecuencia fundamental (3000 Hz). Presentan siete (7) canales de entrada: Tres para tensiones de línea, tres para corrientes de línea y un canal de tensión para propósito general.

Normalmente, los registros son entregados como tablas de datos y formas de onda, los cuales incluyen la siguiente información:

- * Tabla resumen con parámetros de los seis canales (3 tensiones y 3 corrientes) registrados. Los parámetros son: Valor RMS, THD, TIF, It y desbalance NEMA.
- * Tabla con distribución espectral en magnitudes por armónico, de los seis canales y

la corriente del neutro.

* Tabla con distribución espectral en ángulo de fase por armónico, de los 6 canales y la corriente del neutro.

* Formas de onda para cada uno de los seis canales.

* Espectro de frecuencia para cada uno de los seis canales.

Típicamente los rangos de operación para los canales de tensión y corriente son 0-750 VAC y 5-15 A respectivamente.

Para efectuar mediciones en puntos de alta tensión, 1 kV o mayores, se requiere de la utilización de transformadores de potencial y de corriente. En tales situaciones debe prestarse atención al hecho que los transformadores de potencial pueden variar su relación de transformación a frecuencias superiores a la fundamental. Esta variación puede introducir errores en la medición.

ESQUEMA DE CONEXION SISTEMA DE CUATRO HILOS

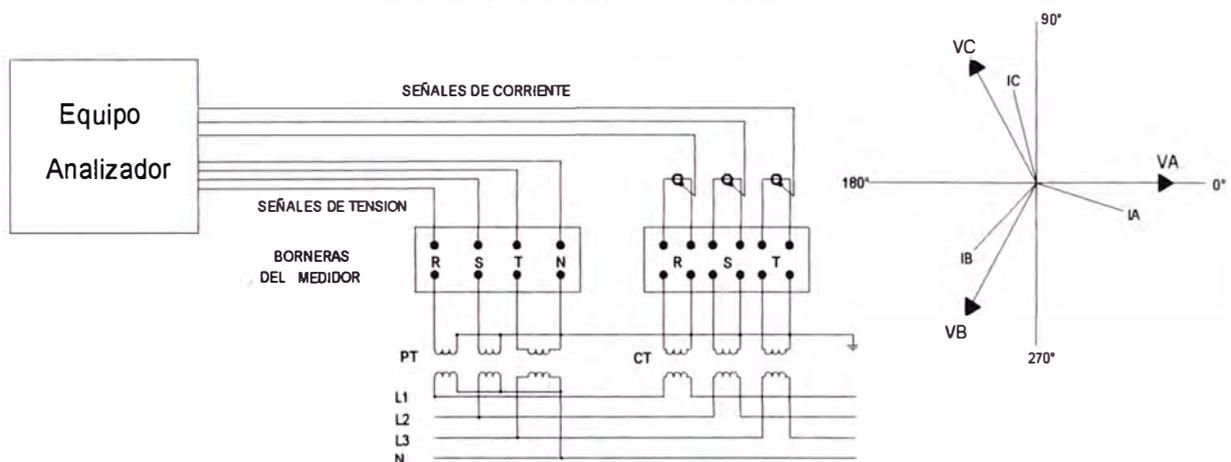


Fig.4.6: Esquema de Conexión para Sistemas de 4 Hilos [4]

ESQUEMA DE CONEXION SISTEMA DE TRES HILOS

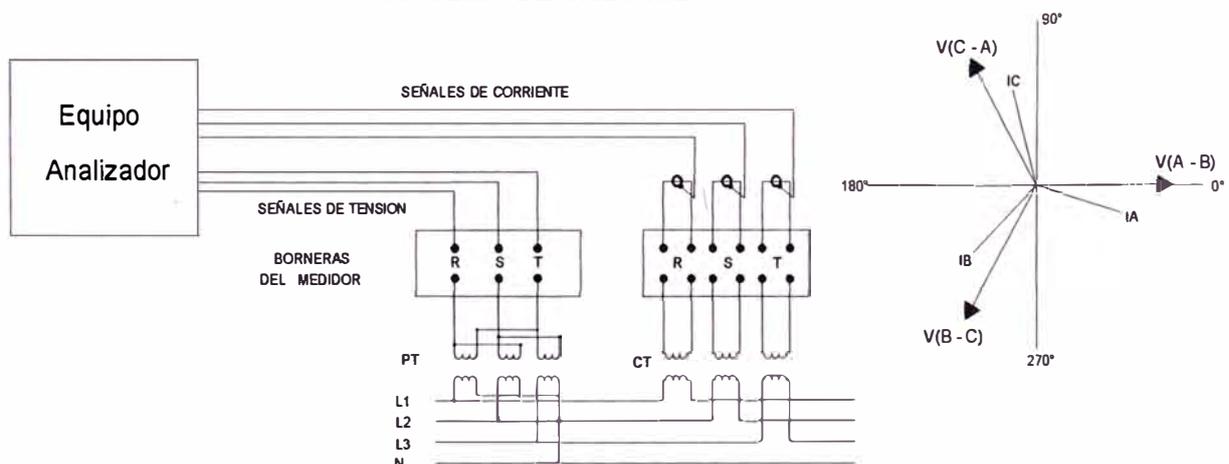


Fig.4.7: Esquema de Conexión para Sistemas de 3 Hilos [4]

ESQUEMA DE CONEXION ARON SISTEMA DE TRES HILOS 3 PT Y 2 CT

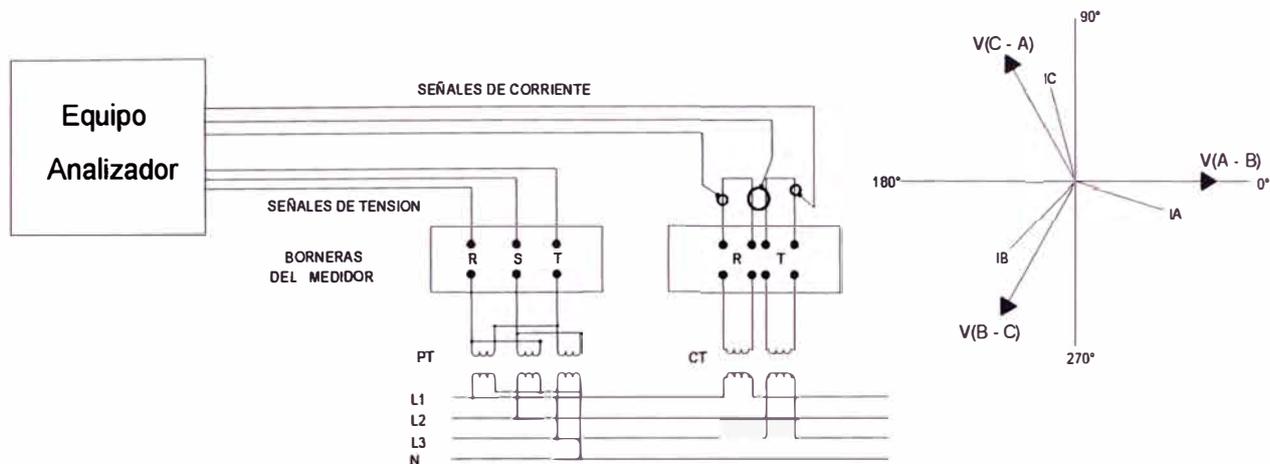


Fig.4.8: Esquema de Conexión para Sistemas de 3 Hilos y con 2 Transformadores de Corriente (Método de Aron) [4]

Los transformadores de potencial inductivos tienen una respuesta de frecuencia casi plana hasta frecuencias entre 700 y 1000 Hz, mientras que los TP tipo capacitivo tienen una respuesta de frecuencia completamente irregular para frecuencias superiores a 60 Hz, razón por la cual estos transformadores pueden ampliar o atenuar los armónicos de la onda bajo medición.

Teniendo en cuenta la respuesta de frecuencia del transformador de potencial tipo inductivo, es posible realizar mediciones confiables de armónicos hasta el 15°, sin que haya atenuación o amplificación de las componentes armónicas. Esto no resulta una limitación dado que los armónicos predominantes en sistemas de potencia son del orden de 11° o menores.

Los transformadores de corriente presentan una respuesta de frecuencia prácticamente plana hasta aproximadamente 5 kHz. Por esto la situación no es de cuidado al usar los TC.

El equipo de registro se interconecta con un microcomputador lap-top mediante una conexión serial RS232. Esto permite que el software de soporte ejecutado en el microcomputador, almacene en medio magnético la información registrada por el analizador.

4.2 Simulación de Filtros Armónicos de un Caso Práctico

A continuación realizaremos el análisis del siguiente caso práctico, cuya importancia es el tipo de filtro a emplear en su instalación eléctrica, ya que su instalación presenta variación de la carga no lineal en cierto horario y se instalara un banco de condensadores de 110 kVAR para la compensación reactiva, lo cual incrementara los armónicos en su

red y se requerirá contrarrestar tal efecto, utilizando el tipo de filtro mas conveniente.

