



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

*“Diseño de un Filtro Reductor de Armónicos Originados  
en la Red de Trenes Eléctricos”*

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**PRESENTA**

**Lenin Sartillo Nava**

**Directores de Tesis**

**M. en C. Manuel García López**

**M. en C. René Tolentino Eslava**



**México, D.F.**

**Junio 2011**

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA**  
**UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

**TEMA DE TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN  
DEBERA(N) DESARROLLAR

INGENIERO ELECTRICISTA  
TESIS Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL  
C. LENIN SARTILLO NAVA

**“DISEÑO DE UN FILTRO REDUCTOR DE ARMÓNICOS ORIGINADOS EN LA RED DE  
TRENES ELÉCTRICOS”**

DISEÑAR UN FILTRO DE ARMÓNICOS ORIGINADOS POR EL USO DE CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA QUE ALIMENTAN LOS MOTORES QUE IMPULSAN TRENES ELÉCTRICOS..

- DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.
- DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.
- RESULTADOS Y ANÁLISIS.
- CONCLUSIONES.

MÉXICO D.F., A 09 DE MAYO DE 2011.



M. EN C. MANUEL GARCÍA LÓPEZ



M. EN C. RENE TOLENTINO ESLAVA



ING. ENRIQUE MARTÍNEZ ROLDÁN  
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE  
INGENIERÍA ELÉCTRICA



## DEDICATORIAS

---

A:

Mi hermano

Augusto Sartillo Nava

Mi madre

María Lucrecia Nava Pérez

## DEDICATORIAS

---

### AGRADECIMIENTOS

A mi hermano por apoyarme en el transcurso de este camino, por enseñarme el valor de la perseverancia y la responsabilidad. A mi madre por brindarme su apoyo incondicional y su comprensión en los momentos difíciles.

A todas las personas que creyeron en mí porque eso me dio la fortaleza y el entusiasmo de seguir. Aquellos que desconfiaron de mí porque su actitud también me impulsó a seguir adelante, por que por cada tropiezo que tuve me impulsó a levantarme y seguir caminando. Gracias.

Sin lugar a dudas gracias a todos esos profesores que en el transcurso de mi vida académica me ayudaron en la adquisición de conocimientos y que me dieron un ejemplo a seguir. También agradezco a aquellos profesores deficientes por haberme enseñado los errores y las deficiencias que un profesionalista puede tener. Gracias.

---

## RESUMEN

En el presente trabajo se presenta el desarrollo del diseño de un filtro de armónicos para una red de trenes eléctricos. Debido a que al uso de equipo de electrónica de potencia dentro de este tipo de redes, se introducen ciertos armónicos en específicos. Este trabajo presenta un filtro de armónicos de simple ajuste que reduce aquellos armónicos introducidos dentro de una red de trenes eléctricos dentro de los límites marcados por la norma IEEE 519 1992 Prácticas Recomendadas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas de Potencia.

Teniendo los resultados de la medición de parámetros realizada en una red de trenes eléctricos, se tomo el caso para el planteamiento del diseño de un filtro reductor de armónicos. Para la determinación de los límites de distorsión armónica se utilizó la norma IEEE 519 1992, también se utilizaron las recomendaciones que en esta se estipulan en el diseño del filtro. Por último para la verificación del funcionamiento del filtro se simuló el filtro diseñado en la aplicación de Simulink del programa de Matlab, con ello se obtuvo el THD y el TDD que se presentaba en la red al conectar el filtro.

Con la ayuda de la simulación se determinó que para el punto de interconexión de la compañía suministradora con el usuario, es necesario conectar un filtro que reduzca los armónicos tercero, quinto y séptimo para cumplir con los límites. El filtro diseñado se compone de tres arreglos RLC y de simple ajuste conectados en paralelo. Se obtuvieron las formas de onda de la corriente y de la tensión en el sistema antes y después de conectar el filtro, en las cuales el valor del TDD cambio de 37.7% a un 2.3%.

La contaminación armónica nunca se elimina por completo en el sistema. Debido a que a pesar de que los arreglos RLC del filtro entren en resonancia siempre existe una resistencia en estos, lo cual ocasiona que exista una distribución de corrientes armónicas entre el sistema y el filtro reductor.

## CONTENIDO

---

RESUMEN.	I
CONTENIDO.	II
GLOSARIO DE TÉCNICO.	IV
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema.	2
1.2. Objetivo.	3
1.3. Justificación.	3
1.4. Alcance.	4
<b>CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED.</b>	<b>6</b>
2.1. Fuentes Generadoras de Distorsión Armónica.	7
2.1.1. Rectificadores Estáticos de Potencia.	9
2.1.2. Indicadores Generales de Harmónicos.	20
2.2. Efectos de la Distorsión Armónica	21
2.3. Control de Armónicos en Subestaciones Alimentadoras.	25
2.3.1. Control de Corrientes Armónicas.	26
2.3.2. Límites de Distorsión de la Corriente.	28
2.4. Filtros Pasivos Utilizados en el Control de Armónicos.	30
2.4.1. Filtros de Ajuste Simple.	32
2.4.2. Filtros de Ajuste Doble.	37
2.4.3. Costos del Filtro de Ajuste Simple.	39

## CONTENIDO

---

<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.</b>	43
3.1. Procedimiento para la Solución del Caso de Estudio.	44
3.2. Análisis del Caso de Estudio.	46
3.2.1. Descripción de la Red Eléctrica.	47
3.2.2. Medición de los Parámetros del Sistema.	49
3.2.3. Determinación de Valores para el Diseño de Filtro.	50
3.2.4. Simulación del Sistema de Suministro de Energía.	53
3.3. Propuesta del Diseño del Filtro.	55
3.3.1. Filtro para el Tercer Armónico.	55
3.3.2. Filtro para el Tercer y Quinto Armónico.	59
3.3.3. Filtro para el Tercer, Quinto y Séptimo Armónico.	62
3.4. Pérdidas en el Filtro Propuesto.	65
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.</b>	69
4.1. Filtro para la Reducción del Tercer Armónico.	70
4.2. Filtro para la Reducción del Tercer y Quinto Armónico.	72
4.3. Filtro para la Reducción del Tercer, Quinto y Séptimo Armónico.	74
<b>CONCLUSIONES.</b>	77
<b>RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO.</b>	79
<b>REFERENCIAS.</b>	80

---

---

## GLOSARIO DE TÉCNICO

BIL. Nivel Básico de Aislamiento, en kV.

$I_n$ . Corriente Armónica, en A.

$I_L$ . Demanda Promedio, en A.

$MVA_{CC}$ . Potencia de Corto Circuito, en MVA.

n. Orden del Armónico.

THD. Distorsión Armónica Total, en %.

TDD. Distorsión Demandada Total, en %

$V_C$ . Tensión en el Capacitor, en V.

$V_n$ . Tensión Armónica, en V.

$\omega_n$ . Frecuencia Angular de Sintonización, en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

$X_0$ . Reactancia en Condiciones de Resonancia, en  $\Omega$ .

$\delta$ . Nitidez de Sintonización, en %.

HVDC. Corriente Directa de Alta Tensión.

PCC. Punto Común de Acoplamiento.

RMS. Raíz Media Cuadrática.

SCR. Relación de Cortocircuito.

ST. Ajuste Simple.

3h. Tercer Armónico.

5h. Quinto Armónico.

7h. Séptimo Armónico.

# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.**

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

---

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La contaminación armónica es un problema que afecta la calidad de la energía suministrada por la compañía suministradora. La contaminación armónica actúa distorsionando la forma de onda senoidal de la corriente y de la tensión provocando diversos problemas en la red. Los problemas principales causados por la contaminación armónica son: activación de las protecciones, mal funcionamiento del equipo electrónico, interferencia en líneas telefónicas, sobrecalentamiento en transformadores, motores y bancos de capacitores. La introducción de armónicos a la red es originada por cargas que utilizan una forma de onda senoidal de tensión pero que la forma de onda de la corriente utilizada no es senoidal, a estas cargas se les denomina cargas no lineales. Entre las principales cargas no lineales que introducen armónicos a la red se encuentran los convertidores estáticos de potencia como rectificadores o inversores. En la actualidad el uso de cargas no lineales han aumentado considerablemente. Se estima que durante los siguientes 10 años, el 60% de las cargas en los sistemas de suministro serán no lineales [2].

Los motores que impulsan los trenes eléctricos son controlados por equipo de electrónica de potencia, debido a que con este equipo es posible variar la velocidad utilizando un suministro de corriente alterna, además este equipo ofrece una eficiencia alta y un mantenimiento mínimo. El empleo de estos dispositivos para el control del suministro eléctrico de los motores que impulsan los trenes, ocasiona la introducción de armónicos en la red. Los armónicos introducidos dentro de la red distorsionan la forma de onda de la corriente a valores que sobrepasan los límites establecidos por la norma IEEE 519 para la contaminación armónica. Esta contaminación ocasiona diversos problemas en el equipo de la red suministradora como también en la red del usuario e incluso en la red de usuarios cercanos a la red donde se origina la contaminación armónica.

El uso de un suministro de energía con la forma de onda de corriente distorsionada reduce el buen funcionamiento del sistema eléctrico de los trenes, ya que el equipo eléctrico es diseñado tomando una forma de onda senoidal de la tensión y la corriente, así cuando existe una distorsión de la tensión y la corriente la eficiencia del equipo disminuye. La contaminación armónica originada en la red eléctrica de los trenes puede propagarse hacia la red de la compañía suministradora e incluso a redes vecinas, afectando no sólo a la instalación donde es originada sino también a toda la red en general. Existen límites en la inyección

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

---

de armónicos que tanto el suministrador como el usuario de energía deben cumplir, estos están establecidos en la norma IEEE 519 1992 Prácticas Recomendadas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas de Potencia.

Para evitar los efectos que la contaminación armónica originada por el equipo estático de potencia de los trenes eléctricos, durante el desarrollo de este trabajo se propondrá el diseño de un filtro de armónicos que disminuya la contaminación armónica por debajo de los límites. Además se realizará un programa modelo donde se observará el comportamiento del filtro.

### 1.2. OBJETIVO.

Diseñar un filtro reductor de corrientes armónicas originadas por el uso de convertidores estáticos de potencia que alimentan los motores que impulsan trenes eléctricos.

Objetivos Particulares.

- Determinar las fuentes de armónicos de la red de trenes eléctricos del caso de estudio.
- Determinar la distorsión armónica de la red del caso de estudio.
- Determinar la topología del circuito reductor de los armónicos más conveniente para el caso de estudio.
- Calcular los componentes del filtro, así como las magnitudes eléctricas mayores con las que trabajará el filtro.
- Analizar el comportamiento del filtro en la condición de demanda máxima del sistema, mediante el modelado del mismo en la aplicación de Simulink de Matlab.
- Obtener la distorsión armónica de la corriente utilizando el filtro, con el empleo del modelo en la condición de demanda máxima.
- Comparar los resultados de la distorsión armónica obtenida con el modelo con los límites que marca la norma.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN.

Se estima que más del 30% de la energía que es entregada por las compañías suministradoras es usada por equipo sensible a la mala calidad de la energía y este porcentaje continua aumentando [4]. La preocupación por la calidad de la energía que se suministrará a este equipo ha ido aumentando, debido al actual uso de cargas no lineales dentro del sistema, las cuales disminuyen la calidad de

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

---

la energía. Así el tema de la contaminación armónica tiene una relevante importancia debido principalmente al aumento de cargas que introducen armónicos y al aumento de cargas sensibles a los armónicos. La propuesta de equipos y métodos que disminuyan la contaminación armónica para mejorar la calidad de la energía dentro del sistema es un tema de importancia para la ingeniería eléctrica hoy en día.

En el caso de estudio que se tomó para realizar el presente trabajo los resultados de la medición de parámetros muestran que la distorsión armónica total de la corriente es de 37.7% de la onda fundamental, lo cual supera demasiado los límites marcados por la norma IEEE 519. La propuesta de un método que reduzca la distorsión armónica a un valor menor a los límites establecidos es una necesidad requerida tanto por el consumidor como por la compañía suministradora [2]. Esto debido a que las dos partes se ven afectadas por el mismo problema.

Las redes de trenes eléctricos se encuentran conectadas al sistema en un nivel de tensión de transmisión, por lo que la contaminación que se origina en esta puede propagarse a un número mayor de usuarios. Al reducir la contaminación armónica se contribuirá a dar un suministro de energía de mayor calidad que traerá por consecuencia el funcionamiento del equipo en los parámetros de diseño alargando con ello la vida útil del equipo eléctrico. Además con una mayor calidad de la energía se evitarán fallas causadas por la contaminación armónica, disminuyendo también el deterioro del equipo que es afectado por los armónicos.

### **1.4. ALCANCE.**

Se utilizarán los resultados obtenidos de la demanda de energía, contaminación armónica y el factor de potencia de la medición de parámetros eléctricos realizados en el lado secundario del transformador TR-01 monofásico de 20 MVA 230/27.5 kV marca ANSALDO de la subestación eléctrica Vallejo perteneciente al tren suburbano ubicado en la ciudad de México. Para plantear el diseño de un filtro que reduzca la distorsión armónica, cubriendo los límites que marca la norma IEEE 519-1992 Practicas Recomendadas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas de Potencia. Se determinará los límites de distorsión armónica para el nivel de tensión de tensión con el suministrador, así como para el nivel de tensión con el que se transmite dentro de la red de trenes.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

---

Se determinará la topología del circuito del filtro de armónicos más adecuada para el caso de estudio. Además se calculará las magnitudes eléctricas y los componentes del filtro necesarios para reducir los armónicos de corriente, todo esto en la condición de demanda máxima del sistema.

Se propondrá un modelo para determinar el comportamiento del filtro en la condición de la demanda máxima de la red mediante la simulación, utilizando MatLab/Simulink como programa para el desarrollo del modelo del filtro. Se calculará la potencia que el filtro demandará al sistema cuando existe la demanda de carga máxima en el sistema. Se obtendrá la distorsión armónica conectando el filtro a la red en la condición de la demanda máxima, con el apoyo del programa prototipo.

