



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“SIMULACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO SERIE  
TRIFÁSICO PARA LA COMPENSACIÓN DE  
ARMÓNICOS DE TENSIÓN”**

**TESIS PROFESIONAL**  
**para obtener el título de**

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:**

**JUAN ANTONIO BARAJAS CRUZ**

**ASESOR DE TESIS:**

**DR. CIRO ALBERTO NÚÑEZ GUTIÉRREZ**

**SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.**

**DICIEMBRE 2005**

EN LIBROS



SISTEMA DE  
BIBLIOTECAS  
U.A.S.L.P.

No. DE REG.

FMNT931

IEL  
B355  
2005

---

## *Dedicatoria*

Para mi Mamá, por su apoyo incondicional en todo momento; por el amor, cuidados y bendiciones que siempre me ha dado.

Para mi Papá<sup>†</sup>, por protegerme siempre, por su bondad, por sus bendiciones desde el cielo.

Para mis hermanos: Rosalba, Ricardo y José Ángel, por su apoyo, cariño y confianza que siempre me han dado; por todos los momentos que hemos vivido desde niños.

Para Xochitl, por su comprensión y paciencia, por sus consejos y cariño que siempre me demuestra.

---

## *Agradecimientos*

Gracias a Dios por darme la fuerza para salir adelante a pesar de las adversidades, gracias por darme la vida y por protegerme.

Gracias a mi familia por darme su apoyo, en especial a mis padres por haberme brindado la oportunidad más grande de un ser humano: vivir. Mil gracias por todas sus lecciones, por su bondad, por su amor incondicional, y por todo el apoyo que siempre me han brindado.

A Xochitl quien con sus consejos, cariño, comprensión y paciencia, me ha ayudado en todos los momentos y me da la fuerza para seguir luchando para salir adelante.

Agradezco a mi asesor de Tesis Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez por su apoyo y paciencia durante éste proyecto, así como los conocimientos que logré adquirir de él durante éste tiempo.

A mis compañeros de generación: Israel, Víctor, Saturnino y Javier, con quienes viví momentos inolvidables y que me han demostrado siempre, que la amistad no se busca.

Al Ing. Pedro García Lascurain por su apoyo y consejos que me ha brindado durante ésta etapa de mi vida.

A todas las personas que de alguna u otra forma han influido en la realización de esta meta y no las mencioné... Muchas gracias.

3.2	Diseño del controlador PI	53
3.2.1	Características del Controlador PI	54
3.2.2	Análisis en frecuencia del sistema con el Controlador PI	55
3.2.3	Análisis en el tiempo del sistema con el Controlador PI	57

## **CAPITULO IV. Resultados de Simulación**

4.1	Respuesta del Filtro Activo Serie	61
4.1.1	Seguimiento a una onda senoidal	61
4.1.2	Seguimiento a una onda cuadrada	63
4.1.3	Seguimiento a un patrón de armónicos	64
4.2	Pruebas compensando carga lineal	66
4.3	Pruebas compensando carga no-lineal	69
4.4	Pruebas con transitorios de carga	71

## **CAPITULO V. Conclusiones**

5.1	Análisis de los Resultados	75
5.2	Trabajos futuros	77

	Referencias Bibliográficas	79
--	----------------------------	----

## INDICE

Lista de Símbolos	III
Resumen	VII

### **CAPITULO I. Introducción**

1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo General	2
1.1.2 Objetivos Particulares	2
1.2 Problemática	3
1.3 Calidad de la Red Eléctrica	4
1.3.1 Armónicos	6
1.3.2 Tensión	10
1.3.3 Ruido Eléctrico	15
1.3.4 Conexión a Tierra	16
1.4 Filtros Pasivos	16
1.5 Filtros Activos	17
1.5.1 Clasificación de los Filtros Activos	18
1.6 Estado del Arte	20
1.6.1 Filtro Activo Serie Trifásico basado en Troceadores de CA	20
1.6.2 Filtro Activo Serie Trifásico con Convertidor CA/CD/CA	21
1.6.3 Filtro Activo Serie Trifásico Híbrido	22
1.6.4 Filtro Activo Serie Trifásico con Convertidor CD/CA	23

### **CAPITULO II. Filtro Activo de Tensión**

2.1 Principio de Funcionamiento	25
2.2 Consideraciones de Diseño	26
2.3 Convertidor de Potencia	27
2.3.1 Inversor	27
2.3.2 Transformador Compensador	29
2.3.3 Filtro Pasivo LC de salida	31
2.4 Generación de Referencias	38
2.4.1 Teoría DQ	39
2.4.2 Simulaciones de la Teoría DQ	41

### **CAPITULO III. Análisis del Controlador**

3.1 Controles más comunes	47
3.1.1 Control en modo Tensión	49
3.1.2 Control en modo Corriente	51

## Lista de Símbolos

$DSP$	Procesador Digital de Señales
$PCC$	Punto de Acoplamiento Común
$Z$	Impedancia asociada al sistema eléctrico
$Z_{red}$	Impedancia de red
$Z_T$	Impedancia del transformador
$THD$	Distorsión Armónica Total
$CA$	Corriente Alterna
$CD$	Corriente Directa
$Sags$	Caídas rápidas de Tensión
$V_a$	Valor eficaz de la tensión de la fase A
$V_b$	Valor eficaz de la tensión de la fase B
$V_c$	Valor eficaz de la tensión de la fase C
$V_k$	Valor eficaz del k-ésimo armónico
$V_l$	Valor eficaz de la componente fundamental de tensión
$\omega$	Frecuencia angular o de rotación
$N$	Neutro
$I$	Corriente eficaz
$I_L$	Valor eficaz de la corriente de carga

$V$	Tensión eficaz
$P$	Potencia Activa
$Q$	Potencia Reactiva
$FP$	Factor de Potencia
$V_h$	Tensión de referencia
$V_d$	Componente “d” de la transformación DQ
$V_q$	Componente “q” de la transformación DQ
$V_0$	Componente “0” de la transformación DQ
$i(t)$	Señal de corriente a través del tiempo
$v(t)$	Señal de tensión a través del tiempo
$i_0(t)$	Corriente de Carga
$U$	Ley de control discreta
$u(t)$	Ley de control continua
$e(t)$	Señal de error
$V_C(t)$	Tensión en el capacitor del filtro LC
$V_{inv}(t)$	Patrón PWM a la salida del inversor
$V_p$	Componente de la secuencia positiva
$V_n$	Componente de la secuencia negativa
$VUF$	Factor de desbalance de tensión (%)
$V_{CD}$	Tensión del bus de CD
$f_c$	Frecuencia de corte
$C_v(s)$	Función de transferencia del controlador (Modo Voltaje)
$C_i(s)$	Función de transferencia del controlador (Modo Corriente)
$T(\theta)$	Matriz de transformación



---

---

$T(\theta)^{-1}$	Inversa de la matriz de transformación
$V_d^{CD}$	Componente de CD de la componente $V_d$
$V_d^{CA}$	Componente de CA de la componente $V_d$
$GND$	Punto de conexión a tierra
$L$	Inductor del filtro pasabajos
$C$	Condensador del filtro pasabajos
$T/C$	Transformador Compensador
$a$	Relación de Transformación
$dV/dt$	Diferencial de Tensión en función del tiempo
$di/dt$	Diferencial de Corriente en función del tiempo
$R$	Resistencia serie asociada al inductor
$\omega_n$	Frecuencia de corte del filtro pasabajos
$\zeta$	Factor de Amortiguamiento
$M_p$	Máximo sobreimpulso de tensión expresado en valor porcentual
$FT$	Amplitud del armónico debido a la frecuencia de conmutación
$\eta$	Eficiencia del Transformador
$N_p$	Número de vueltas del primario
$N_s$	Número de vueltas del secundario
$V_a(t)$	Valor instantáneo de la tensión en la fase A
$i_a(t)$	Valor instantáneo de la corriente en la fase A
$\alpha$	Eje Alfa
$\beta$	Eje Beta
$P_\alpha$	Componente de potencia en el eje $\alpha$

## Lista de Símbolos

---

$P_{\beta}$	Componente de potencia en el eje $\beta$
$P_{3\phi}$	Potencia Activa para sistema trifásico
$i_{\alpha}$	Componente de corriente en el eje $\alpha$
$i_{\beta}$	Componente de corriente en el eje $\beta$
$V_{\alpha}$	Componente de tensión en el eje $\alpha$
$V_{\beta}$	Componente de tensión en el eje $\beta$

## RESUMEN

La red de suministro eléctrico presenta fenómenos en los que la forma de onda de la tensión se ve seriamente alterada; estos fenómenos reciben el nombre de perturbaciones de tensión y en algunas aplicaciones es crítica su aparición. Este tipo de perturbaciones afecta de manera temporal o permanente el funcionamiento de equipos que estén conectados a la red eléctrica.

Por lo tanto, es necesario identificar el problema que produce las perturbaciones, y en consecuencia afrontarlo para solucionarlo de la mejor manera posible. Ya que estas alteraciones de tensión han existido desde que se emplea la energía eléctrica, este fenómeno se ha hecho más evidente con la introducción de nuevas tecnologías que utilizan dispositivos semiconductores. Con estos dispositivos se puede controlar mejor la potencia en la carga de manera que incremente la eficiencia en la misma. Sistemas como los rectificadores y aquellos sistemas en los cuales la corriente continua es un paso intermedio, generan una distorsión en la forma de onda de voltaje y corriente de la red eléctrica viéndose reflejada en una señal con gran contenido de armónicos.

Existen equipos que mejoran la calidad de la tensión eléctrica, estos dispositivos van desde soluciones sencillas hasta soluciones complejas, para eliminar las perturbaciones de la red eléctrica. El control automático ha jugado un papel vital en el avance de estos equipos, y se ha convertido en parte importante e integral de los procesos industriales modernos.

En este trabajo se realiza un estudio y se afronta una de las soluciones que existen para dicho problema. Esta solución es un Filtro Activo Serie Trifásico para la cancelación de armónicos y desbalances en voltaje, obteniendo resultados satisfactorios en simulación usando MATLAB.

Las referencias para la compensación del filtro activo serie se generan haciendo uso de la teoría DQ; ésta y el algoritmo de la etapa de control de un control clásico Proporcional-Integral (PI), -en esta clase de aplicaciones-, usualmente se programan en un procesador de señales digitales (DSP).

La organización de esta tesis consta de cinco capítulos los cuáles se describen a continuación:

En el capítulo I se explica la problemática que existe en la actualidad y la importancia de la calidad de la energía eléctrica y como puede ésta llegar a afectar a los

usuarios. Se explican brevemente las principales soluciones que se han utilizado para resolver algunos de los problemas y en especial la solución que aborda este trabajo. Se exponen diferentes definiciones encontradas en la bibliografía especializada sobre desbalances, con el objeto de medir el desbalance presente en la red eléctrica. También se exponen las diferentes topologías existentes del filtro activo serie trifásico, ventajas y desventajas de cada una de ellas.

En el capítulo II se analiza el principio de funcionamiento del Filtro Activo Serie y se explica cada etapa. Se indica el criterio empleado para la selección de los valores del filtro LC. Se explica la técnica de modulación empleada en este trabajo siendo ésta el PWM senoidal. Se propone un criterio para la selección del valor del capacitor del bus de CD y se explica el principio del balance de energía empleado para regular el voltaje en el capacitor. Se analiza la etapa de potencia y se hace un estudio de los métodos para la obtención de las referencias de tensión a ser compensadas haciendo uso de la teoría DQ. Por último se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones usando Simulink de MATLAB.

En el capítulo III se realiza el análisis del controlador empleado en esta investigación y se explican los controles automáticos más comunes mencionando algunas de las características más importantes. Se explican las consideraciones de diseño del PI (Control Proporcional Integral) utilizado para este trabajo de tesis.

En el capítulo IV se presentan las pruebas en simulación para validar los análisis obtenidos en los capítulos anteriores bajo diferentes condiciones de operación. Se realiza el seguimiento a una onda cuadrada y una senoidal, siendo éste capaz de sostener a cualquier tipo de carga con una tensión senoidal con contenido armónico. Se emplea al Filtro Activo Serie Trifásico con una carga lineal y una carga no-lineal y se muestran los diagramas utilizados para la conexión del filtro activo de potencia a la red eléctrica.

En el capítulo V se presentan las conclusiones de este trabajo, y se mencionan los trabajos futuros propuestos para el Filtro Activo Serie.

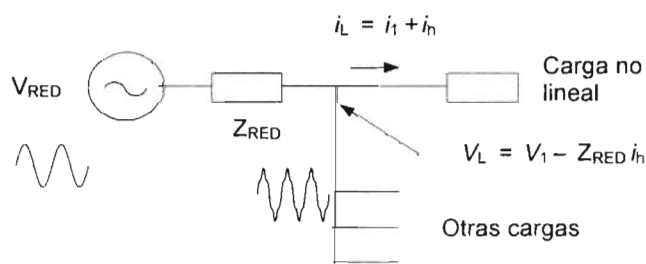
# CAPITULO I

## Introducción

La forma ideal de la tensión de la red eléctrica es una función senoidal del tiempo con frecuencia y magnitud constante. Las cargas de tipo lineal conectadas a dicha red originan corrientes también senoidales. Los parámetros que definen este tipo de respuesta son: amplitud, periodo, frecuencia, oscilación y fase [3].

En la práctica estas condiciones de frecuencia y tensión constantes, y la forma de la onda senoidal no suelen cumplirse, ya que los propios generadores y la red de distribución eléctrica presentan una cierta impedancia interna y otras condiciones no ideales que ocasionan desviaciones con respecto a dicho comportamiento ideal. Por lo tanto, se aceptan como normales ciertas desviaciones en el valor eficaz de la tensión y en la frecuencia, habiéndose establecido normas que marcan los límites tolerados para dichas desviaciones.

Un parámetro para medir la distorsión es el contenido de armónicos. Su origen es debido a la ausencia de linealidad de cierto tipo de cargas (sobretudo con dispositivos semiconductores) que generan una serie de corrientes armónicas y dan lugar a una distribución de dichas corrientes entre la red eléctrica y las cargas, este efecto puede verse en la figura 1.1. Este tipo de distorsión por armónicos se presenta como una desviación permanente de la forma de onda con respecto a una senoidal pura. Por lo tanto la tensión de la red eléctrica ya no será senoidal, sino que resultará distorsionada por la caída de tensión que las corrientes armónicas produzcan sobre la impedancia interna de la red eléctrica.



**Figura 1.1.** Efecto de las corrientes armónicas a través de la red eléctrica.

Las variaciones rápidas de potencia reactiva generadas por algunos sistemas conectados a la red eléctrica, representan un serio problema en la industria. Este tipo de sistemas, incluyen los rectificadores asociados a la alimentación de equipos de corriente continua, es decir, aquellos en los cuales la corriente continua se emplea directamente, por ejemplo, en dispositivos de control de velocidad de motores, en rectificadores, cargadores de baterías, etc., así como aquellos sistemas en los cuales la corriente continua es un paso intermedio de

almacenamiento de potencia, por ejemplo, en dispositivos de variación de velocidad de motores asíncronos y síncronos, sistemas de alimentación in-interrumpida, variadores de frecuencia, etc. Es por esta razón que se hace necesario prestar atención en la calidad de la energía eléctrica de forma que se puedan identificar y valorar los problemas de distorsión armónica, de baja tensión, desbalances, problemas asociados con las caídas de tensión (“sags” de tensión), además de escenarios que involucren un bajo factor de potencia, por nombrar solo algunos.

Existen algunas investigaciones acerca de la calidad de la red eléctrica y estas se orientan al impacto de las variaciones eléctricas de potencia en los equipos electrónicos y en los procesos industriales. Sin embargo, otro de los factores importantes es el aspecto económico, en donde los gastos pueden variar drásticamente en la industria; hay aspectos comunes de producción que pueden verse afectados por problemas de la calidad de la red eléctrica, como son: costos asociados con el restablecimiento del proceso, costos asociados con productos que deben ser desechados, costos de mantenimiento correctivo, etc.

Existen diversos dispositivos que se emplean para mejorar la calidad de la red eléctrica y que además dependen de las características particulares del problema y de la aplicación. En este trabajo de tesis se aborda el fenómeno de las perturbaciones de tensión de la red eléctrica y en consecuencia, el dispositivo propuesto compensa algunos problemas de distorsión armónica y desbalances de tensión.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

El propósito general de este trabajo de tesis es realizar un estudio y simulación de un acondicionador de línea. El acondicionador de línea planteado es un Filtro Activo de potencia tipo Serie, que sirve para compensar las perturbaciones de la red eléctrica como son la distorsión armónica y los desbalances en un sistema de baja tensión. Utilizando para la obtención de las señales de referencia un esquema basado en la teoría DQ, y para la etapa de control un control PI clásico. Se examinan conceptos de análisis armónico, análisis fasorial, modelado y simulación del sistema.

### 1.1.2 Objetivos Particulares

- ♣ Hacer una búsqueda bibliográfica relacionada con el tema.
- ♣ Simular la topología y la etapa de control del Filtro Activo Serie Trifásico para asegurar su funcionamiento y observar algunos aspectos de interés mediante Simulink de MATLAB.
- ♣ Realizar un análisis de la teoría DQ, para la obtención de las señales de referencia.
- ♣ Hacer un estudio de los controladores más comunes y examinar la respuesta dinámica del filtro utilizando un control PI clásico.

## 1.2 Problemática

En los últimos años, el problema de la calidad de la red de energía eléctrica ha adquirido gran relevancia, debido al incremento de equipos eléctricos y electrónicos que necesitan una tensión de alimentación lo más senoidal posible para su correcto funcionamiento. También, se encuentra una distorsión en la corriente de la red eléctrica la cual es producida por varios factores, que van desde los usuarios que utilizan cargas no lineales (usualmente cargas electrónicas con dispositivos semiconductores), que generan armónicos de corriente y afectan la forma de onda de la tensión, y hasta los inestimables como son las descargas atmosféricas [7].

Las cargas no lineales conectadas a la red de corriente alterna senoidal absorben corrientes que no son senoidales, aunque sí periódicas. Como ejemplos más típicos de tales cargas se pueden citar: los convertidores estáticos (rectificadores, reguladores de velocidad, arrancadores, cargadores de baterías, etc.), hornos de arco, instalaciones de iluminación con lámparas de descarga, electrodomésticos con equipos de regulación, etc. Problemas como la contaminación armónica con variaciones frecuentes de tensión, desbalances, mala regulación y un bajo factor de potencia, comprometen la calidad del servicio eléctrico que se entrega a los usuarios, lo cual, causa mal funcionamiento a los equipos conectados a la red eléctrica o incluso su destrucción.

En la industria existen procedimientos en los cuales se utilizan los llamados procesos y cargas críticas, algunos de estos son los PLC's (Computadores Lógicos Programables), las computadoras, procesos de control industrial, equipo medico, etc., por lo tanto, es necesario una tensión de alta calidad. Estos dispositivos deben alimentarse adecuadamente las 24 horas del día y los 365 días del año, debido a que un mal funcionamiento puede tener serias consecuencias económicas [2].

Una carga puede ser crítica porque necesita una elevada seguridad en el suministro de energía eléctrica, debido a la importancia de las funciones que cumple. Una carga también puede ser sensible debido a las excelentes características de la forma de onda con la cual se le suministra energía eléctrica, es decir, una muy buena regulación de tensión, estabilidad en la frecuencia y sin ningún tipo de perturbaciones. Para establecer una diferencia, se dirá carga crítica a aquella que requiera ambas características de alimentación a la vez; y carga sensible será aquella que requiera únicamente la segunda condición [5].

Como existe una gran variedad de cargas críticas en la actualidad, es útil hacer una clasificación en dos grupos para evaluar sus requerimientos; evidentemente esta no es una clasificación absoluta, sino que más bien trata de identificar las necesidades de diferentes equipos o a veces de uno mismo obedeciendo a la función que realice.

### Cargas poco críticas:

- ♣ Controladores de procesos industriales no continuos.
- ♣ Computadoras pequeñas y sus periféricos.
- ♣ Equipos y sistemas de transmisión.

- ♣ Equipos médicos no vitales.
- ♣ Instrumentación electrónica simple.
- ♣ Centros de control de centrales no nucleares y de distribución de la energía eléctrica.

### Cargas muy críticas:

- ♣ Controladores de procesos industriales continuos.
- ♣ Computadoras grandes, medianas y algunos periféricos.
- ♣ Comunicaciones estratégicas y otras instalaciones de defensa.
- ♣ Equipos médicos vitales.
- ♣ Instrumentación electrónica compleja.
- ♣ Centros de control de centrales nucleares.

## 1.3 Calidad de la Red Eléctrica

La expresión "Calidad de la Red Eléctrica" tiene diferentes significados dependiendo del punto de vista. Una definición, es la frecuencia relativa y la gravedad de las distorsiones de la forma de onda de tensión y/o de corriente del sistema de alimentación hacia las cargas del usuario que suceden cuando este conecta su equipo en la red eléctrica [8]. La tensión de la red eléctrica es de buena calidad si su valor instantáneo se mantiene dentro del rango de variación especificada y no presenta variaciones lentas, rápidas y transitorios fuera de los índices recomendados.

Existen cuatro parámetros importantes a estudiar para determinar si la energía eléctrica que reciben los equipos eléctricos en general es la adecuada:

- ♣ Armónicos
- ♣ Tensión
- ♣ Ruido Eléctrico
- ♣ Conexión a Tierra

Se dice que la calidad de la red eléctrica es de "Alta Calidad" si la tensión que entrega la fuente es estable y no sufre distorsiones, y su conexión a tierra es adecuada, y las características de la forma de onda de la tensión y/o corriente se apegan a lo establecido por la recomendación "IEEE-519 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems".

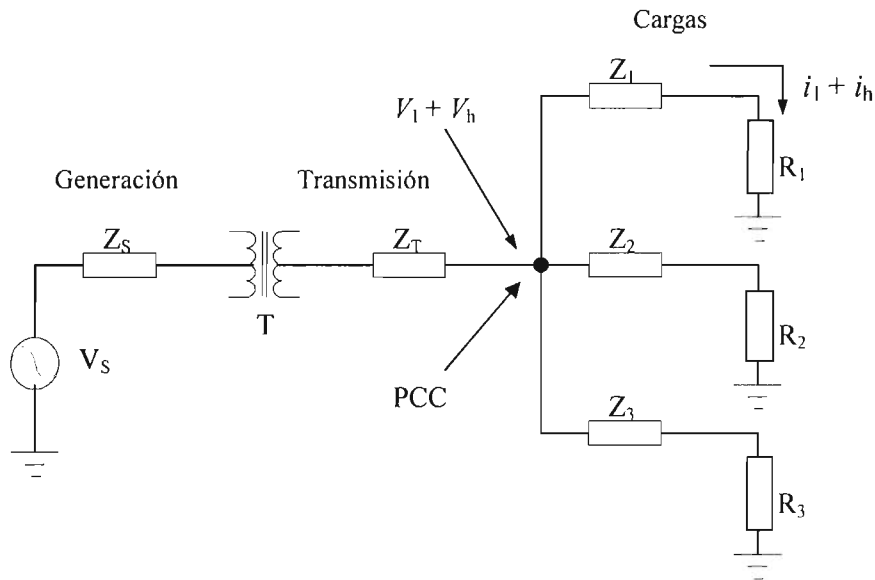
Por el contrario, la calidad de la red eléctrica es de "Baja Calidad" cuando existe gran desviación de las recomendaciones establecidas en tensión y/o corriente en el sistema eléctrico de potencia, como consecuencia de una mala operación y/o falla de algún equipo o línea de transmisión.

Una forma sencilla de definir "Calidad de la Red Eléctrica" en un sistema de potencia es en lo que se refiere a la capacidad de tener una tensión no distorsionada disponible para los dispositivos



conectados al sistema, pues todo dispositivo se diseña con esta base. Desafortunadamente, todos los aparatos de naturaleza electrónica (cargas no lineales), distorsionan la forma de onda de tensión y/o corriente en el sistema de distribución; esto puede afectar a otro equipo que fue diseñado con base en tener una tensión senoidal pura en su alimentación. Debido a la sensibilidad a tales perturbaciones de un equipo con respecto a otro, la calidad de energía afecta en mayor o menor grado a otros dispositivos.

En la figura 1.2 se muestra un ejemplo de un sistema eléctrico de potencia en su modelo equivalente, y el punto donde se encuentran conectados los usuarios es el PCC (punto de conexión común).



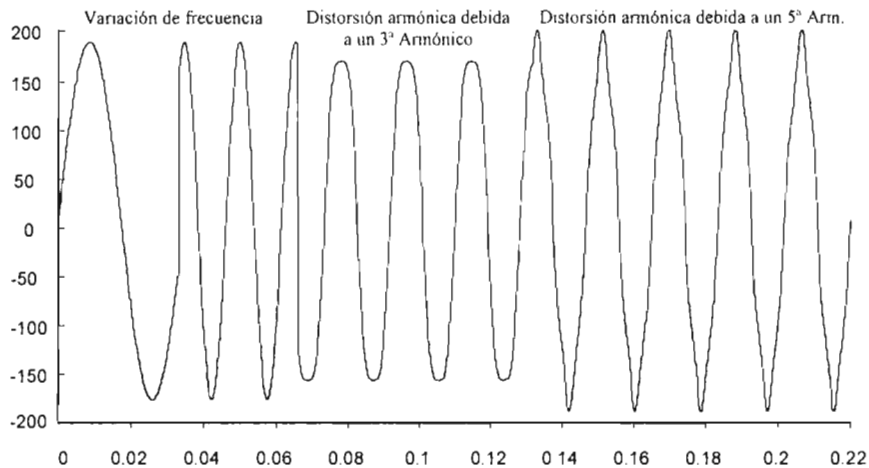
**Figura 1.2.** Sistema eléctrico de potencia.

Supóngase que  $V_s$  proporciona una tensión puramente senoidal, pero si la carga  $R_1$ , demanda armónicos de corriente, y debido a que las líneas de transmisión de alta tensión son demasiado largas, se presenta una impedancia la cual es función de la frecuencia. Esta impedancia tiene como consecuencia una reducción de tensión en el PCC al existir un flujo de potencia; consecuentemente, en el punto de conexión común aparecerán armónicos de tensión de igual frecuencia que los armónicos de corriente que demanda la carga  $R_1$ , distorsionando la forma de onda. Esta tensión distorsionada, también la ven las demás cargas conectadas al punto de conexión común, afectando a los usuarios  $R_2$  y  $R_3$ , generando perturbaciones a cargas críticas y/o sensibles.

Como regla general, se puede concluir que mientras mayor sea el valor de la impedancia de red, el sistema eléctrico de potencia es más susceptible a los problemas de calidad eléctrica. Es por esta razón que se hace indispensable poner atención en la calidad de la energía eléctrica de manera que se puedan identificar y evaluar los problemas ya mencionados.

### 1.3.1 Armónicos

Se define como una desviación permanente de la forma de onda de tensión y/o corriente respecto a una onda senoidal. Las cargas eléctricas no lineales representan una deformación en la onda resultado de la superposición a la fundamental de 60 Hz de ondas en frecuencias múltiples. Un armónico es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Estas señales conocidas como Armónicas producen distorsión de tensión y de corriente que se manifiestan de diversas formas en el resto del sistema como calentamiento, disparos involuntarios de tiristores, vibraciones, pérdidas de información en sistemas de cómputo, etc. La figura 1.3 muestra perturbaciones de forma de onda permanentes ocasionadas por armónicos y variaciones de frecuencia.



**Figura 1.3.** Perturbaciones a la forma de onda de tensión y variaciones de frecuencia.

La presencia de armónicos en el sistema da lugar a sobretensiones y por lo tanto a la probabilidad de aparición del efecto corona, degeneración de los aislamientos y fallos en los mismos. Estos efectos se notan principalmente en los bancos de condensadores, asociados a menudo con casos de resonancia, aunque también puede ocurrir en elementos de protección contra sobretensiones, filtros utilizados en sistemas de comunicación de onda portadora, etc.

La medición de señales armónicas debe practicarse con equipos de alta fidelidad y confiabilidad. Los equipos de medición deben cumplir con dos tareas específicas:

- ♣ Niveles de Monitoreo de distorsión armónica en voltaje y corriente
- ♣ Medición de Impedancia armónica de la red.

En la práctica las amplitudes de los armónicos de corriente y/o tensión suelen ser decrecientes a medida que aumenta su orden, de forma que los armónicos de orden superior a 20 rara vez suelen tener efectos importantes sobre la red eléctrica y cargas contiguas (salvo en el caso de resonancias).