4.2.1 Descripción del Circuito del Caso Práctico

Para el análisis a realizar se considerara una planta industrial de 0,40 kV y 60 Hz, el cual cuenta con un transformador trifásico de 400 kVA, 0,40 / 0,40 kV, una carga representativa resistiva-inductiva de 80 kW-40 kVAR y una carga no lineal variable, rectificador de diodos 6 pulsos.

Mediante el software WinHarmo se obtendrá los armónicos a contrarrestar.

4.2.2 Diagrama Unifilar del Caso Práctico

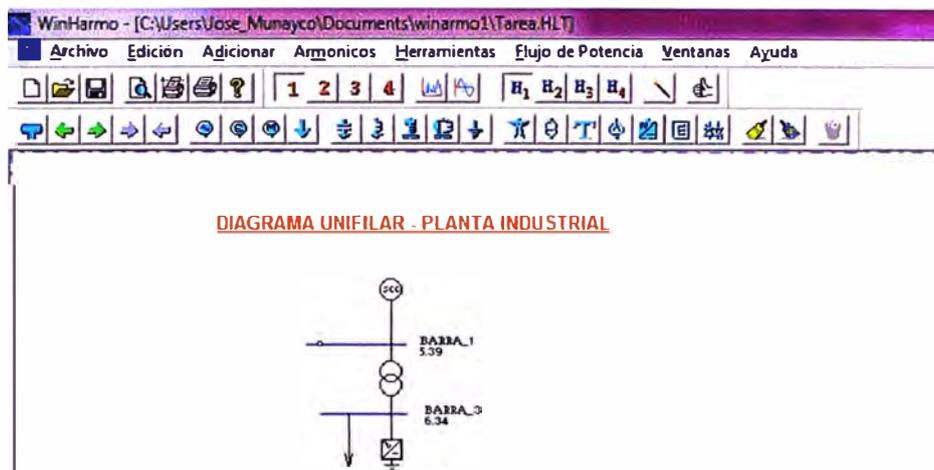


Fig.4.9: Circuito de Planta Industrial – Caso practico

4.2.3 Descripción del Problema encontrado en el Caso Práctico

De los resultados obtenidos de la simulación con el WinHarmo, se puede observar la presencia de armónicos con mayor porcentaje en las órdenes 5,7, 11 y 13, que no superan las tolerancias límites establecidos de la NTCSE, pero al instalar el banco de condensadores estos incrementaran y posiblemente superen las tolerancias establecidas. En la fig.4.10 se puede apreciar dichos armónicos:

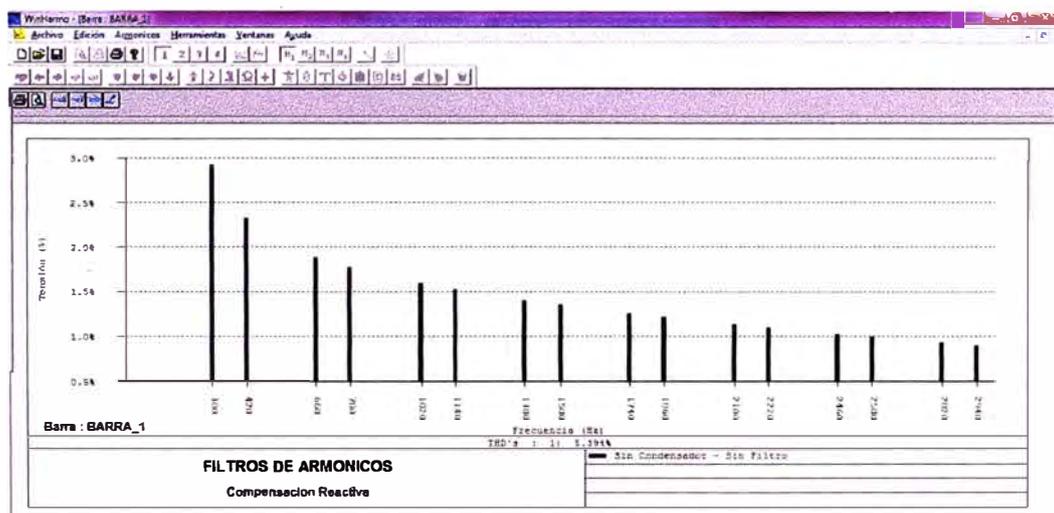


Fig.4.10: Espectro de Armónicos de la Planta industrial

4.2.4 Simulaciones utilizando Filtros para la Reducción de Armónicos del Caso Práctico

A continuación se mostrara los diagramas unifilares, gráficos de Impedancia vs Frecuencia, y espectro de armónicos de los 3 casos propuestos a simular, sin filtro, con filtro pasivo, empleando el software WinHarmo, y con filtro activo, empleando el software Matlab-Simulink.

En base a los resultados de armónicos del problema encontrado, se seleccionara para la reducción de armónicos con Filtro pasivo, el orden de armónico con mayor porcentaje, esto corresponde al orden 5.

➤ Parámetros utilizados para el Circuito

Circuito eléctrico: 0,40 kV , 60 Hz

Banco de Condensadores: 110 kVAR

Transformador: 400 kVA, 0,40 / 0,40 kV

Filtro: Tipo Shunt

➤ Tolerancias utilizadas (Según la NTCSE)

Para la Tensión: 8%

➤ Simulación con banco de condensadores de 110 kVAR y Filtro Shunt

a) Diagrama unifilar sin filtro, con filtro pasivo, con filtro activo (Ver fig.4.11, fig.4.12, fig.4.13)

La siguiente figura 4.11 muestra el Diagrama unifilar del caso práctico de una Planta industrial, cuando es instalado el Banco de Condensadores para la compensación reactiva sin emplear filtro Armónico alguno.