## **CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.**

En este capítulo se muestra la generación de los armónicos por el equipo estático de potencia, además del efecto que tiene la contaminación armónica en los diferentes equipos ubicados en el sistema de potencia. También se presentan las recomendaciones que determina la norma IEEE 519-1992 para el control de armónicos en el sistema eléctrico. Por último se describen los diferentes filtros pasivos que existen así como sus características.

## 2.1 FUENTES GENERADORAS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.

En los últimos años, se ha puesto atención en el análisis y control de armónicos y las normas han establecido las distorsiones de tensión y corriente permisibles. La fuente de armónicos en los sistemas de potencia es principalmente originada por las cargas no lineales.

### Cargas Lineales y No Lineales.

Cuando se aplica una tensión senoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denominan cargas lineales.

En los circuitos en los que las señales de curva corriente – tensión no es lineal, la tensión aplicada no es proporcional a la corriente, resultando una señal distorsionada con respecto a una curva senoidal.

La curva característica corriente – tensión de la carga define si es o no lineal su comportamiento. Es importante señalar que no todos los equipos que tienen semiconductores son no lineales, existen aplicaciones donde se emplean SCR's conectados en antiparalelo con control de cruce por cero en los que prácticamente no existe distorsión, considerándose lineales y por otro lado una resistencia con control de fase es una carga no lineal.

La distorsión armónica en los sistemas eléctricos es provocada por las cargas no lineales, contaminando la red y pudiendo afectar incluso a otros usuarios que únicamente posean cargas lineales. La tabla 2.1 muestra las principales diferencias entre una carga lineal y una carga no lineal.

**Tabla 2.1.** Diferencia entre cargas lineales y no lineales.

Numero	Cargas Lineales	Carga No Lineales
1	La ley de Ohm es aplicable	La ley de ohm no es aplicable
2	El factor de cresta es 1.41	El factor de cresta puede de 3 o 4
3	$\lambda = \cos \theta$	$\lambda =$ factor de desplazamiento $\times$ factor de distorsión
4	Corriente de carga no contiene armónicos	Corriente de carga contiene armónicos impares
5	Resistiva, capacitiva o inductiva	Usualmente equipo con diodos y capacitores
6	Puede no demandar altas corrientes de inrush	Esencialmente existe una demanda grande de corrientes de inrush, en un ciclo

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

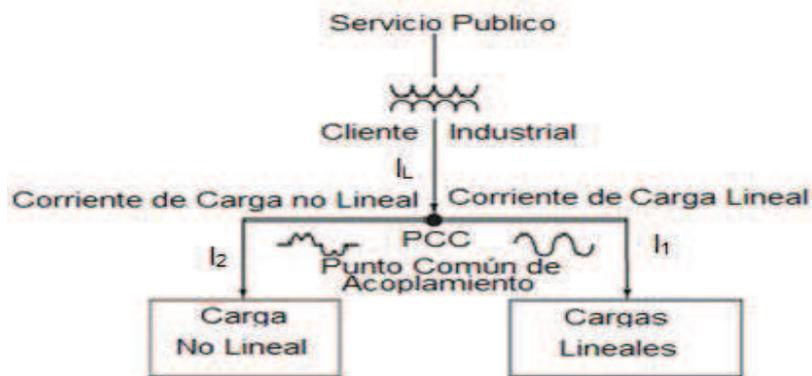
En las cargas no lineales, la aplicación de una onda de tensión senoidal no resulta en un flujo de corriente no sinusoidal. Por otra parte, las cargas no lineales demandan una corriente que incluso puede ser discontinua o fluir en pulsos por una parte del ciclo de la tensión senoidal. Algunos ejemplos de cargas no lineales son los siguientes.

1. Variadores de Velocidad.
2. Computadoras, Maquinas Copiadoras y de Televisión.
3. Compensadores de Potencia Reactiva Estáticos.
4. Tracción Eléctrica.
5. Generación de Energía Eólica y Solar.
6. Lámparas Fluorescentes y Balastos Electrónicos.
7. Rectificadores.
8. Cargas Generadoras de Arco Eléctrico.

El uso de cargas no lineales está en aumento, se estima que, durante los próximos 10 años, 60% de las cargas utilizadas en el sistema eléctrico serán no lineales. El crecimiento de estas cargas ha conducido al estudio de los siguientes temas [2]:

1. Efectos de los Armónicos en la Operación de Equipo Eléctrico.
2. Análisis de Armónicos.
3. Control de Armónicos.

En la figura 2.1, se muestra la relación que tienen las cargas lineales y no lineales en el sistema eléctrico, en esta figura se observa como en el punto común de acoplamiento (PCC, del inglés Point of Common Coupling) es donde las cargas demandan una forma de onda de corriente diferente, en este caso  $I_1$  e  $I_2$  las cuales son suministradas por  $I_L$ , así  $I_L$  se distorsiona ya que la  $I_2$  no es senoidal por lo cual la  $I_L$  tampoco es senoidal e  $I_L$  debe suministrar un tipo de señal como  $I_2$ .



**Figura 2.1.** Efecto de las cargas no lineales en el sistema.

Un número cada vez mayor de usuarios son sensibles a la mala calidad de la energía, está estimado que el costo de los problemas de la calidad de la energía en la industria de los Estados Unidos tiende a mil millones de dólares por año. La expansión del uso de equipo de automatización y controles de electrónica de potencia está conduciendo a una productividad más alta, estas cargas son una fuente de ruidos eléctricos y armónicos, sin embargo, estas cargas son menos tolerantes al uso de energía de mala calidad de energía [2].

### 2.1.1. Rectificadores Estáticos de Potencia.

Los rectificadores estáticos de potencia son usados en una gran diversidad de equipo eléctrico, ya que por su funcionamiento es posible suministrar una corriente continua por mayor tiempo que con baterías y tienen una mayor eficiencia. Sin embargo este equipo funciona por medio de conmutaciones de tiempos demasiado pequeños provocando así una corriente demandada por este equipo no senoidal.

#### Puente Rectificador de Diodos Monofásico.

La configuración de un puente rectificador se muestra en la figura 2.2, en la cual su funcionamiento consiste en convertir una señal de corriente alterna en una señal de corriente continua. La fuente de suministro es presentada como una fuente de tensión senoidal  $V_s$  en serie con la impedancia interna, la cual principalmente es inductiva ( $L_s$ ). Para mejorar la forma de onda de la corriente, un inductor puede ser conectado en serie con el lado de CA, el cual aumentara el valor de de  $L_s$ .

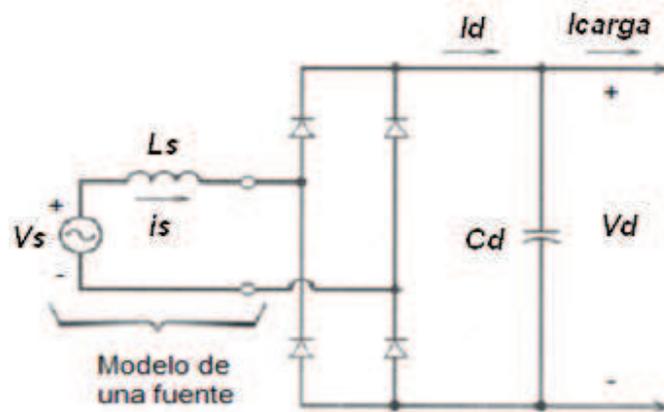


Figura 2.2 Puente rectificador de diodos monofásico.

**Circuito de Rectificador Monofásico Ideal ( $L_s = 0$ ).**

La primera aproximación para el circuito de la figura 2.2 se asume que no existe inductancia ( $L_s=0$ ) y se reemplaza el lado de CD del rectificador por una resistencia  $R$  o una constante de la fuente de corriente de CD  $I_d$ , como se muestra en la figura 2.3(a) y 2.3(b), respectivamente. Aunque en el circuito de la figura 2.3(a) es improbable que exista sólo una resistencia pura en la carga, se presenta su análisis para una mejor comprensión del funcionamiento del puente rectificador.

La representación de la carga por una constante en el circuito 2.3(b) en una aproximación de una situación donde un inductor grande puede ser conectado en serie con la salida del rectificador para el filtrado de la figura 2.2. El circuito de la figura 2.3 es replanteado en la figura 2.4, el cual muestra que este circuito consiste en dos grupos de diodos: el grupo superior con los diodos  $D1-D3$  y el grupo inferior con los diodos  $D2-D4$ . Con una inductancia igual a cero. La corriente  $I_d$  fluye continuamente a través de un diodo del grupo de arriba y otro del grupo de abajo.

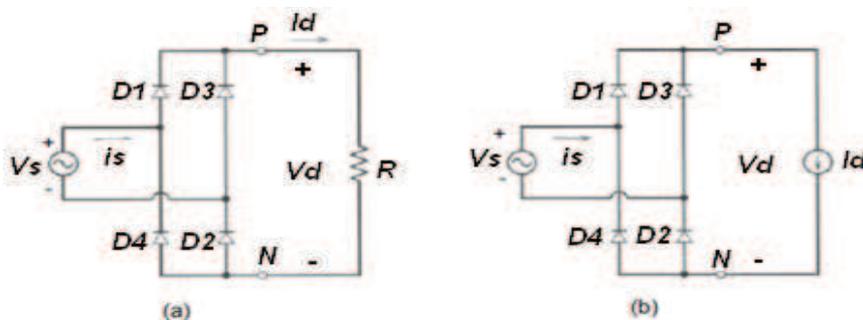
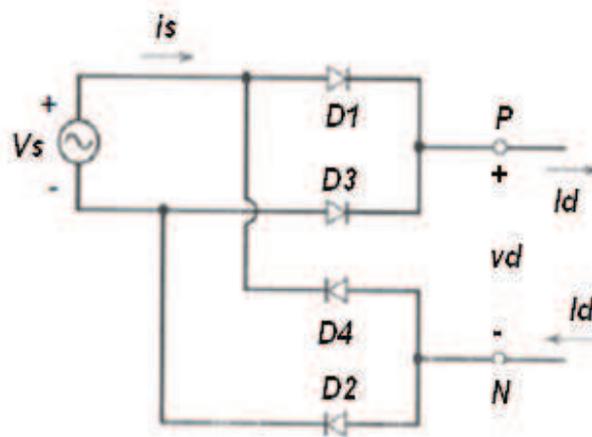


Figura 2.3. Puente rectificador de diodos ideal ( $L_s=0$ ).

En el grupo superior de diodos, los cátodos de los dos diodos están en un potencial común, por lo cual el diodo con su ánodo conducirán en el potencial más alto ( $i_d$ ). Este se presenta cuando  $V_s$  es positivo por lo cual el diodo  $D1$  conduce  $i_d$  y  $V_s$  aparecerá como una tensión inversa a través del diodo  $D3$ . Cuando  $V_s$  es negativa, la corriente  $i_d$  conmutará instantáneamente al diodo  $D3$  ya que la inductancia es cero, una tensión inversa aparecerá en el diodo  $D1$ . Así entonces el diodo con su cátodo en el potencial más bajo conducirá  $i_d$ . Esto es cuando la tensión  $V_s$  es positiva, el diodo  $D2$  conduce  $i_d$  y  $V_s$  aparecerá como una tensión inversa a través del diodo  $D4$ . Cuando  $V_s$  es negativa, la corriente  $i_d$  conmuta instantáneamente a él diodo  $D4$  y una tensión inversa se presenta en el diodo  $D2$ .



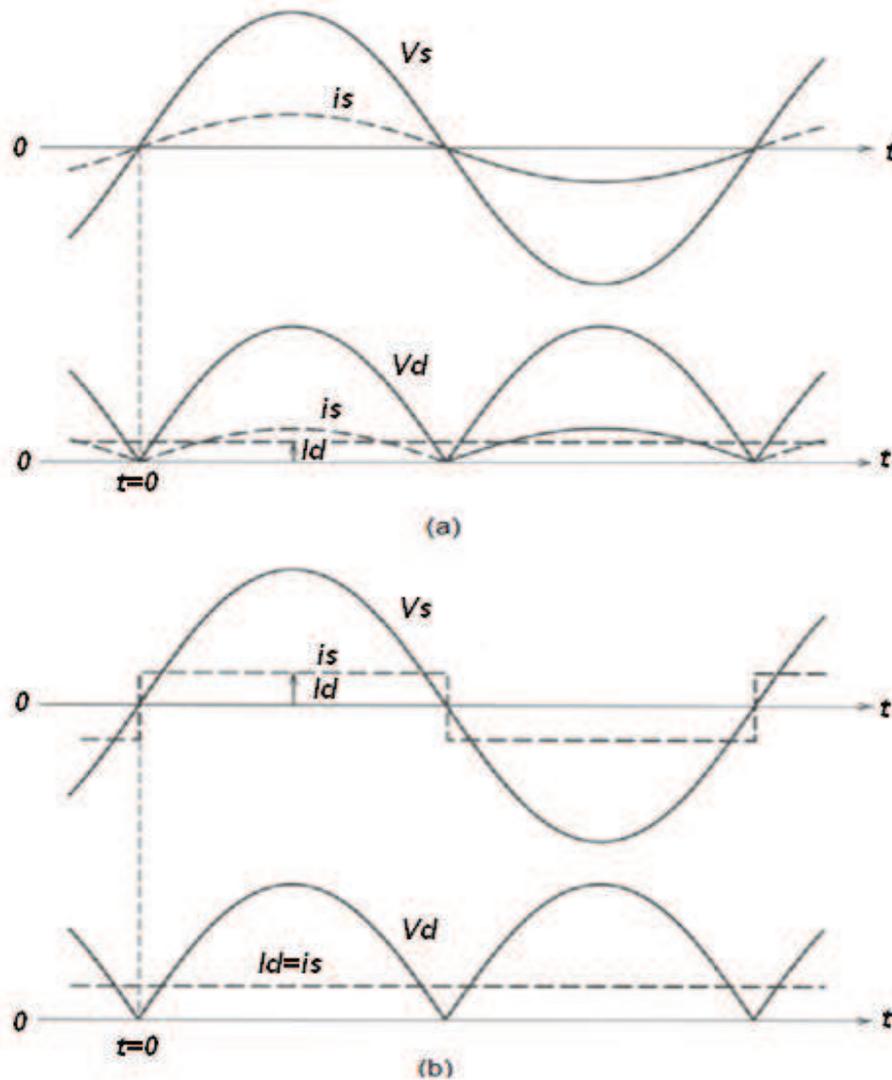
**Figura 2.4.** Equivalente del puente de rectificadores de la Figura 2.2.