El desarrollo en serie de Fourier de una función periódica es una herramienta matemática muy útil en el estudio de estas perturbaciones. Basándose en el

mismo y con objeto de cuantificar la desviación de una forma de onda respecto a la senoidal, se definen los siguientes parámetros según la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) y el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) que han establecido normas que limitan las perturbaciones de baja frecuencia en redes públicas e instalaciones industriales, como las normas IEC 61000, EN 50160, EN 61000, EN 60801 y EN 60555 [1]. Los parámetros manejados por la normativa para establecer los límites de la perturbación por armónicos son:

➤ **Orden de un armónico (n):**

Relación entre la frecuencia de un armónico ( $f_k$ ) y la frecuencia fundamental ( $f_1$ ):

$$n = \frac{f_k}{f_1} \quad (1.1)$$

➤ **Distorsión debida al armónico k:**

Es la relación entre el valor eficaz de la componente armónica de orden k y el valor eficaz de la componente fundamental.

$$DA_k = \frac{V_k}{V_1} \quad (1.2)$$

En donde:

$DA_k$  representa la distorsión armónica del k-ésimo armónico.

$V_k$  representa el valor eficaz del k-ésimo armónico.

$V_1$  representa el valor eficaz de la componente fundamental.

➤ **Distorsión Armónica Total (THD por sus siglas en inglés):**

Representa la relación entre el valor eficaz del residuo armónico y el valor eficaz de la componente fundamental.

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2} \quad (1.3)$$

El nivel de compatibilidad de la tasa de distorsión total teniendo en cuenta los armónicos del 2º al 40º en instalaciones industriales esta dado en la tabla 1.1 según las normas CEI [3].

Armónico e interarmónico	Clase 1: Equipos muy sensibles a perturbaciones	Clase 2: Niveles iguales a las redes de distribución	Clase 3: Aparatos industriales como hornos de arco, etc.
Distorsión armónica total THD en %	5%	8%	10%

**Tabla 1.1.** Niveles de compatibilidad de armónicos en instalaciones industriales

Los niveles de compatibilidad de la tasa de distorsión armónica total de la onda suministrada para baja y media tensión en redes públicas son dados en la tabla 1.2 según las normas CEI. Cabe mencionar que la tasa de distorsión total está limitada al 8% [3].

Armónico	Tensión relativa %	Armónico	Tensión relativa %
2°	2.0	14°	0.2
3°	5.0	15°	0.3
4°	1.0	16°	0.2
5°	6.0	17°	2.0
6°	0.5	18°	0.2
7°	5.0	19°	1.5
8°	0.5	20°	0.2
9°	1.5	21°	0.2
10°	0.5	22°	0.2
11°	3.5	23°	1.5
12°	0.2	24°	0.2
13°	3.0	25°	1.5

**Tabla 1.2.** Niveles de compatibilidad de armónicos en redes para baja y media tensión.

La recomendación **“IEEE Guide for Harmonic Control”** hecha en 1979, limitaba la distorsión armónica total de la señal de tensión a un 5% para sistemas industriales (o un 8% para sistemas dedicados a dar alimentación a convertidores únicamente). En México se utiliza la normativa de la Comisión Federal de Electricidad en su reglamentación interna (L0000-45), pero esta está basada en las recomendaciones de la IEEE. Las especificaciones con respecto a los armónicos han sido agrupadas por la IEEE en la recomendación **“IEEE-519 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”** hecha en 1989. En la cual indica que existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución, la cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas. En México, se utiliza esta especificación para el Punto de Conexión Común donde la Comisión Federal de Electricidad participe. Además también se basa en la recomendación **“IEEE-518 Guide for the installation of Electrical Equipment to Minimize Electrical Noise Input to Controllers from External Source”** hecha en 1982, (norma L0000-45).

Al mismo tiempo, las compañías de distribución eléctrica tienen la obligación de proporcionar una alta calidad de la red eléctrica en lo que respecta al nivel del voltaje y su forma de onda. La recomendación IEEE-519 hace referencia no solo al nivel de distorsión total de armónicos producidos por una fuente individual, sino también a su magnitud con respecto a la red de suministro eléctrico.

Es necesario prestar atención en que la recomendación IEEE-519 está limitada por tratarse de una recopilación de sugerencias prácticas que sirven como guía tanto a consumidores como a distribuidores de energía eléctrica.

Es obligatorio para el distribuidor y el consumidor resolver los problemas asociados a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión del voltaje. La intención de la IEEE-519 es la de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente [4]:

- ❖ Se establece una restricción en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.
- ❖ Se establece una restricción sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red eléctrica.

Ciertas veces los armónicos tienen su origen en las propias industrias, o si no, en la red de suministro eléctrico al haber sido contaminada por algunos consumidores. El incremento de armónicos en la red eléctrica se ha debido al avance de los equipos electrónicos de potencia mediante dispositivos semiconductores, convertidores estáticos, hornos de arco, etc. Merecen una mención especial los rectificadores, por ser éstos los que se encuentran más a menudo en las industrias y los que generan más armónicos. Entre los problemas más frecuentes que causan los armónicos se pueden señalar:

- ❖ Interferencias en los sistemas de telecomunicaciones.
- ❖ Distorsión en la tensión de la red.
- ❖ Fallas en transformadores y motores debido al sobrecalentamiento y por una generación de mayores corrientes parásitas.
- ❖ Calentamiento.
- ❖ Perturbaciones en los sistemas electrónicos e informáticos.
- ❖ Mal funcionamiento de relevadores.

Entre los equipos que más sufren este tipo de efectos están las lámparas incandescentes, motores, generadores, transformadores, condensadores y cables. Del mismo modo, la presencia de armónicos ocasiona desperfectos en el funcionamiento de algunos equipos, algunos de los más representativos son:

- ❖ Interruptores automáticos.
- ❖ Sistemas de comunicación.
- ❖ Fusibles.
- ❖ Equipos de medida.
- ❖ Relevadores de protección.
- ❖ Transformadores de medición.

## Variaciones de frecuencia

Son alteraciones del valor nominal de la frecuencia de red. En la actualidad, la mayoría de los centros de generación se encuentran interrelacionados y por lo tanto, no se presentan variaciones de frecuencia apreciables. Sin embargo, en redes aisladas como pueden ser los casos de islas, áreas rurales, alimentación en grandes barcos o en plataformas marinas, se pueden presentar con mayor facilidad esta clase de problemas. Entre las consecuencias, se encuentra la actuación de protecciones de subfrecuencia y el funcionamiento incorrecto de motores síncronos y asíncronos.

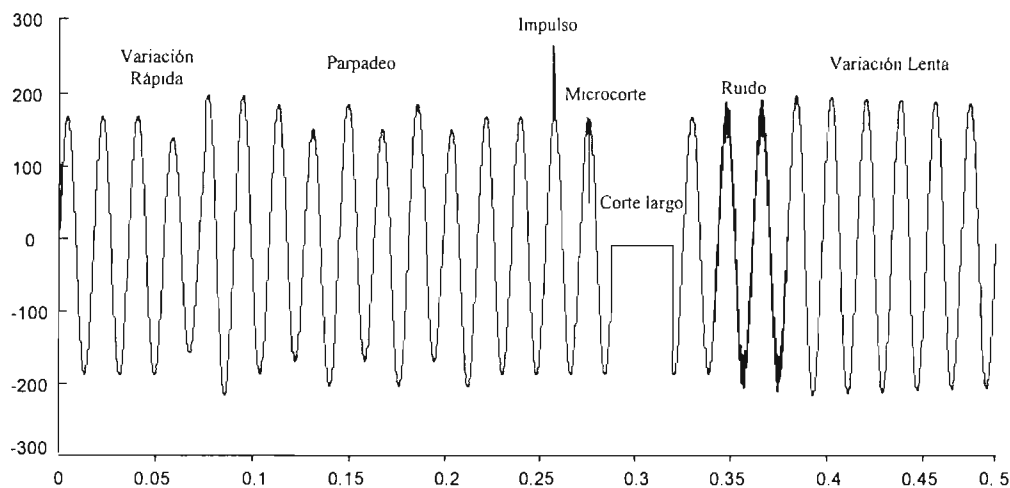
### 1.3.2 Tensión

La forma ideal de la tensión de red es una función senoidal del tiempo con una cierta amplitud y una frecuencia constantes [3]. Los parámetros que definen este tipo de función son:

- ♣ **Amplitud:** máximo valor instantáneo ( $V_o$ ,  $I_o$ )
- ♣ **Periodo:** duración de un ciclo completo ( $T$ )
- ♣ **Frecuencia:** número de ciclos por segundo ( $f=1/T$ )
- ♣ **Oscilación:** se define como  $\omega=2\cdot\pi\cdot f$
- ♣ **Fase:** desplazamiento angular de la función senoidal respecto al origen de ángulos.

En la práctica las condiciones de frecuencia y tensión constantes, y la forma de la onda senoidal no suelen cumplirse. Así pues, se aceptan como normales ciertas desviaciones en el valor eficaz de la tensión y en la frecuencia. Sin embargo, el valor eficaz de la tensión y la frecuencia, no definen totalmente la "calidad" de una red eléctrica, puesto que nada indican acerca de la forma de onda o de su posible distorsión con respecto al valor teórico senoidal.

La figura 1.4 ilustra una serie de perturbaciones de tensión, algunas de ellas han sido exageradas para una mejor visualización. Seguidamente se presenta una descripción de cada una de ellas.



**Figura 1.4.** Perturbaciones de amplitud de tensión de la red eléctrica

#### Variaciones lentas de Tensión

Se define con este nombre a las variaciones del valor nominal de la amplitud de la forma de onda de tensión, durante un tiempo comparativamente prolongado a lo largo de 10 segundos o más. Son producidas principalmente por las variaciones en el tiempo de demanda de potencia de las cargas conectadas a una red de mala calidad con elevada impedancia de corto circuito. Sus efectos se manifiestan en un acortamiento de la vida útil

del equipo conectado a la red eléctrica o en su caso un mal funcionamiento del mismo. Se considera que son de alta tensión si el valor nominal se incrementa en 120% y de baja tensión si disminuye el valor nominal de tensión en un 80%.

### **Variaciones rápidas de Tensión**

Se define con este nombre a las alteraciones de la amplitud de la forma de onda de tensión con respecto a su valor nominal, que tiene lugar en un tiempo menor a los 10 segundos. Se producen debido a la conexión y desconexión de grandes cargas y de maniobras en las líneas de transmisión, o debido a la energización de bancos de condensadores. Su efecto en el funcionamiento de los equipos electrónicos depende de su amplitud y de su duración, de tal manera que un equipo soportará perturbaciones de gran amplitud y corta duración y viceversa. De igual manera que en el caso anterior se pueden diferenciar entre alta y baja tensión.

### **Parpadeo**

Es un caso particular de las variaciones rápidas de tensión que se caracteriza por fluctuaciones cíclicas de baja frecuencia de su valor eficaz. La magnitud de estas variaciones ubican la tensión entre un 90% y un 110% del valor nominal de la señal, con oscilaciones a una frecuencia inferior de 15Hz. Sus causas son las mismas que las variaciones rápidas de tensión. Es frecuente que en sistemas de iluminación fluorescente esta perturbación produzca un parpadeo visible y molesto.

### **Cortes largos**

Se nombra así a un fallo en la tensión de la red por debajo del 50% de su valor nominal en un periodo de tiempo superior a un ciclo de red. Se catalogan en cortes temporales (menores a 30 ciclos de red), y cortes permanentes (en ocasiones varios minutos u horas). Un corte largo, afecta a la mayoría del equipo que se encuentre conectado a la red.

### **Microcortes**

Son definidos como reducción por debajo del 60% del valor nominal de la tensión de la red eléctrica o su anulación durante un tiempo menor a un ciclo de red. Si bien no hay en la normativa una descripción clara de la duración de un microcorte y de un corte largo, se puede considerar como límite entre ambos el valor de un ciclo de red. Son causados por defectos en la red eléctrica y/o en la instalación del usuario, arranque de motores o de cargas de gran potencia en una red con una impedancia de corto circuito grande. Algunos equipos no trabajan correctamente en presencia de un microcorte y otros se "re-inicializan".

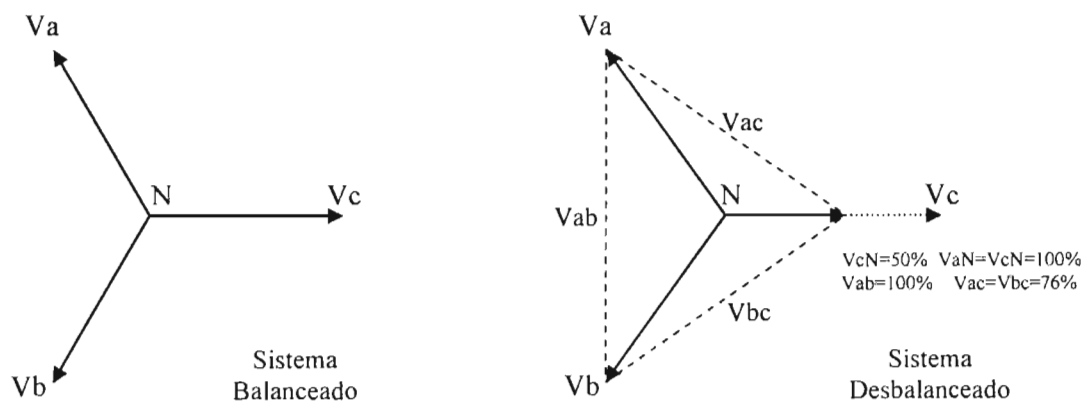
## Impulsos

Son alteraciones del valor instantáneo de la forma de onda de tensión. Los impulsos se presentan de manera unidireccional en su polaridad ya sea positiva o negativa, mostrando una rápida modificación en la tensión de red. Los impulsos se determinan usualmente en función del tiempo de incremento, su tiempo de decaimiento y el valor máximo que alcanzan. Debido a las altas frecuencias en que se presentan los impulsos, su propagación en la red eléctrica depende de la impedancia de la misma. Las principales fuentes de los impulsos son los equipos convertidores y rectificadores, descargas atmosféricas en instalaciones eléctricas, funcionamiento de equipos que producen arcos eléctricos (interruptores, escobillas, etc.), o conexión y desconexión de equipos inductivos y capacitivos. Entre sus principales efectos están la degradación y destrucción de aislamientos, disparo de relevadores, funcionamiento incorrecto de dispositivos de regulación y en el peor de los casos destrucción de equipos electrónicos. Un suceso virtualmente peligroso es la descarga eléctrica a un usuario si los aislamientos están destruidos.

## Desbalance de Tensión

Es la falta de existencia de igualdad entre las amplitudes y desfases de las tres tensiones de un sistema trifásico. Es considerado como un problema de calidad de la red eléctrica de gran interés en la distribución. Si bien, las tensiones son bastante bien balanceadas en niveles de generación y transmisión, las tensiones a nivel distribución pueden volverse desbalanceadas debido a la desigualdad de impedancias en el sistema y a la distribución de cargas monofásicas repartidas de manera irregular entre las fases de la red.

La figura 1.5 expone las tensiones fase-neutro de un sistema balanceado y las tensiones resultantes durante un "sag" del 50% con respecto al valor nominal de la tensión de red, al mismo tiempo se puede observar como afecta a las otras dos fases.



**Figura 1.5.** Esquema fasorial de un sistema balanceado y uno desbalanceado.



En sistemas eléctricos trifásicos, los "sags" de tensión (caídas de tensión) referenciados a una fase (fase-neutro), afectan dos de las tensiones fase-fase. Como resultado un equipo verá un desbalance en dos fases, y debido a que responde solamente a la tensión fase-fase, seguramente tendrá un mal funcionamiento bajo estas condiciones. Cuando se presentan "sags" en dos y tres fases (referenciados a fase-neutro), el equipo ve como si fuera un "sag" trifásico.

Gran cantidad de desbalances de tensión pueden ocasionar serios inconvenientes sobre los motores de inducción, y la operación de equipos variadores de velocidad, donde el sistema consiste de un rectificador trifásico. Si bien, es casi imposible eliminar totalmente el "sag" de tensión, se puede tener bajo control. En un sistema de suministro eléctrico senoidal balanceado, y en el caso de un sistema trifásico, las tensiones fase-neutro deben ser iguales en magnitud y en frecuencia, y desfasadas una de la otra por  $120^\circ$ . Cualquier diferencia que exista en las tres magnitudes de las tensiones y/o un cambio en la fase en la separación de  $120^\circ$ , se puede decir que el sistema se encuentra desbalanceado. Cuando una carga trifásica se conecta a una fuente de suministro eléctrico desbalanceada, la corriente solicitada por la carga también se torna desbalanceada.

### Definición de Desbalance de Tensión

La proporción de desbalance de tensión que se presenta en un sistema puede ser descrito usando dos definiciones frecuentemente empleadas [13]:

1) La primera definición se determina a partir de la teoría de componentes simétricas, la cual establece que un sistema desbalanceado se puede descomponer en tres sistemas balanceados como se muestra en la figura 1.6. Estos tres métodos son llamados secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero. Para tener un sistema balanceado ideal, la secuencia negativa y la secuencia cero deberán ser suprimidas, y de esta forma ocuparse sólo con la componente de secuencia positiva.

- **Sistema directo o de Secuencia Positiva**

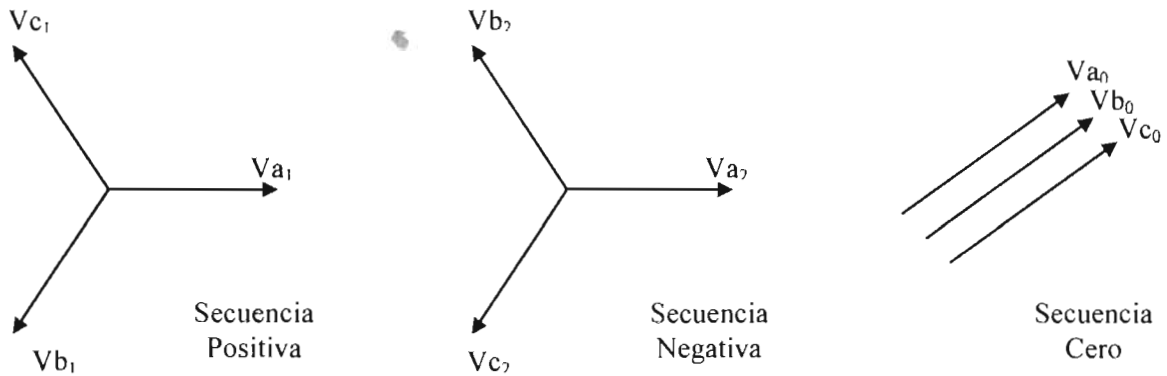
Es un sistema equilibrado de tres vectores giratorios de secuencia directa  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  y  $V_{c1}$  desfasados  $120^\circ$ . El orden de sucesión de fases será  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  y  $V_{c1}$ , girando en sentido contrario a las agujas del reloj.

- **Sistema inverso o de Secuencia Negativa**

Es un sistema equilibrado de tres vectores giratorios de secuencia inversa  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  y  $V_{c2}$  desfasados  $120^\circ$ . El orden de sucesión de fases será  $V_{a2}$ ,  $V_{c2}$  y  $V_{b2}$ , girando en sentido contrario a las agujas del reloj.

- **Sistema homopolar o de Secuencia Cero**

Es un sistema de tres vectores monofásicos de igual módulo y fases coincidentes  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$  y  $V_{c0}$ . Su secuencia de fases se puede decir que es cero, ya que los tres vectores pulsan a un tiempo.



**Figura 1.6.** Teoría de las Componentes Simétricas.

Existen dos definiciones para conocer el factor de desbalance basadas en las componentes simétricas, estas son:

- Factor desbalance de voltaje de secuencia negativa:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\text{Componente de Secuencia Negativa}}{\text{Componente de Secuencia Positiva}} \quad (1.4)$$

- Factor desbalance de voltaje de secuencia cero:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{\text{Componente de Secuencia Cero}}{\text{Componente de Secuencia Positiva}} \quad (1.5)$$

Siendo  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_0$ , las secuencias positiva, negativa y cero respectivamente.

El factor de desbalance de tensión también algunas veces es conocido por "VUF" por sus siglas en inglés "Voltage Unbalance Factor". La definición real del desbalance de tensión esta dada como el radio de la componente de voltaje de secuencia negativa a la componente de voltaje de secuencia positiva [4]. El porcentaje del factor de desbalance de voltaje (% VUF), está dado por la siguiente ecuación:

$$\%VUF = \frac{\text{Componente de tensión de Secuencia Negativa}}{\text{Componente de tensión de Secuencia Positiva}} * 100 \quad (1.6)$$

Las componentes de voltaje de secuencia positiva y negativa  $V_p$  y  $V_n$  respectivamente, son conseguidas a partir de la teoría de las componentes simétricas, las dos componentes balanceadas están dadas por las ecuaciones 1.7 y 1.8 [12]:

$$V_p = \frac{V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}}{3} \quad (1.7)$$

$$V_n = \frac{V_{ab} + a^2 V_{bc} + a V_{ca}}{3} \quad (1.8)$$

Siendo:  $a=1\angle 120^\circ$  y  $a^2=1\angle 240^\circ$

2) La segunda definición es la NEMA (National Electrical Manufacturers Association of USA), esta es una definición estándar que es dada por la ecuación 1.9 [13]:

$$\text{Desbalance de Voltaje} = \frac{\text{Máxima desviación del promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\}}{\text{Promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\}} \quad (1.9)$$

Se deben utilizar las tensiones fase-fase para calcular el desbalance de tensión. No conviene que sean usadas las tensiones fase-neutro con las ecuaciones anteriores, debido a que la componente de secuencia cero puede tomar valores incorrectos. También es importante notar que la definición VUF es rigurosa matemáticamente comparada con la definición NEMA, y al calcular el nivel de desbalance de tensión, las dos definiciones pueden presentar diferentes resultados.

### 1.3.3 Ruido Eléctrico

Son señales eléctricas adicionales que aparecen superpuestas a la señal senoidal generalmente de Alta Frecuencia y de escasa amplitud que producen efectos no deseables en los circuitos de control en que se presentan. La frecuencia a la que aparecen no se encuentra en un valor preciso, sino que cuentan con un ancho de banda disperso, comúnmente inferior a los 200KHz. La magnitud del ruido eléctrico puede estar entre valores del 1% y el 3% de la amplitud de la fundamental, por otro lado, son impulsos cuando tienen una duración muy corta y una elevada amplitud, y pueden dividirse en:

- ♣ **Ruido en Modo Común.**- Es el ruido en la tensión que aparece balanceado y en fase con la corriente de los conductores respecto a tierra, sobrepuesto a la forma de onda de tensión de la red, su frecuencia de aparición no tiene un valor preciso.
- ♣ **Ruido en Modo Diferencial.**- Son las señales de ruido múltiple entre los conductores de potencia activa que alimentan a una carga pero no entre los conductores de tierra o de referencia que existen en el circuito.

Los ruidos eléctricos pueden ser generados principalmente por el funcionamiento de máquinas eléctricas con escobillas, soldadoras de arco, interruptores, fuentes de alimentación conmutadas, etc.

Entre sus efectos producen mal funcionamiento y/o destrucción de equipos electrónicos, funcionamiento incorrecto de dispositivos de regulación, errores en la electrónica digital y en datos, degradación y destrucción de los aislamientos en conductores, etc.

Las mediciones deben efectuarse con un buen Analizador de Espectro con banda suficientemente amplia. En el caso de tener niveles de ruido por encima de los índices

aceptables se deben aplicar acciones correctivas instalando equipos como Transformadores de Aislamiento, Reguladores Ferro-Resonantes, UPS's, etc.

### 1.3.4 Conexión a Tierra

Se puede definir como una conexión intencional a Tierra formada por un conductor a tierra, una malla enterrada y la tierra que la rodea con una impedancia suficientemente baja y una alta conductividad que proporcione un aterrizaje eficaz de tal forma que cualquier falla a tierra produzca una sobre-elevación máxima en las tensiones de las fases no falladas del 40% del valor nominal.

Los criterios de diseño de un electrodo o red de tierras se dividen en dos grupos:

- ♣ *Seguridad del personal.*- donde debe considerarse el Potencial de Toque y el de Paso.
- ♣ *Protección del equipo de control y comunicaciones.*- La elevación del potencial en el área obliga a considerar el aislamiento para el equipo de control y comunicaciones que por norma es de 5kV como una limitante para el valor de resistencia de la red.

La resistividad del terreno deberá obtenerse a través de mediciones directas con cuatro electrodos según la teoría del método Wenner [22]. Un buen análisis y medición de resistividad del terreno es información vital que permite un buen diseño del sistema de tierras.

## 1.4 Filtros Pasivos

Son arreglos LC de inductores y condensadores que se utilizan para atenuar señales indeseables de tensión o de corriente. Se pueden diseñar filtros para el rango de grandes potencias; en este caso, los filtros pasivos establecen su funcionamiento en proporcionar a las corrientes armónicas una trayectoria de mucha menor impedancia que la red. Pueden atenuar ruidos en modo diferencial y modo común. Su aplicación también está en la radiofrecuencia, atenuando ruidos superiores a 1MHz, principalmente los de muy corta duración y poca amplitud. Están basados en componentes pasivos, que para las grandes potencias se emplean principalmente tres tipos:

- ♣ *Filtro LC paralelo:* Es un filtro que está sintonizado a una frecuencia única y está formado por una bobina conectada en serie con un condensador o con un banco de condensadores; las frecuencias más habituales a las cuales se diseñan este tipo de filtros son para eliminar el 5º, 7º y 11º armónicos.
- ♣ *Filtro pasa altas (LR o LCR):* Al arreglo del filtro LC paralelo se le añade una resistencia en paralelo con la bobina. Este tipo de filtro se utiliza cuando las restricciones en la generación de armónicos son más exigentes. Puesto que deben ser capaces de soportar la circulación de corriente de todos los armónicos por arriba de la frecuencia a la cual están sintonizados, requieren un espacio mucho mayor de los equipos. Particularmente, el condensador puede llegar a tener un

tamaño muy grande. Debido a ello, se recurre al diseño de filtros pasa altas de ordenes superiores (segundo y tercer orden). Otra desventaja que tienen este tipo de filtros, son las pérdidas que se producen en la resistencia.

- ❖ *Combinación de las opciones anteriores:* en las cuales los armónicos de menor orden se cancelan con filtros LC individuales, y los de mayor orden con un filtro LCR.

Existen diversos dispositivos para la eliminación o la disminución de las perturbaciones presentes en la tensión de la red eléctrica, los cuales dependen de las características del problema y de la aplicación, por un lado, se encuentran las soluciones que le corresponden al usuario y a la compañía de suministro eléctrico, y por otro, se tienen los equipos que son instalados físicamente en la red eléctrica y que se ubican en lugares estratégicos. Una de las perturbaciones de mayor relevancia son las corrientes y tensiones armónicas, siendo los filtros pasivos una solución clásica para la atenuación de éstas. La principal desventaja de los filtros pasivos, es que trabajan a una frecuencia específica y eventualmente tienen la posibilidad de generar problemas de resonancia (en paralelo o en serie) con la red eléctrica bajo determinadas condiciones transitorias de operación, lo cual, puede generar tensiones o corrientes elevadas en perjuicio del mismo filtro o del propio equipo que se desea proteger. Como solución alterna, han surgido los filtros activos de potencia.

## 1.5 Filtros Activos

Los filtros activos son esquemas basados en convertidores electrónicos de potencia CD/CA, en donde el objetivo es cancelar las variaciones de tensión de la red eléctrica y las corrientes armónicas que circulan por la carga, además de otras funciones como corregir el factor de potencia y suministrar energía a una carga crítica durante breves intervalos de tiempo [23], compensar corrientes de secuencia cero en sistemas balanceados o desbalanceados, compensar desbalances de tensión en algunas aplicaciones, etc. Otros nombres que se les da a los filtros activos son: acondicionadores de línea, acondicionadores de red o simplemente acondicionadores.

El uso de los filtros activos ha sido estudiado desde que sus principios básicos fueron propuestos en la década de los 70's con topologías monofásicas, sin mucho éxito debido a las limitaciones de los dispositivos de potencia que se utilizaron. En los años 80's se vuelve a retomar la propuesta aprovechando las nuevas tecnologías de los semiconductores. También la teoría básica de este tipo de filtros, aplicada a la compensación de energía reactiva ha sido analizada y se pueden encontrar en la literatura especializada algunas referencias con respecto al diseño y estrategias de control. En los últimos 20 años la proliferación de cargas no lineales, han dado como resultado una variedad de fenómenos indeseables en la operación de sistemas de potencia, que en muchos casos no pueden ser resueltos con filtros pasivos LC.