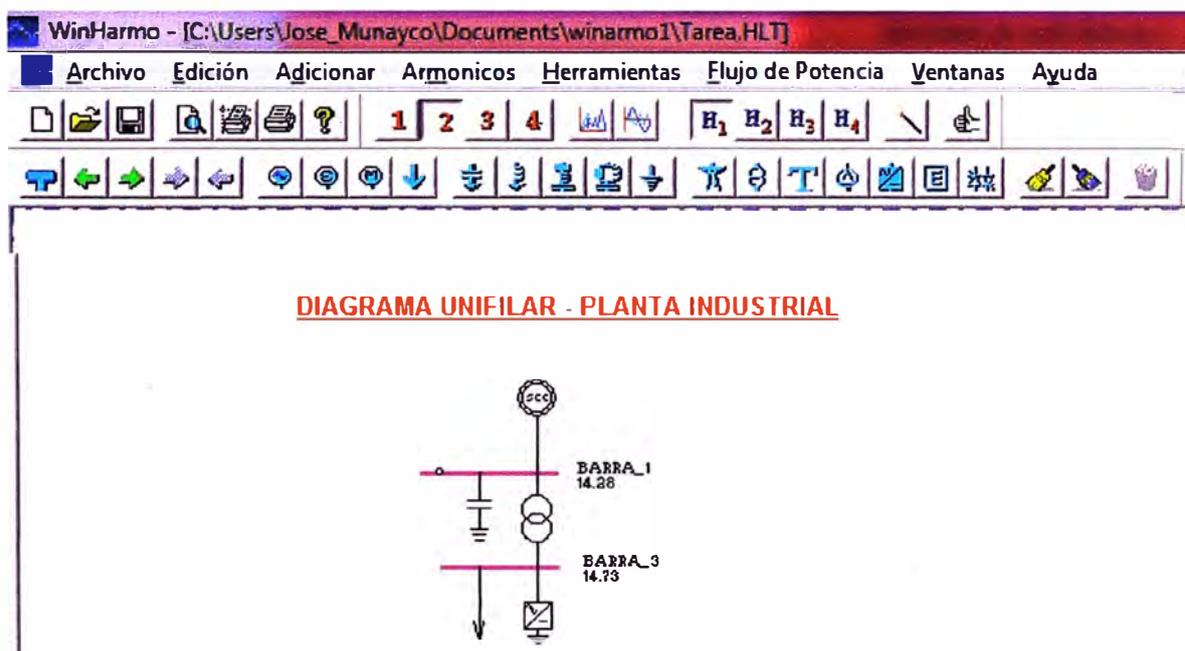


Fig.4.11: Circuito con Banco de condensadores sin Filtro

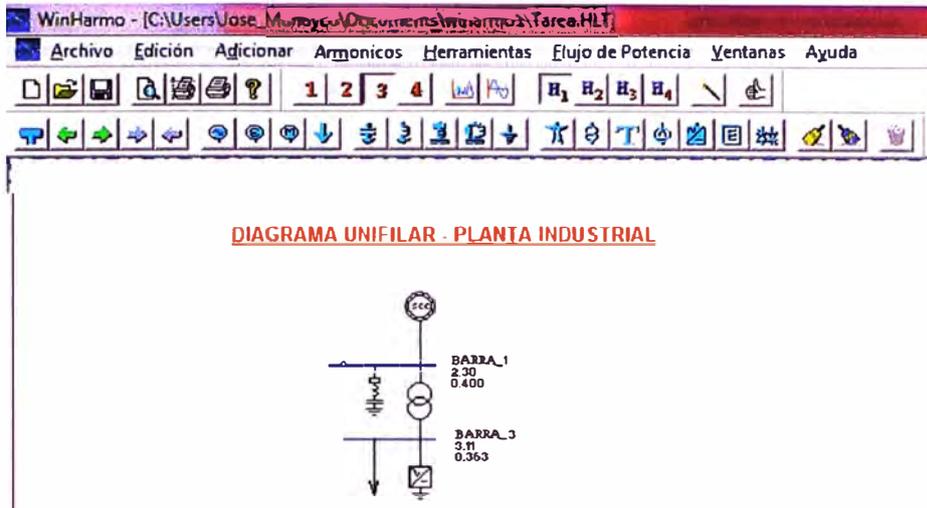


Fig.4.12: Circuito con Banco de condensadores con Filtro Pasivo

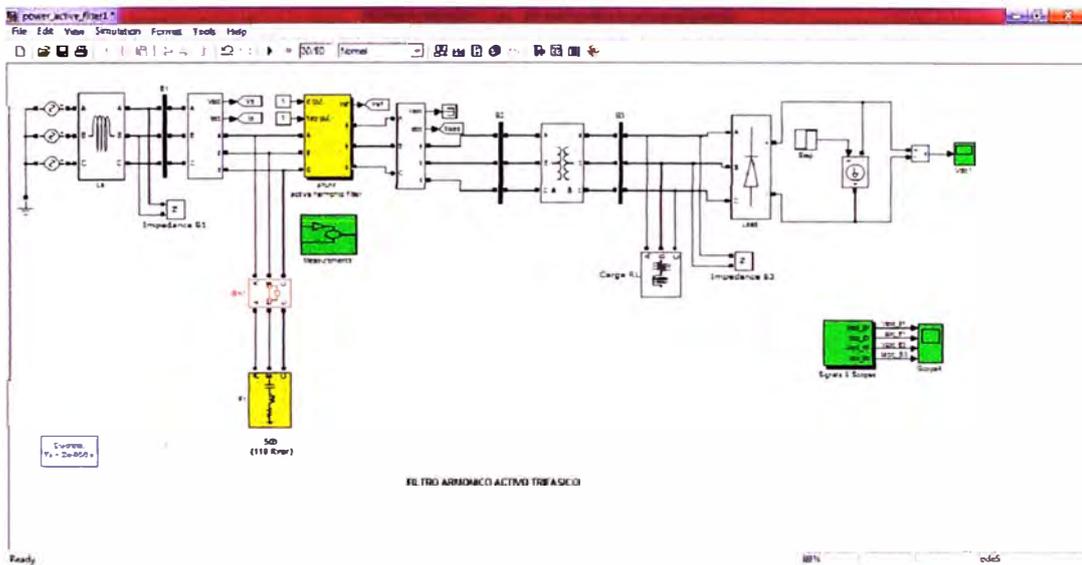


Fig.4.13: Circuito con Banco de condensadores con Filtro Activo

b) Grafica de Impedancias de la barra 1, de los 3 casos. (Ver fig.4.14, fig.4.15)

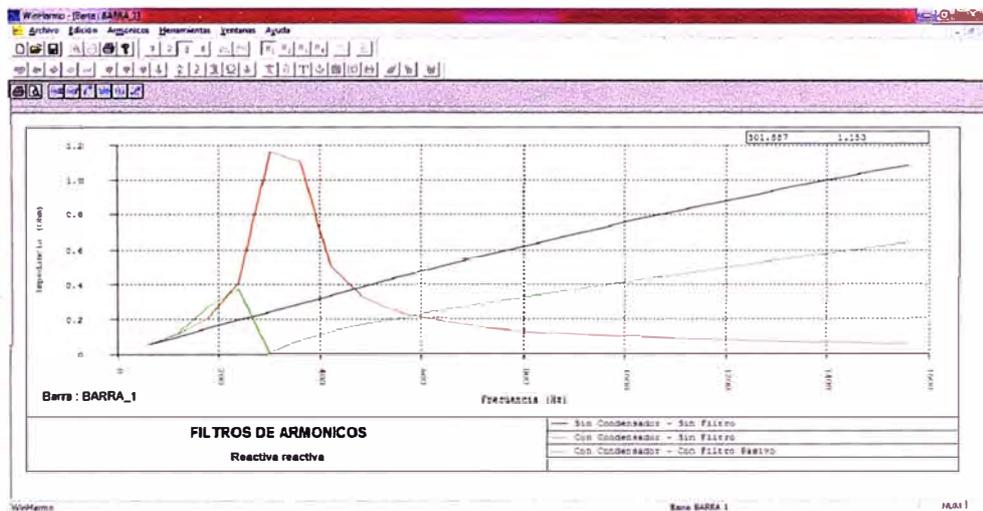


Fig.4.14: Grafico de Impedancia vs Frecuencia en la Barra 1
– Sin / Con Filtro Pasivo

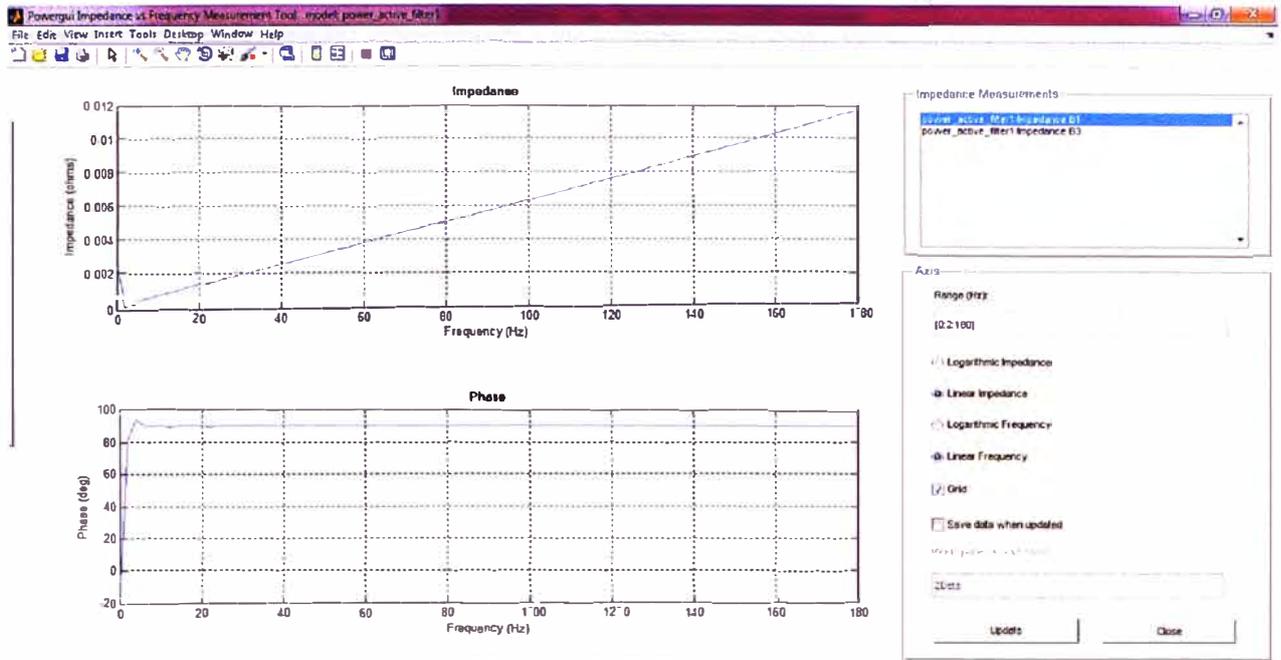


Fig.4.15: Grafico de Impedancia vs Frecuencia en la Barra 1,
Con Filtro Activo

c) Espectros de armónicos de tensión en la barra 1, de los 3 casos. (Ver fig.4.16, fig.4.17)

La siguiente figura 4.16 muestra los Espectros de Armónicos de Tensión del caso práctico de la Planta industrial, para el caso sin emplear Banco de condensadores, y para los casos empleando el Banco de Condensadores para la compensación reactiva sin emplear Filtro Armónico, y empleando Filtro Armónico Pasivo.