Las formas de tensión y corriente del circuito mostrado en la figura 2.3 son mostradas en la figura 2.5(a) y 2.5(b). En ambos circuitos, cuando  $V_s$  es positiva, los diodos  $D1$  y  $D2$  conducirán, por lo cual  $v_d=V_s$  e  $i_s=i_d$ , cuando la tensión  $V_s$  es negativa, los diodos  $D3$  y  $D4$  conducirán, así  $v_d=-V_s$  e  $i_s=i_d$ . En cualquier instante de tiempo la tensión de salida en el lado de CD del diodo rectificador puede ser expresada con la siguiente ecuación:

$$v_d(t) = |v_s| \quad (2.1)$$

El lado de corriente alterna es expresado con la función siguiente:

$$i_s = \begin{cases} i_d & v_s > 0 \\ -i_d & v_s < 0 \end{cases}$$



**Figura 2.5.** Formas de onda en los rectificadores de la Figura 2.3(a) y 2.3(b).

Con  $i_d(t) = I_d$ , las formas de onda de  $V_s$  e  $i_s$  son mostradas en las figura 2.6(a) con la componente de la frecuencia fundamental  $i_s$ . Aplicando la definición básica de del valor *rms* a la forma de onda de  $i_s$  en este caso ideal se tiene:

$$I_s = I_d \quad (2.2)$$

Con el análisis de Fourier de  $i_s$ , la componente fundamental y de las armónicas tienen los siguientes valores en el caso ideal:

$$I_{s1} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_d = 0.9 I_d \quad (2.3)$$

$$I_{sh} = \begin{cases} 0 & \text{para valores pares de } h \\ I_{s1}/h & \text{para valores impares de } h \end{cases}$$

Los componentes en  $i_s$  son mostrados en la figura 2.6(b), utilizando estos valores y aplicando la ecuación 2.12 se obtiene que la distorsión demandada total es:

$$TDD = 48.43\%$$

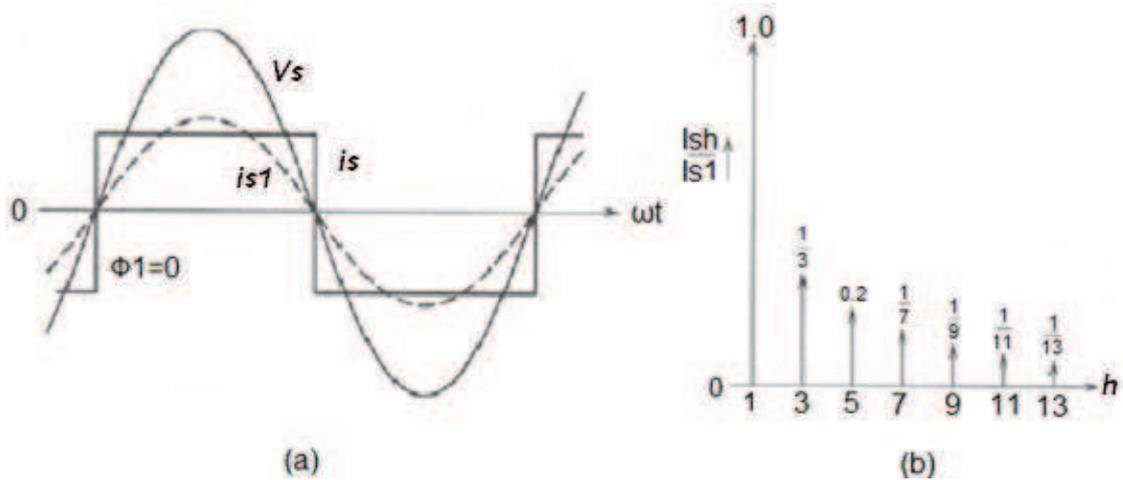


Figura 2.6. Corriente de línea  $i_s$  en el caso ideal.

### Efecto de la Inductancia en la Corriente de Conmutación.

Para las condiciones cuando existe inductancia tomamos en cuenta que el lado de Cd puede ser representado por una corriente constante  $I_d$  como se muestra en la figura 2.7, debido a la inductancia finita, la transición de la corriente del lado de corriente alterna ( $i_s$ ) del valor de  $+I_d$  a  $-I_d$  (o viceversa) no es instantáneo. El intervalo de tiempo que se requiere para cada transición es llamada tiempo de corriente de conmutación o intervalo de conmutación  $\mu$ , este proceso donde la conducción de corriente cambia de un diodo a otro es llamado proceso de conmutación.

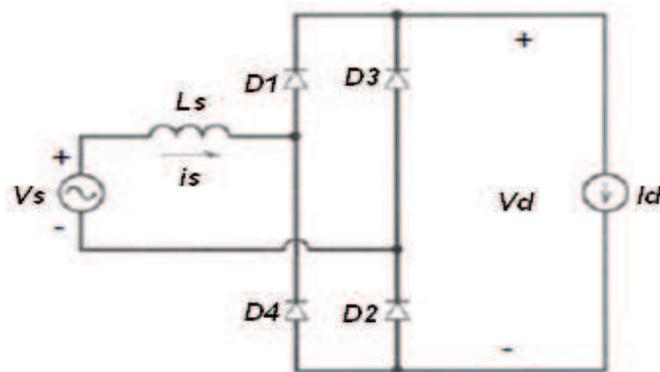
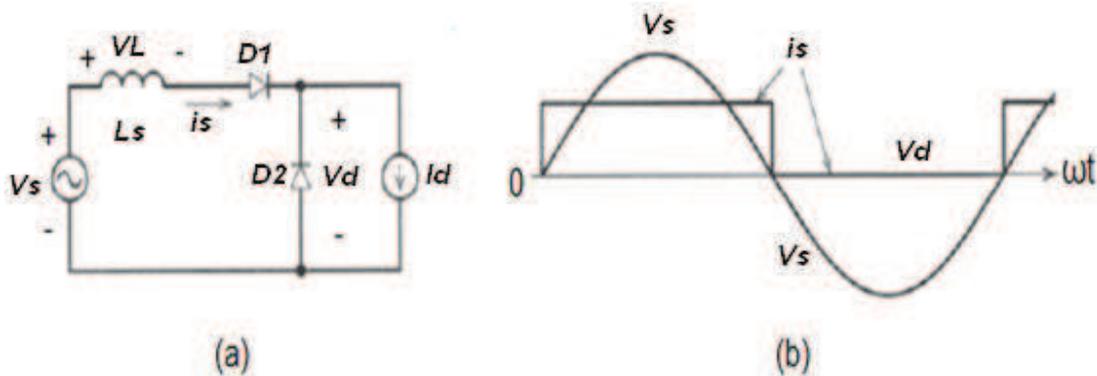


Figura 2.7. Rectificador monofásico con una  $L_s$  finita.

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

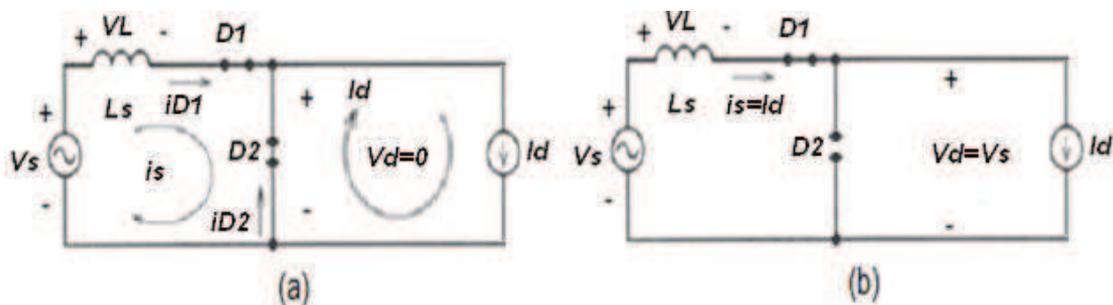
Para entender el proceso se considera el circuito de la figura 2.8(a) con dos diodos alimentados por una fuente de tensión senoidal, la salida es representada por una corriente constante de la fuente ( $I_d$ ). Para apreciar mejor el cambio la figura 2.8(b) muestra las formas de onda de  $v_s$ ,  $v_d$  e  $i_s$  con  $L_s=0$ .



**Figura 2.8.** Circuito básico para ilustrar la conmutación, con  $L_s=0$ .

Con  $\omega t = 0$ , la tensión  $v_s$  es negativa y la corriente  $I_d$  está circulando a través de  $D2$  con  $V_d=0$  e  $i_s=0$ . Cuando  $V_s$  es positivo en  $\omega t = 0$ , una tensión aparecerá en  $D1$  provocando que este permita el flujo de corriente. Con un  $L_s$  finito, la  $i_s$  puede ser obtenida del circuito redibujado en la figura 2.9(a). Ya que está conduciendo, esto origina un corto circuito (con una tensión  $v_d=0$ , con un diodo ideal), las dos corrientes  $I_d$  e  $i_s$  son mostradas. En estos términos de las corrientes, la corriente del diodo  $i_{D2} = I_d - i_s$ .

La corriente es dependiente del valor de  $I_d$  durante el intervalo de conmutación  $\omega t = u$ ,  $i_{D2}$  es positivo y el diodo  $D2$  conduce el circuito de la figura 2.9(a). La corriente  $i_s$  no puede exceder  $I_d$  ya que resultara en un valor negativo de la corriente  $i_{D2}$  imposible. Como consecuencia el diodo  $D2$  no conduce en  $\omega t = u$ , resultando en el circuito de la figura 2.9(b). Las formas de onda se muestran en la figura 2.10 como una función de  $\omega t$ .



**Figura 2.9.** (a) Circuito Durante la Conmutación. (b) Circuito Después de la Conmutación.

La corriente  $i_s$  que circula por el inductor comienza con un valor de cero en el inicio del intervalo conmutación y termina con un valor de  $I_d$  en el final. Para obtener el valor del intervalo de conmutación  $\mu$ , se considera la ecuación del inductor durante el intervalo de conmutación, la entrada de tensión de CA aparece como una corriente de conmutación a través del inductor como se muestra en la figura 2.9(a).

### Puente Rectificador de Diodos Trifásico.

La figura 2.10, muestra un sistema de suministro trifásico para un puente rectificador de diodos. Con su operación sin carga, la tensión más alta de línea a línea se conectará al circuito de carga (CD) dando la forma de onda de la tensión mostrada en la figura 2.11.

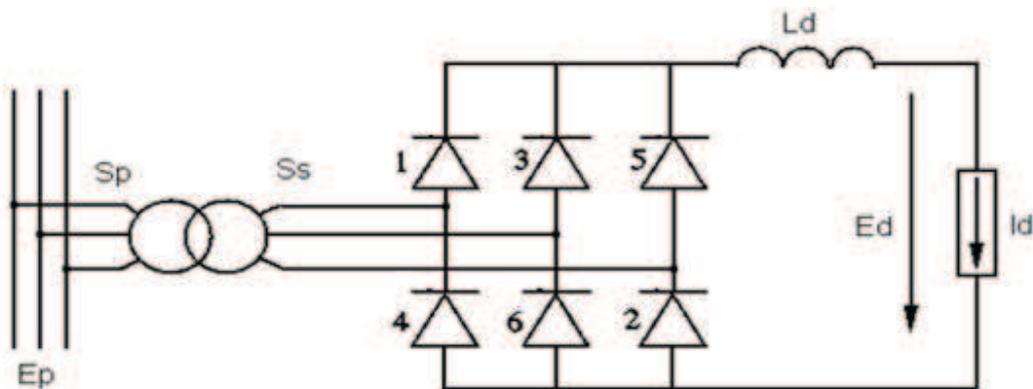


Figura 2.10. Circuito de un puente rectificador trifásico.

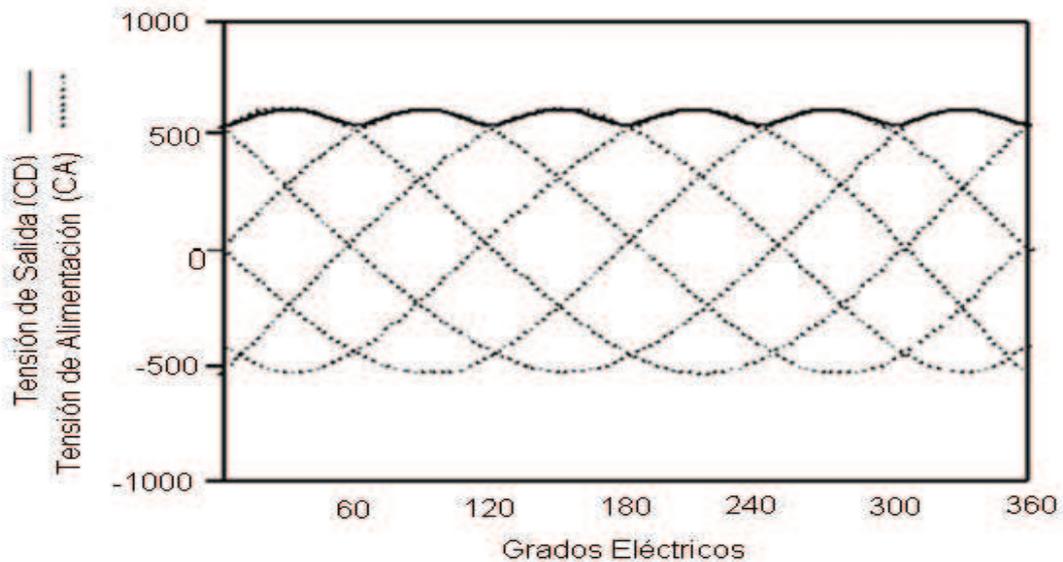


Figura 2.11. Onda de salida del puente rectificador ideal.