La diferencia básica entre los filtros pasivos y los activos, es que los filtros activos tienen la capacidad de compensar variaciones aleatorias de corriente o tensión.

El requerir compensar distorsiones en menos de un ciclo de red, además de compensar variaciones rápidas en la amplitud de los armónicos y no introducir armónicos adicionales al sistema, lleva a la consideración de emplear convertidores electrónicos que conmuten a alta frecuencia y con control mediante Modulación de Ancho de Pulso (PWM por sus siglas en inglés). Al mismo tiempo, existen diferentes arreglos, tanto para compensación monofásica como trifásica. Cada filtro activo puede ser clasificado de acuerdo a la variable eléctrica que compensa; de esta manera, existen filtros activos de tensión (también conocidos como filtros activos serie por la manera como se conectan a la red eléctrica), filtros activos de corriente y filtros activos universales. Estos últimos compensan ambas variables.

Las principales características de un filtro activo son: flexibilidad en el control, rápido tiempo de respuesta, bajo costo de mantenimiento, un equipo puede compensar amplios rangos de frecuencia, proporciona un rango continuo de compensación de potencia reactiva y no presenta problemas de resonancia natural.

### 1.5.1 Clasificación de los Filtros Activos

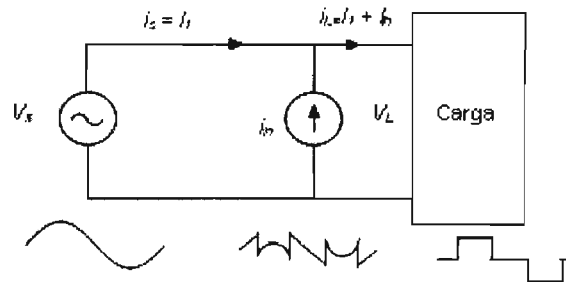
Una primera aproximación para el análisis de los filtros activos es a partir de la variable eléctrica compensada: filtros activos de tensión, filtros activos de corriente y filtros activos universales.

#### Filtros Activos de Corriente

Los filtros activos de corriente se modelan como una fuente de corriente controlada en paralelo con la carga. El consumo de corriente de cargas con características no lineales, producen componentes armónicas, las cuales al circular por la impedancia de la red, provocan una distorsión en la forma de tensión en el PCC. Una forma para solucionar este problema es colocar un equipo que genere las corrientes cuyo valor en todo instante sea igual que las corrientes armónicas demandadas por la carga evitando así que circulen por la red. Esto puede lograrse mediante el uso de filtros pasivos, pero la amplia gama de armónicos a compensar, y la influencia de estos filtros con la impedancia de la red, hacen que no sea la solución más adecuada.

Otra opción es el uso de convertidores electrónicos, los cuales inyectan la corriente armónica a la carga de forma controlada. De esta manera, la fuente ve al conjunto "filtro activo - carga no lineal", como una carga lineal que solo demanda corriente a frecuencia fundamental.

La figura 1.7 muestra el circuito equivalente para un filtro activo de corriente, también conocido en la literatura especializada como filtro activo paralelo por la forma de conexión con la red eléctrica. En la figura el filtro activo se modela como una fuente de corriente ( $i_n$ ) que se conecta en paralelo entre la red eléctrica y la carga, esta fuente de corriente inyecta a la carga los armónicos que requiere para funcionar; por lo cual, por la red eléctrica únicamente circula la componente fundamental.



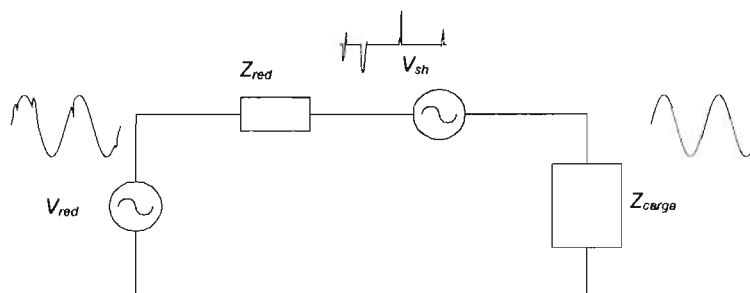
**Figura 1.7.** Circuito equivalente para el filtro activo de corriente.

Los filtros activos de corriente están basados en convertidores estáticos de potencia, cuyos interruptores de potencia y dispositivos de almacenamiento de energía deberán ser seleccionados cuidadosamente para mejorar los niveles de potencia requeridos durante la operación. Es importante mencionar que esta clase de filtros pueden usarse en combinación con filtros pasivos, a esta variedad se le conoce como filtros híbridos.

De la misma forma que en los filtros de tensión, existen diferentes formas de construir físicamente esta clase de filtros en sistemas monofásicos y trifásicos, con inversores medio puente o puente completo, alimentados en tensión o en corriente, etc.

### Filtros Activos de Tensión

El objetivo de estos equipos como su nombre lo indica, es reducir las variaciones lentas y rápidas de la tensión, atenuando ruidos en modo común y en modo diferencial, de tal manera que las únicas perturbaciones que no compensan son los cortes largos de tensión, de los cuales se encargan otros equipos como los UPS (Sistemas de Alimentación Ininterrumpible). Aún cuando la variable que compensan es la tensión, el principio de funcionamiento y los esquemas de potencia difieren de los reguladores. Suministran a la carga, en el caso ideal, una tensión puramente senoidal. En sistemas trifásicos puede compensar las diferencias entre los valores eficaces de los voltajes de entrada proporcionando un sistema de tensiones senoidales y balanceados.



**Figura 1.8.** Circuito equivalente para el filtro activo de tensión.

La figura 1.8 muestra el circuito equivalente para un filtro activo de tensión, también llamado en literatura especializada como filtro activo serie por su tipo de conexión en la red eléctrica. En la figura el filtro activo se modela como una fuente de

tensión ( $V_{sh}$ ) que se conecta entre la red eléctrica y la carga, esta fuente de voltaje debe ser capaz de cancelar los armónicos y/o perturbaciones de voltaje, de tal manera que se proporcione a la carga una señal de tensión senoidal no contaminada. Para llevar a cabo la conexión a red, el filtro activo de voltaje utiliza un transformador de corriente.

### Filtros Activos Universales

La combinación de filtros activos de corriente y de tensión, constituyen lo que se conoce como filtros activos universales. La figura 1.9 muestra el circuito equivalente del filtro. Por otro lado, ambos filtros comparten el almacenamiento de energía; esto con el objetivo de optimizar las topologías de potencia evitando que se dupliquen componentes y de este modo, se incremente el costo del equipo. El filtro activo universal podría bajo ciertas condiciones, compensar potencia reactiva, cancelar algunas perturbaciones de tensión y equilibrar cargas entre fases.

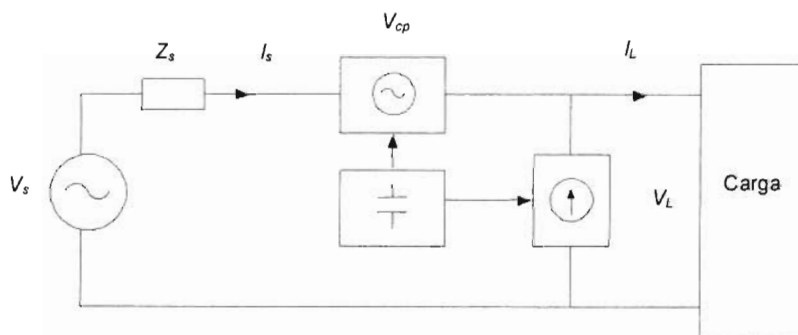


Figura 1.9. Circuito equivalente para el filtro activo universal.

FAT 931

La combinación de las posiciones de cada filtro activo en un filtro activo universal, puede realizarse de diferentes formas.

## 1.6 Estado del Arte

Los filtros activos de Tensión, también conocidos como acondicionadores de tensión, o bien, como filtros activos serie; pueden realizar diferentes funciones dependiendo de la configuración de la topología utilizada. Su característica común, es que esta clase de filtros se conectan a la red eléctrica a través de un transformador compensador (T/C).

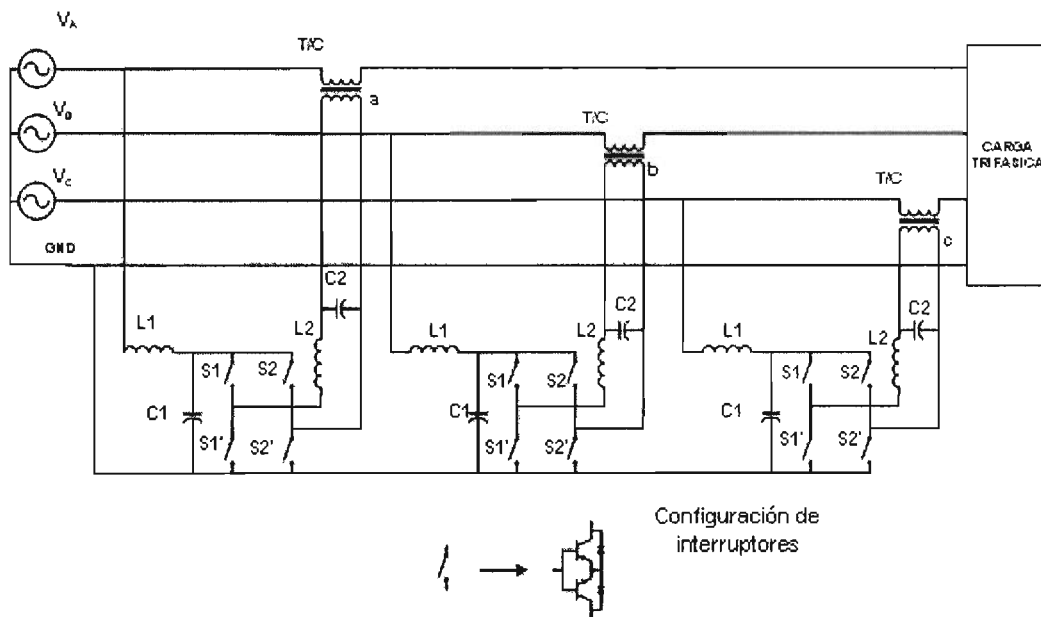
En la literatura especializada se encuentran varias topologías para el filtro activo serie trifásico, en este trabajo se muestran las más empleadas.

### 1.6.1 Filtro Activo Serie Trifásico basado en Troceadores de CA

La figura 1.10 muestra un filtro activo serie de tensión trifásica; se trata de una topología con transformador compensador utilizando para cada fase un



convertidor CA/CA. Esta clase de acondicionador toma la energía necesaria para efectuar la compensación, directamente de la red eléctrica [7], por lo tanto la capacidad de compensación se limita a los periodos en los cuales existe un valor de tensión de red dentro de cada periodo. Esto quiere decir que en este esquema no existe acción de compensación en los cruces por cero; sin embargo, este tipo de acondicionador es relativamente sencillo y confiable, además; al tomar la energía directamente de la red, puede compensar potencia activa, de tal manera que se puede utilizar para compensar desbalances de tensión dentro de ciertos límites. Esta configuración permite reducir las corrientes manejadas por el convertidor electrónico en la misma proporción que la relación de transformación. Hasta este momento, la literatura especializada no reporta capacidad de compensación armónica [14].



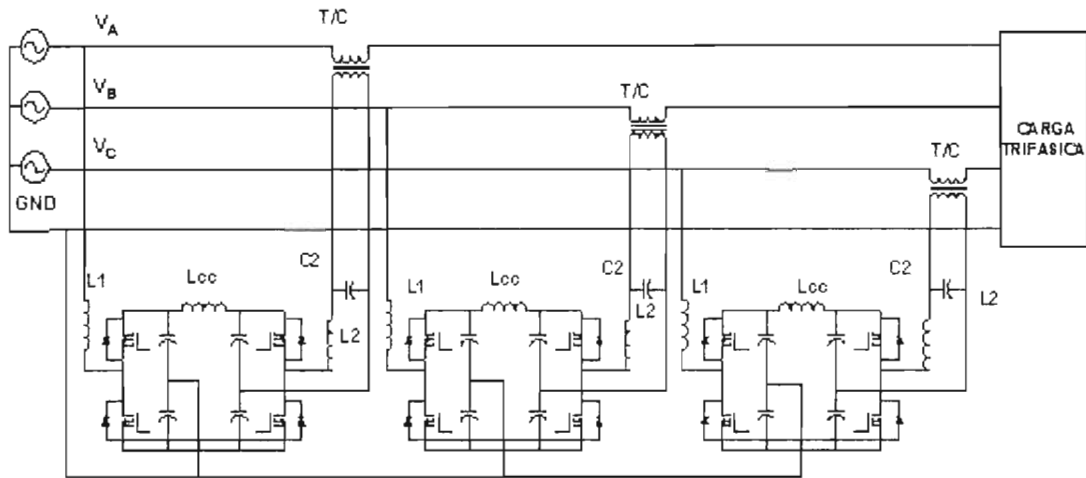
**Figura 1.10.** Filtro activo de tensión trifásico basado en troceadores de CA.

Cada troceador se compone de cuatro interruptores bidireccionales en voltaje y en corriente que se encargan de realizar la modulación, el filtro  $L_1$ - $C_1$  constituye un filtro pasabajos cuya función es reducir los armónicos de corriente tomados de la red eléctrica que el convertidor demanda de manera natural, además atenúa ruidos e impulsos en modo diferencial. La tensión modulada del convertidor es aplicada a través del filtro pasabajos formado por  $L_2$ - $C_2$  que reduce los armónicos de tensión que genera el troceador, para después aplicarla a la red eléctrica a través del transformador compensador (T/C). El principio de compensación se basa en alternar la conmutación de los interruptores de potencia, de tal manera que en algunos casos el filtro activo entregue a la red eléctrica la tensión faltante necesaria y que en otros casos reste una tensión.

### 1.6.2 Filtro Activo Serie Trifásico con Convertidor CA/CD/CA

La figura 1.11 muestra un acondicionador de tensión con una topología con transformador compensador (T/C), alimentado por un convertidor CA/CD/CA,

que permite reducir los niveles de corriente manejados por el convertidor electrónico en la misma proporción que la relación de transformación [7], esto repercute en un menor tamaño de los interruptores de potencia del filtro activo. Además utiliza elementos almacenadores de energía para llevar a cabo la compensación. Esto permite compensar tensión incluso los cruces por cero.



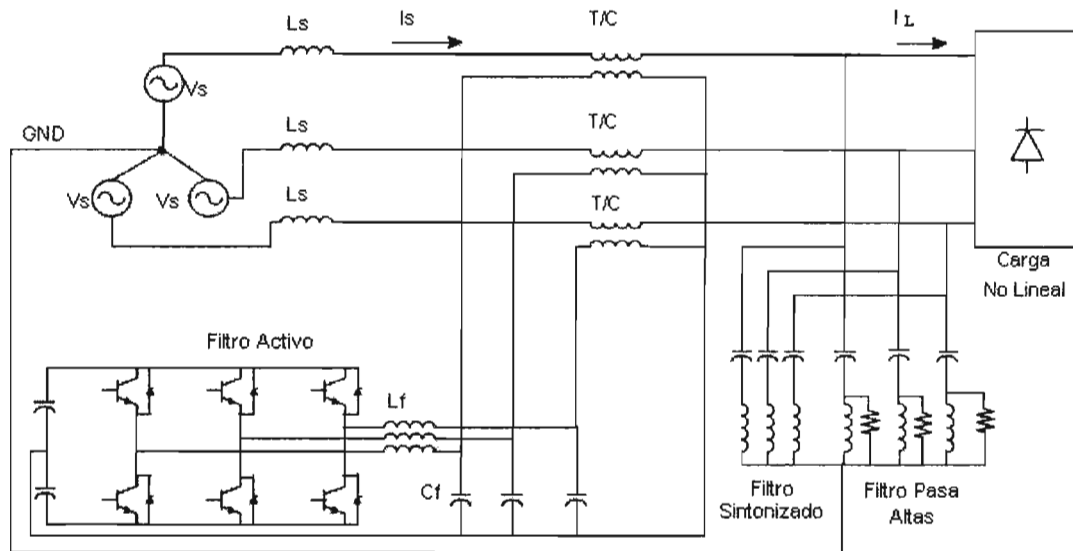
**Figura 1.11.** Filtro activo serie trifásico con convertidor CA/CD/CA.

Como se puede ver, para cada fase el filtro activo consta de un rectificador síncrono bidireccional en corriente, el cual proporciona energía a los condensadores del lado de CD del filtro; después se encuentra un inversor de potencia y en la salida un filtro LC y el transformador compensador para la conexión con la red eléctrica. Tanto el rectificador como la etapa de potencia pueden ser construidos en configuración medio puente o puente completo, o bien, cualquier combinación entre estas dos opciones. Cada convertidor lleva asociados sus condensadores encargados de mantener la tensión dentro de unos límites. Es deseable mantener siempre un cierto nivel de tensión en el bus de CD, para efectuar la compensación; al ser alimentado el bus de CD mediante la acción del rectificador, el filtro activo será capaz de regular la tensión dentro de un cierto margen siendo posible realizar el balanceo de la red. Existe también un inductor en el bus de CD cuya función es evitar que las corrientes de menor frecuencia de un convertidor, afecten el funcionamiento de otro convertidor.

### 1.6.3 Filtro Activo Serie Trifásico Híbrido

La figura 1.12 muestra la topología de un filtro activo híbrido, en esta topología se observa que primero se tiene el filtro activo de tensión, con el propósito de que la tensión que alimenta a la carga esté libre de las perturbaciones que pudieran existir en la red eléctrica; posteriormente para eliminar las corrientes armónicas que circulan por la red, se requieren elementos adicionales conectados en paralelo con la carga, estos elementos son filtros pasivos sintonizados. Las características de compensación del filtro están determinadas principalmente por su circuito de control, el cual puede actuar como filtro para atenuar corrientes armónicas y/o como balanceador de tensiones de fase. Al funcionar como filtro de armónicos, el compensador genera una

tensión nula a frecuencia fundamental, dejando circular libremente la componente fundamental de la corriente desde la red eléctrica hacia la carga. Por otro lado, el compensador también genera tensiones de igual frecuencia a las corrientes armónicas requeridas por la carga, presentando una alta impedancia a estas corrientes armónicas, obligándolas de esta forma a circular por los filtros pasivos.



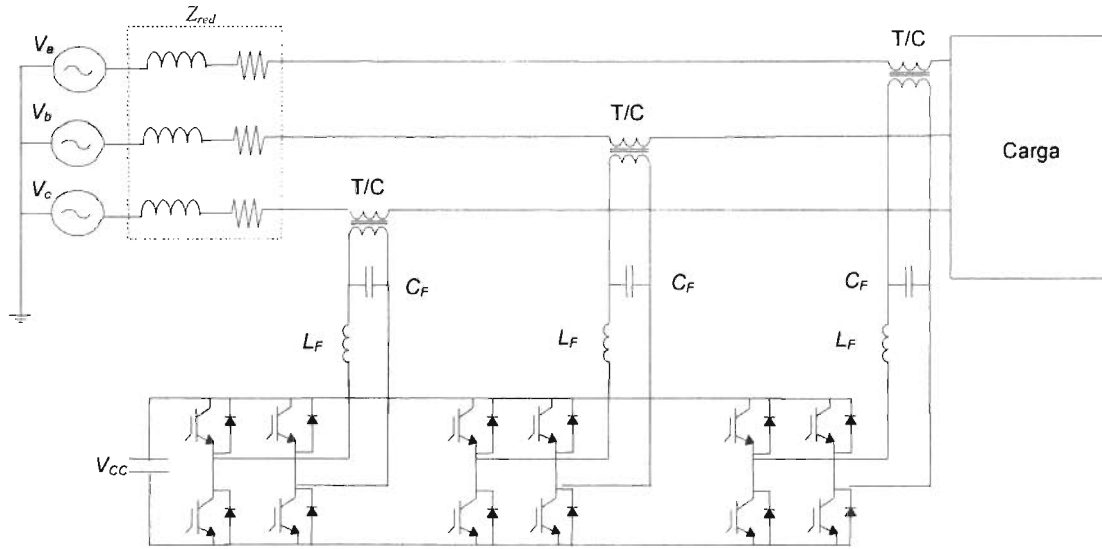
**Figura 1.12.** Filtro activo de tensión híbrido para compensación de armónicos de corriente.

El filtro activo serie híbrido es implementado con un inversor PWM alimentado en tensión, y funciona en conjunto con un filtro pasivo LC conectado en paralelo a las líneas de potencia, siendo capaz de compensar armónicos de corriente y las componentes de tensión de secuencia cero y negativa, generadas por cargas desbalanceadas no lineales. Este esquema también compensa las componentes de armónicos de corriente de secuencia cero que fluyen a través del conductor neutro. La compensación de los armónicos de corriente y el desbalance de tensión, son logrados generando las apropiadas formas de onda de tensión con el inversor trifásico [15].

#### 1.6.4 Filtro Activo Serie Trifásico con Convertidor CD/CA

La figura 1.13 presenta un filtro activo de tensión con convertidores CD/CA. En esta configuración se utilizan tres inversores puente completo en la etapa de potencia, uno para cada fase, y además comparten el bus de CD permitiendo realizar compensación para cada fase en forma independiente; de tal manera que si una fase o dos llegan a fallar, las otras pueden continuar funcionando, siendo esta una de sus principales características. En este caso, como la energía para efectuar la compensación se toma de un condensador, entonces el filtro podrá únicamente compensar Potencia Reactiva. Sin embargo, si el flujo de Potencia Activa a través del filtro es cero, el filtro puede compensar desbalances de tensión dentro de un cierto rango de tensión. Por otra parte, si se desea que el filtro compense algunos

desbalances de tensión, se deberá agregar un elemento extra para suministrar energía al condensador; típicamente se hace uso de un rectificador.



**Figura 1.13.** Filtro activo serie trifásico con convertidor CD/CA para cada fase.

Una de las ventajas de este acondicionador de línea es que la corriente a través del convertidor es menor que la corriente de carga. Al mismo tiempo, el filtro activo serie es afectado solo por un porcentaje de la potencia total de la carga; este porcentaje está relacionado a las variaciones de voltaje de línea. Para cada fase del convertidor se utilizan interruptores bidireccionales en corriente y unidireccionales en tensión y la salida consta de un filtro LC, que reduce los armónicos generados por el inversor. Finalmente se conecta a la red eléctrica a través de un transformador compensador de corriente (T/C). Los esfuerzos de corriente de la etapa de potencia se ven atenuados por la relación de transformación del transformador compensador. El transformador maneja solamente una porción de la potencia total de la carga y está relacionado con la máxima capacidad de compensación del filtro. De acuerdo con las características mencionadas anteriormente, esta topología se escoge para ser empleada en el desarrollo de la tesis, siendo una buena solución para resolver los problemas de distorsión armónica y desbalances de tensión.

# CAPITULO II

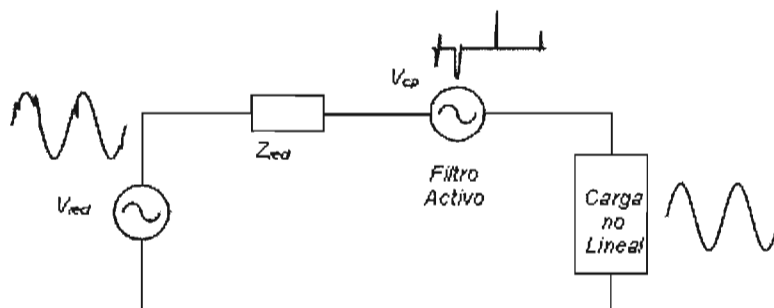
## Filtro Activo de Tensión

El Filtro Activo de Tensión, también llamado en la literatura especializada como Filtro Activo Serie o Acondicionador de Tensión, es un equipo capaz de disminuir o eliminar las perturbaciones presentes en la tensión de entrada descartando los cortes largos de tensión. Proporciona a la carga en el caso ideal, una tensión puramente senoidal, dejando pasar solo la componente fundamental. Puede compensar las diferencias entre los valores eficaces de la tensión de entrada en sistemas trifásicos, proporcionando un sistema de tensiones senoidales y balanceados.

### 2.1 Principio de Funcionamiento

El principio de funcionamiento del filtro activo de tensión, está considerado para que éste trabaje solamente con las perturbaciones asociadas a la forma de onda de la tensión de la red eléctrica. Debido a eso, el filtro activo exclusivamente maneja una parte de la potencia total de la carga, es decir, únicamente maneja potencia reactiva que demande la carga; por otra parte, al estar conectado al secundario de un transformador, la etapa de potencia reducirá sus esfuerzos de corriente en la misma proporción que la relación de transformación del T/C. las funciones de compensación del filtro dependen, entre otras cosas, de la topología, del dimensionamiento de la etapa de potencia, de la obtención de referencias de compensación y del método de control empleado.

En la figura 2.1 se muestra un diagrama equivalente donde se puede apreciar el principio de funcionamiento del Filtro Activo de Tensión. Como caso ilustrativo se considera un caso monofásico.



**Figura 2.1.** Circuito equivalente del Filtro Activo de Tensión.

Supóngase que se conecta a la red eléctrica un equipo electrónico (carga no lineal) que demanda una forma de corriente distorsionada para su correcto funcionamiento; por

tal razón, la tensión de la red eléctrica esta contaminada y presenta perturbaciones en su valor instantáneo. Esta condición, puede afectar el funcionamiento de cargas críticas o sensibles. El Filtro Activo de Tensión, se modela como una fuente de tensión conectada en serie entre la red eléctrica y la carga y solo proporciona las tensiones equivalentes a la tensión distorsionada.

Hay que tener presente que el Filtro Activo Serie es una fuente de tensión que proporciona un voltaje cuyo valor es en todo instante de igual magnitud a la perturbación pero en contrafase con la misma, de tal manera que son canceladas las distorsiones presentes en la red eléctrica y la carga puede ver una forma de onda de tensión "limpia" y puramente senoidal. El convertidor toma la energía necesaria de un banco de condensadores para realizar la compensación, solo cuando maneja potencia reactiva; hay casos en que maneja potencia activa sólo cuando existen desbalances de tensión (de corta duración) o Microcortes. Como puede verse, no es necesario que el filtro activo maneje toda la potencia de la carga, sino solamente una parte proporcional de la misma y esta proporción esta relacionada con la capacidad de compensación del filtro.

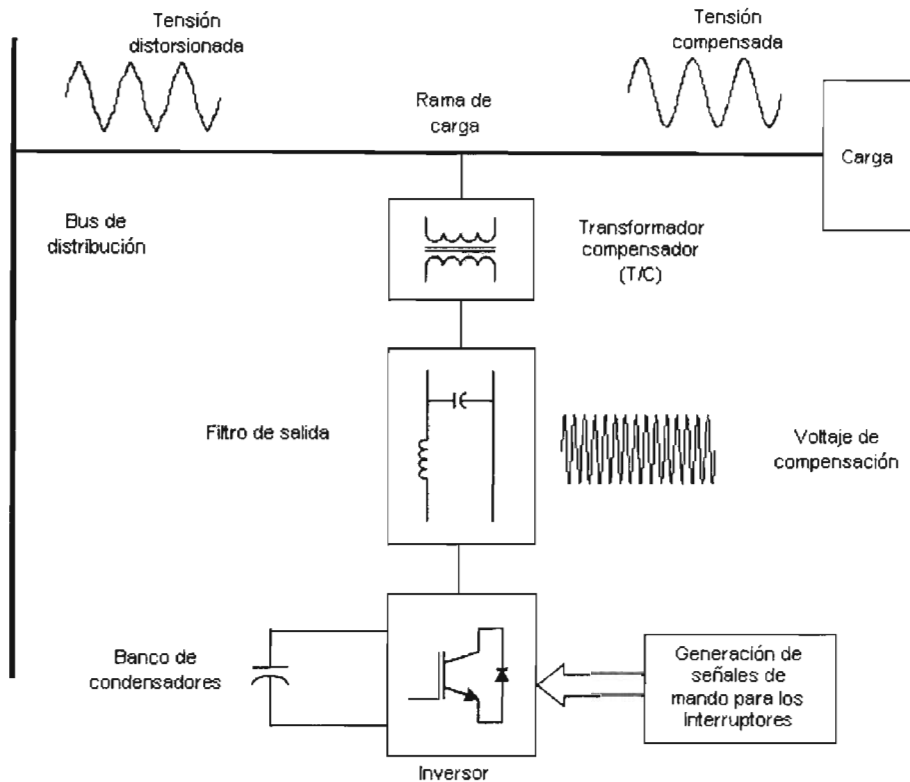
### 2.2 Consideraciones de Diseño

El filtro activo de tensión utiliza convertidores de potencia formado por inversores puente completo, para generar la tensión que cancela los armónicos y/o perturbaciones de tensión de la red eléctrica. Como se requiere que la salida sea en tensión, entonces se utiliza un inversor puente completo alimentado en tensión y con salida en tensión que se interconecta a la red eléctrica mediante un filtro pasabajos y un transformador compensador (T/C).