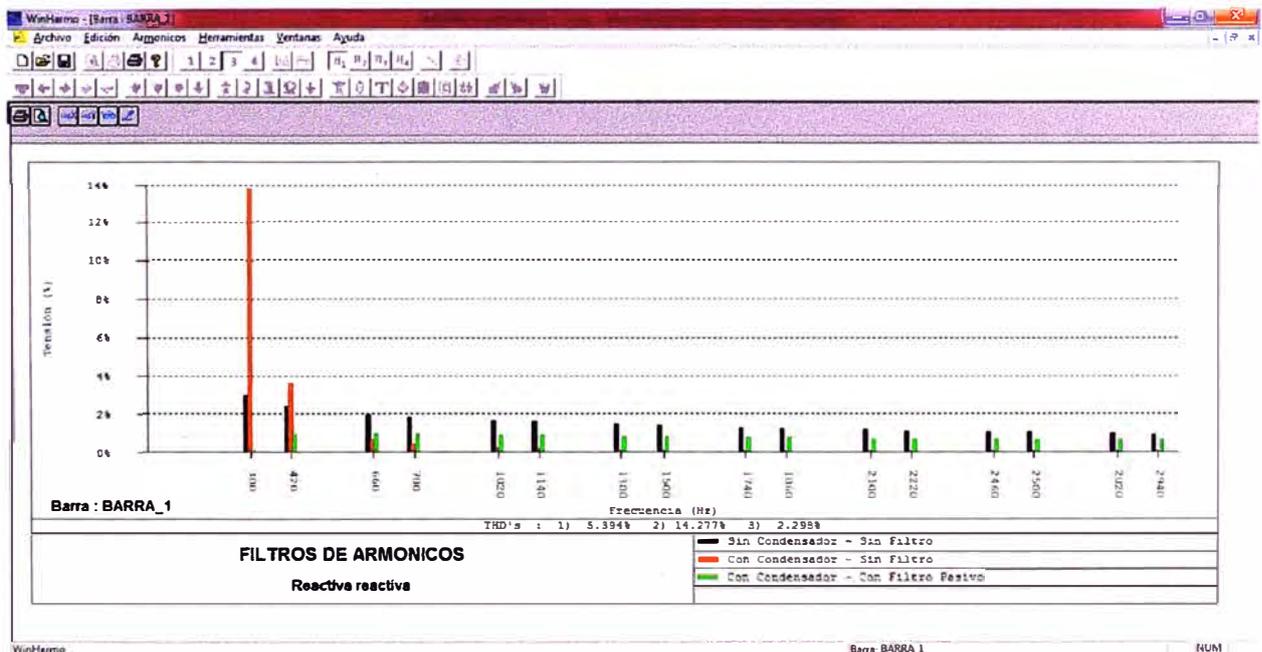


Fig.4.16: Espectro de Armónicos en la Barra 1, empleando
Sin y Con Filtro Pasivo

La siguiente figura 4.17 muestra los Espectros de Armónicos de Tensión del caso práctico de la Planta industrial, para el caso empleando el Banco de Condensadores para la compensación reactiva, y empleando Filtro Armónico Activo.

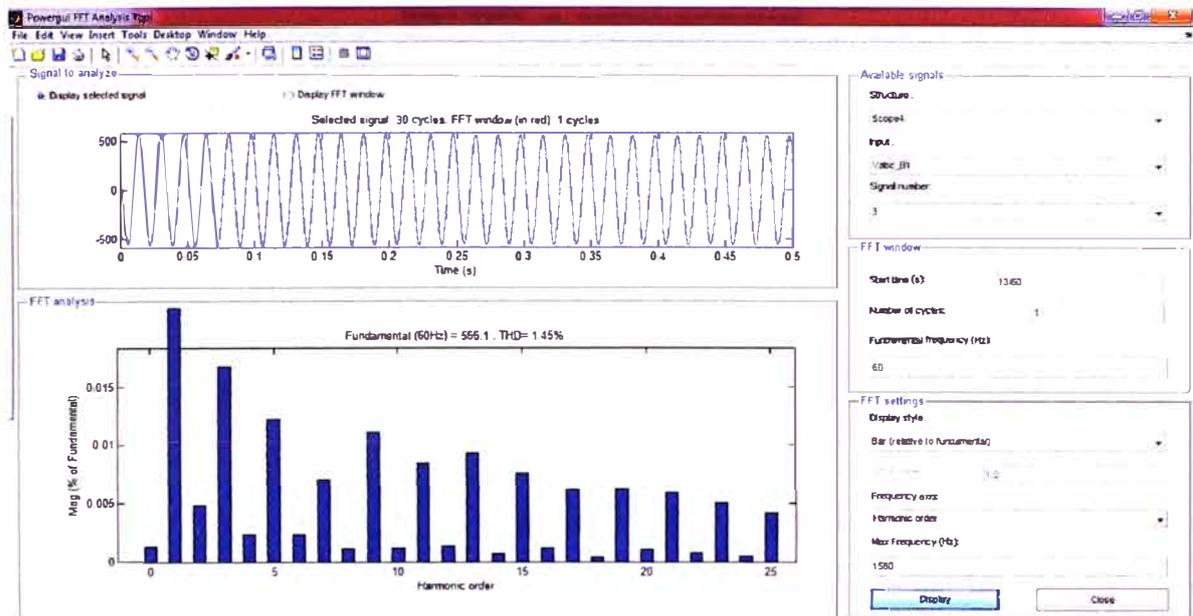


Fig.4.17: Espectro de Armónicos en la Barra 1 - Con Filtro Activo

d) Grafico de Potencia Activa y Reactiva Instantánea en la barra 1, de los 3 casos. (Ver fig.4.19, fig.4.20, fig.4.21)

La fig. 4.18 muestra las Graficas de Potencia Activa en color amarillo y Potencia Reactiva en color magenta del caso práctico de la Planta industrial, para el caso sin emplear el Banco de Condensadores y sin emplear Filtro Armónico.

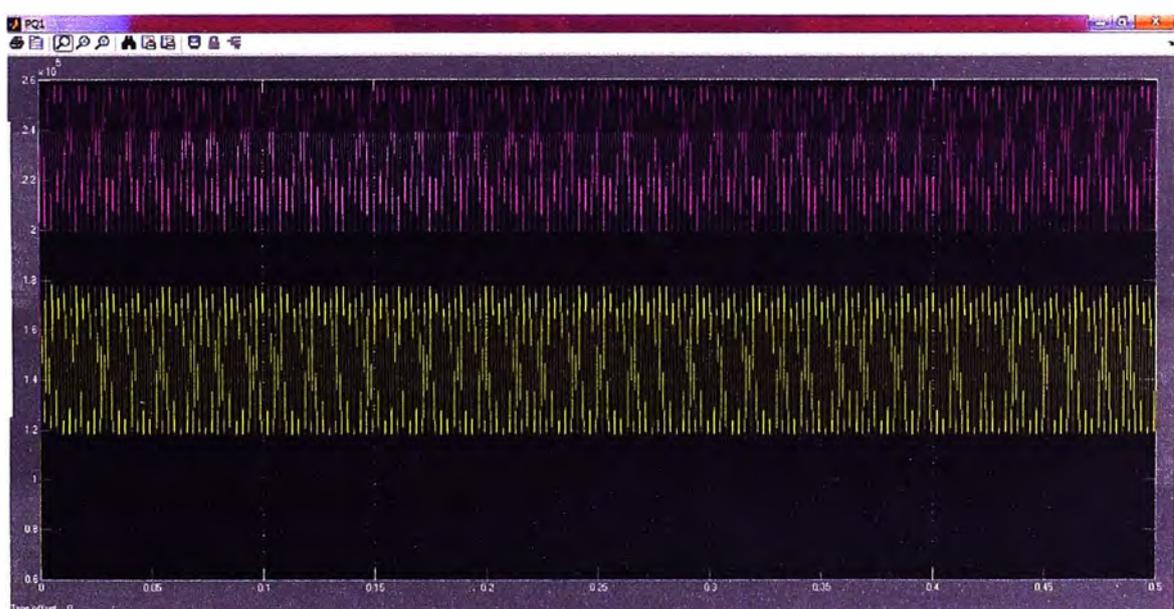


Fig.4.18: Potencia Activa y Reactiva instantánea en la Barra 1 – Sin Condensador, Sin Filtro

La fig. 4.19 muestra las Graficas de Potencia Activa en color amarillo y Potencia Reactiva en color margenta del caso práctico de la Planta industrial, para el caso sin emplear el Banco de Condensadores y sin emplear Filtro Armónico.