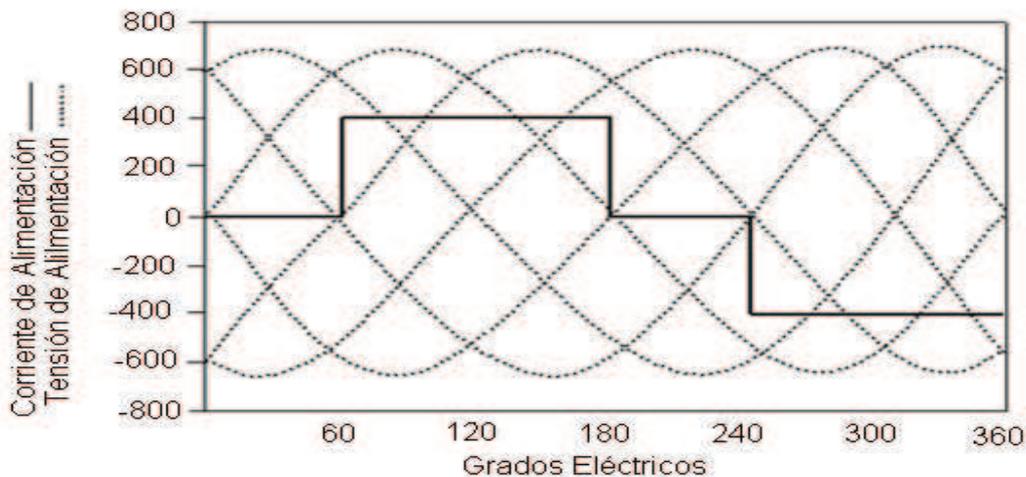
## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

La figura 2.11, muestra la onda de corriente CA ideal en un puente rectificador. Esta forma se basa en la asunción de que la corriente CD no tiene fluctuaciones (carga inductiva) y que la corriente CD es transferida de una fase a otra al momento en que la tensión en la fase entrante excede la tensión en la fase saliente. La ecuación para los componentes de corriente armónica de la onda de corriente AC es la que se muestra a continuación donde  $h$  es el orden del armónico,  $k$  es algún entero positivo,  $q$  es el número de pulso del circuito rectificador,  $I_h$  es la amplitud de la corriente armónica de orden  $h$ ,  $I_1$  es la amplitud de la corriente fundamental.

$$h = kq \pm 1 \quad (2.4)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (2.5)$$

Una onda de corriente rectangular significa inductancia cero o fuente infinita en el circuito CA que alimenta al rectificador, en cuyo caso el escalonamiento de tensión no ocurre.



**Figura 2.13.** Forma de onda de la corriente de un puente rectificador ideal.

Una onda de corriente rectangular significa inductancia cero ó fuente infinita en el circuito CA que alimenta al rectificador, en cuyo caso el escalonamiento de tensión no ocurre. Cuando la inductancia está presente, la corriente no se transfiere de una fase a otra al instante; en cambio hay una conmutación durante la cual los dos dispositivos están conduciendo. Durante esta conmutación, hay un circuito corto transitorio de CA a través de los dispositivos que conducen. Este circuito es interrumpido por la corriente inversa en el dispositivo de salida. La duración de la conmutación depende del ángulo cerrado entre el circuito corto CA y éste valor.

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

La figura 2.13, muestra las condiciones de conmutación con  $\alpha$  igual a cero grados. La figura 2.14 muestra las condiciones de conmutación con  $\alpha$  igual a  $30^\circ$ . Las diferencias entre estos dos casos son debido a las diferentes proporciones de aumento de corriente en la fase entrante. Cuando  $\alpha$  es igual a  $0^\circ$ , las condiciones de corto circuito son aquellas correspondientes a la asimetría máxima con esta característica de elevación inicial lenta. Con  $\alpha$  igual a  $90^\circ$ , las condiciones de corto circuito son aquellas de asimetría cero con una proporción inicialmente rápida de elevación de corriente. A este ángulo de retraso de disparo, el ángulo de la conmutación es el más pequeño para un valor particular de corriente. Las figuras 2.15 y 2.16 muestran la tensión de línea a neutro CA para los dos casos.

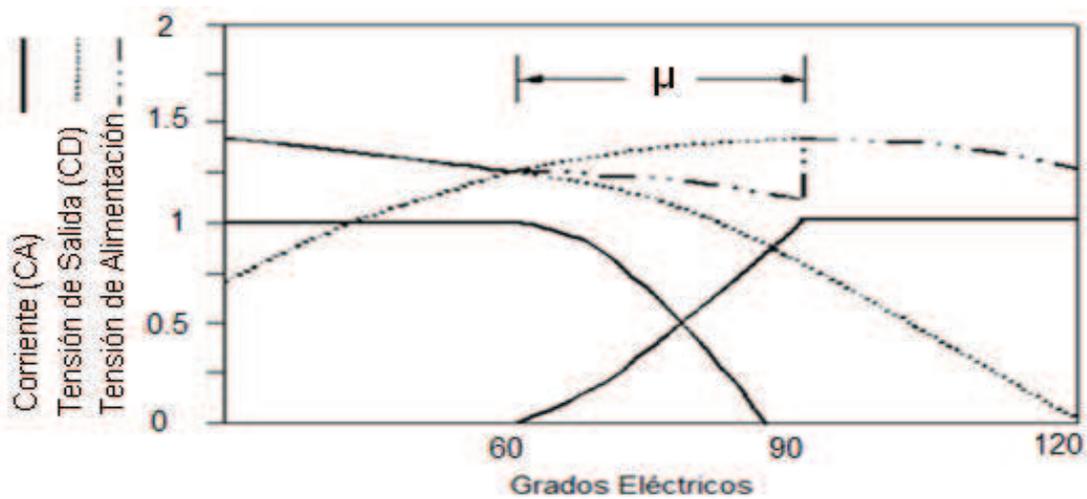


Figura 2.13. Conmutación de los dispositivos en  $\alpha=0^\circ$ ,  $\mu=25^\circ$ .

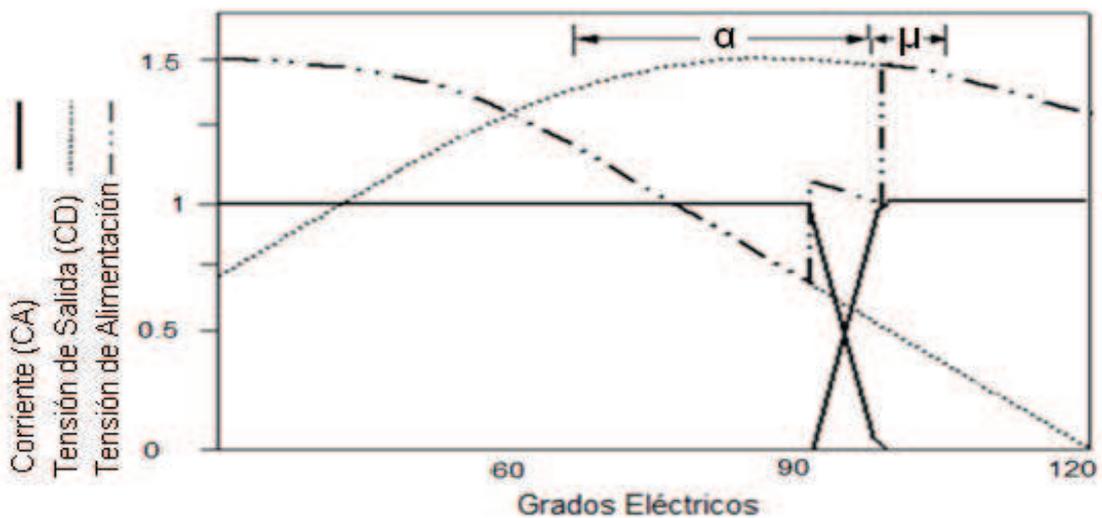


Figura 2.14. Conmutación de los dispositivos en  $\alpha=30^\circ$ ,  $\mu=12^\circ$ .

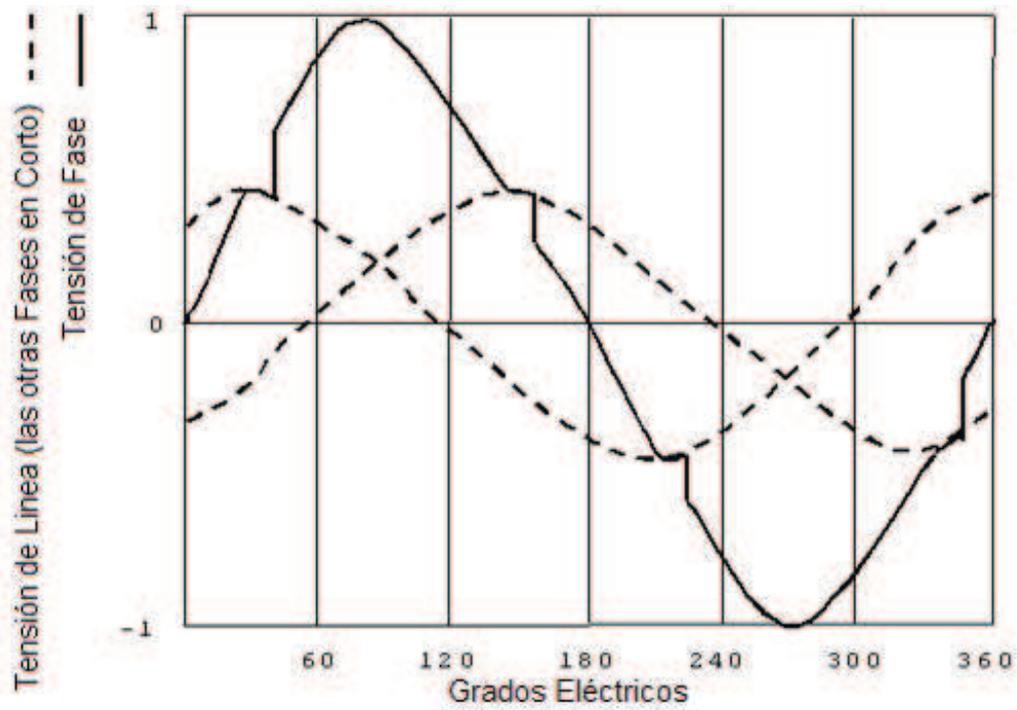


Figura 2.15. Escalonamiento de tensión rectificada con  $\alpha=0^\circ$ .

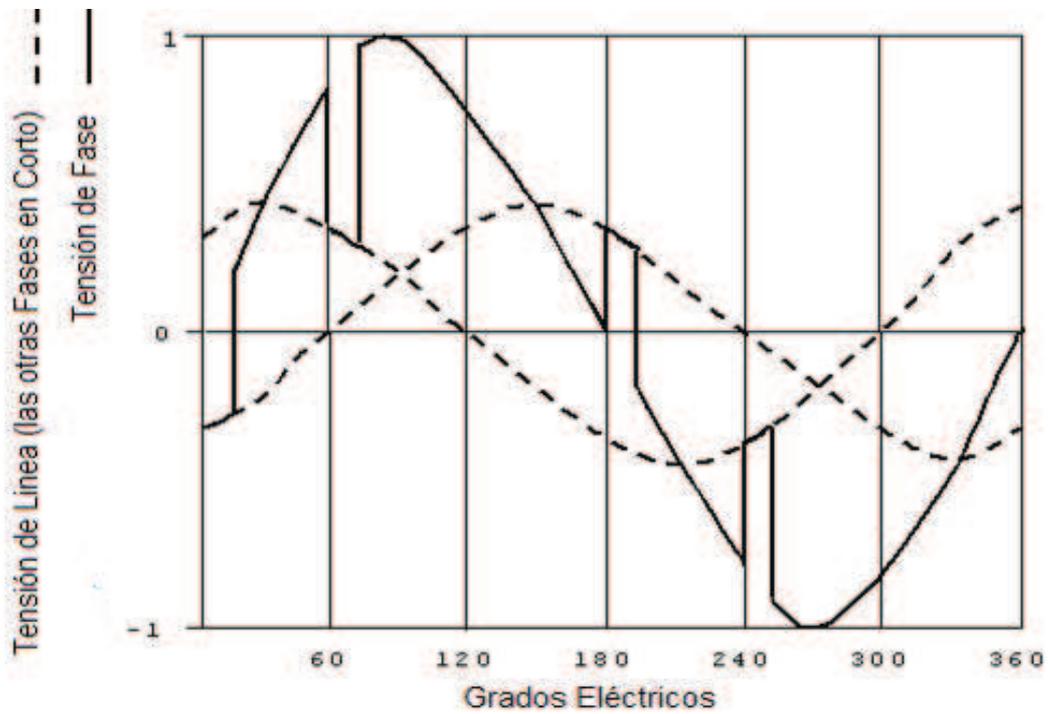


Figura 2.16 Escalonamiento de tensión rectificada con  $\alpha=30^\circ$ .

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

La ecuación para corrientes armónicas, permitida para ángulos de retraso y solapamiento y asumiendo la corriente CD libre de rizo, es:

$$I_h = I_{DC} \left\{ \frac{6}{\pi} \sqrt{\frac{A^2 + B^2 - 2AB \cos(2\alpha + \mu)}{h[\cos \alpha - \cos(\alpha - \mu)]}} \right\} \quad (2.6)$$

Donde

$$A = \frac{\text{sen} \left[ (h-1) \frac{\mu}{2} \right]}{h-1} \quad (2.7)$$

$$B = \frac{\text{sen} \left[ (h+1) \frac{\mu}{2} \right]}{h+1} \quad (2.8)$$

### Análisis de Fourier en Señales no Senoidales.

El teorema de Fourier define que, bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones senoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original. Las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que para ondas asimétricas existirán tanto armónicas pares como impares. La figura 2.17 muestra el ejemplo de una onda distorsionada que puede ser representada como la suma de la señal fundamental ( $f=60\text{Hz}$ ), el segundo ( $2f=120\text{Hz}$ ) y tercer armónico ( $3f=180\text{Hz}$ ).