Para almacenar la energía necesaria para efectuar la compensación se hace uso de un banco de condensadores; estos se mantienen cargados por efecto de la transferencia de energía entre el filtro y la red eléctrica, ya que el convertidor principal es bidireccional en corriente. El filtro no necesita proporcionar Potencia Activa para llevar a cabo la compensación de componentes armónicas de tensión; para esto únicamente necesita proveer la Potencia Reactiva correspondiente a dichos armónicos, esta es la razón por la que se utiliza un banco de condensadores para alimentar al Filtro Activo de Tensión. Por lo tanto, los condensadores y los componentes del filtro se deben dimensionar de acuerdo a la Potencia Reactiva que se debe compensar y con la forma de onda de la tensión actual.

También el filtro cuenta con un bloque para obtener las referencias de voltaje adecuadas para efectuar la compensación, además se debe aplicar una ley de control y generar los pulsos de disparo para los interruptores. Los bloques adicionales del filtro están formados por el filtro pasabajos de salida y el transformador compensador. Un aspecto importante que se debe considerar es que el filtro L-C de salida sirve para atenuar el rizo de alta frecuencia producido por las conmutaciones del inversor, su diseño es importante ya que la dinámica de compensación depende en gran parte de este bloque. Finalmente el transformador compensador es la parte con la que se efectúa la conexión con la red eléctrica y la carga para llevar a cabo la compensación. De esta manera la carga del filtro pasabajos la constituye la impedancia de la red eléctrica y la carga del sistema,

reflejadas hacia el secundario del transformador compensador, aunado a que la relación de transformación debe ser elevada, debido a que se debe aislar la carga del filtro activo. Todo esto se puede observar en la figura 2.2.



**Figura 2.2.** Diagrama a bloques del filtro activo de Tensión.

## 2.3 Convertidor de Potencia

La etapa de potencia del filtro activo serie esta conformada por un convertidor puente completo para cada fase, los circuitos impulsores para cada uno de los interruptores y sus fuentes de alimentación correspondientes. Por otra parte, también se considera parte de la etapa de potencia al filtro pasabajos L-C de salida para la eliminación de armónicos de alto orden y al transformador compensador de corriente. A continuación se presenta una breve explicación de cómo se diseña la etapa de potencia; considerando que en cada fase se utilizan los mismos componentes, se efectúa el análisis para una sola fase.

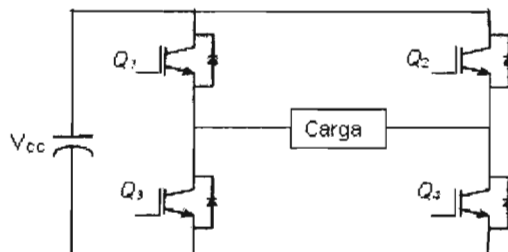
### 2.3.1 Inversor

Como se desea corregir distorsiones en tensión, es necesario utilizar un inversor que pueda suministrar dicha tensión; por lo tanto, se propone un inversor alimentado en tensión y con salida en tensión, debido a que es más fácil almacenar energía en un condensador que en un inductor.

Para este caso existen varias posibilidades, una es utilizar el inversor con una topología medio puente o bien con una configuración puente completo; para visualizar las bondades de cada opción es necesario establecer los esfuerzos a que se verán sometidos los interruptores de potencia para llevar a cabo la compensación de una misma perturbación. En general, como se desea compensar perturbaciones de tensión entonces se analizó el caso de inversores puente completo alimentados en tensión con salida en tensión.

No se considera utilizar un inversor Push-Pull ya que en su configuración aun cuando existen solo dos interruptores, requiere de un transformador para proporcionar la tensión de salida. Aunado a que se trata de una aplicación en donde la tensión a compensar se considera de baja frecuencia, ya que se habla de compensar el 5° y 7° armónicos los cuales son los que presentan mayor energía, el tamaño del transformador sería muy grande. Por otro lado, si se pretendiera utilizar el Push-Pull aprovechando su transformador como transformador compensador, no existiría un filtro pasabajos que atenuara el armónico que produce la frecuencia de conmutación y la señal que se estaría agregando a la red eléctrica sería una tensión PWM, de manera que no se realizaría adecuadamente la compensación de tensión, ya que para esto, se requiere de un filtro pasabajos [2].

La opción más acertada es utilizar un convertidor puente completo como se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2.3.** Inversor puente completo.

Analizando la configuración se tiene que para este caso los esfuerzos de tensión quedan representados de la siguiente forma; la tensión pico de salida está determinada por:

$$V_o = V_{CC} \quad (2.1)$$

El esfuerzo de tensión en los interruptores es:

$$V_{CE} = V_{CC} \quad (2.2)$$

El esfuerzo de corriente en los interruptores queda definido por:

$$I_{CP} = \frac{V_{CC}}{Z_{carga}} \quad (2.3)$$

En el caso del convertidor puente completo el almacén de energía no requiere conexión al neutro, por lo tanto, el filtro activo puede utilizarse para conexiones trifásicas tanto en estrella como en delta. Como consecuencia se selecciona la configuración puente completo como convertidor para el filtro activo de tensión.



### 2.3.2 Transformador Compensador

Un aspecto importante que se debe considerar, es la forma en que el filtro activo se va a conectar a la red eléctrica. Por el tipo de compensación que se requiere hacer es necesario conectar el equipo en serie con la red eléctrica y la carga, cuyo devanado primario se conecta en serie entre la red y la carga y el secundario se conecta al filtro activo, por lo tanto es conveniente hacer uso de un transformador compensador, además, el transformador se puede modelar como transformador de corriente [32].

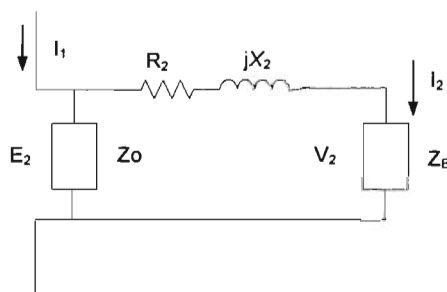
Un transformador de corriente (T/C) es capaz de realizar las siguientes funciones:

- ♣ Aislar los aparatos de protección y medición de la tensión de red. Si además se conecta el secundario del transformador a tierra, se asegura la protección del usuario.
- ♣ Convertir la corriente en valores normalizados, lo cual permite la estandarización de los dispositivos e instrumentos que se conectan al secundario.

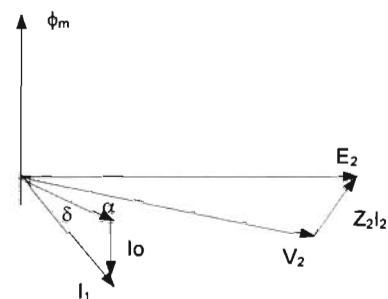
Por lo general, los transformadores de corriente son de baja potencia en aplicaciones eléctricas y el primario es el devanado que se conecta en serie con la red eléctrica y el secundario a contactores, instrumentos de medición o equipos de control; es decir, equipos de instrumentación. La principal condición que debe cumplir un transformador de corriente, es que la corriente del secundario sea proporcional a la del primario y estén en fase [33].

El principio de diseño de los transformadores de corriente utilizados para medición es en esencia similar al del transformador que acopla magnéticamente al filtro con la red, sin embargo, los criterios de diseño no pueden ser usados para el filtro de tensión, debido principalmente a que en el caso de los primeros los transformadores son normalizados para niveles de potencia y de factores de potencia estándar y además trabajan con un flujo máximo bajo. La estandarización de estos valores es dependiente de la carga conectada al secundario, ya que en el caso de transformadores de medición la carga la componen instrumentos de medición, en el caso del filtro de tensión, la carga del transformador, del lado secundario es un filtro LC que a su vez representa la salida del convertidor de potencia.

La figura 2.4 muestra el circuito equivalente del transformador de corriente en donde se considera la impedancia de carga, y la figura 2.5 muestra su diagrama fasorial.



**Figura 2.4.** Circuito equivalente del Transformador.



**Figura 2.5.** Diagrama Fasorial.

Donde:

- $E_2$  Fuerza contraelectromotriz inducida en el secundario
- $R_2$  Resistencia efectiva del secundario
- $jX_2$  Inductancia de dispersión
- $V_2$  Tensión del secundario
- $Z_B$  Impedancia de carga
- $\phi_m$  Flujo mutuo
- $I_{o1}$  Corriente de excitación
- $I_1$  Corriente del primario
- $I_2$  Corriente del secundario
- $Z_0$  Impedancia de excitación

Por otra parte, los niveles de potencia entregados por el convertidor de potencia dependen de la aplicación en la cual se encuentra ubicado el filtro activo, en gran medida, esto depende de la calidad de la red eléctrica.

La resistencia y la inductancia de fuga del primario se desprecian debido a que se encuentran en serie con la red eléctrica. Esto hace que la corriente del primario quede definida por las características de la carga y de la red eléctrica y no por el transformador.

Tomando en cuenta como primera aproximación que los transformadores mantienen la misma potencia en el lado primario y en el secundario, se pueden obtener las siguientes expresiones:

$$a = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.4)$$

Siendo:

- $N_p$  Número de vueltas del devanado primario
- $N_s$  Número de vueltas del devanado secundario
- $V_p$  Tensión pico en terminales del devanado primario
- $V_s$  Tensión pico en terminales del devanado secundario
- $I_s$  Corriente pico del lado secundario
- $I_p$  Corriente pico del lado primario
- $a$  Relación de transformación o relación de vueltas del transformador

De esta manera, considérese ahora una potencia de carga de 10KVA, para una tensión eficaz de 127 Volts, lo cual corresponde a 180 Volts de pico. Para compensar en un rango aceptable, supóngase un porcentaje de variación máxima de  $\pm 20\%$  (este es el máximo porcentaje de variación de tensión permitido por CFE). Esta proporción establece

la máxima variación de tensión, que en el peor de los casos será de 36 Volts. Con los valores de tensión anteriores es posible obtener el límite máximo para la relación de vueltas del transformador considerando la capacidad del bus de CD del convertidor.

Estimando una perturbación de 36 Volts de amplitud del lado primario y considerando un bus de CD de 400 Volts; por lo tanto:

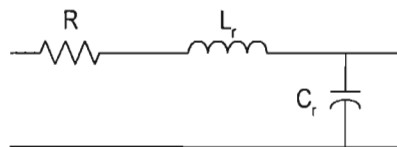
$$a = \frac{400}{36} = 11.11 \approx 11 \quad (2.5)$$

De esta forma se escogió una relación de vueltas de 1:10, con esta relación si se presenta una perturbación del valor indicado anteriormente, se requiere del lado secundario una tensión mínima de 360 Volts. En el filtro activo serie, para llevar a cabo la compensación de corriente se requiere de un valor del bus de CD de 400 Volts, lo cual hace muy conveniente que se tenga esta relación de vueltas ya que de esta manera se puede compartir el bus de energía.

### 2.3.3 Filtro pasivo LC de salida

El filtro LC de salida desempeña una función central para llevar a cabo la compensación de tensión. La salida del inversor presenta una forma PWM, la cual contiene una componente de alta frecuencia debido a las conmutaciones del inversor. Para atenuar esta componente y suavizar la forma de onda de salida del inversor, se utiliza la etapa del filtro de salida. No obstante, gran parte de la respuesta dinámica del filtro esta determinada por las características de respuesta del filtro pasivo.

Existen diversas configuraciones de filtro pasivo que pueden ser utilizadas en la salida del inversor, pero una opción sencilla y que presenta buenas características de filtrado es utilizar un filtro pasa bajas LC de segundo orden; es una configuración robusta, contiene pocos elementos y presenta una atenuación suficiente para llevar a cabo el filtrado. La figura 2.6 muestra el diagrama eléctrico del filtro LC de salida. Se ilustra al filtro LC con una resistencia R asociada a la inductancia L. Se toma en cuenta el efecto que ésta produce, ya que al momento de realizar la construcción física de la inductancia, aparece una impedancia con una componente resistiva asociada al alambre y a las pérdidas del núcleo.

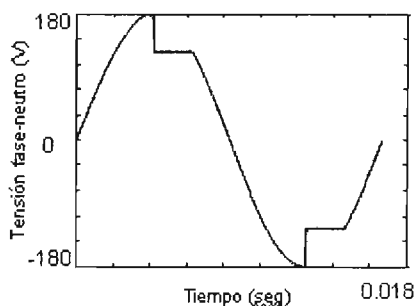


**Figura 2.6.** Filtro LC de salida.

El diseño del filtro puede hacerse desde dos perspectivas diferentes: una es especificar un ancho de banda máximo de compensación, no obstante, esto no muestra la calidad práctica del filtro. Considérese el siguiente ejemplo para representar mejor lo anterior: supóngase que se especifica un ancho de banda de 2KHz, como el filtro pasivo es

del tipo pasa bajas, si a la entrada del filtro aparece un armónico de una frecuencia menor a 2KHz, el filtro lo debe reproducir en la salida; no obstante, si la entrada es una señal que contenga una suma de armónicos, aún cuando la frecuencia fundamental de dicha señal esté dentro del ancho de banda del filtro, la salida puede estar distorsionada con respecto a la entrada. De los dos casos anteriores, la frecuencia de la señal esta por debajo del ancho de banda del filtro, sin embargo en el primer caso solo se desea reproducir una señal senoidal y el filtro no tiene problemas para poder hacerlo; por otro lado, en el segundo caso se trata de reproducir una señal con una serie de armónicos, aún cuando la mayoría de estos (los más significativos) se encuentran dentro del ancho de banda del filtro la tensión de salida no es bien reproducida por el filtro pasivo.

Otra opción de diseño se basa en especificar una máxima variación de tensión en un determinado período de tiempo (dV/dt), es decir, el comportamiento real del filtro activo va a estar limitado a esta característica de velocidad de respuesta; por otra parte, tomando en cuenta que en la tensión de la red eléctrica se presentan caídas de tensión o impulsos, entonces la capacidad para compensar estas perturbaciones se ve mejor representada por un dV/dt que por un ancho de banda. Finalmente, al hacer el diseño considerando un máximo dV/dt a compensar de manera natural se especifica también un ancho de banda del filtro aunque la calidad del mismo no se especifica por éste término. Para iniciar el diseño del filtro de salida se considera que la forma de onda de tensión de la red eléctrica presenta una perturbación como la que se muestra en la figura 2.7 y que la impedancia del sistema reflejada hacia el secundario es mucho mayor que la impedancia del condensador.



**Figura 2.7.** Tensión distorsionado con un dV/dt específico para el diseño del filtro LC.

Analizando la figura 2.6 del filtro LC, se observa que el sistema es de segundo orden y que la resistencia esta asociada con el coeficiente de amortiguamiento. En este caso se considera un R mínima, garantizando que la respuesta del filtro no presenta amortiguamiento y no disipa energía. La función de transferencia esta dada por:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^2 + s \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}} \quad (2.6)$$

Y la frecuencia de corte esta dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

La ecuación 2.6 puede expresarse en función de la frecuencia normal  $\omega_n$  y del factor de amortiguamiento  $\zeta$ :

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + s2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (2.8)$$

Ambos factores se definen matemáticamente como:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

$$\zeta = \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.10)$$

Se debe tener en cuenta que en un sistema de segundo orden la respuesta del filtro esta relacionada con el valor del factor de amortiguamiento  $\zeta$ . Consecuentemente, se puede describir el comportamiento dinámico de un sistema en términos de los parámetros  $\zeta$  y  $\omega_n$ , el tipo de respuesta se puede clasificar dependiendo del valor de  $\zeta$ , si está entre cero y uno, si vale cero o si vale uno generando la siguiente clasificación de los sistemas:

- ♣ Si  $0 < \zeta < 1$ , se tiene un sistema subamortiguado.
- ♣ Si  $\zeta = 0$ , ante un escalón de entrada el sistema oscila indefinidamente.
- ♣ Si  $\zeta = 1$ , se tiene un sistema sobreamortiguado.

Para este caso se desea que el sistema sea subamortiguado, de manera que responda rápidamente ante una variación en la tensión de entrada. Por otro lado, para un determinado valor de  $\zeta$  entre cero y uno, se tiene un máximo impulso en la salida; éste sobreimpulso debe ser acotado a una tensión adecuada para el sistema y es expresado por la variable  $M_p$ . La figura 2.8 muestra la respuesta típica de un sistema subamortiguado y los parámetros de interés para efectuar el análisis.

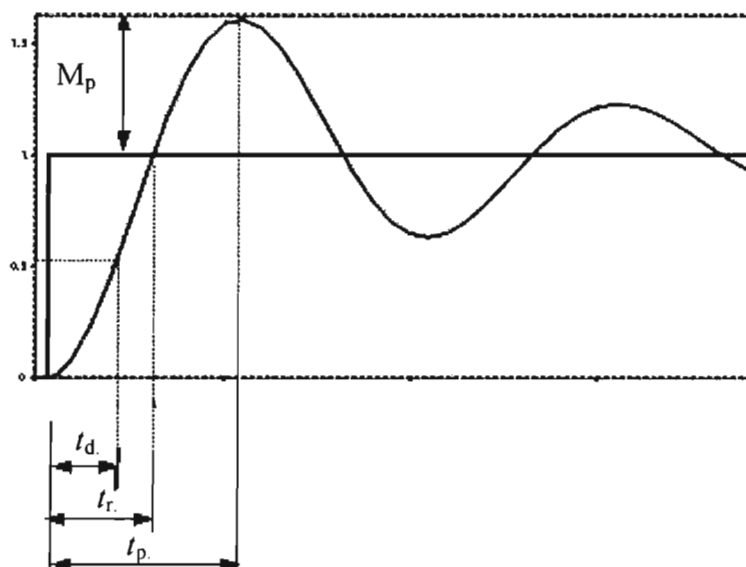


Figura 2.8. Respuesta del sistema ante un escalón de carga.

Los parámetros de la respuesta del sistema son los siguientes:

•• Tiempo de retardo	$t_d$
•• Tiempo de crecimiento	$t_r$
•• Tiempo de pico	$t_p$
•• Sobreimpulso máximo	$M_p$

El máximo sobreimpulso en un sistema de segundo orden se expresa como [25]:

$$M_p = e^{-\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\pi} \quad (2.11)$$

De las ecuaciones anteriores, se observa que se puede conocer la frecuencia de corte del filtro LC a partir de un máximo sobreimpulso propuesto, es decir, tomando un valor propuesto de máximo sobreimpulso para un valor de tiempo pico, se pueden conocer los valores necesarios de  $\zeta$  y  $\omega_n$ ; una vez conocidos estos valores se puede calcular el valor de la bobina y el condensador para que de esta manera se obtenga la frecuencia de corte deseada. Sin embargo, para una frecuencia de corte calculada existe una gran variedad de combinaciones en los valores de L y C. Por otra parte, empleando éste método de diseño se observa que  $M_p$  se convierte en la parte dominante para conocer a  $\omega_n$ , de manera tal que el ancho de banda del filtro de salida dependerá en forma directa del valor de  $M_p$  propuesto.

En la práctica no es conveniente manejar el ancho de banda del filtro de esta manera, porque se podrían dar valores al inductor y condensador que no serían los adecuados para las características de compensación; consecuentemente, es conveniente asociar la frecuencia de corte con la frecuencia de conmutación, con el objeto de eliminar los armónicos de alto orden, y únicamente trabajar con los armónicos de bajo orden, que realmente son los de interés. Por lo tanto se recurre a un segundo método, en el cual si se hace ésta consideración.

En éste segundo proceso de diseño del filtro LC de salida, se basa en introducir en el análisis la máxima frecuencia a la que van a estar conmutando los interruptores de potencia, la amplitud máxima esperada para el armónico presente a la frecuencia de conmutación y la máxima corriente que se desea se demande al convertidor en función de la capacidad de los interruptores de potencia. En este caso, a partir de la función de transferencia del filtro pasabajos dada por la ecuación 2.8, se puede tener la siguiente ecuación:

$$FT = -20 \log \left| \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2} \right)^2 + \left( 2\zeta \frac{\omega_c}{\omega_n} \right)^2 \right| \quad (2.12)$$

Siendo:

$FT$  es la amplitud del armónico debido a la frecuencia de conmutación en decibeles.

$\omega_c$  es la frecuencia de conmutación en radianes del inversor.

$\omega_n$  es la frecuencia de corte del filtro pasivo en radianes.

Se requiere que el sistema sea subamortiguado de manera que  $0 < \zeta < 1$ , considerando que la frecuencia de conmutación del convertidor es muy superior a la frecuencia de resonancia del filtro pasivo en donde  $\omega_c \gg \omega_n$ , de tal forma que se puede hacer la siguiente aproximación a partir de la ecuación (2.12):

$$FT \approx -20 \log \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2} \quad (2.13)$$

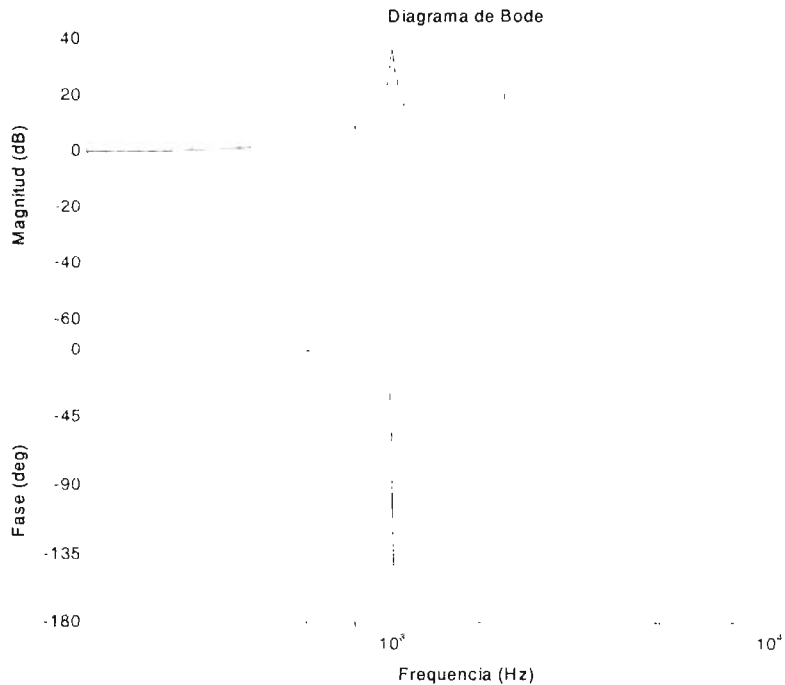
Finalmente, despejando  $\omega_n$  se tiene que la frecuencia de corte del filtro pasabajos en función de la máxima frecuencia de conmutación de la etapa de potencia y de la amplitud del armónico debido a la frecuencia de conmutación esta dado por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_c^2}{\log^{-1}\left(\frac{FT}{-20}\right)}} \quad (2.14)$$

Para plantear el valor de FT, se considera el peor caso en el cual la amplitud del armónico presente a la frecuencia de conmutación tiene el mismo valor que la componente fundamental de voltaje de la red y se desea atenuarlo a un valor pequeño en porcentaje con respecto a la fundamental. Como se trata de un armónico de frecuencias elevadas, puede considerarse una atenuación entre un 1 y 5% del valor de la componente fundamental. Es necesario calcular los valores de la bobina y el capacitor una vez que se conoce el valor de la frecuencia de resonancia, los cuales cumplan esta especificación. De acuerdo a las ecuaciones 2.9 y 2.10, puede verse que existe una multitud de posibles valores que pueden satisfacer el valor de la frecuencia de resonancia.

Una vez que se conoce la frecuencia de corte con el método propuesto, se pueden calcular los valores apropiados para L y C, de tal manera que se tenga un factor de amortiguamiento apropiado, además debe cuidarse que L y C sean prácticos y razonables.

Con la ecuación 2.6 y con el software de MATLAB se puede conocer el comportamiento del filtro de salida. Observando la figura 2.9 y con el análisis hecho previamente, se puede verificar que se trata de un sistema de segundo orden el cual presenta polos complejos conjugados; ésta es la razón por la que existe un sobretiro en la ganancia presentándose en la frecuencia de corte del filtro. Se presenta el diagrama de Bode correspondiente a la magnitud de la función de transferencia, de tal forma que el ancho de banda de compensación se especifica como todas aquellas frecuencias en las que la función de transferencia no se ve afectada por el comportamiento del filtro LC. También se presenta el diagrama de fase del filtro de tal forma que en la frecuencia de corte la señal presenta un ángulo de fase de  $-90^\circ$  tendiendo a ser de  $-180^\circ$  conforme se eleva la frecuencia. Consecuentemente, interesa que la señal a compensar no presente una amplificación en la ganancia y no tenga un defasamiento significativo, de esta forma queda expresado el ancho de banda de una manera general para cualquier valor de inductancia y capacitancia del filtro LC.



**Figura 2.9.** Diagrama de Bode de la respuesta en frecuencia del filtro LC de salida.

### Selección de los valores del filtro LC

Es primordial diseñar un filtro pasivo eficiente para eliminar los armónicos de voltaje producidos por los inversores del filtro activo, ya que éste filtro se relaciona con la impedancia de la red del sistema asociado. Sin embargo, en este caso se debe considerar que el filtro activo se conecta a la red eléctrica mediante un transformador de corriente.

Se elige una frecuencia de conmutación de los interruptores  $f_{SW} = 10\text{KHz}$ , de manera que para garantizar un buen desempeño del filtro LC es necesario que la frecuencia de conmutación de los interruptores sea mucho mayor que la frecuencia de corte del filtro pasivo. Además el armónico de tensión que se genera debido a la frecuencia de conmutación se ve atenuado a razón de  $1/a^2$ , en donde  $a$  es la relación de transformación del transformador de corriente.

En este caso se requiere que la amplitud del armónico que se genera debido a la frecuencia de conmutación de los convertidores sea de un valor pequeño, se sugiere que sea del 1% del valor nominal de la tensión de entrada, aplicando la ecuación 2.14 se obtiene:

$$\omega_n = 6283.2 \text{ rad/seg} \quad (2.15)$$

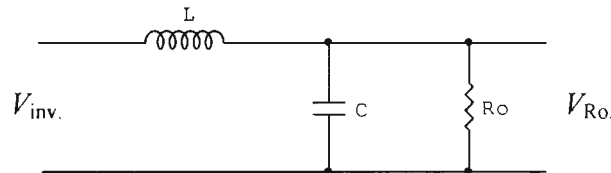
A partir de la expresión 2.15 se obtiene que la frecuencia de corte del filtro pasabajas resulta ser de:  $f_C = 1\text{KHz}$ .



Retomando la ecuación 2.7 y manipulándola se obtiene:

$$LC = \frac{1}{(2\pi f_c)^2} \quad (2.16)$$

Para este trabajo de tesis la potencia que maneja el Transformador Compensador es de 10KVA para cada fase. Por lo tanto, la mínima resistencia de carga que ve el filtro pasabajos esta correspondida con la relación de transformación del Transformador Compensador de corriente, siendo esta  $1/a^2$ , como  $a = 10$ , entonces la resistencia de carga del filtro pasabajos es de aproximadamente  $161.3\Omega$  con un voltaje de red de 127V. La figura 2.10 muestra al filtro LC con carga.