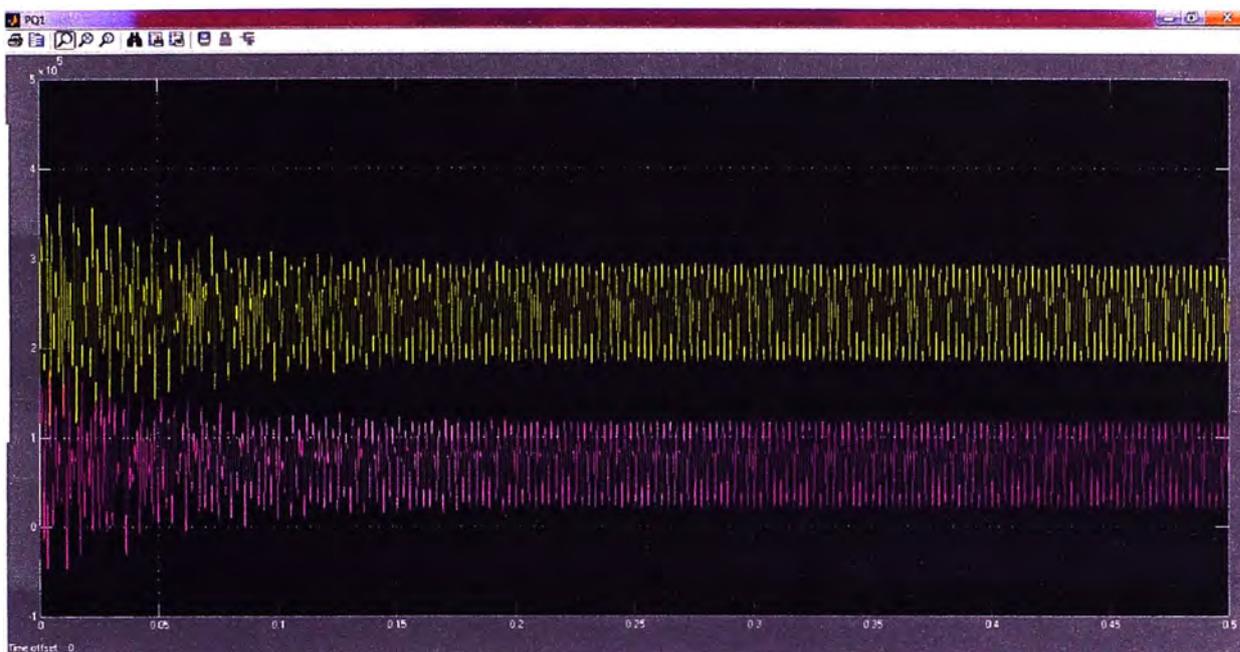


Fig.4.19: Potencia Activa y Reactiva instantánea en la Barra 1 –
Con Condensador y Sin Filtro

La fig. 4.20 muestra las Graficas de Potencia Activa en color amarillo y Potencia Reactiva en color margenta del caso práctico de la Planta industrial, para el caso empleando el Banco de Condensadores y empleando Filtro Armónico Pasivo.

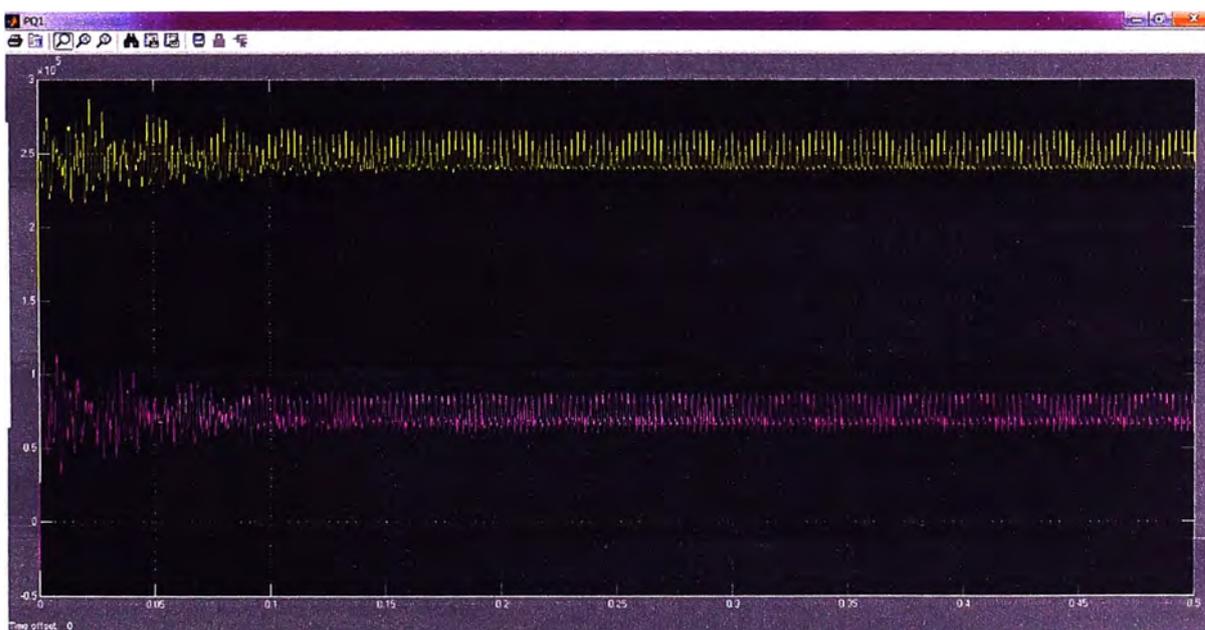


Fig.4.20: Potencia Activa y Reactiva instantánea en la Barra 1 –
Con Filtro Pasivo

La fig. 4.21 muestra las Graficas de Potencia Activa en color amarillo y Potencia Reactiva en color margenta del caso práctico de la Planta industrial, para el caso empleando el Banco de Condensadores para la compensación reactiva y empleando Filtro Armónico Activo.

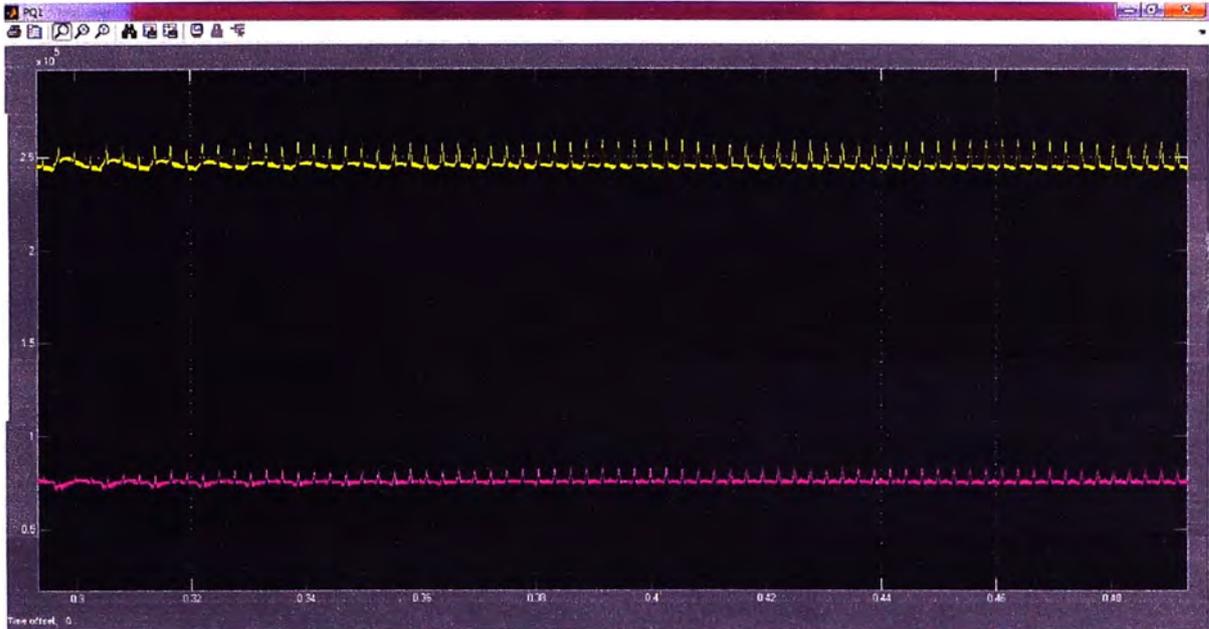


Fig.4.21: Potencia Activa y Reactiva instantánea en la Barra 1 –
Con Filtro Activo

➤ **Simulación con Variación en la Carga no lineal, con banco de condensadores de 110 kVAR y Filtro Shunt, para los 3 casos anteriores.**

a) Espectros de armónicos de tensión en la barra 1, en las figuras de los 3 casos. (Ver fig.4.22, fig.4.23)