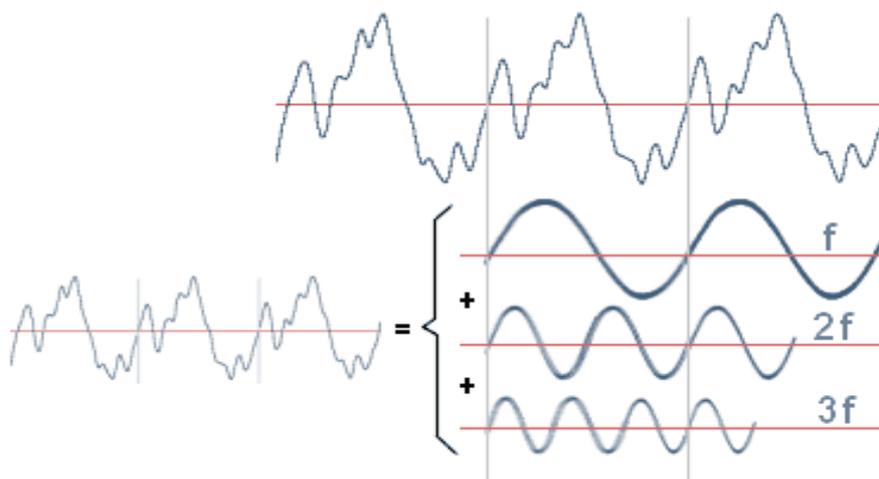


Figura 2.17 Ejemplo del análisis de fourier de una onda no senoidal.

Cuando se hacen mediciones de las ondas de corriente o tensión utilizando analizadores de redes, el equipo efectúa integraciones mediante la técnica de la transformada rápida de Fourier, dando como resultado la serie de coeficientes  $A_n$  que expresadas con relación a la amplitud  $A_1$  de la fundamental, constituye el espectro de corrientes armónicas relativo a la onda medida. La figura 2.18 muestra un ejemplo de la representación de los espectros armónicos de corriente de una señal distorsionada.

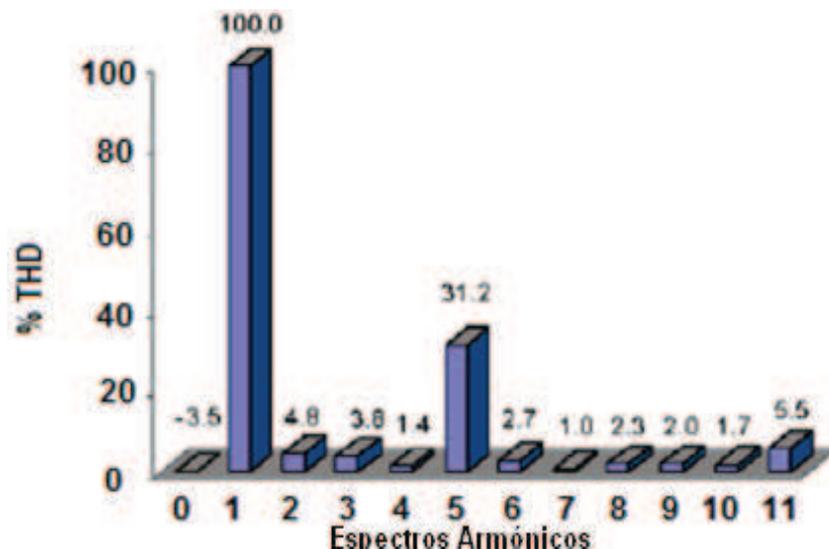


Figura 2.18. Ejemplo de espectros armónicos relativos a la señal fundamental.

### 2.1.2. Indicadores generales de armónicos.

El indicador de armónicos más común, el cual está relacionado con la forma de onda de la tensión. Es el THD (Distorsión Armónica Total), este se define como la raíz media cuadrática (rms) de los armónicos expresados como un porcentaje de la componente fundamental. La expresión matemática para calcular el THD se muestra a continuación.

$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (2.9)$$

Donde  $V_n$  es la tensión del armónico en la frecuencia rms del armónico  $n$ ,  $N$  es el orden de armónico máximo que se considera y  $V_1$  es la tensión rms de línea a neutro. En la mayoría de las aplicaciones se considera los armónicos desde el segundo hasta el vigésimo quinto, pero la mayoría de las normas especifican que debe considerarse hasta el quincuagésimo armónico.

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

Los niveles de distorsión de la corriente pueden ser también caracterizados por un valor de THD pero puede ser erróneo cuando la magnitud de la corriente fundamental es baja. Un valor grande del THD para una corriente de entrada no es importante si la carga es pequeña, ya que la magnitud de los armónicos de corriente es baja aunque la distorsión de la corriente fundamental es grande. Para evitar errores con lo anteriormente mencionado existe un indicador de la distorsión demandada total (TDD) es usado, el cual se define matemáticamente como:

$$TDD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_R} \quad (2.10)$$

Este indicador es similar al THD excepto que la distorsión es expresada como un porcentaje de la corriente de carga máxima, en lugar de la corriente fundamental. Ya que los sistemas de suministro eléctrico son diseñados sin tomar en cuenta la corriente máxima de carga, el impacto de la corriente distorsionada será mayor si la evaluación de la red es basada en los valores de diseño en vez de los valores de las fluctuaciones de carga.

### 2.2. EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.

El valor al cual los armónicos pueden ser tolerados es determinado por la susceptibilidad de la carga. El mayor tipo de susceptibilidad de equipos es aquel cuyo diseño o constitución asume una entrada fundamental sinusoidal perfecta. El equipo que toma estas consideraciones está frecuentemente en las categorías de comunicación o equipo de procesamiento de datos. Los efectos en el equipo eléctrico debido a los armónicos pueden ser clasificados como se muestra a continuación:

#### **Motores y Generadores.**

El efecto de las tensiones y corrientes armónicas en las máquinas rotativas (inducción y sincrónicas) incrementa el calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro a frecuencias armónicas. Los componentes armónicos de este modo afectan la eficiencia de la máquina, y pueden afectar el par desarrollado por el motor [1].

Cada armónico de tensión, induce una corriente armónica correspondiente en el estator de la máquina. Así cada uno de estos armónicos está en una secuencia negativa o positiva de la componente de corriente total. Estas corrientes inducen un calentamiento en el devanado del estator, de este modo se adiciona un aumento de temperatura. El calentamiento debido a la contaminación armónica

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

aproximadamente reduce el funcionamiento entre 90% y 95% del que puede ser experimentado por la onda senoidal fundamental aplicada [1]. La tabla 2.2 muestra un ejemplo de los efectos que producen los armónicos en el par mecánico de un motor de inducción producidos por un rectificador de seis pasos.

**Tabla 2.2.** Efectos en el par de un motor de inducción debido a los armónicos de un rectificador de seis pasos.

Orden del Armónico	Frecuencia (Hz)	Red de Secuencia	Armónico del Estator	Rotación del Armónico	Armónico del Rotor
1	60	+	1	Hacia delante	-
5	300	-	5	Hacia atrás	6
7	420	+	7	Hacia delante	6
11	660	-	11	Hacia atrás	12
13	780	+	13	Hacia delante	12
17	1020	-	17	Hacia atrás	18
19	1140	+	19	Hacia delante	18
23	1380	-	23	Hacia atrás	24
25	1500	+	25	Hacia delante	24

### Transformadores.

El efecto de los armónicos en transformadores es doble: las corrientes armónicas causan un incremento de las pérdidas en el cobre y pérdidas de flujos dispersos, y las tensiones armónicas causan un incremento de las pérdidas en el hierro. El efecto total es un incremento en el calentamiento del transformador, al ser comparado con una operación puramente senoidal. El límite superior factor de distorsión de corrientes es el 5% de la corriente [1].

Las pérdidas del transformador causadas por tensiones y corrientes armónicas dependen de la frecuencia. El incremento de la frecuencia implica un aumento de pérdidas, por lo tanto, los componentes armónicos de alta frecuencia son más importantes que los componentes armónicos de baja frecuencia causando calentamiento en el transformador.

### **Bancos de Capacitores.**

Un mayor inconveniente se presenta con el uso de capacitores en un sistema de potencia debido a la posibilidad de resonancia del sistema. Este efecto emplea tensiones y corrientes que son considerablemente superiores en comparación con los valores nominales. La reactancia de un banco de capacitores disminuye con la frecuencia, y el banco actúa como una carga para corrientes armónicas altas. Este efecto incrementa el calentamiento y el esfuerzo dieléctrico. El resultado del incremento en el calentamiento y esfuerzo de tensión provocado por los armónicos es una disminución en la vida del capacitor. Los capacitores son severamente sobrecargados debido a los armónicos, especialmente bajo condiciones de resonancia y pueden dañarse.

### **Equipo Electrónico.**

El equipo electrónico es susceptible a mal funcionamiento causado por las distorsiones armónicas. Este equipo a menudo depende de la determinación exacta del cruce por cero de la tensión o de otros aspectos de la forma de onda de la tensión. La distorsión armónica puede resultar en un cambio en el cruce por tensión cero o en el punto al cual la tensión de fase a fase en una línea se vuelve mayor que la tensión de fase a fase de otra línea. Estos son dos puntos críticos para muchos tipos de controles de circuitos electrónicos, y estos cambios conducen al funcionamiento erróneo del equipo.

Las computadoras y equipos asociados tal como los controladores lógicos programables frecuentemente requieren fuentes de CA con un factor de distorsión de tensión armónica menor al 5%, siendo el armónico de mayor magnitud menor al 3% de la tensión fundamental. Los instrumentos son afectados similarmente, dando datos erróneos o de otra manera funcionamiento impredecible.

### **Medidores y Conductores de Potencia.**

Los medidores e instrumentos son afectados por componentes armónicas, particularmente si la existencia de condiciones de resonancia resulta en tensiones y corrientes armónicas excesiva en los circuitos. Los dispositivos con disco de inducción, tal como vatímetros, normalmente miden solo la corriente fundamental; sin embargo, el desbalance de fase ocasionado por las distorsiones armónicas puede causar operaciones erróneas en estos dispositivos. El factor de distorsión debe ser severo (mayor al 20%) antes de que se observan errores significativos.

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

Los conductores implicados en la resonancia del sistema pueden estar sujetos a fuerzas y coronas de tensión, que conducen a fallas en el dieléctrico. El flujo de una corriente no senoidal en un conductor causa un calentamiento adicional, esto es debido a dos fenómenos conocidos como “efecto piel” y “efecto proximidad”, que varían en función de la frecuencia así como también del tamaño y calibre del conductor.

### **Convertidores de Potencia Estáticos.**

Los convertidores estáticos de potencia generalmente son los responsables de introducir armónicos, en algunas situaciones los convertidores pueden ser afectados por armónicos. Frecuentemente la otra fuente de armónicos es un convertidor similar o idéntico que está en paralelo con la fuente. La mayoría de los convertidores se diseñan con respecto a las características normales de la fuente de tensión. Si la fuente de CA entrante es severamente distorsionada por los armónicos, los convertidores pueden fallar al conmutar. Así, los controles pueden recibir una corriente de disparo falsa, causando un mal funcionamiento o en algunos casos, la destrucción de los componentes.

### **Equipo de Protección.**

Como con otros tipos de equipos, las corrientes armónicas pueden reducir la capacidad nominal de los fusibles debido al calentamiento generado en las condiciones nominales. No hay actualmente ninguna norma para los niveles de corrientes armónicas requeridas por los dispositivos de maniobra y fusibles. Todas las pruebas son realizadas en la frecuencia nominal.

El Comité de Relevadores para Sistemas de Potencia de la Sociedad de Ingeniería de Potencia de la IEEE ha realizado un reporte titulado “*Distorsiones de Onda Senoidal en Sistemas de Potencia y el Impacto en los Relés de Protección*”. Este informe cubre muchos tipos de distorsiones que pueden ocurrir en sistemas de potencia y discute su impacto en la operación de los relés de protección. El informe aclara la imposibilidad de definir completamente las respuestas de un relevador debido a la variedad de relés en uso y a las variaciones en la naturaleza de las distorsiones que pueden ocurrir, aún cuando la discusión se limita a los armónicos característicos de convertidores de seis y 12 pulsos. No solo pueden la magnitud armónica y el orden de armónico predominante variar, sino que también los ángulos de fase relativa pueden variar también [1].

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

Dos formas de onda con la misma magnitud armónica característica pueden diferenciarse sustancialmente si sus armónicos tienen diferentes ángulos de fase relativos a la fundamental. Un relevador puede responder diferente a cada forma de onda aun cuando cada una contenga la misma magnitud armónica. El informe del comité de relevadores establece:

- Los relevadores muestran una tendencia a operar más lentamente con valores pico muy altos y operan más rápidamente con valores pico muy bajos.
- Los relés de baja frecuencia estática son susceptibles a sustanciales cambios en las características de operación.
- En muchos casos, los cambios en las características son relativamente pequeños sobre el rango moderado de distorsiones esperadas durante la operación nominal (THD=5%).
- Para diferentes fabricantes, los relevadores de sobrecorriente o sobretensión muestran diferentes cambios en las características de operación.
- Los armónicos pueden dañar la operación de alta velocidad de los relés diferenciales. Algunas pruebas demuestran que los relés pueden exhibir fijación completa.

Los niveles de armónicos requeridos para causar mal funcionamiento de los relevadores deben tener factores de distorsión entre 10% y 20%. La primera o segunda generación de dispositivos de disparo de estado sólido en interruptores de circuitos de baja tensión responde a corrientes picos. Subsecuentemente después de 1978, estos dispositivos han estado respondiendo a valores de corrientes rms. Los modelos que utilizan valores rms pueden causar disparos molestos debido a las corrientes armónicas de carga de los circuitos.