**Figura 2.10.** Filtro LC con carga.

A partir de la figura 2.10 se obtiene la función de transferencia de la tensión en la resistencia  $R_o$  (carga), entre la tensión de entrada:

$$\frac{V_{R_o}(s)}{V_{inv}(s)} = \frac{1}{s^2 + s \frac{1}{R_o C} + \frac{1}{LC}} \quad (2.17)$$

Expresándose la ecuación 2.17 en función de la frecuencia normal  $\omega_n$  y del factor de amortiguamiento  $\zeta$ :

$$\frac{V_{R_o}(s)}{V_{inv}(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + s2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (2.18)$$

Tenemos que el factor de amortiguamiento  $\zeta$  esta dado por:

$$\zeta = \frac{1}{2\omega_n R_o C} \quad (2.19)$$

Como queremos que el sistema sea subamortiguado ( $0 < \zeta < 1$ ), de manera que responda rápidamente ante una variación en la tensión de entrada, se propone que el factor de amortiguamiento sea igual a:

$$\zeta = 0.7071 \quad (2.20)$$

Utilizando la ecuación 2.19 se plantea utilizar un condensador de  $5\mu F$ ; sustituyendo este valor en la ecuación 2.16, se obtiene un inductor con valor de:

$$L = \frac{1}{5 \times 10^{-6} (2\pi \cdot (1 \times 10^3))^2} = 0.00506H \quad (2.21)$$

Con los valores anteriormente obtenidos se puede conseguir la máxima variación de tensión en un período de tiempo ( $dV/dt$ ) que el filtro será capaz de reproducir y como consecuencia de la función de transferencia del filtro pasivo, también se puede determinar un ancho de banda del filtro, aunque como se mencionó en un principio, la calidad del filtro en cuanto a capacidad de compensar variaciones de tensión, se describe mejor en términos de un  $dV/dt$ .

En conclusión, para los valores obtenidos del condensador y el inductor, se recomienda realizar la construcción del inductor en núcleo de aire, ya que de esta manera se obtiene un comportamiento más lineal del mismo y se evita la posible saturación del núcleo; asimismo se deben elegir valores de condensadores comerciales. Los valores utilizados para el filtro son: un condensador de  $5\mu F$  en conjunto con un inductor de  $5mH$ .

### 2.4 Generación de Referencias

Las señales de referencia para compensar las perturbaciones de tensión, deben ser lo más precisas posibles, la no inclusión de desfases significativos que puedan alterar la información necesaria para realizar una correcta compensación de tensión, y la no atenuación de dichas señales. Por otra parte, debe contener toda la información necesaria para compensar tanto armónicos como posibles impulsos o caídas de tensión que el filtro sea capaz de compensar.

Para este trabajo de tesis, la forma en que se generan las referencias en el sistema trifásico, es haciendo uso de la teoría DQ; cabe mencionar que en esta sección se usa otro método para obtener las referencias llamado "Extracción de la Fundamental". La cual consiste en extraer la componente fundamental de la tensión de la red eléctrica, para posteriormente evaluar las tensiones armónicas a partir de la diferencia entre la tensión de red y su fundamental.

Para generar la señal de referencia se emplea un filtro pasabajos de 4º orden el cual presenta un comportamiento tipo Butterworth; esto con el propósito de no amplificar la componente fundamental, debido a que la frecuencia de corte del filtro estará muy cerca de la frecuencia fundamental. Este filtro será el encargado de extraer solo la componente fundamental de la tensión de red distorsionada.

Una vez obtenida la componente fundamental de la tensión de la red eléctrica, se realiza una resta entre la tensión de la red distorsionada y la tensión filtrada. Al realizar dicha resta, la componente fundamental de dichas señales se anulará quedando solo los armónicos que presenta la tensión de red distorsionada.

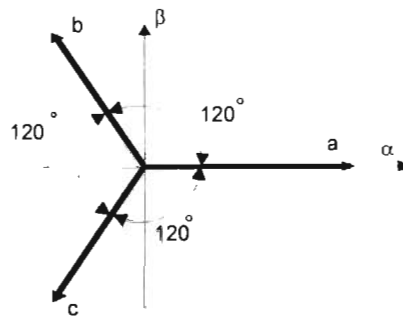
### 2.4.1 Teoría DQ

El método tradicional para calcular el flujo de potencia en un sistema trifásico con la presencia de armónicos de corriente y/o tensión, presenta restricciones principalmente debido a la complejidad de las ecuaciones para obtener los valores necesarios de manera rápida. Por consecuencia, suele utilizarse otro método de análisis para estimar el flujo de potencia y esta basado en una teoría de potencia reactiva imaginaria desarrollada por S. Battcharya [37] y que simplifica el cálculo introduciendo la transformada de Park en el análisis.

La potencia demandada por la carga, queda expresada como sigue:

$$P_{3\phi} = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (2.22)$$

Supóngase el sistema trifásico representado por los fasores  $a$ ,  $b$  y  $c$ , los cuales se convierten a ejes ortogonales  $\alpha$  y  $\beta$ . En la figura 2.11 se muestra el principio de transformación de ejes.



**Figura 2.11.** Transformada de Park; transformación de ejes ortogonales.

La equivalencia de corrientes y tensiones en los ejes ortogonales  $\alpha$  y  $\beta$  se relacionan como sigue:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Siendo:

- $i_\alpha$  Componente de corriente en eje alfa
- $i_\beta$  Componente de corriente en eje beta
- $V_\alpha$  Componente de tensión en el eje alfa
- $V_\beta$  Componente de tensión en el eje beta

Una vez que se conocen las corrientes y las tensiones en ejes alfa y beta, se obtienen unos nuevos ejes llamados D y Q; matemáticamente la potencia queda definida como sigue:

$$P_{3\phi} = V_{\alpha}i_{\alpha} + V_{\beta}i_{\beta} \quad (2.25)$$

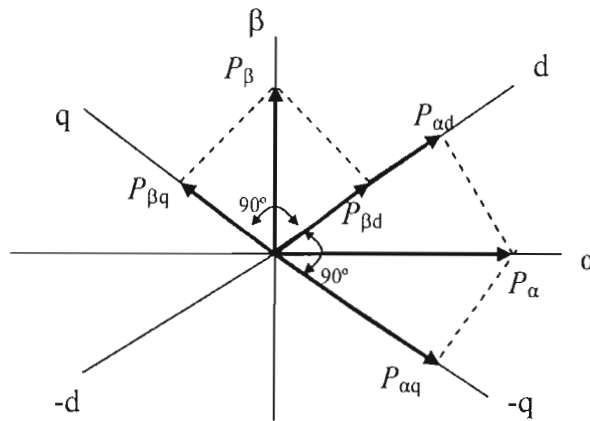
La transformación DQ aplicada a voltajes  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  de una fuente de suministro trifásico a componentes de la transformada DQ,  $V_d$ ,  $V_q$  y  $V_0$  esta definida por la ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}(\phi) \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Donde  $\mathbf{T}(\phi)$  es la matriz de transformación:

$$T(\phi) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \text{sen}(\phi) & \text{sen}(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{cos}(\phi) & \text{cos}(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \text{cos}(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Donde  $\phi = \omega t$  es un ángulo variante en el tiempo que representa la posición angular del marco de referencia. El marco de referencia rota a una velocidad constante  $\omega$ , sincronizado con el voltaje de suministro de la red eléctrica como muestra la figura 2.12.



**Figura 2.12.** Marco de referencia de la teoría DQ.

Donde:

$$\begin{aligned} P_{\alpha d} &= -P_{\alpha} \cos (90-\omega t) \\ P_{\alpha q} &= -P_{\alpha} \text{sen } \omega t \\ P_{\beta d} &= P_{\beta} \text{sen } \omega t \\ P_{\beta q} &= P_{\beta} \cos \omega t \end{aligned}$$

La matriz (2.27) representa a las potencias activa y reactiva bajo el concepto de la teoría DQ. En un sistema trifásico bajo régimen senoidal, la potencia total trifásica es de valor constante. Sin embargo, con la presencia de armónicos en el sistema, este concepto ya no es válido ya que éstos ocasionan variaciones a la componente constante de potencia, de tal manera que las potencias se pueden separar en una parte constante o de CD y una parte variable o de CA. Estas componentes se pueden escribir en términos de potencia activa y reactiva de la siguiente forma:

$$PD = PD^{CD} + PD^{CA} \quad (2.28)$$

$$PQ = PQ^{CD} + PQ^{CA} \quad (2.29)$$

Lo que representa cada una de estas componentes se menciona a continuación:

$PD^{CD}$  Corresponde al valor de potencia activa asociada a las componentes fundamentales de tensión y de corriente.

$PD^{CA}$  Es el valor de potencia activa asociada a las componentes armónicas de tensión y de corriente.

$PQ^{CD}$  Corresponde al valor de potencia reactiva asociada a las componentes fundamentales desfasada a  $90^\circ$ , de tensión y de corriente.

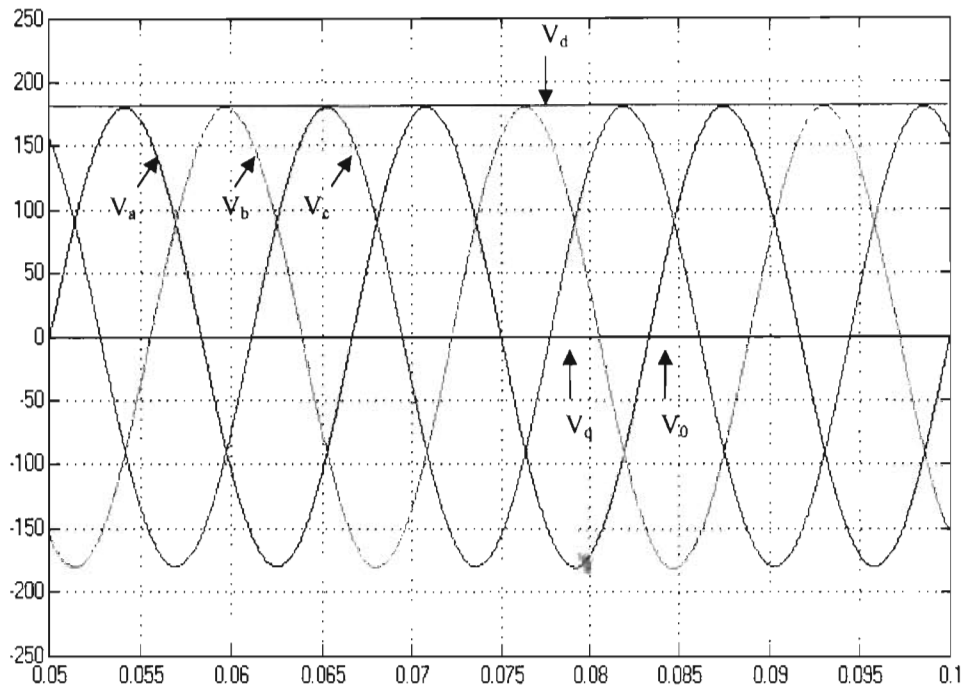
$PQ^{CA}$  Es el valor de potencia reactiva asociada a las componentes armónicas de tensión y de corriente.

Para el caso del filtro de tensión se desea compensar los disturbios de tensión, debido a ello es necesario separar las componentes de CD de las de CA y quedarse con estas últimas. Esta es una parte crítica del proceso de obtención de referencias ya que es necesario filtrar las potencias para quedarse con las componentes de CA de potencia sin que sean atenuadas ni desfasadas para que a partir de ellas, reproducir las tensiones de referencia. Por otra parte, la componente de secuencia cero debe ser compensada en su totalidad para cancelar posibles desbalances de tensión.

## 2.4.2 Simulaciones de la teoría DQ

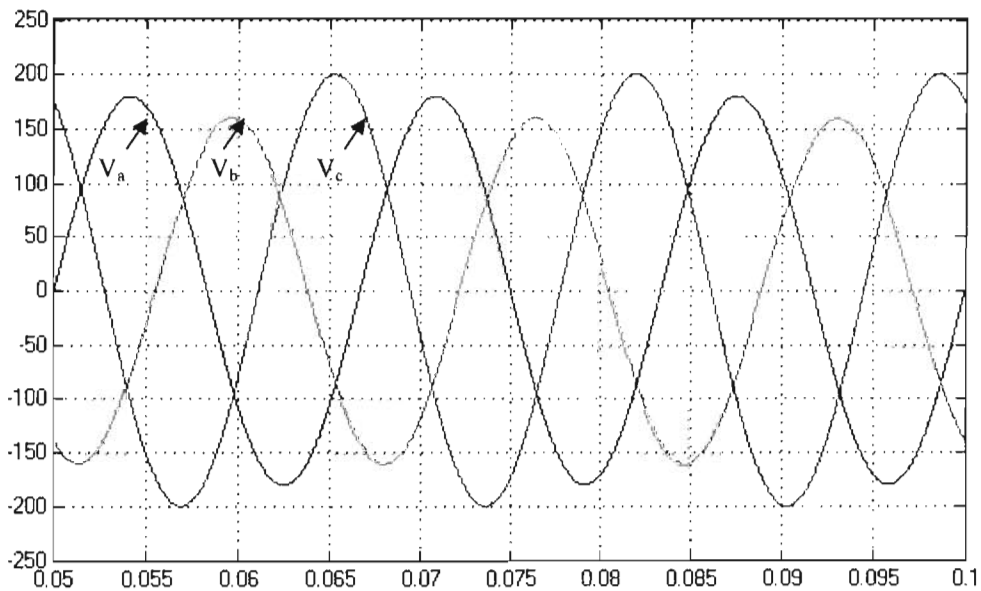
Esta teoría transforma la tensión fundamental de fase en un valor de CD de igual magnitud que la amplitud pico de la tensión de fase, mientras que los armónicos son mapeados en frecuencias mas altas. La figura 2.13 muestra un ejemplo de lo dicho anteriormente.

En esta figura se puede observar que al tener una fuente de suministro de tensión trifásica sin presencia de armónicos y desbalances, al aplicar la transformación DQ, resulta que la componente  $V_d$  es un nivel de CD correspondiente a la tensión pico de la tensión de fase, mientras que las componentes  $V_q$  y  $V_0$  se encuentran en cero.

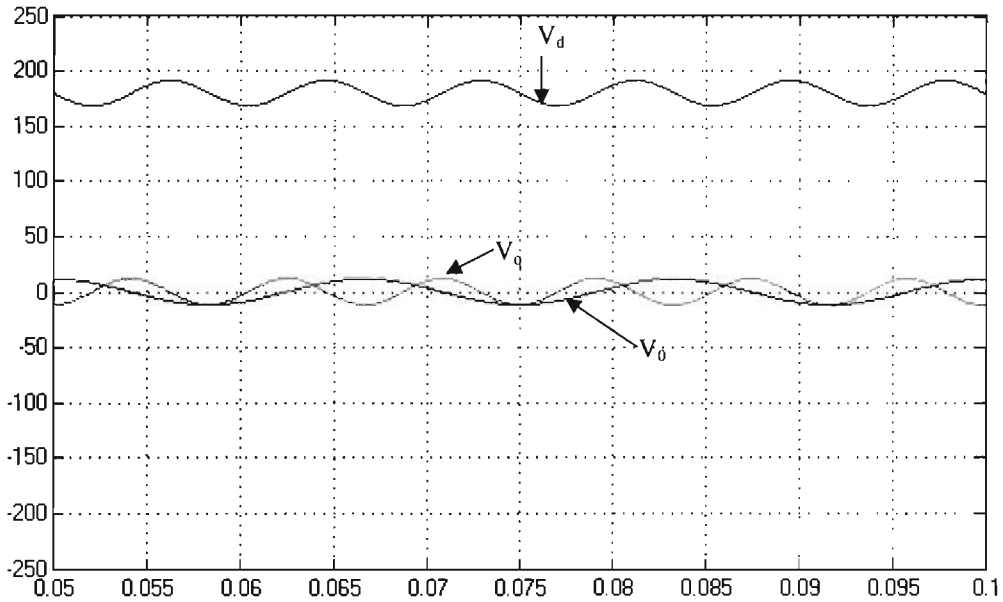


**Figura 2.13.** Transformación DQ de  $V_{abc}/V_{dq0}$  sin presencia de perturbaciones.

Con la presencia de desbalances de tensión, se tiene el caso de la figura 2.14 y la figura 2.15 que muestran la transformación DQ correspondiente. Estas figuras presentan un desbalance en el suministro eléctrico del 6%; al aplicar la transformación correspondiente, en la componente  $V_d$  se puede observar que existe una señal de CA montada en un nivel de CD, las componentes  $V_q$  y  $V_0$  solo muestran señales de CA.

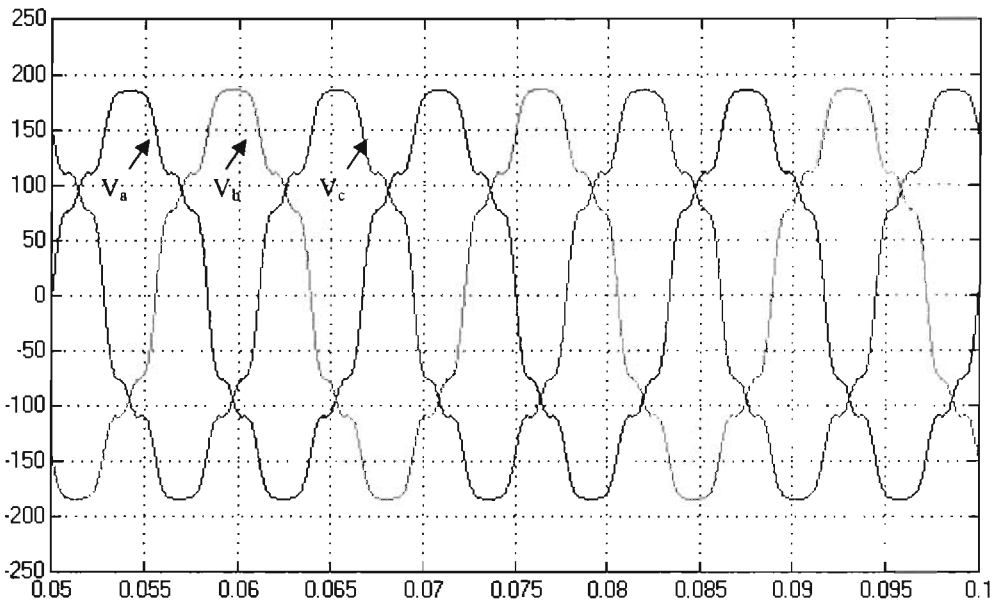


**Figura 2.14.** Tensión del suministro eléctrico trifásico con un %VUF = 6%.

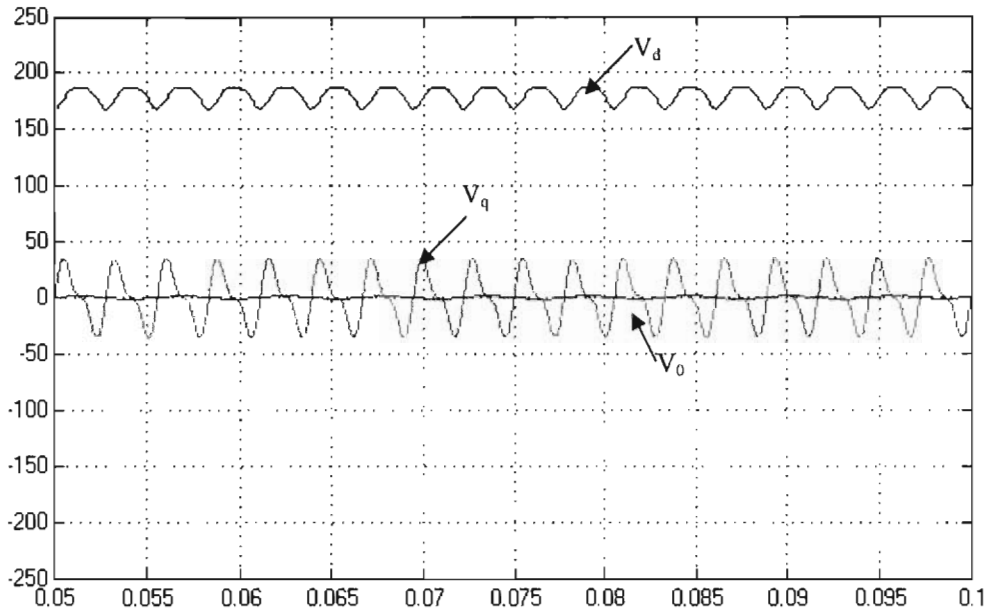


**Figura 2.15.** Transformación DQ de  $V_{abc}/V_{dq0}$  en presencia de desbalances de tensión.

Ante la presencia de armónicos se tiene el caso de la figura 2.16 y la figura 2.17 que muestra la transformación DQ correspondiente. Se puede observar que la componente  $V_d$  presenta una señal de CA montada en un nivel de CD, donde el nivel de CD corresponde a la tensión pico de las fases, las componentes  $V_q$  y  $V_0$  presentan solo señales de CA. Para este caso se supone que en los voltajes de fase esta presente un 12.7% de distorsión armónica total, tomando en cuenta el 3°, 5°, 7°, 11° y 13° armónicos de tensión, siendo estos los más significativos.

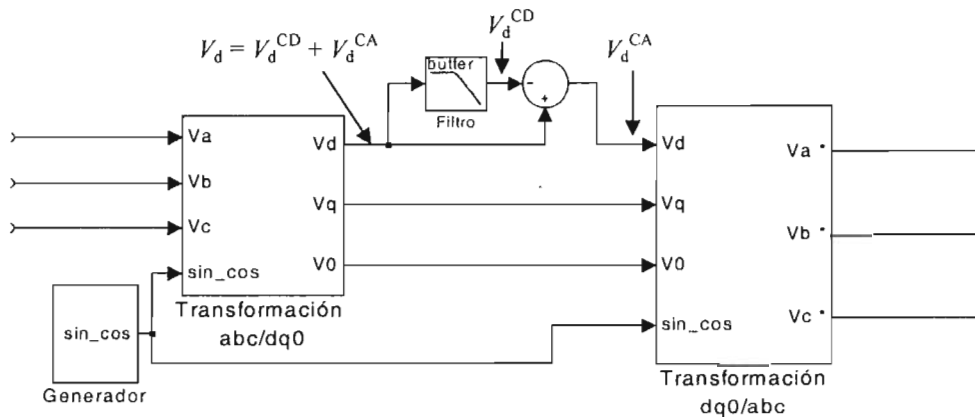


**Figura 2.16.** Tensión del suministro eléctrico trifásico con un THD = 12.7%.



**Figura 2.17.** Transformación DQ de  $V_{abc}/V_{dq0}$  en presencia de armónicos de tensión.

De acuerdo con las transformaciones de  $V_{abc}/V_{dq0}$  y su inversa, se puede considerar la forma en que se han de generar las referencias en tensión. Con los datos obtenidos anteriormente, se muestra que si no existe perturbación en la red eléctrica solo aparece un nivel de CD en la componente  $V_d$ ; por lo tanto, para el caso en que existen perturbaciones ya sean desbalances o armónicos, estas introducen señales de CA en las tres componentes  $V_{dq0}$ . Por lo tanto, una vez que se transforman los tres vectores  $V_a$ ,  $V_b$ , y  $V_c$ , la idea es dejar solo la perturbación asociada a las señales de CA. La figura 2.18 muestra el esquema utilizado para generar las referencias en tensión.



**Figura 2.18.** Esquema a bloques para generar las referencias en tensión.

El propósito de insertar un filtro pasabajos en la componente  $V_d$ , es para dejar solo la componente de CD, para después restársela a  $V_d$  y obtener así la señal de CA necesaria. Esta claro que entre mas baja sea la frecuencia de corte del filtro pasabajos, resultara que la componente de CA de  $V_d$  no se atenúe, pero esto hace que se obtenga como consecuencia un tiempo de asentamiento mas grande. Por el contrario, se tiene que entre mas alta sea la



frecuencia de corte del filtro pasabajos, hay posibilidades de que el filtro empiece a dejar pasar un rango de frecuencias, atenuando las señales de CA que son las de interés, pero se obtiene un mejor tiempo de asentamiento.

Para compensar armónicos de tensión, suponiendo que el primero en aparecer es el 3º armónico, se propone un filtro pasabajos tipo Butterworth de 4º orden con una frecuencia de corte de  $f_0 = 30\text{Hz}$ ; y el mismo valor se propone para compensar desbalances de tensión, este valor es el utilizado en las simulaciones que se realizaron para obtener los resultados que se muestran en los siguientes capítulos.



# CAPITULO III

## Análisis del Controlador

Es importante tomar en cuenta cuáles son las estrategias de control comúnmente utilizadas en esta clase de sistemas, por lo que se abordará en este apartado el tema del control clásico para filtros activos. Una vez calculadas las referencias de compensación, es necesario generar las señales de mando para los interruptores de potencia; es en esta parte donde se debe contar con un control que además de proporcionar la salida deseada con un mínimo error, mantenga estables las variables necesarias para un buen desempeño del filtro. Consecuentemente, de nada sirve tener una referencia muy buena si el control no tiene la dinámica suficiente para seguir a la referencia, por otra parte, tampoco sirve tener un control muy rápido si el sistema físico es incapaz de responder con tanta velocidad.

La estructura del control, está directamente relacionada con el generador de pulsos PWM para los interruptores, ya que de esto depende la estabilidad del sistema.

De acuerdo con la referencia [18], el método de control basado en portadora triangular y control PI, es el que mejor resultado ofrece cuando se desea seguir una referencia senoidal. Por otra parte, el modulador por banda de histéresis, es el que mejores resultados ofrece cuando la referencia a seguir no es senoidal, como en el caso del filtro activo. Para llevar a cabo la implantación del control se debe hacer uso de una tarjeta de control basada en un DSP; la cual tiene cierto grado de complejidad además de detalles importantes y hasta críticos para el buen funcionamiento del filtro activo. Además se debe contar con un buen sistema de adquisición de variables físicas a los niveles requeridos para un correcto procesamiento de las señales.

### 3.1 Controles más comunes

El control automático desempeña una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, ya que el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Por lo cuál la teoría de control es un tema de interés para muchos científicos e ingenieros que desean dar nuevas ideas para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, disminuir tareas manuales o repetitivas.

El controlador mide la salida del proceso y calcula la diferencia (error) entre lo que se ha medido y el punto de referencia. Si existe un error, el controlador ajusta su salida para alterar el proceso con el fin de acercarlo al punto de referencia, disminuyendo así el error. Cada vez que se calcule un error, el controlador debe decidir cuánto alterará el

proceso. Si el controlador es demasiado agresivo (baja amortiguación), puede provocar que el proceso se vuelva inestable y oscile. Si por otro lado no es lo suficientemente agresivo (sobre amortiguación), el sistema puede necesitar demasiado tiempo para recuperarse.

La agresividad del controlador en el Filtro Activo es determinada por las constantes PI que proporciona el controlador. Las constantes proporcionales e integrales se utilizan para calcular cuál debería ser la salida con relación al error medido. La constante proporcional representa el área en la cual el controlador realmente está controlando el proceso, y determina la banda de operación. La parte integral corrige cualquier offset entre el punto de consigna y la variable del proceso reiniciando o desplegando de manera automática la banda proporcional.

Calcular las constantes que utiliza el controlador PI en el Filtro Activo es el punto de mayor investigación. Existen muchos métodos para "sintonizar" el controlador con el fin de obtener la respuesta deseada. La mayoría de los métodos proporcionan valores para cada constante, pero cuando el sistema está realmente implementado, no funciona como corresponde. De hecho, incluso los mejores métodos por lo general sólo le permiten acercarse a las constantes correctas, pero para una operación óptima del controlador, todavía existe un elemento de juicio y error.

Para continuar con el tema es necesario definir ciertos términos básicos.

- ♣ **Señal de salida:** es la variable que se desea controlar (posición, velocidad, presión, temperatura, etc.).
- ♣ **Señal de referencia:** es el valor que se desea que alcance la señal de salida.
- ♣ **Variable controlada y variable manipulada.** La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. El objetivo del control es medir el valor de la variable controlada del sistema para aplicar correcciones a través de la variable manipulada para obtener un valor deseado.
- ♣ **Error:** es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.
- ♣ **Señal de control:** es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error.
- ♣ **Señal análoga:** es una señal continua en el tiempo.
- ♣ **Señal digital:** es una señal que solo toma valores de 1 y 0. El PC solo envía y/o recibe señales digitales.
- ♣ **Proceso:** operación que conduce a un resultado determinado.

- ♣ **Planta:** es el elemento físico que se desea controlar. Planta puede ser: un motor, un horno, un sistema de disparo, un sistema de navegación, un tanque de combustible, etc.
- ♣ **Sistema:** consiste en un conjunto de elementos que actúan coordinadamente para realizar un objetivo determinado.
- ♣ **Perturbación:** es una señal que tiende a afectar la salida del sistema, desviándola del valor deseado.
- ♣ **Control realimentado.** El control realimentado es un sistema que mantiene una comparación entre la entrada de referencia y la salida deseada, el resultado de la comparación es utilizado para controlar.
- ♣ **Sistema de control en lazo cerrado:** es aquel en el cual continuamente se está monitoreando la señal de salida para compararla con la señal de referencia y calcular la señal de error, la cual a su vez es aplicada al controlador para generar la señal de control y tratar de llevar la señal de salida al valor deseado. También es llamado **control realimentado**.
- ♣ **Sistema de control en lazo abierto:** en estos sistemas de control la señal de salida no es monitoreada para generar una señal de control.