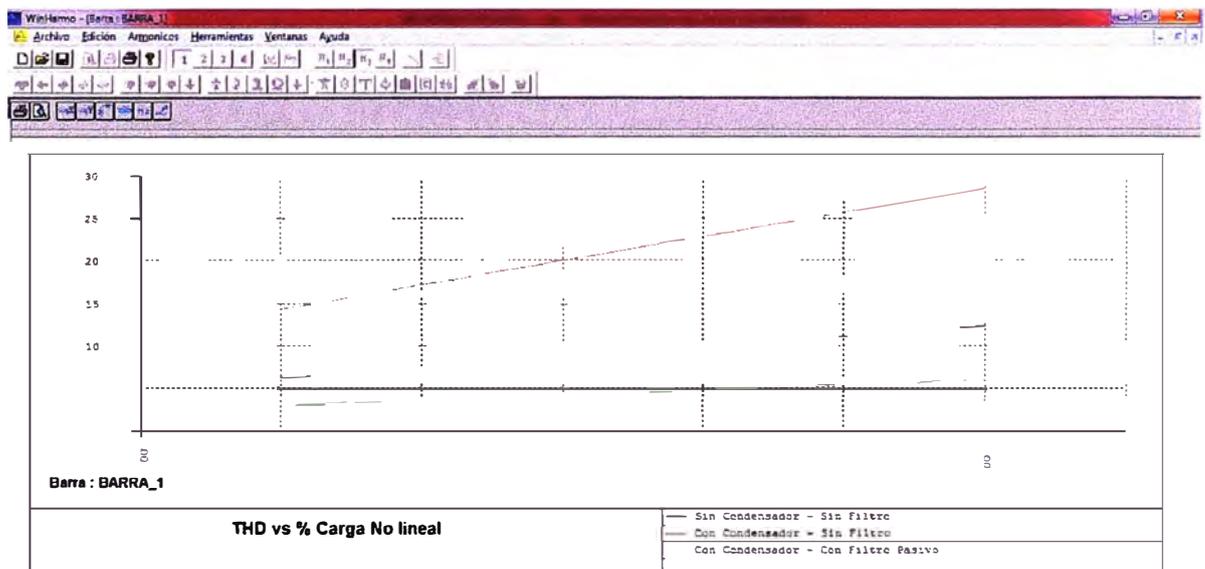


Fig.4.22 THD-V ante Variación de la Carga no lineal, Sin y Con Filtro Pasivo

La figura 4.23 a) muestra el Espectro de Armónicos de Tensión del caso práctico, para el caso empleando el Banco de Condensadores, y empleando Filtro Armónico Activo en el tiempo $T=13/60$ antes de la Variación de la carga no lineal.

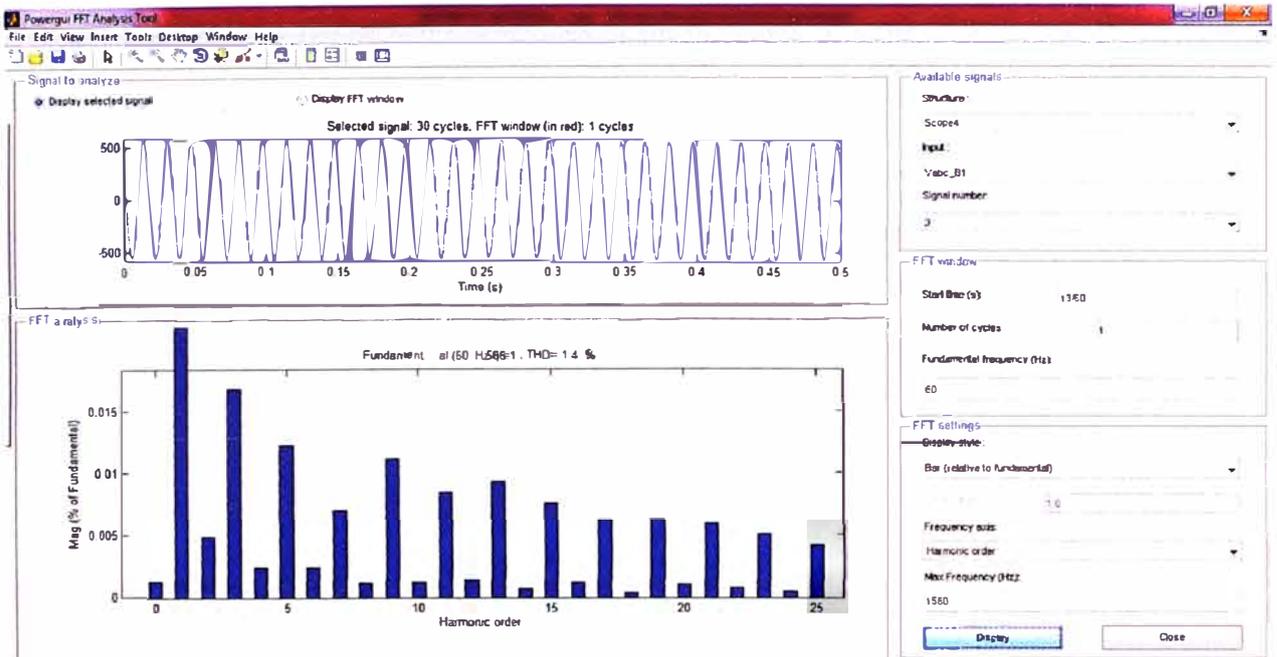


Fig.4.23 a)

La figura 4.23 b) muestra el Espectro de Armónicos de Tensión del caso práctico, para el caso empleando el Banco de Condensadores, y empleando Filtro Armónico Activo en el tiempo $T=18/60$ después de la Variación de la carga no lineal.

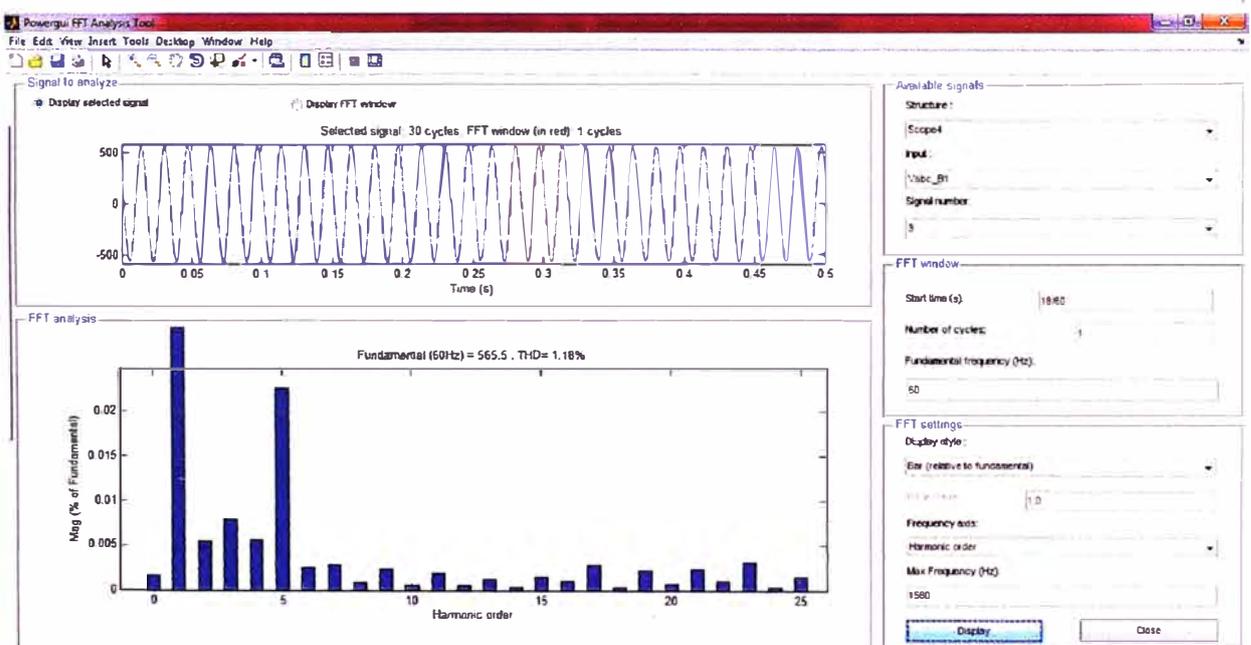


Fig.4.23 b)

Fig.4.23 THD-V ante Variación de la Carga no lineal, Con Filtro Activo

a) $T=13/60$ antes de la variación, b) $T=18/60$ después de la variación

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y MEJORAS DEL CASO PRÁCTICO EMPLEANDO FILTRO ACTIVO

En el presente capítulo comentaremos de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el capítulo anterior, así mismo de la solución al problema encontrado.

5.1 Resultados y Mejoras de Simulación con Banco de condensadores empleando Filtro Activo

a. Resultado 1:

De las simulaciones realizadas se observa que al instalar el banco de condensadores de 110 kVAR en la barra 1, el THD-V incrementa de 5,39% a 14,28% y la frecuencia de resonancia sería 300 Hz (5ta armónica). Mientras al instalar el Filtro Pasivo shunt sintonizado a la 5th armónica, ya que presenta resonancia a dicha frecuencia, el THD-V disminuye de 14,28% a 2,30% y la frecuencia de resonancia sería 240 Hz (4ta armónica). En cambio al instalar el Filtro Activo shunt, el THD-V disminuye de 12,55% a 1,45% y no presenta frecuencia de resonancia. Ver Tabla N° 5.1

Tabla N° 5.1 THD-V de los 3 casos simulados

		Barra 1		
	Sin Condensador - Sin Filtro	Con Condensador - Sin Filtro	Con Condensador - Con Filtro Pasivo	Con Condensador - Con Filtro Activo
THD-V	5,39%	14,28%	2,30%	1,45%

Los valores de THD-V cuando se emplean Filtro Pasivo y Filtro Activo están dentro de los límites tolerables.

b. Resultado 2:

Se observa que al instalar el banco de condensadores, se compensa el consumo de potencia reactiva en 150 kVAR aproximadamente, y el consumo de potencia activa aumenta 70 kW aproximadamente, ya que existe una variación ó distorsión de las potencias activa y reactiva, debido a las armónicas.