### **2.3. CONTROL DE ARMÓNICOS EN SUBESTACIONES ALIMENTADORAS.**

Los límites de distorsión recomendados por la norma IEEE 519 1992 Prácticas Recomendadas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas de Potencia, establecen la máxima distorsión de la forma de onda en el punto de acoplamiento común (PCC) para cada consumidor. Si los límites son excedidos, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Realizar las mediciones de armónicos en el punto seleccionado dentro del circuito de la subestación alimentadora, incluyendo el PCC, y buscar a consumidores que utilicen convertidores que provoquen distorsión de corriente más allá de los límites de lo que marca la norma. Si son identificados, tales consumidores pueden ser informados para que mantengan las distorsiones armónicas dentro de los límites recomendados mediante la instalación de filtros.
2. Instalar filtros para controlar los armónicos.
3. Instalar un nuevo alimentador. Esto es efectivo en el refuerzo de la fuente y en el aislamiento de los problemas de armónicos. Sin embargo, no siempre es económicamente factible.

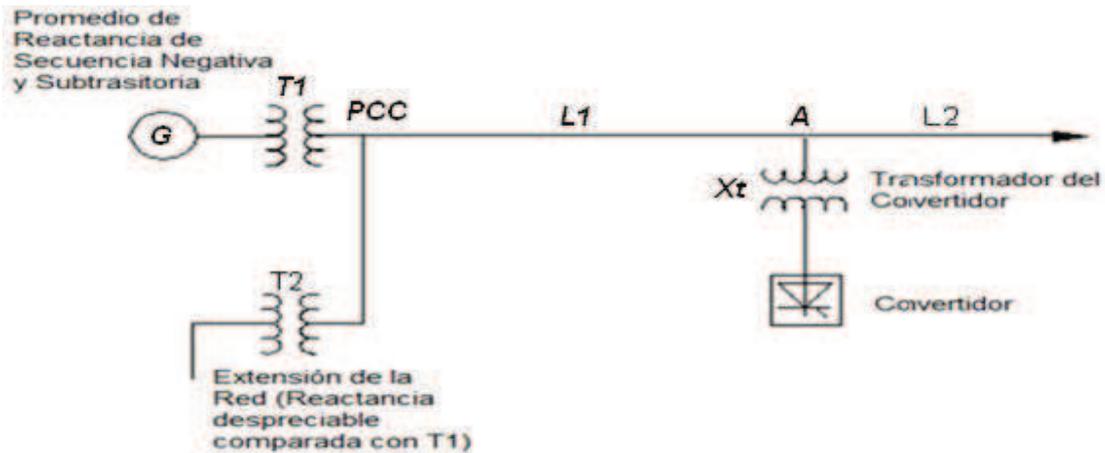
Es posible adicionar nuevas cargas de convertidores a circuitos contaminados con armónicos para los límites recomendados tanto como convenga el diseño de los filtros que sean proporcionados.

### 2.3.1. Control de Corrientes Armónicas.

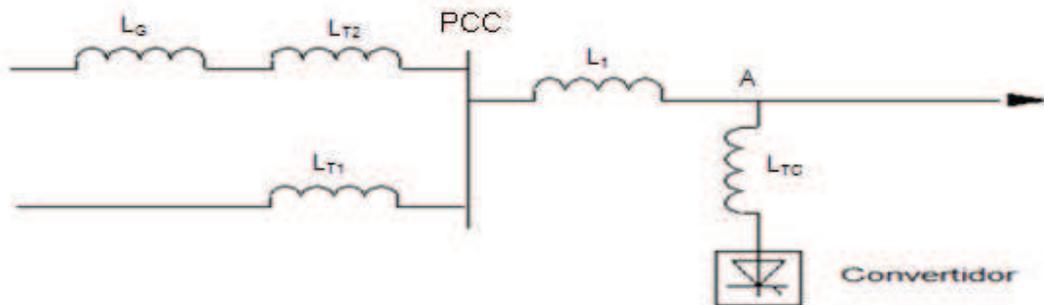
Las corrientes armónicas buscan el camino de menor impedancia o una condición de resonancia para viajar a través del sistema de potencia causando problemas a los consumidores los cuales no tienen equipo que origine la generación de armónicos. Un consumidor puede inyectar solo una cierta cantidad de corriente armónica dentro del sistema de potencia, dependiendo de su carga la corriente de corto circuito y de su sistema de suministro de tensión. La compañía de suministro público debe medir una cierta tensión de calidad en el PCC (punto común de acoplamiento) con el equipo del consumidor.

El diagrama de la figura 2.19 muestra un convertidor alimentado por una fuente de potencia,  $G$ , sobre una línea trifásica,  $L1$ . La reactancia de la fuente,  $XG + XT2$ , y la línea,  $L1$ , están en serie con la reactancia del transformador en el convertidor,  $Xt$ . Si una corriente armónica,  $Ih$ , fluye entre el convertidor y la fuente, habrá una tensión armónica  $Eh = Ih Xh$  en el punto  $A$ . ( $Xh$  es la reactancia de la fuente a la frecuencia armónica,  $h$ ).

Cuando existe una extensión,  $L2$ , para alimentar otras cargas, la tensión armónica en el punto  $A$  causará una corriente armónica que fluirá sobre esa línea, aunque la potencia al rectificador será suministrada sólo por la línea  $L1$ . El valor más alto de  $Xh$ , será la mayor tensión armónica en  $A$  y la mayor magnitud del flujo de corriente armónica sobre la línea  $L2$ . Las corrientes armónicas de un convertidor pueden fluir en alguna parte de un sistema de CA al cual están conectados.



(a) Diagrama Esquemático



(b) Diagrama de las Reactancias

Figura 2.19 Influencia de una carga no lineal en el sistema.

### Filtros Paralelos.

Los filtros paralelos para la reducción del flujo de corrientes armónicas en un sistema de potencia de CA consisten en uno o más circuitos afinados y conformados por circuitos L-C en serie. Los filtros en los sistemas industriales pueden ser más simples debido a que el tamaño del filtro es relativo a la capacidad del sistema.

Los filtros se clasifican normalmente según el tamaño para proporcionar potencia reactiva (var) para el mejoramiento del factor de potencia así como para el filtrado de corrientes armónicas. Como resultado, el tamaño del filtro es bastante grande para controlar el flujo no solo del armónico para el cuál ha sido afinado, sino también para armónicos de orden mayor. La impedancia del filtro con respecto al sistema de potencia es baja. En sistemas de tensión baja, la proporción X/R es pequeña.

### Diseño de Filtros Paralelo.

Los filtros paralelos constan de un condensador y un inductor. El condensador debe ser capaz de resistir la suma aritmética de los picos de tensión, la caída de tensión armónica y fundamental por el condensador. Como la reactancia total es menor que la reactancia capacitiva (la reactancia inductiva tiene signo opuesto a la reactancia capacitiva así que el total es la diferencia entre los dos valores), la corriente fundamental en el filtro será mayor que en el condensador sin reactancia afinada. La tensión armónica a través del condensador es la tensión debido a la corriente armónica a la cual el filtro es afinado estando disponible a los tiempos del sistema y la reactancia del condensador a la frecuencia afinada. El inductor del filtro debe ser capaz de resistir la corriente (rms) que entra al filtro. Esto incluye no solo la corriente armónica a la cual es afinado el filtro, sino también a algunas otras corrientes armónicas que puedan estar presentes así como la corriente fundamental.

### 2.3.2 Límites de Distorsión de Corriente.

La distorsión armónica puede ser causada por un solo consumidor, esta puede ser limitada a un nivel aceptable en algún punto del sistema; en tanto que el sistema completo puede ser operado sin distorsión armónica substancial en cualquier parte de éste. Los límites de distorsión armónica recomendados establecen la máxima distorsión de la forma de onda aceptable para un consumidor. Los límites listados en la tabla 2 pueden ser usados como valores de diseño de un sistema para "condiciones ideales" en operación normal (condiciones que duran más de una hora). Para periodos cortos, durante arranques altos o en condiciones inusuales, los límites pueden excederse en 50%. Estas tablas son aplicadas a rectificadores de seis pulsos y a situaciones de distorsión general [1].

Con tal de que las amplitudes de los ordenes armónicos no característicos sean menores al 25% de los límites especificados en las tablas. La tabla 2.3 lista los límites de corrientes armónicas basadas en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia al cual la carga está conectada. La relación  $I_{SC}/I_L$  es la relación de la corriente de cortocircuito disponible en el punto de acoplamiento común (PCC), con respecto a la máxima corriente de carga fundamental. Se recomienda que la corriente de carga,  $I_L$ , sea calculada como el promedio de la corriente de demanda máxima para los 12 meses precedentes. Así, como el tamaño de la carga del usuario disminuye con respecto al tamaño del sistema, el porcentaje de corriente armónica que el usuario se permita inyectar al sistema de la subestación alimentadora se incrementa. Este usuario protege a otros usuarios del mismo alimentador así como a la subestación alimentadora [1].

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

Para las redes que usan niveles de tensión mayores a 161 kV los valores de los límites disminuyen ya que estos son niveles de transmisión por lo cual estas redes se conectan con la compañía suministradora y con una gran mayoría de usuarios; por lo que la inyección de distorsión armónica debe ser menor para evitar problemas de mayor magnitud en todo el sistema. La tabla 2.4 muestra los límites marcados para estos niveles de tensión, comparándolos con los niveles de la tabla 2.3 se puede observar cómo se limita más la inyección de armónicos.

**Tabla 2.3.** Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución en general (desde 120 v hasta 69 000 v).

Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de IL						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
Isc / IL	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
<20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 < 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 < 1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Incluso los armónicos son limitados al 25% de los límites armónicos impares anteriores.  
 \*Todo equipo de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, sin tener en cuenta la relación Isc/IL real.  
 Isc = corriente máxima de cortocircuito en el PCC.  
 IL = corriente de carga demandada máxima (frecuencia fundamental) en el PCC.

**Tabla 2.4.** Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión en general (>161 kV), generación y cogeneración dispersa.

Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de IL						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
Isc / IL	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
<20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 < 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 < 1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Incluso los armónicos son limitados al 25% de los límites armónicos impares anteriores.  
 \*Todo equipo de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, sin tener en cuenta la relación Isc/IL real.  
 Isc = corriente máxima de cortocircuito en el PCC.  
 IL = corriente de carga demandada máxima (frecuencia fundamental) en el PCC.

### 2.4. FILTROS PASIVOS UTILIZADOS EN EL CONTROL DE ARMÓNICOS.

Los filtros de armónicos son de muchas formas y tamaños. En general, los filtros de armónicos son conectados en paralelo con el sistema de potencia debido a que brindan una vía de impedancia baja hacia tierra para las corrientes de una o más frecuencias de armónicos. Para aplicaciones de potencia, los filtros paralelos son más económicos que los filtros conectados en serie por las siguientes razones:

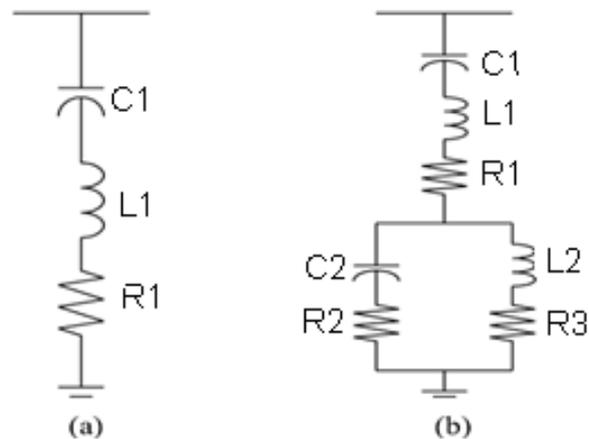
- Los componentes en serie deben ser seleccionados para la corriente máxima. Tal requerimiento implica componentes de mayor capacidad lo que implica más costos.
- Los componentes de filtros paralelos generalmente son seleccionados para solo una parte de la tensión del sistema. Lo cual implica componentes más pequeños y por lo tanto costos menores.

Los filtros pasivos están clasificados según su topología en tres categorías básicas las cuales son:

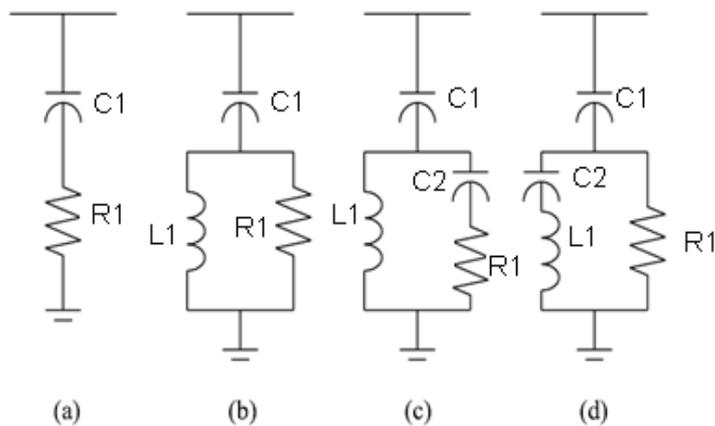
- Filtros de Ajuste Simple.
- Filtros de Ajuste Doble.
- Filtros Amortiguados (de primero, segundo, tercer orden o tipo c).

Los filtros de ajuste simple y doble son usualmente usados para frecuencias específicas, mientras los filtros amortiguados son usados para reducir varias frecuencias. En aplicaciones para armónicos pequeños, es frecuentemente usar un filtro de ajuste simple para eliminar la problemática de las corrientes armónicas. En grandes aplicaciones, como en hornos de arco, los filtros de doble ajuste o los filtros amortiguados son usados. Los circuitos equivalentes de los filtros de ajuste simple y doble son mostrados en la figura 2.20. Los circuitos equivalentes para el primero, segundo, tercero y tipo c de los filtros amortiguados son mostrados en la figura 2.21.

Los filtros amortiguados son típicamente usados para controlar armónicos de mayor orden. En general, los filtros amortiguados son ajustados entre los pares correspondientes de armónicos (11 y 13, 17 y 19). Debido a que los filtros amortiguados tienen resistencias más grandes que los filtros de simple y doble ajuste, estos no son usados en filtros de armónicos cerca de la frecuencia del sistema.