### 3.1.1 Control en modo Tensión

Con la función de transferencia del Filtro Activo Serie obtenida en la sección anterior y con la ecuación 2.6 se puede conocer el comportamiento de éste en el dominio de la frecuencia junto con el bus de CD.

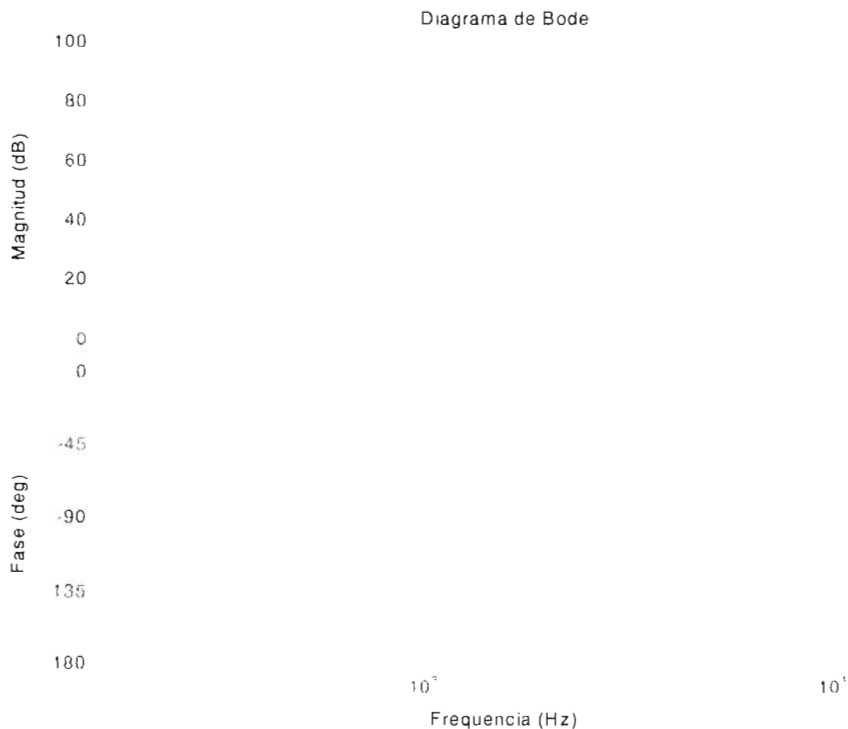
$$F_v(s) = \frac{V_{CD}}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (3.1)$$

Conforme con el criterio establecido en la sección 2.3, se eligen los valores para L, R y C; siendo estos:  $R=1\Omega$ ,  $L=5\text{mH}$ ,  $C=5\mu\text{F}$ , con una frecuencia de corte  $f_c=1\text{KHz}$ . Para este hecho se contempla un bus de CD de 400 Volts.

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior, se encuentra que la función de transferencia esta dada por:

$$F_v(s) = \frac{1.6 \times 10^{10}}{s^2 + 200s + 4 \times 10^7} \quad (3.2)$$

Con la ecuación anterior y con el software de MATLAB se puede conocer el comportamiento del filtro de salida en el dominio de la frecuencia a partir de las graficas de Bode de magnitud y fase, la cual se muestra en la figura 3.1.



**Fig. 3.1.** Diagrama de Bode del Filtro Activo Serie en conjunto con la tensión del bus de CD.

Acorde con la grafica de magnitud de la figura anterior, se observa que la ganancia del filtro activo en bajas frecuencias es de 52dB, los cuales pertenecen a la ganancia del bus de CD y que tiene un pico de resonancia debido a que el sistema es de segundo orden y tiene un bajo amortiguamiento, justo en la frecuencia de corte del filtro.

Aunado a esto, se aprecia que el filtro puede llegar a ser inestable si se opera cerca de la frecuencia de corte, ya que difícilmente la tensión de salida podrá seguir a la tensión de referencia debido al cambio de fase en esa región.

Debido a las características que presenta el filtro activo, resulta necesario agregar un controlador que atenúe el pico de resonancia y el cambio abrupto de fase presente en la frecuencia de corte con el fin de evitar que la tensión de salida se amplifique y que el filtro activo se vuelva inestable.

Para generar la señal de referencia se emplea un filtro pasabajas de 4° orden tipo Butterworth; con la intención de no amplificar la componente fundamental, debido a que la frecuencia de corte del filtro estará muy cerca de la frecuencia fundamental. Este filtro será el encargado de extraer solo la componente fundamental de la tensión de red distorsionada, después, se realiza una resta entre la tensión de la red distorsionada y la tensión filtrada, para que la componente fundamental de dichas señales se anule quedando solo los armónicos que presenta la tensión de red distorsionada como se muestra en la figura 3.2.

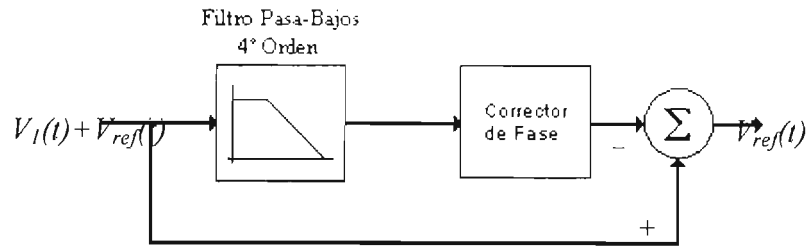


Fig. 3.2. Diagrama a bloques de la generación de referencia.

### 3.1.2 Control en modo Corriente

Con la función de transferencia del Filtro Activo Serie obtenida en la sección anterior y con la ecuación 3.1 se puede conocer el comportamiento de éste en el dominio de la frecuencia junto con el condensador de filtro de salida.

$$F_i(s) = \frac{V_{CD}Cs}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (3.3)$$

Conforme con el criterio establecido en la sección 2.3, se emplean los mismos valores para L, R y C, contemplando un bus de CD de 400 Volts.

Sustituyendo estos valores en la ecuación anterior, se encuentra que la función de transferencia esta dada por:

$$F_i(s) = \frac{8 \times 10^4 s}{s^2 + 200s + 4 \times 10^7} \quad (3.4)$$

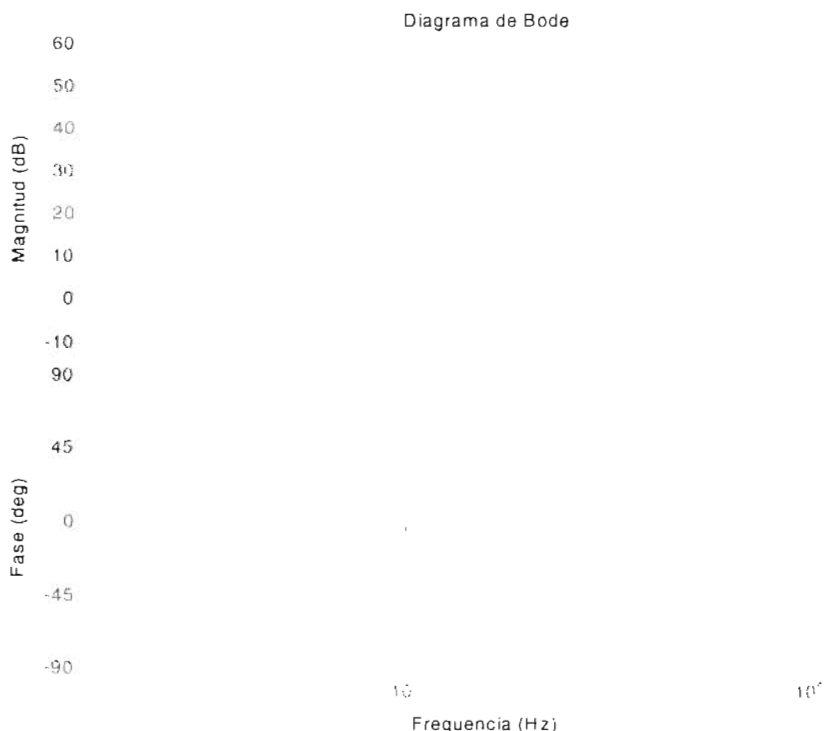
Con la ecuación anterior y con el software de MATLAB se puede conocer el comportamiento del filtro de salida en el dominio de la frecuencia a partir de las graficas de Bode de magnitud y fase, la cual se muestra en la figura 3.3.

De acuerdo con la grafica de magnitud de la figura, se observa un pico de resonancia debido a que el sistema es de segundo orden y tiene un bajo amortiguamiento debido a que no se incluye la carga, justo en la frecuencia de corte del filtro.

Asimismo, se aprecia que el filtro puede llegar a ser inestable si se opera cerca de la frecuencia de corte, ya que difícilmente la salida podrá seguir a la entrada de referencia debido al cambio abrupto de fase en esa región.

Debido a las características que presenta el filtro activo, resulta indispensable agregar un controlador que atenúe el pico de resonancia y el cambio abrupto de fase presente en la frecuencia de corte con el fin de evitar que la corriente del inductor se amplifique y que el filtro activo se vuelva inestable; por otra parte de igual forma que sea

capaz de eliminar el desfaseamiento de 90° que se presenta justo en las frecuencias de interés correspondiente a los armónicos de tensión.



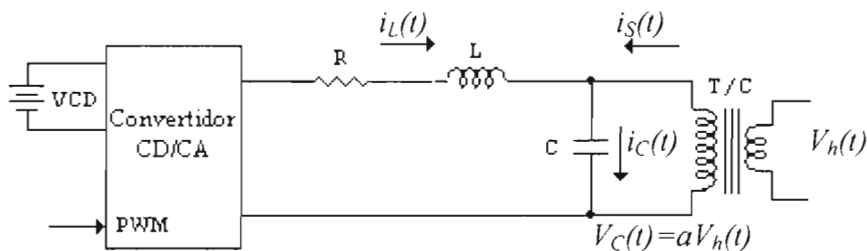
**Fig. 3.3.** Diagrama de Bode del Filtro Activo Serie en conjunto con la corriente del condensador de salida.

Como se conoce el voltaje que se necesita en el condensador del filtro LC para llevar a cabo la compensación de armónicos de tensión, se puede conocer la corriente que pasa a través del condensador:

$$i_c(t) = aC \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Donde:

- $V_c(t)$  Tensión instantánea en las terminales del condensador del filtro LC.
- $C$  Valor del condensador.
- $a$  Relación de transformación.



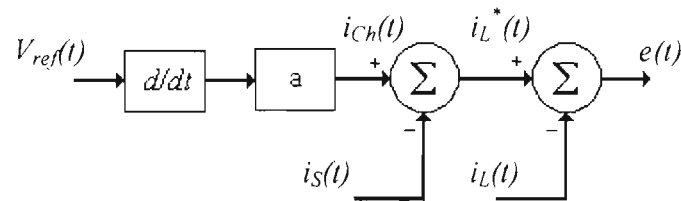
**Fig. 3.4.** Circuito para generar las referencias en corriente.



Observando la figura 3.4 y aplicando la ley de Kirchoff de corriente, se puede encontrar una expresión para la corriente que circula a través del inductor del filtro LC, asimismo, la corriente del inductor estará en función del voltaje necesario para llevar a cabo la compensación de los armónicos de tensión y la corriente del lado secundario del transformador, y sustituyéndola con la ecuación 3.3 resulta:

$$i_L(t) = aC \frac{dV_c(t)}{dt} - i_s(t) \quad (3.6)$$

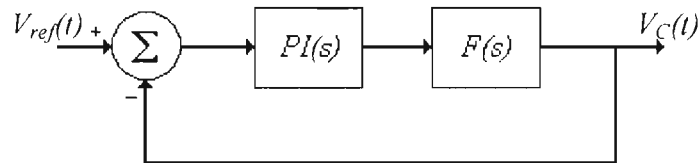
La figura 3.5 muestra el diagrama a bloques de la forma en que se genera la referencia en corriente:



**Fig. 3.5.** Diagrama a bloques de la generación de referencia en corriente.

### 3.2 Diseño del controlador PI

Para realizar el diseño del controlador PI, necesitamos la función de transferencia de la salida del Filtro Activo como se muestra en el diagrama a bloques de la figura 3.6.



**Fig. 3.6.** Diagrama a bloques del controlador PI.

La función de transferencia de la salida con respecto a la entrada del conjunto controlador-filtro activo queda de la siguiente forma:

$$\frac{V_h(t)}{V_{ref}(t)} = \frac{PI(s)F(s)}{1 + PI(s)F(s)} \quad (3.7)$$

La función de transferencia del controlador PI está dada por:

$$PI(s) = k_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.8)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación anterior, se encuentra que la función de transferencia esta dada por:

$$\frac{V_h(t)}{V_{ref}(t)} = \frac{\left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( s^2 + \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC} \right)}{1 + \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( s^2 + \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC} \right)} \quad (3.9)$$

Con el software MATLAB podemos conocer los polos y los ceros de la función de transferencia y por consiguiente los valores de  $K_p$  y  $K_i$  permitiendo acercarse a las constantes correctas y utilizando un elemento de juicio y error en las simulaciones, se obtuvieron las siguientes valores para  $k_p=1$  y para  $K_i=3$ .

### 3.2.1 Características del controlador PI

La función de transferencia que se propone para el controlador PI esta dada por la ecuación:

$$\frac{sK_p + K_i}{s} \quad (3.10)$$

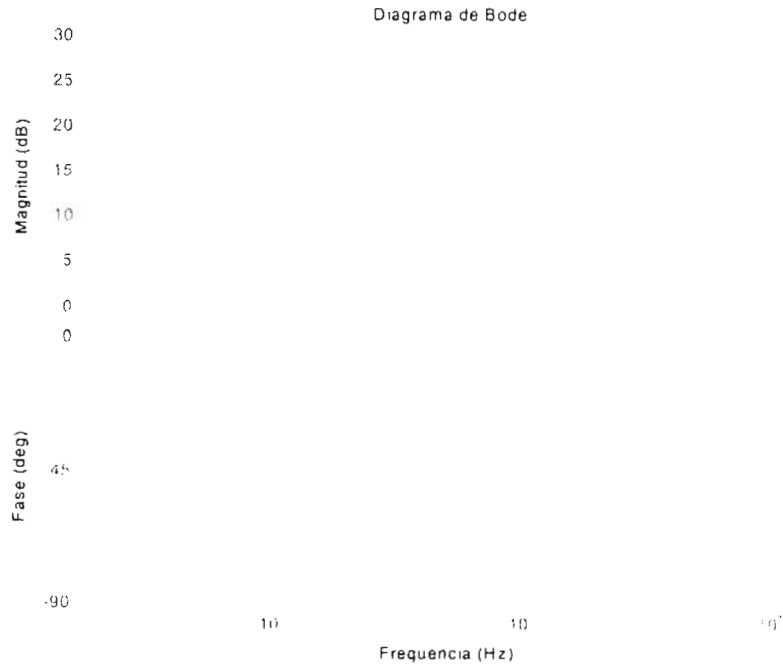
Sustituyendo los valores para  $K_p=1$  y  $K_i=3$  tenemos:

$$\frac{s + 3}{s} \quad (3.11)$$

Corresponde señalar que para el caso en que se opere al Filtro Activo Serie con una carga lineal, basta que el controlador sea un Controlador Proporcional; por lo tanto, para este capítulo se muestran resultados de simulación operando con carga lineal, el único requerimiento que se le exige al controlador PI es que éste le suministre la ganancia necesaria para la compensación de armónicos.

El polo se ubica a muy bajas frecuencias y el cero un poco más adelante, consiguiendo así que para todo el rango de frecuencias de interés se cuente con la ganancia necesaria para lograr la compensación.

La figura 3.7 muestra la grafica de Bode de magnitud y fase del controlador PI planteado para compensar los armónicos de tensión.



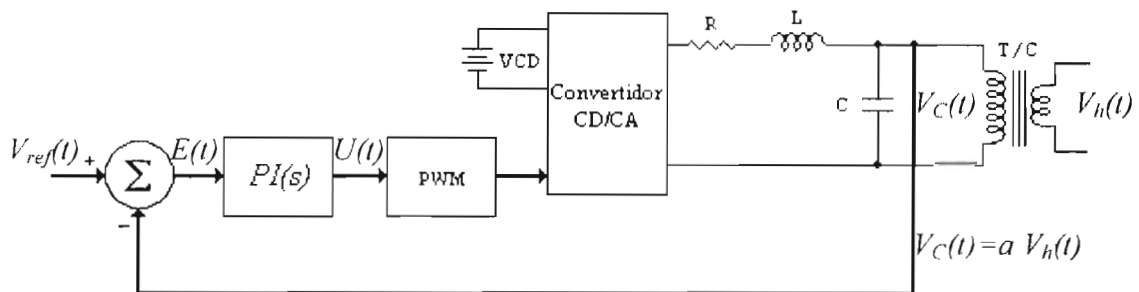
**Fig. 3.7.** Diagrama de Bode del controlador PI.

### 3.2.2 Análisis en frecuencia del sistema con el Controlador PI

La función de transferencia de la salida con respecto a la entrada del conjunto controlador-filtro activo queda de la siguiente forma:

$$\frac{V_h(t)}{V_{ref}(t)} = \frac{sK_p\omega_n^2 + K_i\omega_n^2}{s^3 + s^2(2\zeta\omega_n) + s(\omega_n^2 + K_p\omega_n^2) + K_i\omega_n^2} \quad (3.12)$$

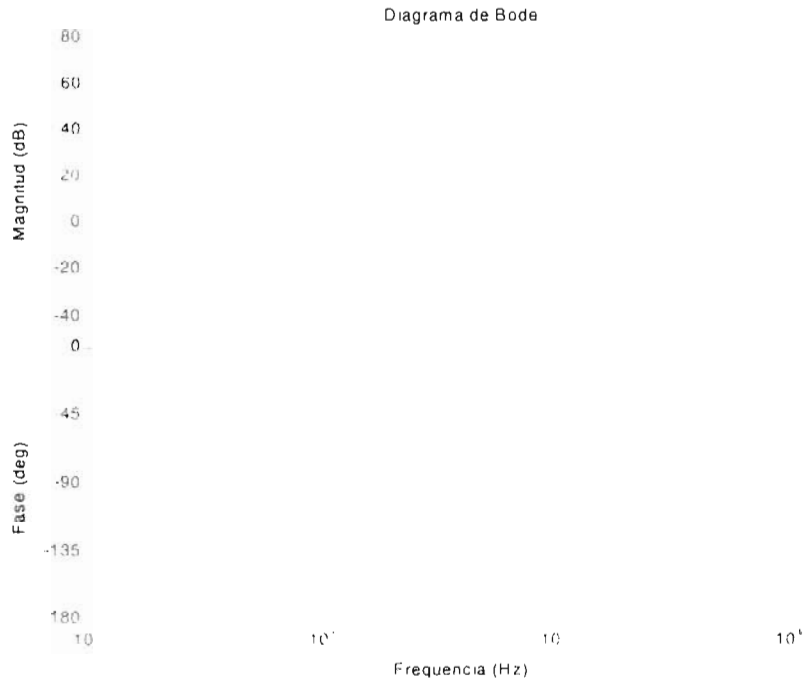
El diagrama a bloques del controlador PI en conjunto con el Filtro Activo esta representado por la figura 3.8.



**Fig. 3.8.** Esquema a bloques del controlador PI en conjunto con el Filtro Activo Serie.

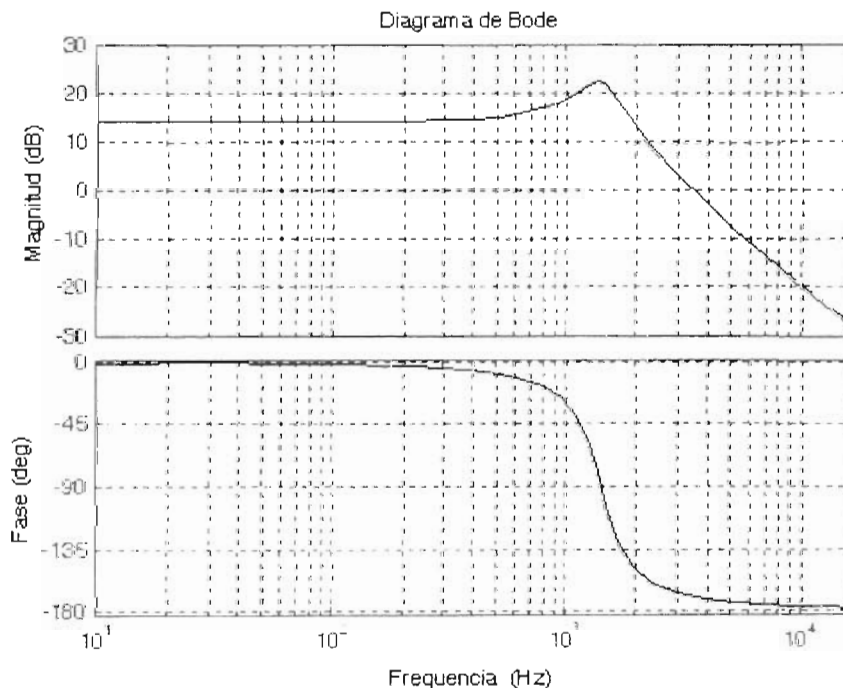
En la figura 3.9 se muestra el comportamiento en el dominio de la frecuencia del controlador PI en conjunto con el Filtro Activo Serie; se observa el pico de resonancia en la

frecuencia de corte, debido al hecho de no tener carga en la salida. Si el Filtro Activo Serie llegase a operar en esa región, el sistema llegaría a hacerse inestable por la amplificación que tendrían ese rango de frecuencias.



**Fig. 3.9.** Diagrama de Bode del conjunto Planta-Controlador.

La figura 3.10 presenta la respuesta en frecuencia del controlador PI en conjunto con el Filtro Activo Serie, con una carga de 10KVA conectada a su salida.



**Fig. 3.10.** Diagrama de Bode del conjunto Planta-Controlador en condiciones de 10KVA de carga.

Si bien el pico de resonancia disminuye al operar con una carga de 10KVA, éste no se reduce en su totalidad.

Cabe mencionar que operando con cargas de mayor potencia como 50KVA, el pico de resonancia se reduce por completo. Incluso operando el Filtro Activo Serie bajo estas condiciones de 10KVA de potencia nominal, éste tiene un buen desempeño en el seguimiento a una señal con armónicos, dado que no existirá una componente de armónicos que se encuentre en ese rango de amplificación.

### 3.2.3 Análisis en el tiempo del sistema con el Controlador PI

Se efectúan algunas simulaciones en Simulink de MATLAB, para conocer el comportamiento en el dominio del tiempo del conjunto controlador Filtro Activo Serie, con el objetivo de obtener resultados más apegados a la realidad. La figura 3.11 muestra el diagrama a bloques del sistema para llevar a cabo las simulaciones.

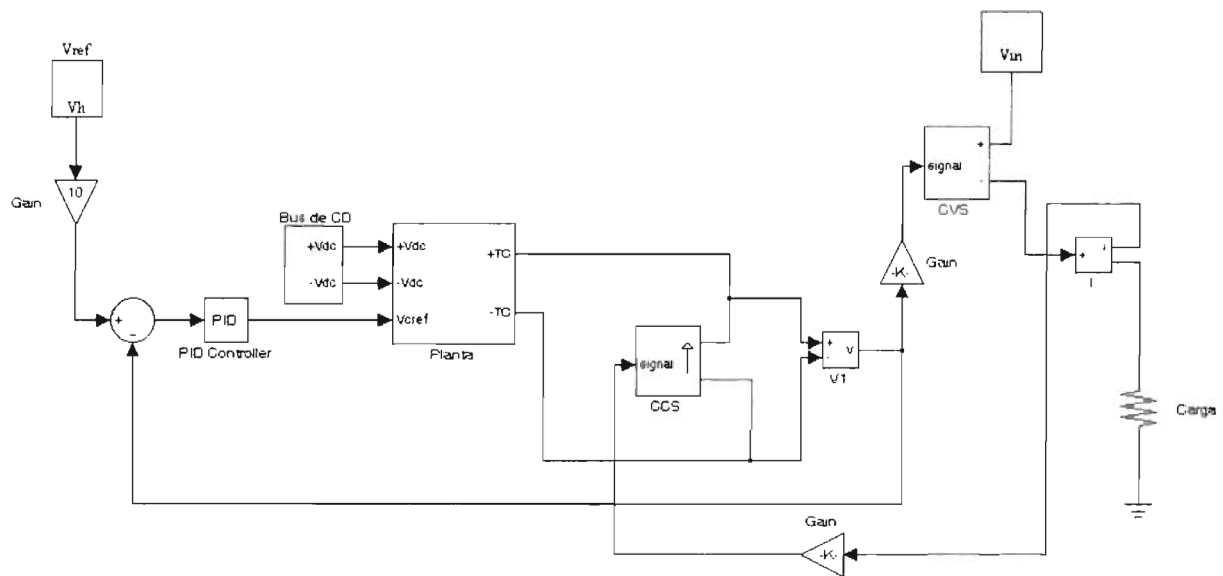
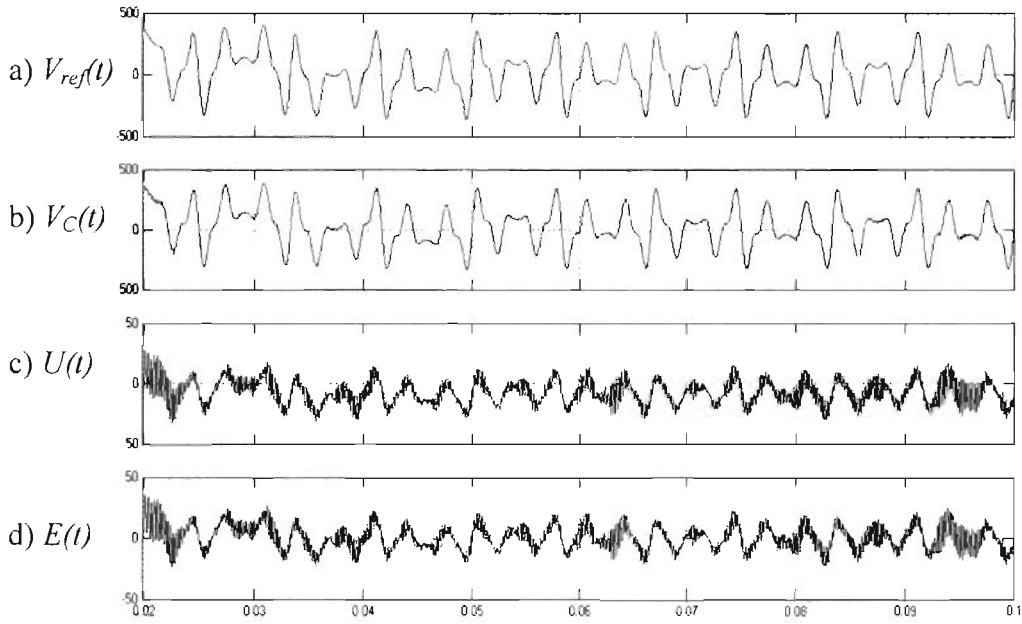


Fig. 3.11. Diagrama a bloques del Filtro Activo en Simulink.

El propósito de esta simulación es verificar que la tensión de la salida sigue a la referencia en tensión. En estas circunstancias se realiza una simulación considerando que la referencia en tensión presenta un 3°, 5°, 7° y 11° armónicos, produciéndose una distorsión armónica total del 12.7%. Los resultados se muestran con la tensión de referencia; la tensión de la salida que corresponde a la tensión en el condensador, el cual deberá seguir a la referencia en tensión; el error creado al restar la tensión deseada con la salida, y la señal de control generada por el controlador PI (se incluye la carga lineal de 10KVA en el modelo).

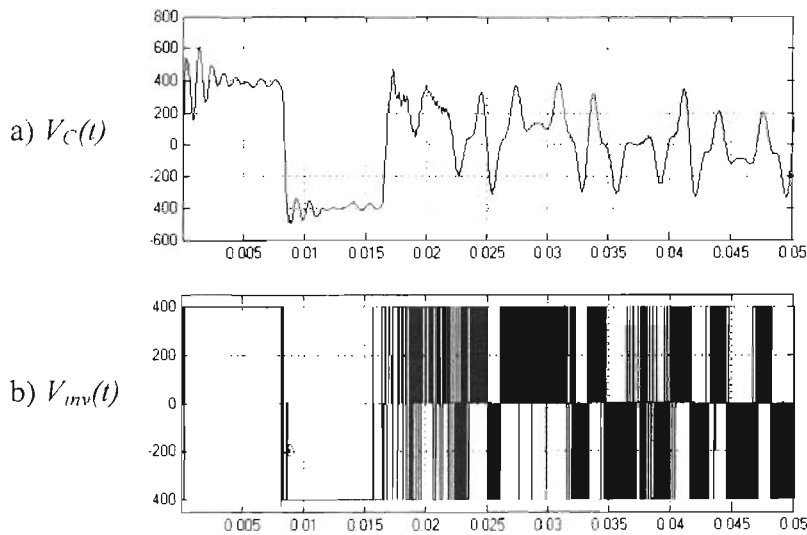
La figura 3.12 muestra como es la perturbación en tensión, la tensión de la salida, la señal de error y la señal de control.