Pero luego de instalar el Filtro Pasivo shunt sintonizado, la distorsión ó variación de las potencias activa y reactiva del circuito se reduce, esta variación aun persiste debido al restante órdenes de armónicos. Mientras al emplear Filtro Activo dicha distorsión ó variación se reduce significativamente, esto es debido a que el filtro activo es capaz de eliminar de forma automática los armónicos de corriente presentes en la red con una

amplia gama de frecuencias armónicas, y así mejorar el factor de potencia con respecto al filtro pasivo.

5.2 Resultados y Mejoras de Simulación ante Variación de la Carga no lineal

a. Resultado 1:

De las simulaciones realizadas se observa que al duplicar la carga no lineal, dicha variación hace incrementar proporcionalmente el valor del THD-V cuando se emplea Filtro Pasivo. Mientras al emplear Filtro Activo, dicha variación no afecta significativamente el valor de THD-V. Ver Tabla N° 5.2

Tabla N° 5.2 THD-V vs % Carga no Lineal

		Barra 1	
		Con Condensador - Con Filtro Pasivo	Con Condensador - Con Filtro Activo
THD-V	A 100% Carga no Lineal	3,02%	1,45%
	A 200% Carga no Lineal	6,03%	1,18%

b. Resultado 2:

En las fig.5.1, fig.5.2 se visualiza que en $t=0.25$ al darse el incremento de carga no lineal, el tiempo de establecimiento a un estado estacionario de la onda $labc_B1$ en el caso del Filtro Pasivo es mayor con respecto al Filtro Activo, ya que el filtro pasivo no cuenta con un sistema de control, que ayude al comportamiento del ante dichas variaciones. En cambio el filtro activo si cuenta con un sistema de control, que ayuda a reaccionar con rapidez su comportamiento ante perturbaciones exteriores.

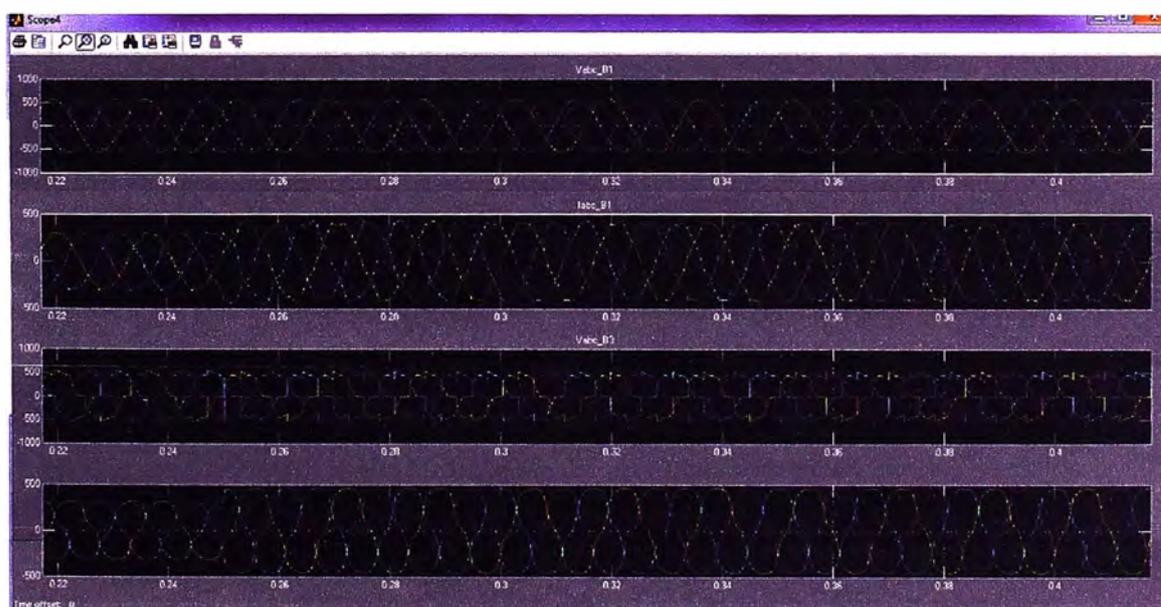


Fig.5.1 Establecimiento de $labc_B1$ ante Variación de la carga no lineal en $T=0,25$ – Con Filtro Pasivo

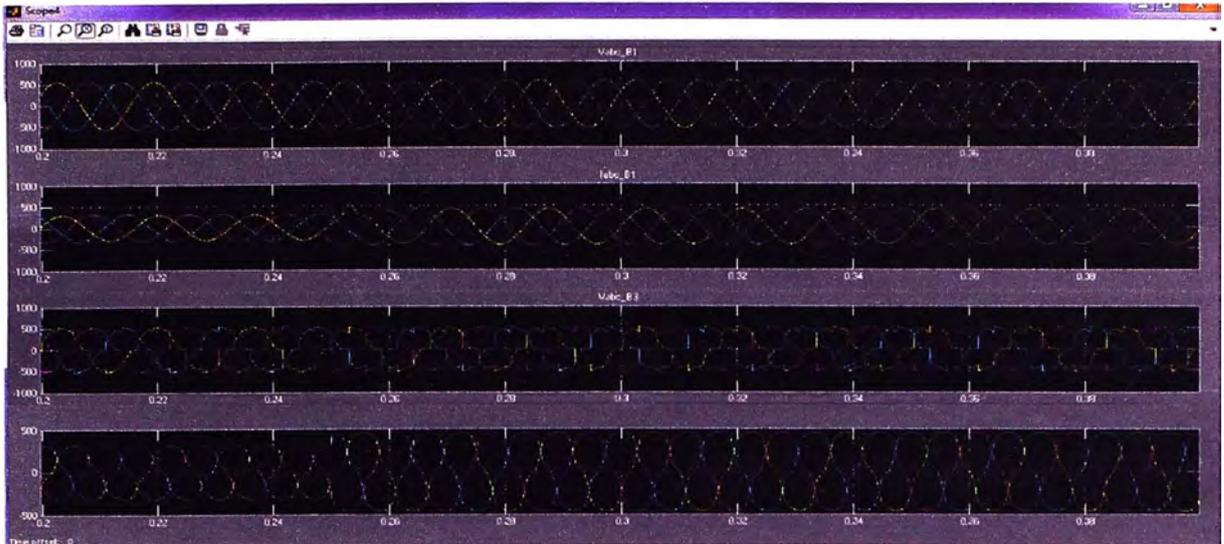


Fig.5.2: Establecimiento de I_{cbr_B1} ante Variación de la carga no lineal en $T=0,25$ – Con Filtro Activo

5.3 Ventajas y Desventajas de Filtros Activos y Pasivos

En las siguientes tablas N° 5.3 y N° 5.4, indicaremos las ventajas y desventajas de ambos filtros:

Tabla N° 5.3: Ventajas y Desventajas del Filtro Pasivo

Filtros Pasivos	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tienen la tecnología madura, conocida y de costo razonable. • Es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado, proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema. • En muchas ocasiones puede utilizarse el banco de condensadores de la instalación para implementar el filtro, con lo que los gastos se reducen a una posible ampliación, y a las bobinas. • Bloquean las corrientes armónicas en los dos sentidos, evitando que la carga se vea afectada por armónicos precedentes de otro punto de la instalación y viceversa. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se adapta al circuito si la carga no lineal cambiara su comportamiento, produciéndose ineficiencias en la supresión de las corrientes armónicas. • Su comportamiento es afectado por la impedancia de la fuente, la que cambia al variar la topología de la red, esto ocasiona cambios en la frecuencia de resonancia del filtro y hasta problemas. • No puede lograrse objetivos de compensación más complejos ó dinámicos.

Tabla N° 5.4: Ventajas y Desventajas del Filtro Activo

Filtros Activos	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Está compuesto por una fuente de corriente controlada que puede suministrar corrientes de cualquier amplitud, fase y frecuencia pudiendo adaptarse a las condiciones cambiantes de la carga y de la propia red sin producir resonancia con el filtro. • El comportamiento dinámico es muy adecuado. • Es posible establecer y conservar objetivos precisos para factor de potencia. Esto permite que los filtros activos funcionen en aplicaciones en las que es necesario controlar con precisión el factor de potencia para evitar perturbaciones en la instalación. • Puede aplicarse un equilibrado preciso de cargas permitiendo la descarga de los sistemas neutros y evitando que la tensión del neutro a tierra se mantenga en los niveles mínimos. • Mantenimiento mínima. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es una solución de mayor coste.