**Figura 2.20.** Filtros de armónicos (a) ajuste simple (b) doble ajuste.



**Figura 2.21.** Filtros Amortiguados: primer (a), segundo (b), tercer (c) orden, y tipo c (d).

En la mayoría de los casos es común ajustar filtros de ajuste simple a ligeramente abajo de la frecuencia (5%) del armónico a ser reducido (3). Por las siguientes razones:

- a) Para un filtro de resonancia serie con resistencia baja que es exactamente ajustado, el filtro actuará como una vía fácil de todos los armónicos en la frecuencia ajustada en el sistema. Esto puede rápidamente sobrecargar el filtro.
- b) Todos los componentes tienen algún coeficiente de temperatura diferente de cero y los condensadores son los más sensibles a la temperatura en un filtro ajustado. Como la mayoría tiene un coeficiente de temperatura negativo, es conveniente ajustar ligeramente más abajo de la frecuencia deseable.

### Circuitos Resonantes.

Un circuito resonante es un circuito formado por un inductor ( $L$ ) y un capacitor ( $C$ ). Para un circuito resonante existe una frecuencia para la cual se produce la resonancia eléctrica, a la cual se llama frecuencia de resonancia, en estas condiciones la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva ( $x_C=x_L$ ). Por lo tanto, la impedancia será mínima e igual a la resistencia óhmica. Esto también equivale a decir, que el circuito estará en fase. En un circuito resonante, la impedancia total es  $Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}$ , donde  $x_L = x_C$ . Así entonces resulta  $Z = R$ .

En el estado de resonancia eléctrica, al ser la impedancia mínima, la corriente será máxima. Simultáneamente, la tensión eléctrica en  $x_C$  y  $x_L$ , tiene valores máximos iguales. Otra característica de los circuitos resonantes es que la energía liberada por un elemento reactivo (inductor o capacitor) es exactamente igual a la absorbida por el otro. Es decir, durante la primera mitad de un ciclo de entrada el inductor absorbe toda la energía liberada por el capacitor, y durante la segunda mitad del ciclo el capacitor vuelve a capturar la energía proveniente del inductor. Es precisamente esta condición "oscilatoria" que se conoce como resonancia, y la frecuencia en la que esta condición se da es llamada frecuencia resonante.

#### 2.4.1. Filtros de Ajuste Simple.

La operación de un filtro paralelo de ajuste simple es mostrada en la figura 2.22. La corriente inyectada de la fuente a través de la impedancia  $Z_c$  se divide dentro el filtro y el sistema, la impedancia del sistema ( $Z_s$ ) en este caso consiste de la impedancia de la fuente ( $Z_u$ ) en serie con la impedancia del transformador ( $Z_t$ ) y en paralelo con la impedancia del motor ( $Z_m$ ):

$$I_h = I_f + I_s \quad (2.11)$$

Donde  $I_h$  es la corriente inyectada dentro del sistema,  $I_f$  es la corriente a través del filtro e  $I_s$  es la corriente a través de la impedancia del sistema. El armónico de tensión a través de la impedancia del filtro  $Z_f$  es igual al armónico de tensión a través de la impedancia del sistema de potencia. Donde  $I_f$  e  $I_s$  son cantidades complejas las cuales determinan la distribución corriente de armónicos en el filtro y la impedancia del sistema.

$$I_f Z_f = I_s Z_s \quad (2.12)$$

CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

$$I_f = \left[ \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} \right] I_h = \rho_f I_h \quad (2.13)$$

$$I_s = \left[ \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} \right] I_h = \rho_s I_h \quad (2.14)$$

Un filtro diseñado propiamente tendrá  $\rho_f$  lo más cercano a la unidad, usualmente 0.995 y el correspondiente al sistema será 0.005. Los ángulos de impedancia de  $\rho_f$  y  $\rho_s$  podrían ser del orden de -81 y -2,6, respectivamente. Las tensiones armónicas deberán ser lo más bajas posibles.

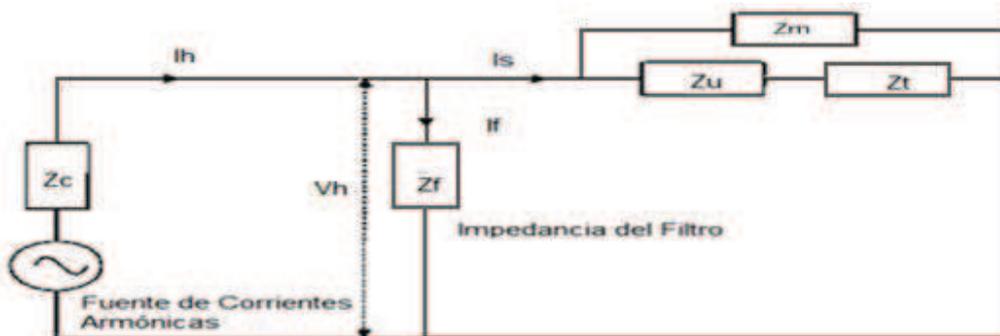


Figura 2.22. Circuito Equivalente visto desde la inyección armónica como una fuente.

El circuito equivalente de la figura 2.23 muestra la conexión del filtro en el sistema, la cual es en paralelo con las demás cargas del sistema, la impedancia del sistema juega un papel muy importante en la distribución de corrientes armónicas.

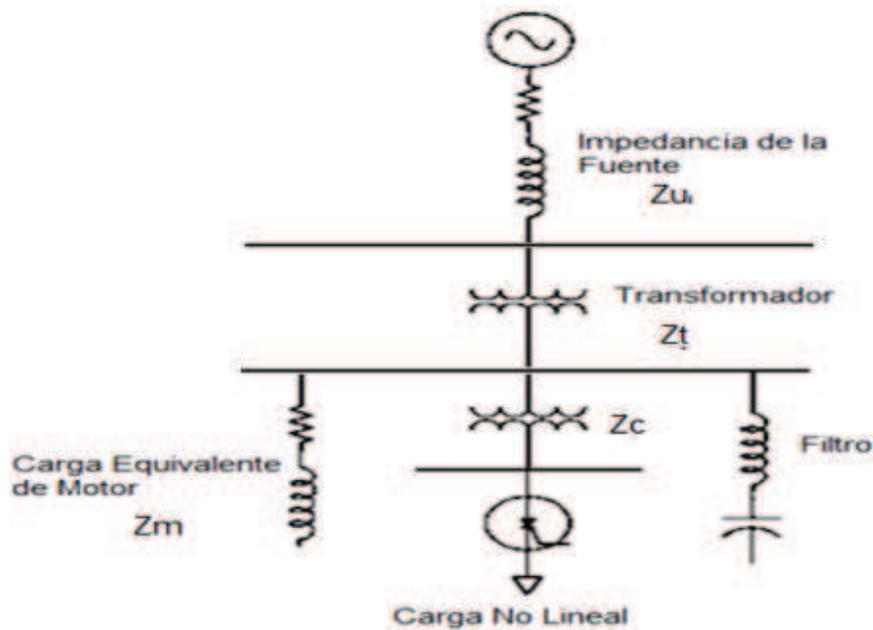


Figura 2.23. Diagrama de conexiones de un filtro de ajuste simple.

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

Para una impedancia infinita en la fuente la filtración es perfecta ya que no hay flujos de corrientes armónicas a través de la impedancia del sistema. Por el contrario, para un sistema de impedancia armónica de cero, todos los armónicos fluirán dentro del sistema y ninguno en el filtro. En ese caso donde no hay filtración, todos los armónicos de corriente pasarán al sistema.

En un filtro de ajuste simple, las reactancias inductiva y capacitiva son iguales en la frecuencia de resonancia, así las reactancias se cancelan resultando que la impedancia está dada por la resistencia  $R$ .

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R \quad (2.15)$$

Los siguientes parámetros pueden ser definidos por  $\omega_n$  que es la frecuencia angular de sintonización en radianes y es dada por:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.17)$$

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (2.18)$$

Donde  $X_0$  es la reactancia del inductor o capacitor en la frecuencia angular de sintonización. Así  $n = f_n/f$ , donde  $f_n$  es la frecuencia angular de sintonización  $f$  es la frecuencia del sistema de potencia. El factor de calidad en el reactor sintonizado está definido como:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad (2.19)$$

La banda de paso está limitada por las frecuencias en la cual  $Z_f$  es:

$$|Z_f| = \sqrt{2}R \quad (2.20)$$

$$\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (2.21)$$

En estas frecuencias la reactancia neta es igual a la resistencia capacitiva en un lado e inductiva en el otro. Si esto está definido como la desviación en por unidad de la frecuencia afinada, entonces pequeñas desviaciones para de frecuencia, la impedancia es aproximadamente dada por:

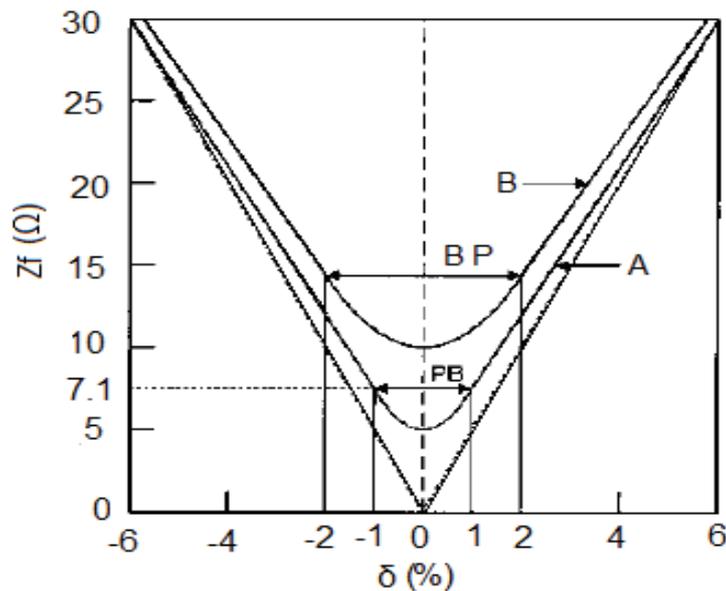
$$|Z_f| = R\sqrt{1 + 4\delta^2 Q^2} = X_0\sqrt{Q^{-2} + 4\delta^2} \quad (2.22)$$

---

Para minimizar los armónicos de tensión,  $Z_f$  debe de ser reducido o la admitancia del filtro debe ser alta al ser comparada con la admitancia del sistema. La gráfica de la impedancia de la fuente se muestra en la figura 2.24, la nitidez de la sintonía depende de  $R$  así como de  $X_o$  y de la impedancia del filtro en su frecuencia de resonancia puede ser reducida mediante la reducción de los mismos.

Las asíntotas son calculadas por los bordes del paso de la banda de frecuencias y están dados por:

$$|X_f| = \pm 2X_o|\delta| \quad (2.23)$$



**Figura 2.24.** Respuesta de un filtro de simple ajuste, la banda de paso y las asíntotas variando los factores  $Q$ .

### Frecuencia de Ajuste.

El filtro de ajuste simple no se ajusta exactamente a la frecuencia del armónico que se pretende suprimir. La frecuencia del sistema podría cambiar, causando resonancia eléctrica en el cambio. La tolerancia en los inductores y capacitores puede cambiar debido a los efectos del envejecimiento o de la temperatura.

La tolerancia de las unidades de capacitores comerciales es  $\pm 20\%$  de su capacitancia de los valores nominales y en inductores de  $\pm 5\%$  de los valores nominales de inductancia. Para aplicaciones de filtros es necesario considerar tolerancias pequeñas en lo inductores y capacitores. Donde un número de unidades de capacitores son conectadas en serie o paralelo.

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

Cualquier desbalanceo entre las fases resultara en esfuerzos de sobretensión; además, la tolerancia antes mencionada es práctica en el ambiente industrial, un cambio en la inductancia o la capacitancia del  $\pm 2\%$  causa la misma desafinación al igual que la frecuencia del sistema por 1%. La ecuación siguiente es utilizada para el cálculo de la nitidez de sintonización cuando ocurre un cambio en la frecuencia del sistema.

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (2.24)$$

### Relaciones en un Filtro ST.

La potencia reactiva de salida de un capacitor en una frecuencia fundamental es  $V^2/X_c$ . En la presencia del reactor del filtro se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_f = \frac{V^2}{X_l - X_c} \quad (2.25)$$

Las consideraciones que se tienen para la selección de un capacitor en un filtro de armónicos son las siguientes:

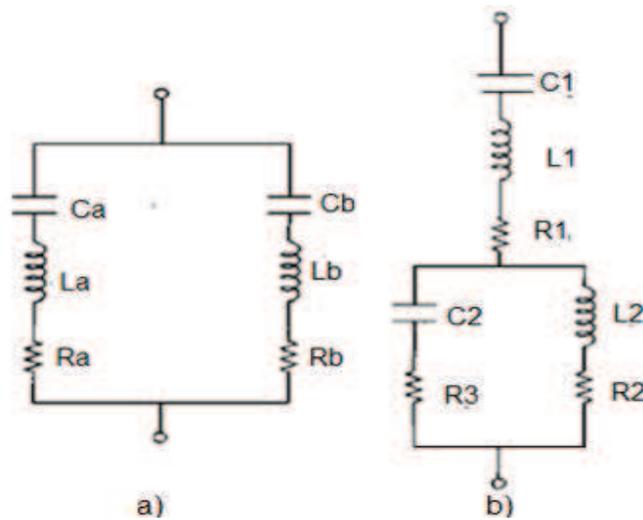
1. Tensión de operación es más alta debido a la presencia de reactores.
2. El suministro de tensión debe ser constante el mayor tiempo posible durante la operación del sistema de potencia.
3. Las tensiones más altas que serán impuestas cuando una o dos unidades de condensadores en paralelo salen de servicio. Los esquemas de detección de desbalanceo del neutro no toman un banco fuera de servicio si una o dos unidades están fuera de servicio, debido a que la operación del fusible en las unidades de condensadores es individual.