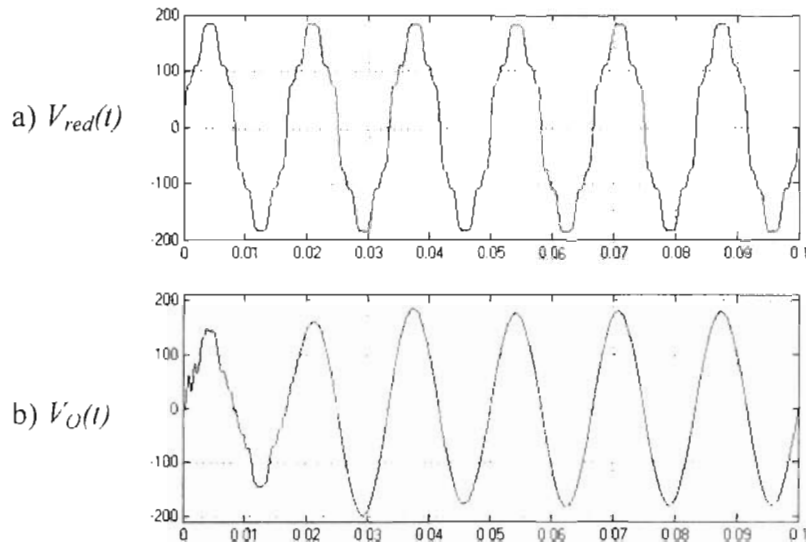
**Fig. 3.12.** Comprobación del Filtro Activo, a) Tensión de referencia, b) Tensión correspondiente a la salida, c) Señal de control, d) Señal de error.

En la figura anterior se observa que la tensión de la salida sigue con muy buena precisión a la tensión de referencia, comprobando así que el Filtro Activo Serie es capaz de reproducir un patrón de armónicos de tensión.

A partir de las simulaciones realizadas con MATLAB se obtienen los resultados de la figura 3.13 la cual muestra la tensión del condensador del filtro LC correspondiente a la tensión de salida  $V_C(t)$  con el mismo patrón de armónicos anteriormente mencionado de THD=12.7%; asimismo se muestra la forma de onda de la tensión a la salida del inversor.



**Fig. 3.13.** Comprobación del Filtro Activo, a) Tensión en el condensador del filtro LC, b) Tensión a la salida del inversor.



**Fig. 3.14.** Comprobación del Filtro Activo. a) Tensión de la red eléctrica perturbada por el 3°, 5°, 7° y 11° armónicos (THD=12.7%),  
b) Tensión en la carga (THD=1.69%).

Como se observa en la figura 3.14, la tensión de la red eléctrica contiene una distorsión armónica total del 12.7%, seguidamente se observa que se reduce considerablemente la distorsión armónica total hasta un 1.69%, permitiendo que la carga se alimente con una tensión senoidal prácticamente libre de contenido armónico.





# CAPITULO IV

## Resultados de Simulación

Una vez desarrollado el análisis del Filtro Activo Serie, se presentan las pruebas en simulación con el propósito de validar los análisis teóricos realizados en los capítulos anteriores.

De una forma integral, la construcción de un prototipo de Filtro Activo de Tensión Trifásico es un proceso complejo y/o tardado, debido a los circuitos que se tienen que diseñar y construir, tales como la etapa de potencia, sistemas de alimentación para la etapa de control, sistemas de alimentación para la etapa de potencia, sistemas de censado para variables físicas, etc. Además se deben calibrar los transductores para la correcta adquisición de las señales; debido a esto, solamente se tratan los resultados en simulación.

### 4.1 Respuesta del Filtro Activo Serie

Como el principal objetivo del Filtro Activo Serie es el de reproducir señales de un patrón de armónicos, para después introducirlas a la carga por medio de un transformador compensador de corriente, se efectuaron las siguientes simulaciones con el propósito de conocer el comportamiento del Filtro Activo Serie. Se plantea realizar el seguimiento a una forma de onda senoidal y una cuadrada.

#### 4.1.1 Seguimiento a una onda senoidal

Esta simulación radica en hacer seguimiento a una onda senoidal de 125 Volts de amplitud pico y de 240Hz como referencia, con el objetivo de probar el modelo a una potencia nominal. Para esta prueba se tiene un bajo amortiguamiento utilizando una carga resistiva de  $15\Omega$ , llevando al sistema a manejar una potencia de un poco más de 1KW.

La figura 4.1 muestra el esquema utilizado para realizar las simulaciones.

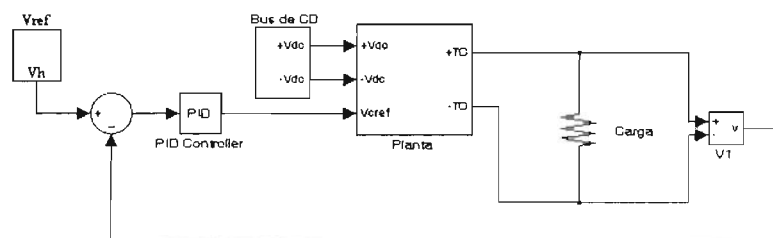
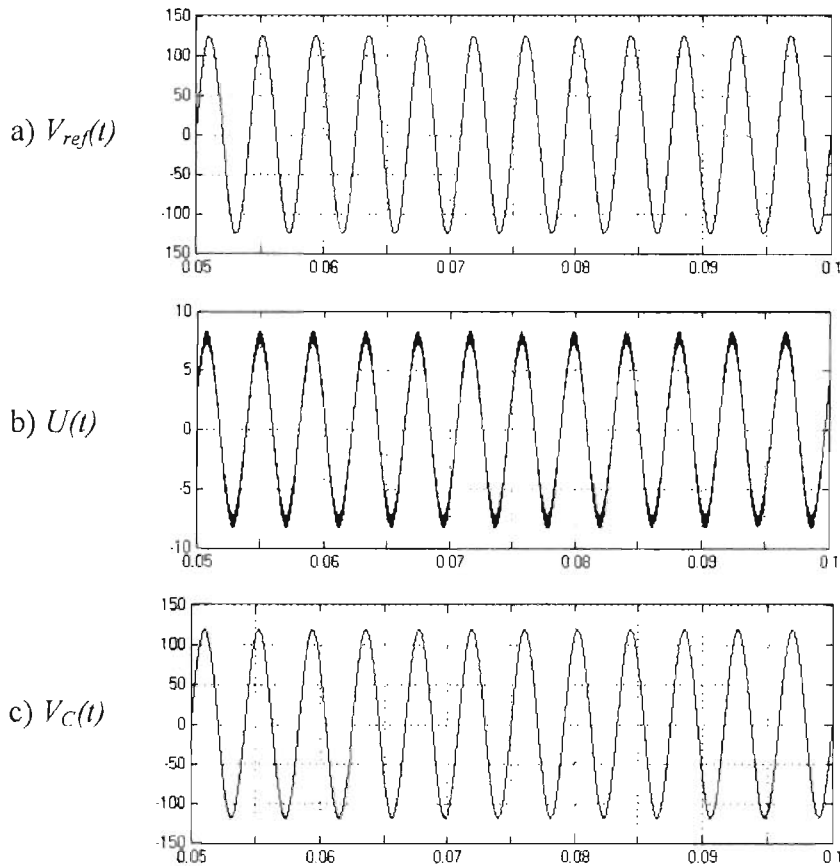


Figura 4.1. Esquema utilizado en lazo cerrado.

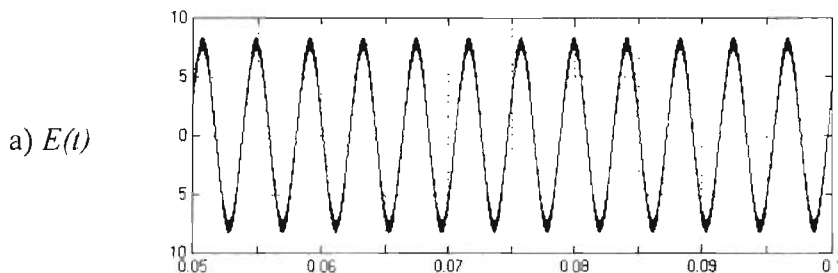
La figura 4.2 muestra las formas de onda de tensión para esta prueba; el orden de las formas de onda es el siguiente: desde arriba, la forma de onda de la señal de referencia, la tensión de control y la tensión en la carga que es igual a la tensión en el condensador en el filtro LC, la cual se observa que es senoidal.

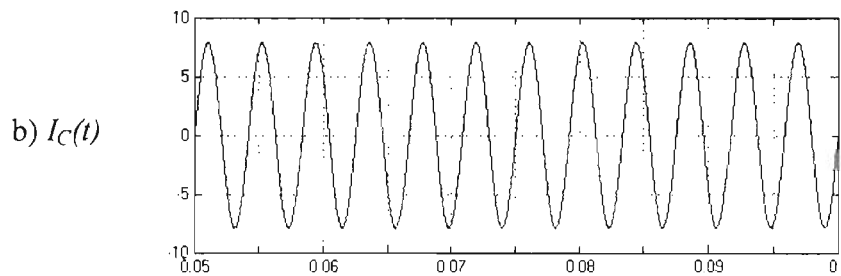


**Figura 4.2.** Reproducción de una señal senoidal, a) Señal de referencia, b) Tensión de control, c) Tensión en la salida del filtro LC.

Se puede observar que existe una buena reproducción entre la señal de referencia y la tensión en el condensador del filtro LC, siendo ésta de la misma amplitud, frecuencia y fase y sin distorsión alguna. Cabe mencionar que al disminuir la resistencia de carga aumenta la tensión de control, esto es debido al amortiguamiento del sistema.

La figura 4.3 muestra la señal de error y la corriente demandada por la carga del filtro LC.



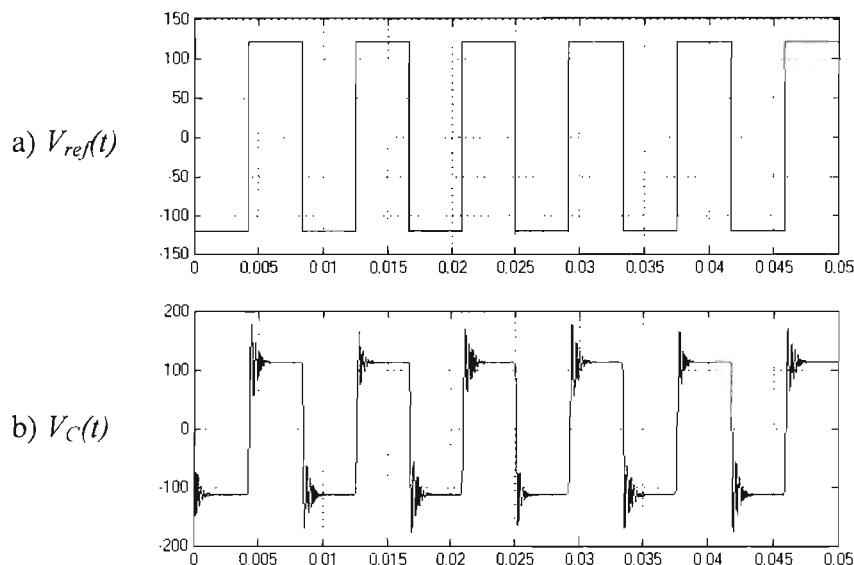


**Figura 4.3.** Reproducción de una señal senoidal, a) Señal de error, b) Corriente en la carga.

#### 4.1.2 Seguimiento a una onda cuadrada

Una variación de tensión con respecto al tiempo ( $dV/dt$ ) es un tipo de perturbación de tensión que en este caso es importante considerar, ya que el funcionamiento del filtro activo se especifica con una capacidad de compensación para corregir esta perturbación. Con la intención de conocer la capacidad del Filtro Activo Serie para compensar  $dV/dt$  elevados, se propone reproducir una señal cuadrada a una frecuencia de 120Hz de 120 Volts de amplitud. Para esta simulación se utiliza una carga resistiva de  $30\Omega$ , operando a una potencia de aproximadamente 500W.

La figura 4.4 muestra las formas de onda de la señal de referencia y la señal reproducida en el condensador del filtro LC.

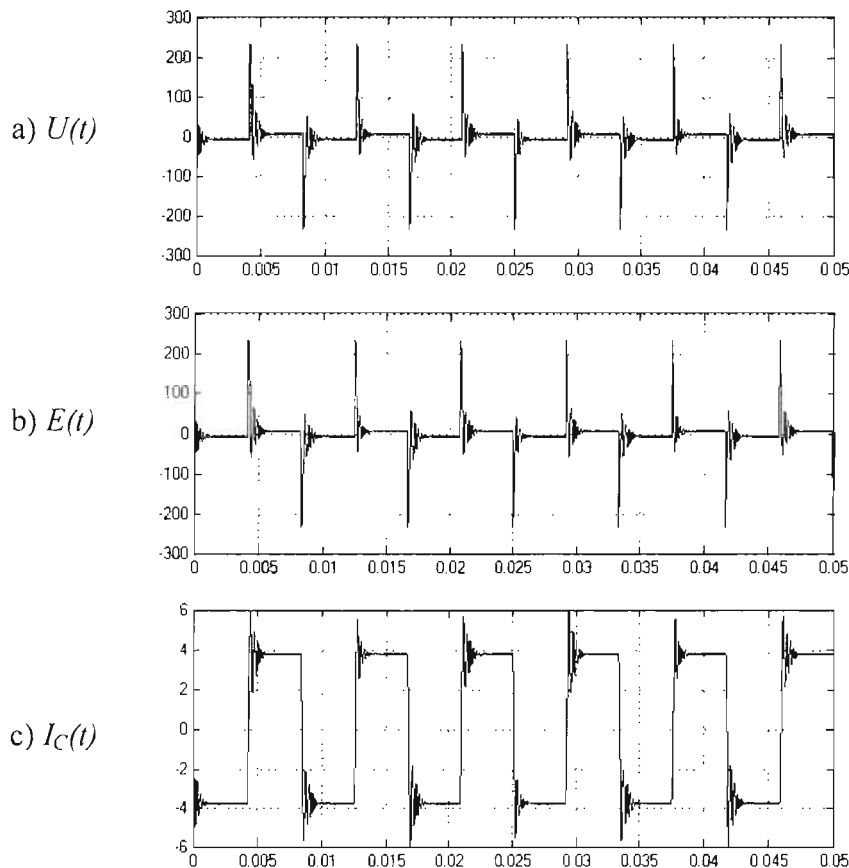


**Figura 4.4.** Reproducción de una señal cuadrada, a) Señal de referencia, b) Tensión en la salida del filtro LC.

Este análisis es de gran interés debido a que el sistema es de segundo orden, y con una entrada cuadrada como esta, el sistema puede hacerse inestable. En el diagrama de

bode que se mostró en los capítulos anteriores se puede observar un pico de resonancia debido al bajo amortiguamiento ya que no se incluye la carga. En la figura 4.4 se distingue cómo es la respuesta del filtro activo, volviéndose un sistema subamortiguado; por lo que, al intentar reproducir una señal cuadrada, la respuesta tiende a oscilar. Una cosa a favor que se tiene es que el Filtro Activo Serie nunca va a funcionar sin carga, ya que el principal objetivo es conectarlo a la red eléctrica con carga, dándole cierto amortiguamiento; observándose que entre mas pequeña sea la resistencia de carga, la reproducción de la señal de referencia se mejora.

En la figura 4.5 se pueden observar las formas de onda de la siguiente manera: desde arriba, la forma de onda de la señal de control, la señal de error y la forma de onda de la corriente demandada por la carga.



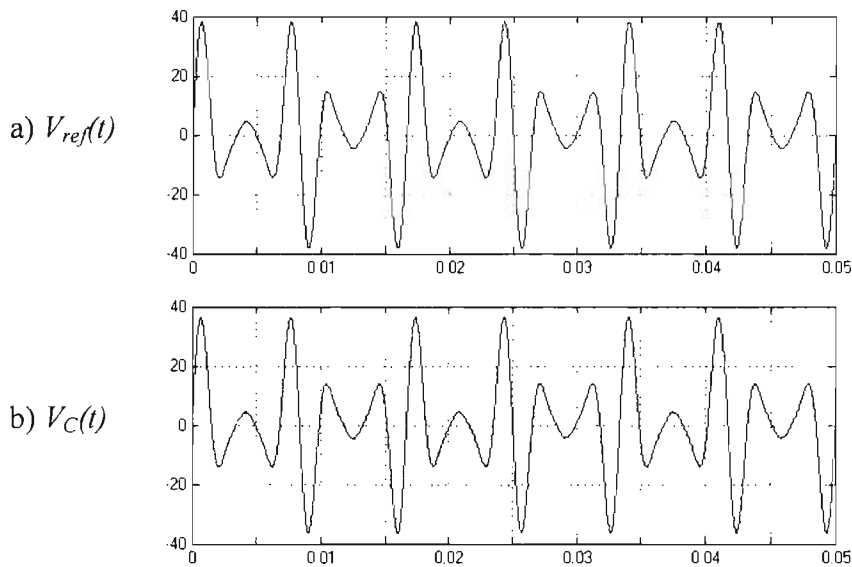
**Figura 4.5.** Reproducción de una señal cuadrada. a) Señal de control, b) Señal de error, c) Corriente en la carga.

### 4.1.3 Seguimiento a un patrón de armónicos

El reproducir un patrón de armónicos con el Filtro Activo Serie es una prueba de esencial importancia, debido a que es la tensión que ha de inyectarse desfasada  $180^\circ$  a la red eléctrica para llevar a cabo la compensación. Cabe mencionar que lo interesante en esta simulación no es sólo el hecho de poder reproducir un patrón de armónicos, sino que se

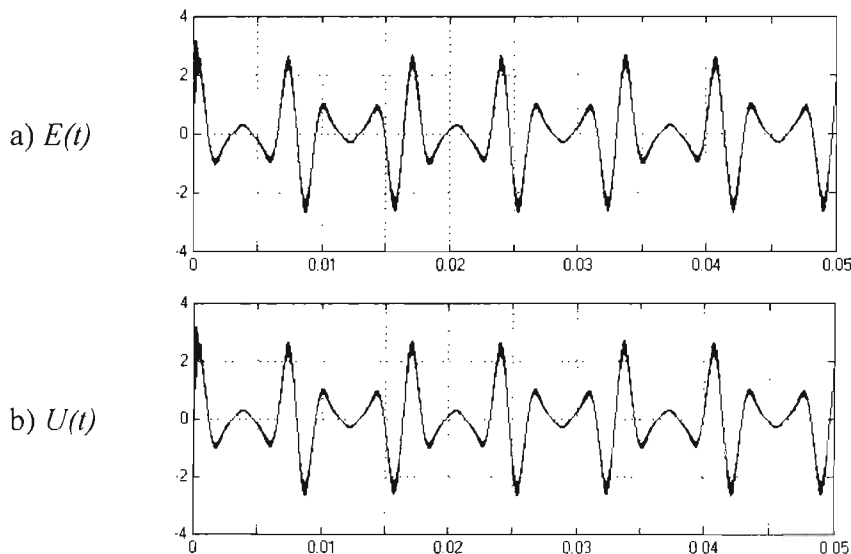
obtenga una tensión correspondiente a los valores de la referencia del patrón de armónicos presente en la red eléctrica. Esta prueba radica en hacer seguimiento a un patrón de armónicos de una fundamental de 60Hz de 180 Volts de amplitud pico como referencia con una distorsión armónica total del 13.5% del 3°, 5°, 7° y 9° armónicos.

En la figura 4.6 se puede observar cómo es la tensión de referencia, asimismo se muestra el patrón de armónicos reproducidos por el filtro activo; se puede observar la buena reproducción que existe de la tensión del capacitor del filtro LC a la tensión de referencia.



**Figura 4.6.** Reproducción de una señal armónica, a) Señal de referencia, b) Tensión en la salida del filtro LC.

La figura 4.7 muestra las formas de onda de tensión para esta prueba; el orden de las formas de onda es el siguiente: desde arriba, la forma de onda de la señal de error, la tensión de control y la corriente demandada por la carga.



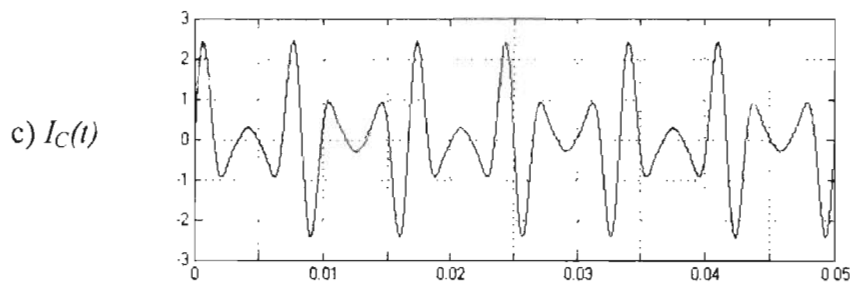


Figura 4.7. Reproducción de una señal armónica, a) Señal de error, b) Señal de control, c) Corriente en la carga.

### 4.2 Pruebas compensando carga lineal

Una vez que se realizaron las simulaciones necesarias para probar el comportamiento del Filtro Activo Serie ante diferentes referencias como entradas, se proponen varios esquemas para operar la compensación con el Filtro Activo Serie.

Para realizar esta simulación se usa el esquema mostrado en la figura 4.8, cuenta con una carga lineal disipando una potencia de 10KW y la tensión de entrada cuenta con una distorsión armónica total de 12.7%. Debido a que cada fase es independiente, solo se muestra el circuito para una sola fase, siendo lo mismo para las otras dos fases.

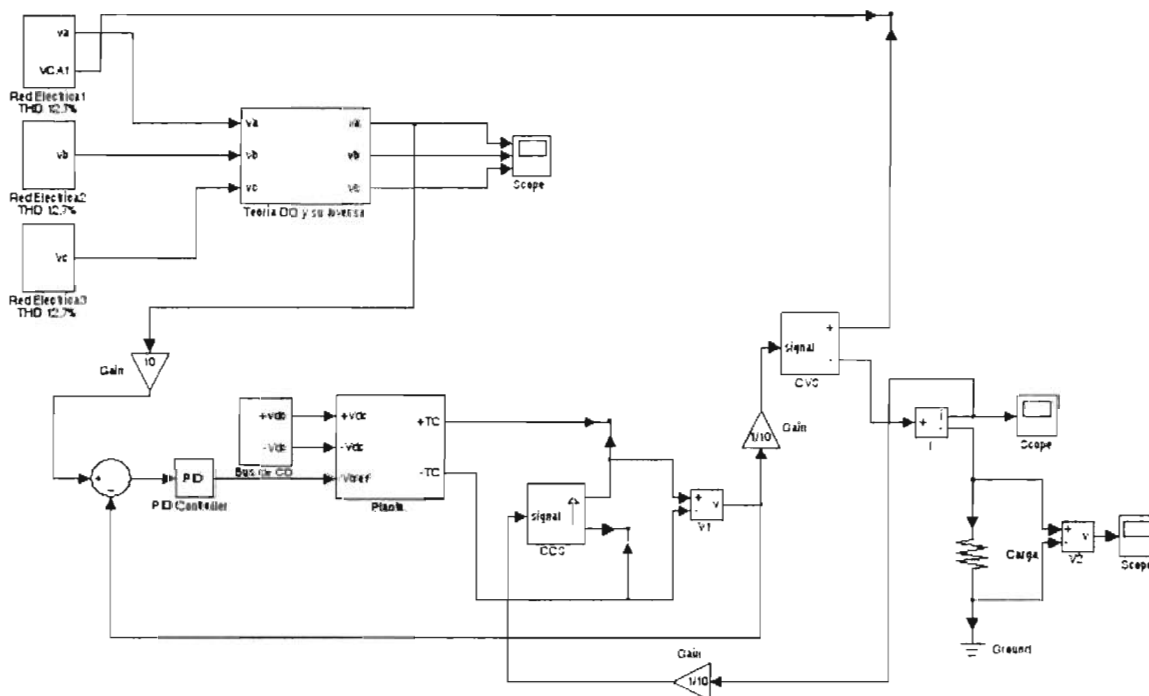
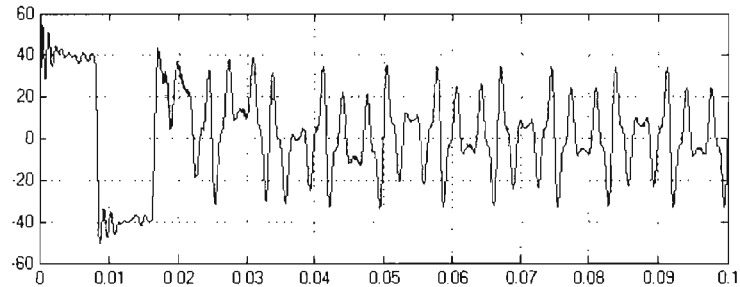


Figura 4.8. Esquema utilizado para efectuar la simulación.

De acuerdo con las simulaciones, se logra reducir la THD a un 1.69%, obteniendo así que una carga resistiva se alimente con una tensión con un menor contenido de armónicos,

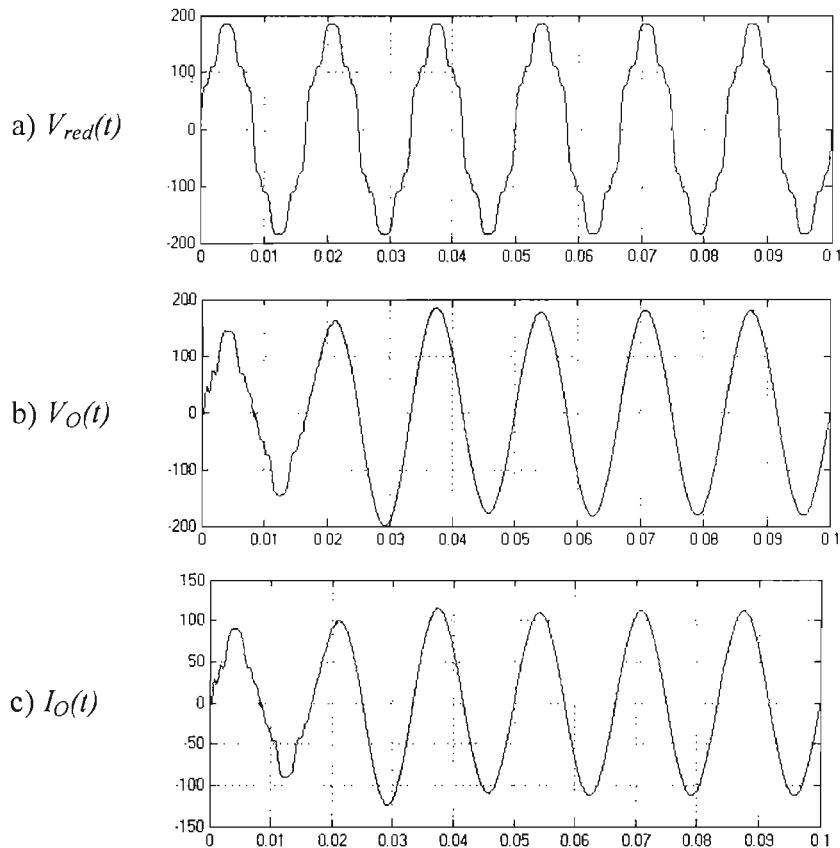
para que de esta manera se mantenga la distorsión armónica presente en la tensión de la carga dentro de los límites establecidos por las recomendaciones de la IEEE y las normas de la CFE.

En la figura 4.9 se muestra la tensión de compensación que se suministra a la red eléctrica a través del transformador compensador.



**Figura 4.9.** Tensión de compensación.

La figura 4.10 muestra las condiciones del sistema, el orden es el siguiente: en la señal superior aparece la tensión fase-neutro de la tensión de red, después se muestra la tensión en la carga y por último se muestra la corriente que fluye a través de la carga.