CONCLUSIONES

1. Las Instalaciones industriales que planeen realizar compensación reactiva en su instalación eléctrica, deberían utilizar Filtros de armónicos para así evitar el incremento de armónicos y no ser un potencial perturbador en la red, esto ayudara a reducir el nivel de armónico. De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda el empleo de Filtros Activos para obtener una mayor mejora de distorsión armónica, ya que es capaz de eliminar los armónicos de corriente presentes en la red con una amplia gama de frecuencias armónicas, y así mejorar el factor de potencia.
2. Las Instalaciones industriales que cuenten con compensación reactiva en su instalación eléctrica con o sin Filtro Pasivo, se recomendaría reemplazar o instalar Filtros Activos, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos, los Filtros Activos ofrecen mayores mejoras de distorsión armónica.
3. De los filtros presentados, el Filtro Activo presenta grandes ventajas significativas con respecto al Filtro Pasivo, ya que esto significa eliminar una amplia gama de los armónicos presentes en las instalaciones eléctricas industriales, compensar en forma automática la potencia reactiva, etc.
4. Ante Instalaciones de baja tensión muy dinámicas, variaciones de consumo de cargas no lineales, ampliación futura de cargas no lineales, el empleo de Filtro Activo es apropiado, ya que puede suministrar una amplia gama de corrientes de cualquier amplitud, fase y frecuencia pudiendo adaptarse a las condiciones cambiantes de la carga y de la propia red sin producir resonancia con el filtro.

ANEXO

ANEXO A
ESPECIFICACIONES TECNICAS DE FILTROS ACTIVOS DE BAJA TENSION

ESPECIFICACIONES TECNICAS DE FILTRO ACTIVO DE BAJA TENSION

A continuación indicaremos las especificaciones técnicas de algunos Filtros Activos de Potencia para Red de Baja Tensión de la marca ABB:

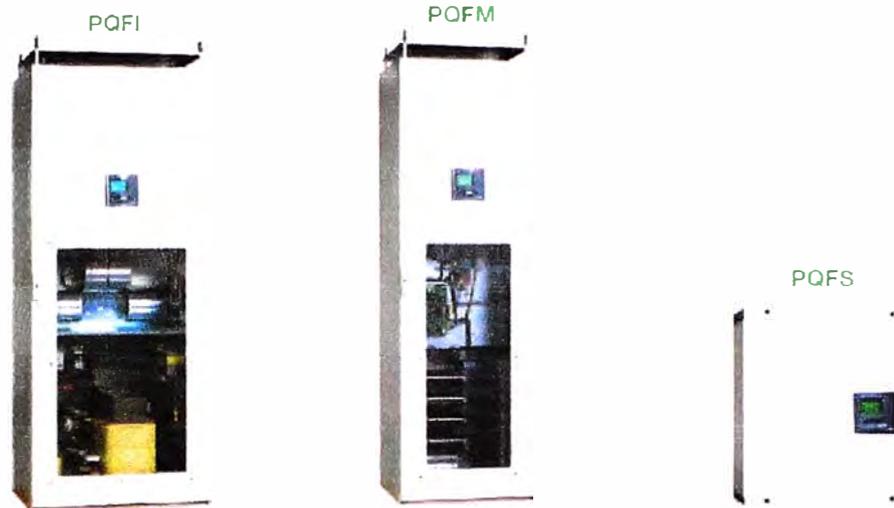


Fig.A.1: Filtros Activos de Baja Tensión en modelos PQFI, PQFM y PQFS

Tabla N° A.1 Especificaciones Técnicas de Filtros Activos de Baja Tensión

Modelo	PQFI	PQFM	PQFS
Características Eléctricas			
Método de Conexión	3 Hilos	3 Hilos	3 Hilos / 4 Hilos
Tensión de Sistema	V1: 208-480v V2: 480-690v	V1: 208-480v V2: 480-600v	208-480v 380-415v
Frecuencia de Sistema	50 Hz / 60 Hz \pm 5%		
Corriente de Línea por Unidad base (A_{rms})	V1: 300A, 450A V2: 180A, 320A	V1: 70A, 100A, 130A, 150A V2: 100A	30A, 45A, 60A, 70A 80A, 90A, 100A
Corriente de Neutro por Unidad base (A_{rms})	-	-	3 veces la Corriente de Línea
Modularidad	Máximo 8 unid. puede ser combinadas		Máximo 4 unid. puede ser combinadas
Redundancia	Arreglo Maestro/Maestro ó Maestro/Esclavo		
Perdida de Equipamiento	Típicamente 3% de la Potencia de equipamiento		
Protección del Circuito de Potencia interna	Interruptor Principal	Caja de fusibles seccionadores (Opcional)	-
Características de Filtro			
Rango de Armónicos	2 nd a 50 th orden		

Modelo	PQFI	PQFM	PQFS
Armónicos Seleccionable	20 ordenes		3 Hilos: 20 ordenes 4 Hilos: 15 ordenes
Grado de Filtrado	Programable por Armónica en valor absoluto de Ampere		
Factor de Atenuación Armónica (I_H (fuente)/ I_H (carga))	Mejor que un 97% con carga nominal		
Tiempo de Reacción	< 0.5 ms Respuesta instantánea		
Tiempo de Respuesta	Típicamente 2 ciclos del sistema (10-90% de filtrado)		
Características de Potencia Reactiva			
cos Φ Objetivo	Programable de 0.6(inductivo) a 0.6(capacitivo)		
Características de Carga balanceada			
Modos	Entre Fases: ON / OFF		Entre Fases: ON/OFF Entre Fase y Neutro: ON/OFF
Programación / Comunicación			
Digital I / O	2 entradas digitales / 6 salidas digitales (libre potencial)		
Contacto de Alarma	1 NO/NC contacto de alarma (libre potencial)		
Programación / Monitoreo	Usando PQF-Manager GUI Usando interface Modbus RTU (Opcional) Usando software PQF-Link (Opcional)		
Certificación			
	CE, cUL & CTick		CE & CTick
Aspectos físicos (por unidad base)			
Montaje	Libre de pie armario (PQFI-M) o IP00 placa (PQFM)		Montaje en pared de cerramiento
Dimensiones aprox. (WxDxH)	800 x 600 x 2150 mm	600 x 600 x 2150 mm (armario) 498 x 432 x 1697 mm (placa)	585 x 310 x 700 mm
Peso aprox.	180 A/300 A unidad: 525 kg 320 A/450 A unidad: 620 kg	270 kg (armario) 150 kg (placa)	120 kg
Color	RAL 7035 (Gris claro)		
Aspectos de Instalación			
Altitud	Instalación en interiores en un ambiente limpio hasta 1000 m de altitud		
Temperatura ambiente	-10°C a 40°C		
Humedad	Máximo 95% de humedad relativa, sin condensación		
Fijación	Piso de fijación / Siempre Cáncamos		Montado en Pared
Entrada de Cables	Por debajo	Por Arriba ó Debajo (A ser especificado en tiempo de ordenar	Por debajo
Requerimientos de CT	3 CT's son requeridos (clase 1.0 ó mejor) * Carga de Filtro: 5VA para hasta 8 unidades * Secundario: 5A CT's deben estar instalados en configuración bucle cerrado		

Modelo	PQFI	PQFM	PQFS
Protección IP	IP21 Opcional: IP41	Versión placa: IP00 Versión armario: IP21 Opcional: IP41	IP30

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Arrillaga, D.A Bradley, P.S.Bodger, 'Power System Harmonics', Wiley & Sons Ltd Año 1985.
- [2] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, 'Power Electronic Control in Electrical Systems', Newnes Power Engineering Series, 2002.
- [3] Carlos Ríos, M. Aristizábal, Ramón Gallego, Artículo 'Análisis de Armónicos en Sistemas Eléctricos', Grupo de investigación Universidad Tecnológica de Pereira Año 2003.
- [4] David Vilca, Curso 'Calidad de la Energía', Programa de Capacitación Continua – Tecsup, Año 2011.
- [5] Juan Gers, Artículo 'Teoría y Diseño de Filtros Armónicos en Sistemas Eléctricos' GERS USA, Weston-Florida, Año 2008.
- [6] Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, D.S N° 020-97 –EM.
- [7] Jesús R. Vázquez, J. L. Flores, Patricio Salmerón, Salvador P. Litrán, 'Diseño de filtros pasivos, activos e híbridos para la compensación armónica de cargas trifásicas no lineales', Escuela Politécnica Superior. Universidad de Huelva, Año 2005.
- [8] Manuel Lamich Arocas, 'Filtros Activos: Introducción y Aplicaciones', Universidad Politécnica de Catalunya, España, Año 2005.
- [9] Instalación, Operación e Instrucciones de mantenimiento de Filtros Activos de Baja Tensión, modelo PQFI, revisión 5, Año 2011.
- [10] IEC 61000-3-6, Parte 3: Límites – Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y alta tensión., Año 2008.
- [11] IEC 61000-3-14, Edición 1.0: Evaluación de los límites de emisión para la conexión de instalaciones perturbadoras a redes de baja tensión, Año 2007.
- [12] Brochure de Filtros de Calidad de Potencia PQFI – PQFM – PQFK – PQFS de la marca ABB para Red de Baja Tensión, Año 2011.