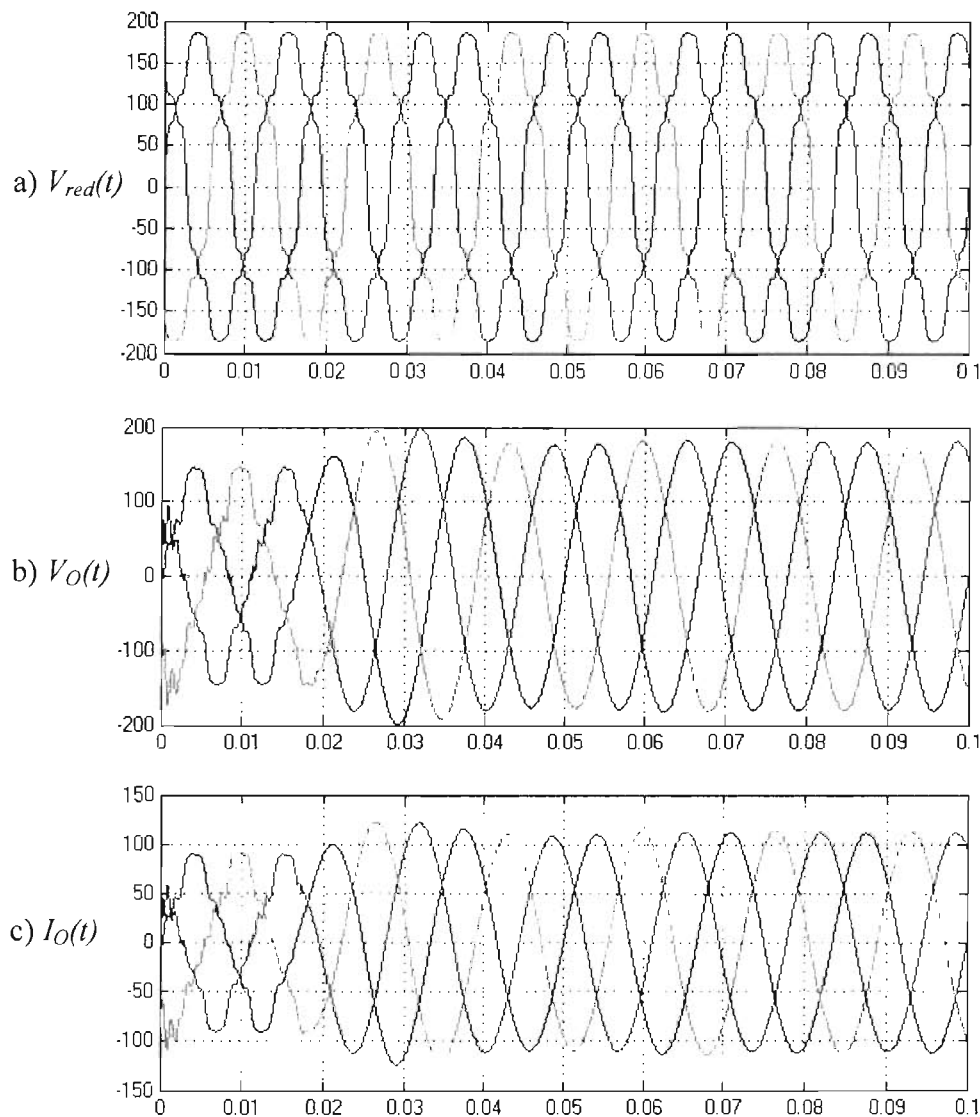


**Figura 4.10.** Verificación del Filtro Activo, a) Tensión fase-neutro, b) Tensión en la carga, c) Corriente en la carga.

Se alcanza a observar que una vez inyectada la tensión de compensación se logra corregir considerablemente la tensión con la que se alimenta a la carga resistiva.

Nótese que cuando se inicia la simulación existe una distorsión muy grande de tensión en el condensador del filtro LC y por consiguiente en la salida del filtro activo, esto es debido a la tensión en el condensador del bus de CD que al inicio se comporta como un cortocircuito dando como resultado que la tensión del bus de CD sea nula mientras se carga el condensador; cuando el bus de CD tiene energía, el filtro activo se comporta en estado estable.

En la figura 4.11 se muestran las formas de onda del sistema trifásico en el siguiente orden: en la imagen superior aparecen las tensiones de fase de la red, después se muestran las tensiones en la carga y finalmente se muestra la corriente que fluye a través de la carga.



**Figura 4.11.** Verificación del Filtro Activo, a) Tensión trifásica de red THD=12.7%, b) Tensión trifásica en la carga THD=1.69%, c) Corriente en la carga.



### 4.3 Pruebas compensando carga no-lineal

Esta simulación se efectúa con el objetivo de comprobar que el Filtro Activo Serie sea capaz de mejorar la tensión en la carga a pesar de que ésta sea no-lineal y demande corrientes armónicas.

Para realizar esta simulación se usa el esquema mostrado en la figura 4.12, cuenta con una carga no-lineal disipando una potencia de aproximadamente 10KVA y la tensión de entrada cuenta con una distorsión armónica total de 12.7%. Puesto que cada fase puede ser independiente, solo se muestra el circuito para una sola fase, siendo lo mismo para las otras dos fases.

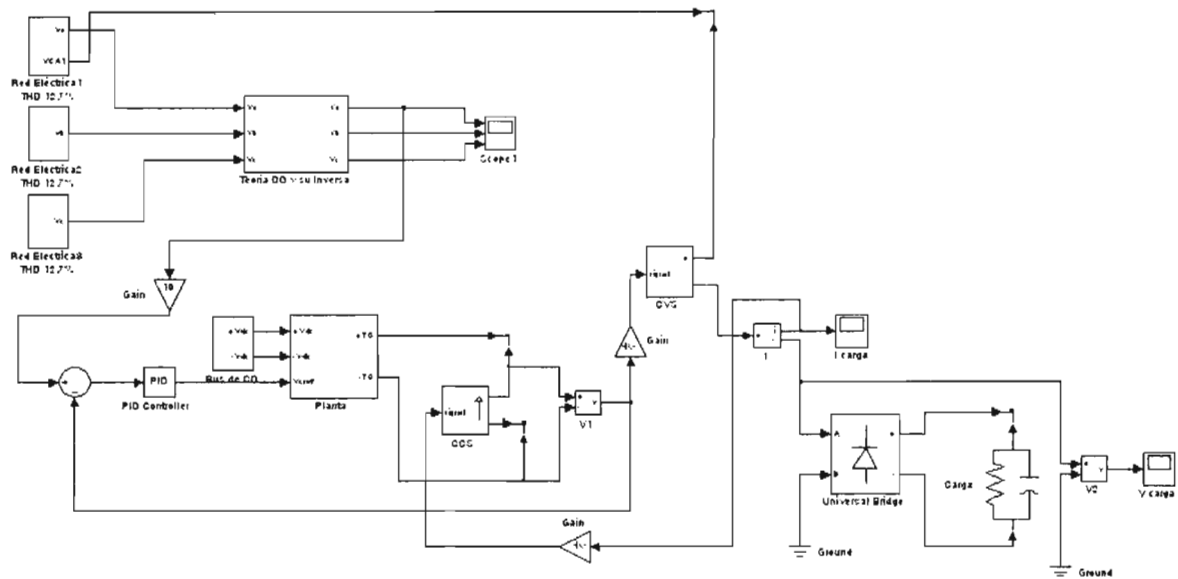


Figura 4.12. Esquema utilizado para efectuar la simulación.

A pesar de ser una carga no-lineal, se consiguieron resultados satisfactorios en la disminución de los armónicos de tensión. La figura 4.13 se muestra la tensión de compensación que se inyecta a la red eléctrica a través del transformador compensador.

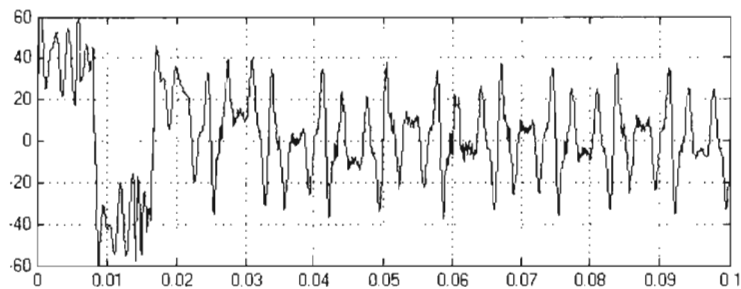
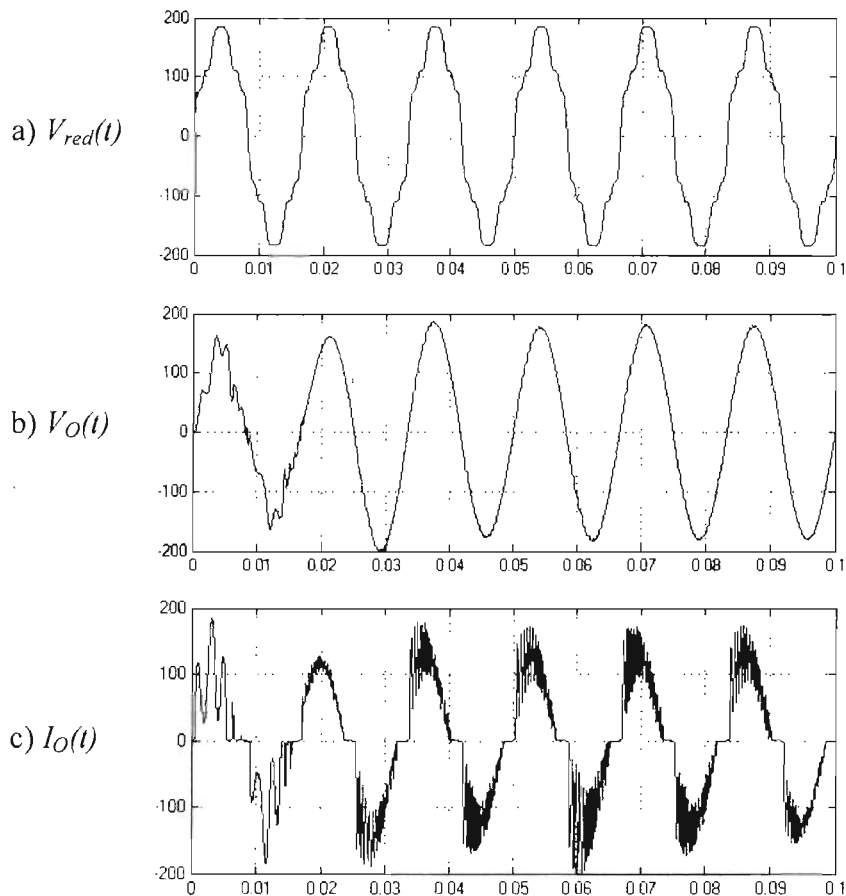


Figura 4.13. Tensión de compensación.

Una vez inyectado el voltaje de compensación se logra reducir considerablemente la distorsión presente en la carga; de acuerdo con las simulaciones, se logra reducir la THD

de un 12.7% a un 2.17%, consiguiendo así que una carga no-lineal se alimente con una tensión con un menor contenido de armónicos, para que de esta manera se mantenga la distorsión armónica presente en la tensión de la carga dentro de los límites establecidos por las normas de la CFE y las recomendaciones de la IEEE.

En la figura 4.14 se muestran los resultados de simulación obtenidos con este esquema de control; se observan la tensión fase-neutro de la tensión de red, la tensión en la carga y la corriente que fluye a través de la carga.

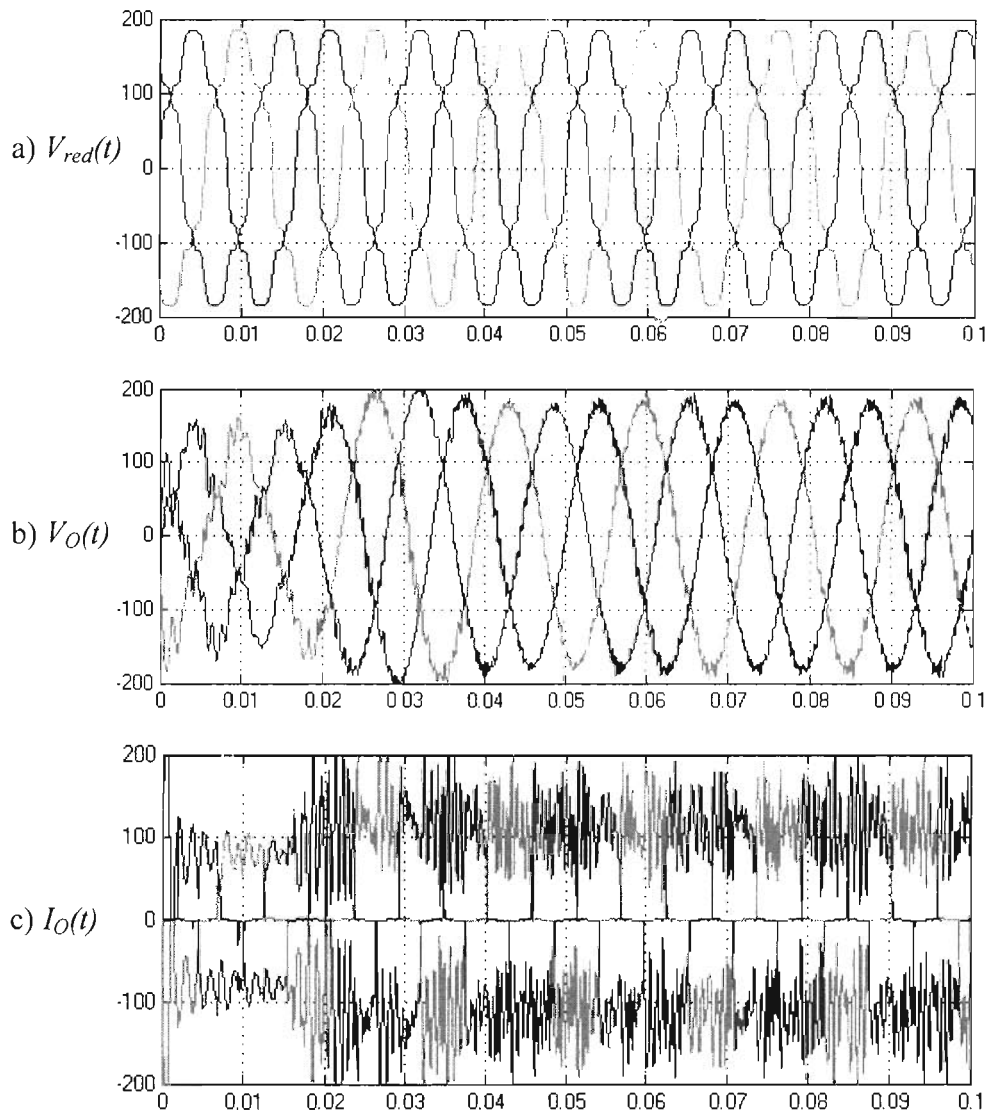


**Figura 4.14.** Verificación del Filtro Activo, a) Tensión fase-neutro, b) Tensión en la carga, c) Corriente demandada por la carga.

De igual manera que en la simulación anterior, existe una distorsión muy grande de tensión en la salida del filtro activo, esto es debido de la misma manera a la tensión en el condensador del bus de CD que al inicio es nula; cuando el condensador del bus de CD tiene energía, el filtro activo se comporta en estado estable.

En la figura 4.15 se muestran las formas de onda del sistema trifásico en el siguiente orden: en la señal superior aparecen las tensiones de fase de la red, después se muestran las tensiones en la carga y finalmente se muestra la corriente que fluye a través de la carga. Se puede apreciar que el Filtro Activo Serie mantiene en la carga una tensión senoidal con poca distorsión, de tal manera que se obtiene un buen resultado de compensación a pesar

de la distorsión que existe en la red eléctrica; mientras que en la corriente de la carga si existe una considerable distorsión.

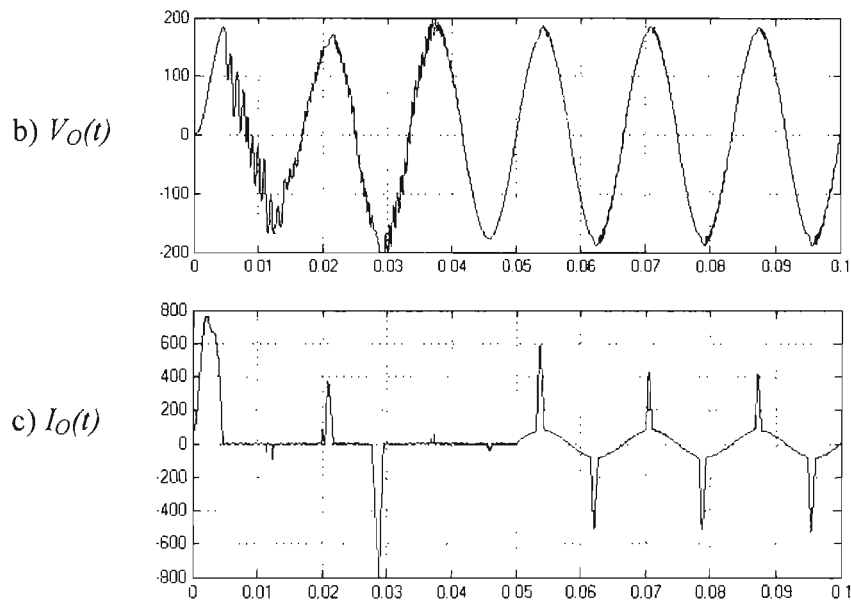


**Figura 4.15.** Verificación del Filtro Activo, a) Tensión trifásica de red THD=12.7%, b) Tensión trifásica en la carga THD=2.17%, c) Corriente en la carga.

#### 4.4 Pruebas con transitorios de carga

Esta última simulación consiste en aplicar una carga transitoria al sistema. Inicialmente la red eléctrica en conjunto con el Filtro Activo Serie se encuentra operando con una carga no lineal de aproximadamente 5.1KVA y después de cierto tiempo (50ms), entra abruptamente una carga resistiva que disipa una potencia de aproximadamente 7.3KW. El circuito utilizado para la elaboración de esta simulación es el que se muestra en la figura 4.16.





**Figura 4.18.** Verificación del Filtro Activo, a) Tensión fase-neutro, b) Tensión en la carga, c) Corriente demandada por la carga.

Se puede observar que justo en el cambio de carga, la corriente de carga aumenta y cambia su forma de onda, esto es debido a que ahora fluye mayor potencia activa que reactiva. Nótese que cuando se presenta la conmutación de carga en el sistema, el Filtro Activo Serie mantiene una buena regulación de tensión en la carga, de tal manera que estos transitorios no afectan al equipo conectado a la red eléctrica.



# CAPITULO V

## Conclusiones

### 5.1 Análisis de los resultados

El trabajo de tesis realizado asiste a estudios previos relacionados con los filtros activos, los cuales constituyen una solución adecuada para problemas relacionados con la calidad de la energía eléctrica, y vienen a sustituir las soluciones clásicas que utilizan filtros pasivos y/o bancos de condensadores conmutados. El Filtro Activo de Tensión es un equipo que representa una solución acertada cuando se desean corregir problemas relacionados con la tensión de la red eléctrica, es muy práctico en aplicaciones monofásicas y es una buena opción en sistemas trifásicos. Es un recurso que se manifiesta para aplicaciones de media y alta potencia debido al efecto que pueden producir las perturbaciones a estos niveles de potencia en equipos industriales.

En esta investigación se apreció que el Filtro Activo de Tensión trifásico puede compensar las diferentes perturbaciones de tensión exceptuando los cortes largos. Con el análisis realizado en esta tesis sobre la Calidad de la Energía, también se tienen en conocimiento los inconvenientes que se producen cuando existe una mala calidad en la forma de tensión que alimenta a las cargas que se conectan a la red eléctrica.

Al mismo tiempo, se sabe que hay diferentes soluciones para incrementar la Calidad de la Energía, pudiendo recomendar alguna de las soluciones existentes para algún problema en específico, realizando previamente un estudio. Para esto se deben hacer algunas consideraciones que son importantes, tales como: la aplicación en donde se requiere instalar el equipo, los niveles de potencia manejados por la carga, el problema al que esta sometida la carga, etc.

Igualmente, se comprendió que al circular una corriente elevada por la red eléctrica, aunado a tener una impedancia asociada a la red, existirá mayor distorsión de tensión en el PCC debido a una mayor caída de tensión que se produce en la mencionada impedancia. Simultáneamente, si la carga demanda niveles de corriente que difícilmente podrían variar y si se tiene una red eléctrica que presenta malas características, tal que su impedancia varía según la conexión o desconexión de cargas a la red, la tensión en el PCC presentará mayor o menor distorsión con respecto a la fundamental.

Además, se desea que el Filtro Activo de Tensión mantenga una interacción con la red eléctrica debido a que se requieren compensar perturbaciones de tensión. Esto se logra insertando el Filtro Activo en la red eléctrica por medio de un transformador de corriente que debe ser diseñado con los criterios adecuados; este transformador es el encargado de

agregar a la red eléctrica la tensión necesaria para obtener una tensión senoidal sin perturbaciones.

Debido a la extensión del trabajo para poder obtener un prototipo para realizar las pruebas completamente, se consigue solamente un análisis del desarrollo a sistemas trifásicos; obteniendo resultados satisfactorios en simulación, eliminando armónicos de tensión y desbalances de tensión, logrando conseguir resultados que se encuentran dentro de las normas establecidas para armónicos, y que se hallen dentro de los límites que hoy en día se encuentran dentro de la literatura especializada; éstas simulaciones se realizaron usando MATLAB.

Con los análisis desarrollados, se consigue que la distorsión armónica total que se presenta en la red eléctrica, disminuya a niveles por debajo del 3%, dando como consecuencia que cargas del tipo lineal se puedan alimentar con una tensión senoidal con escaso contenido de armónicos, estando ésta dentro de los límites establecidos por la recomendación IEEE-519 y las normas de la CFE. Estos resultados son efectivos siempre y cuando la distorsión armónica total presente en la red eléctrica se encuentre como máximo en un 15%, para este caso en particular.

Para el caso de manejar al Filtro Activo Serie con una carga de tipo no lineal, también se obtuvieron resultados satisfactorios; pero por causa a los  $dv/dt$  elevados que se presentan al conectar este tipo de carga, se plantea trabajar con un Filtro Activo Universal; de forma tal que la parte pasiva ayude a atenuar las corrientes armónicas demandadas por la carga no lineal. De las simulaciones se puede concluir que los  $dv/dt$  elevados presentes en la tensión de la red eléctrica originados por la distorsión armónica, difícilmente se alcanzarán eliminar, puesto que se tienen limitaciones.

La etapa de control puede ser programada en un procesador digital de señales (DSP), de esta manera se puede prescindir de circuitería externa, evitando así algunos problemas de ruido, y simultáneamente utilizar nuevas tecnologías para la operación del Filtro Activo Serie.

Se realizó un estudio para establecer de qué manera convenía obtener las referencias de tensión a compensar, encontrándose que la solución más acertada es usando un marco de referencia giratorio como lo es la transformación DQ y su transformación inversa, esto con la seguridad de no introducir desfases significativos que son de mucha importancia para que las señales de referencia obtenidas sean válidas, permitiendo a su vez poder generar referencias para un sistema trifásico, asimismo puede ser programado en el DSP.

Se propuso un controlador Proporcional e Integral el cual fuera capaz de reducir un poco el ancho de banda y eliminar el pico de resonancia que se presenta cuando opera el Filtro Activo Serie con poca carga, dando como resultado que aquellas pendientes elevadas que se encuentran en las señales de referencia sean más suaves, igualmente puede ser programado en el DSP.



## 5.2 Trabajos futuros

Existen varios aspectos de interés que pueden considerarse para trabajos futuros de este tema de investigación, con el objeto de conseguir un mejor desempeño y confiabilidad en la operación del Filtro Activo Serie; son los siguientes:

- ❖ Con los datos obtenidos en simulación, poder ratificarlos mediante pruebas experimentales con un prototipo del Filtro Activo Serie de 10KVA.
- ❖ Comprobar los resultados empleando varias técnicas de control apoyándose en una ley de control más completa.
- ❖ Ampliar el estudio del Filtro Activo de Tensión para utilizarlo como un regulador dinámico de tensión, de manera que se exploten mas sus prestaciones.
- ❖ Utilizar el Filtro Activo de Tensión para la constitución de un Filtro Activo Universal, y de esta manera compensar de una forma mas completa problemas asociados con la Calidad de la Energía eléctrica.



**Referencias Bibliográficas**

- [1] “Disturbances in Supply Systems caused by Household Appliances and Similar Electric Equipment”, CENELEC, Norma EN 60555 (1986).
- [2] M<sup>a</sup> Inmaculada Zamora, Valentín M. Stadler, “Estudio Bibliográfico: Distorsión Armónica producida por Convertidores Estáticos”, Madrid, Octubre 1996.
- [3] Alarcón R. Gustavo, “Filtro Activo Serie Trifásico para compensación de Armónicos de Tensión”, Tesis de Maestría, CENIDET, Cuernavaca-Morelos, Julio 2000.
- [4] Espinoza Trejo Diego, “Estudio del Filtro Activo Serie Trifásico para la compensación de Armónicos de Tensión en sistemas de baja tensión”, Tesis de Maestría, CIEP, Facultad de Ingeniería, San Luis Potosí, Enero 2004.
- [5] Martínez S., “Alimentación de equipos Informáticos y otras cargas críticas”, Ed. McGraw-Hill, 1992.
- [6] Dugar R., McGranaghan, Beaty H. M., “Electrical Power Systems Quality”, Ed. McGraw-Hill, 1992.
- [7] Barrero F., Yeves G. F., Martínez S., “Análisis Topológico y funcional de Acondicionadores para la reducción de Perturbaciones en la Red Eléctrica”, Tesis Doctoral, Madrid, Mayo 1995.
- [8] “Harmonic References”, Aim Energy Inc. Handbook, 1999.
- [9] Daish M., “Preventive Maintenance comes to Power Quality Monitoring”, Power Quality Assurance, Octubre 1999.
- [10] Pumar C., González R., Martínez P. M., Villar E., Iribarren J., Zabala I. A., Martínez S., Feliú V., “Mejora de la calidad e inmunización de Equipos mediante Filtros Activos de Alta Frecuencia”, CIRED, Madrid, Octubre 1994.
- [11] C. Núñez, V. Cárdenas, G. Alarcón, M. Oliver, “Voltage Disturbances and Unbalance Compensation by the use of a 3-Phase Series Active Filter”, Power Electronic Specialist Conference, PESC IEEE 32<sup>nd</sup> Annual, Vol. 2, Junio 2001.

- [12] Power Quality Centre, University of Wollongong; Technical Note No. 6 “Voltage Unbalance”.
- [13] M. H. J. Bollen, “Definitions of Voltage Unbalance”, IEEE Power Engineering Review, Noviembre 2002.
- [14] L. Morán, P. Werlinger, J. Dixon, R Wallace, “A Series Active Power Filter which Compensates Current Harmonics and Voltage Unbalance Simultaneously”, Power Electronics Specialist Conference, PESC IEEE 26<sup>nd</sup> Annual, Vol. 1, Junio 1995.
- [15] W. H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly, “Análisis de Circuitos en Ingeniería”, 5<sup>a</sup> Edición, McGraw-Hill, 1998.
- [16] J. A. Pérez Ladrón, “Desarrollo de un Filtro Activo Serie Monofásico para la Compensación de Armónicos de Tensión en sistemas eléctricos de baja tensión”, Tesis de Maestría, CIEP, Facultad de Ingeniería, San Luis Potosí, 2001.
- [17] Ogata K., “Ingeniería de Control Moderna”, Tercera Edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1998.
- [18] S. Ramírez, “Análisis y Desarrollo de un Control no lineal para Filtros Activos de Potencia tipo Serie”, Tesis de Maestría, CENIDET, Cuernavaca-Morelos, Diciembre 1999.
- [19] B. C. Kuo, “Sistemas de control Digital”, 1<sup>a</sup> Edición en Español, CECSA, 1997.
- [20] V. B. Bhavaraju, Parasad N. Enjeti, “Analysis and Design of an Active Power Filter for Balancing Unbalanced Loads”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 8, No. 4, Octubre 1993.
- [21] P. Hsu, Hewi, “Análisis de Fourier”, Addison-Wesley Iberoamericana, 1987.
- [22] Informática e Ingeniería Integral, [http://www.ininin.com.mx/cal\\_tierra.htm](http://www.ininin.com.mx/cal_tierra.htm).