Generalmente, una operación de tensión ligeramente más alta que la tensión nominal del sistema es seleccionada, aunque los capacitores tengan una capacidad de sobretensión del 10%. Cuando los flujos de corrientes y tensiones armónicas son conocidas a través de formas armónicas de simulación. El incremento en la tensión del bus en el cambio de un condensador en un bus secundario del transformador es aproximadamente dado por:

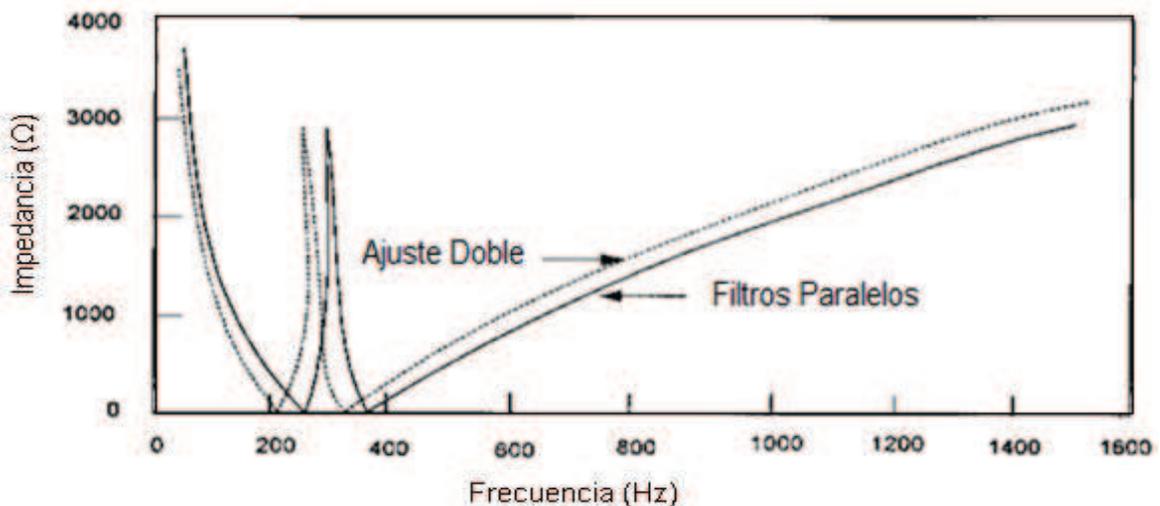
$$\% \Delta V = \frac{Kvar_{capacitor} Z_t}{KVA_t} \quad (2.26)$$

**2.4.2. Filtros de Ajuste Doble.**

Un filtro de ajuste doble es un derivado de 2 filtros de ajuste simple. Este se muestra en la figura 2.25 b), sus gráficas  $R-X$  y  $Z-\omega$  son idénticas ya que los dos filtros están en paralelo. La ventaja con respecto a dos filtros de ajuste simple es las pérdidas de potencia en la frecuencia fundamental es menor y un inductor en vez de dos inductores son sujetos a una tensión de impulso. En la figura 2.26 el BIL (Nivel Básico de Aislamiento) en el reactor  $L2$  es reducido mientras el inductor  $L1$  ve la tensión de impulso total. Esto es una ventaja en aplicaciones de altas tensiones.



**Figura 2.25.** a) Circuito de dos filtros de simple ajuste conectados en paralelos st, b) filtro de ajuste doble.



**Figura 2.26.** Gráficas  $Z-\omega$  de dos Filtros ST Paralelos y un Filtro Doblemente Ajustado.

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

Para transformar dos filtros ST de diferentes frecuencias en un solo filtro doblemente ajustado se considera que  $C_1$  y  $L_1$  son el equivalente del arreglo en paralelo de  $L_a$ ,  $L_b$  y  $C_a$ ,  $C_b$  respectivamente, por lo cual resulta en las siguientes ecuaciones.

$$C_1 = C_a + C_b \quad (2.27)$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{(L_a + L_b)} \quad (2.28)$$

Para el cálculo de  $C_2$  y  $L_2$  de las ramas en paralelo del filtro de ajuste doble se tienen las siguientes ecuaciones:

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(C_a L_a + C_b L_b)^2} \quad (2.29)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - C_b L_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \quad (2.30)$$

Para el cálculo de las resistencias de las ramas en paralelo es necesario calcular las siguientes constante, esto con el objetivo de facilitar el cálculo.

$$a = \frac{C_a}{C_b} \quad x = \sqrt{\frac{L_b C_b}{L_a C_a}} \quad (2.31)$$

En la determinación de  $R_1$  se toma el valor de la resistencia interna del inductor  $L_1$  esto debido a que físicamente el inductor tendrá una resistencia. Por último las resistencia  $R_2$  y  $R_3$  son calculadas con las siguientes ecuaciones, estas son deducidas a través del los equivalentes de  $R_a$  y  $R_b$  tomando en cuenta las capacitancias y las inductancias de los dos filtro sintonizados.

$$R_2 = R_a \left[ \frac{a^2(1-X^2)}{(1+a^2)(1+X^2)} \right] - R_b \left[ \frac{a^2(1-X^2)}{(1+a^2)(1+X^2)} \right] + R_1 \left[ \frac{a(1-a)(1-X^2)}{(1+a^2)(1+X^2)} \right] \quad (2.32)$$

$$R_3 = -R_a \left[ \frac{a^2 X^4 (1-X^2)}{(1+aX^2)^2 (1+X^2)} \right] + R_b \left[ \frac{(1-X^2)}{(1+aX^2)^2 (1+X^2)} \right] + R_1 \left[ \frac{(1-aX^2)(1-X^2)}{(1+X^2)(1+aX^2)} \right] \quad (2.33)$$

La ventaja con respecto a dos filtros de ajuste simple es que la pérdida de energía en la frecuencia fundamental es menor y un inductor en vez de dos está sujeto a un impulso de tensión completo. En la figura 2.25 el BIL (Nivel Básico de Aislamiento) en el reactor  $L_2$  es reducido mientras en reactor  $L_1$  ve la tensión de impulso completa.

---

### 2.4.3. Costos del Filtro de Ajuste Simple.

Un filtro efectivo reduce armónicos en el costo más bajo y suministra potencia reactiva, pero no toda la que es requerida. Las siguientes consideraciones son hechas en el análisis de costos de los componentes del filtro [8].

- En una instalación típica, un banco de capacitores consiste de una serie de unidades de capacitores, cada unidad tiene una capacidad nominal de la tensión de servicio establecida y protegida por un fusible externo. El costo de un banco de capacitores es aproximadamente constante hasta la capacidad del mínimo de unidades completas. Para capacidades más grandes, una o más unidades son adicionadas para cada grupo como sea requerido y una exactitud del costo por Mvar o el tamaño. La situación se complica aun más por las unidades con diferentes capacidades nominales, así el costo aumenta para diferentes tamaños de bancos de capacitores. Aunque algunos factores pueden ser incluidos en el desarrollo de la ecuación de costos, se asume que el costo de los capacitores es proporcional a sus capacidades.
- Aunque el costo de los inductores del filtro dependen principalmente del método de construcción, su costo no varía considerablemente con diferentes capacidades. La aproximación del costo usada en el análisis es de la siguiente forma:

$$\text{Costo del Inductor} = U_K + U_L \times (\text{Mvar totales})$$

Donde  $U_K$  es el costo constante del componente y  $U_L$  es el costo incremental por Mvar.

- La potencia de la resistencia necesaria para ajusta el factor de calidad en cada rama afectará el costos. Sin embargo, la resistencia nominal de la unidad es difícil predecir con un análisis por que depende del factor Q del inductor. Por esta razón, y también por el costo de un resistor con ventilación propia es pequeño comparado con los otros componentes, un costo constante por resistencia es asignado en el análisis. Si una unidad ventilada con aire es usada, el costo es significativo pero puede ser independiente de la potencia del filtro. Finalmente se asume que la resistencia del inductor, para propósito de la estimación de pérdidas, es constante en todas las frecuencias.

Costo del Filtro Sintonía Simple

En un circuito con un factor Q alto se asume que:

$$V_C = V_L + V_S \quad (2.34)$$

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

Donde  $V_C$ ,  $V_L$  y  $V_S$  representan la tensión del suministro, en el capacitor y en el inductor respectivamente. El tamaño del filtro se expresa por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{V_S^2}{X_C - X_L} \quad (2.35)$$

Donde  $X_C$  y  $X_L$  son las reactancias en la frecuencia fundamental del capacitor y del inductor. Pero para un filtro ajustado para la armónica  $n$ ,

$$X_0 = nX_L = X_C/n \quad (2.36)$$

Por lo cual:

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (2.37)$$

$$V_L = V_C/n^2 \quad (2.38)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.37 resulta:

$$S = \frac{V_S^2}{X_C(1 - \frac{1}{n^2})} = \left(\frac{V_S^2}{X_C}\right) \left[\frac{n^2}{(n^2-1)}\right] \text{ Mvar} \quad (2.39)$$

También:

$$V_S = V_C - V_L = V_C \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (2.40)$$

Despejando la tensión en el capacitor resulta:

$$V_C = V_S \left[\frac{n^2}{(n^2-1)}\right] \text{ kV} \quad (2.41)$$

Las cargas para cada componente del filtro son determinadas por la evaluación de costo que continuación se presenta.

### Capacitor.

Carga Fundamental:

$$\frac{V_C^2}{X_C} = \left(\frac{V_S^2}{X_C}\right) \left[\frac{n^2}{(n^2-1)}\right]^2 = S \left[\frac{n^2}{(n^2-1)}\right] \text{ Mvar} \quad (2.42)$$

Carga Armónica:

$$I_n^2 \left(\frac{X_C}{n}\right) = \left[\frac{(V_S^2 \times I_n^2)}{(S \times n)}\right] \left[\frac{n^2}{(n^2-1)}\right] \text{ Mvar} \quad (2.43)$$

## CAPÍTULO 2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UNA RED ELÉCTRICA.

---

Pérdidas:

$$K_{CL} \times (Carga\ Total) = K_{CL} \left[ \frac{S + (V_S^2 \times I_n^2)}{(S \times n)} \right] \left[ \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \right] kW \quad (2.45)$$

Donde  $K_{CL}$  es el factor de pérdidas de los capacitores (kW/Mvar).

### Inductor.

Carga Fundamental

$$\frac{V_C^2}{X_L} = \left( \frac{V_C}{n^2} \right)^2 \left( \frac{n^2}{X_C} \right) = \left[ \frac{V_C^2}{(n^2 X_C)} \right] = \left( \frac{S}{n^2} \right) \left[ \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \right] Mvar \quad (2.46)$$

El valor de la carga armónica es la misma que en el capacitor ya que las reactancias son iguales en la frecuencia armónica. Para propósitos de costo, se consideran las pérdidas en la resistencia efectiva total R, donde:

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{X_C}{Q \times n} \quad (2.47)$$

La corriente fundamental se calcula por la siguiente ecuación:

$$I_1 = \frac{S}{V_S} \text{ kA} \quad (2.48)$$

Las pérdidas totales son:

$$(I_1^2 + I_n^2)R = \left[ \left( \frac{S}{nQ} \right) + \frac{V_S^2 I_n^2}{(nS Q)} \right] \left[ \frac{(n^2)}{(n^2 - 1)} \right] \times 10^3 kW \quad (2.49)$$

Para propósitos de comparación, el costo de las pérdidas de energía son expresadas en términos del costo capital por el uso de un factor de valor presente:

$$P_v = \frac{[(1+i)^N - 1]}{[i(1+i)^N]} \quad (2.50)$$

Donde  $i$  es la tasa de interés y N son los gastos de la vida del filtro. Así el costo de valor presente de las pérdidas de energía es:

$$P_v U_u F_u \times 365 \times 24 \times (\text{pérdidas totales}) = 8760 P_v U_u F_u \times (\text{perdidas totales})$$

Donde  $U_u$  es el costo de la energía por kWh hora y  $F_u$  es factor de utilización. La expresión completa para el costo total es:

$$TCOST = U_T + AS + \frac{B}{S} \quad (2.51)$$

Donde  $U_T$  es el coto total constante del filtro de la rama,  $U_C$  es el costo incremental por Mvar,  $U_L$  es el costo incremental del inductor por Mvar.

$$A = \left[ \frac{(n^2)}{(n^2-1)} \right] \left[ U_C + \frac{U_L}{n^2} + 8760P_v U_u F_u \left( K_{CL} + \frac{10^3}{nQ} \right) \right] \quad (2.52)$$

$$B = \left[ \frac{(n^2)}{(n^2-1)} \right] \left[ \frac{V_S^2 I_n^2}{n} \right] \left[ U_C + U_L + 8760P_v U_u F_u \left( K_{CL} + \frac{10^3}{Q} \right) \right] \quad (2.53)$$

Así la ecuación para calcular la potencia mínima es:

$$S_{MIN} = \sqrt{\frac{B}{A}} \text{ Mvar} \quad (2.54)$$

### Limitaciones de los filtros pasivos.

Los filtros pasivos han sido ampliamente aplicados para el límite de la propagación armónica, mejorando la calidad de la energía y suministrando potencia reactiva simultáneamente. Estos pueden ser diseñados para aplicaciones de corrientes y tensiones grandes. Algunas de las limitantes de los filtros pasivos son mencionadas a continuación:

- Los filtros pasivos no se adaptan a los cambios de las condiciones y una vez instalados están rígidamente en el lugar. Aunque la frecuencia ajustada del filtro pueda ser cambiada fácilmente.
- Un cambio en las condiciones de operación o del sistema puede resultar en el incremento de la distorsión. Esto no se puede detectar a menos que un equipo de monitoreo en el lugar.
- Los filtros pasivos requerirán un número de ramas en paralelo. El corte de una unidad en paralelo altera la frecuencia de resonancia y los flujos de corrientes armónicas. Esto puede incrementar los niveles de distorsión.
- El envejecimiento, el deterioramiento y la temperatura afectan al desajuste del filtro de manera alternada (aunque el efecto máximo de variaciones puede ser considerado en el diseño).

## **CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.**

En este capítulo se presenta el procedimiento para desarrollar el diseño del filtro de armónicos, así como el cálculo de las pérdidas del mismo. Por último se presenta la simulación del filtro que sirvió de apoyo para observar comportamiento y obtener la distorsión armónica.

### 3.1. PROCEDIMIENTO PARA LA SOLUCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.

El diagrama de flujo de la figura 3.1, presenta la metodología que se utilizó en el desarrollo de este trabajo. La primera etapa que se cumplió es el análisis del caso de estudio, ya que se tomaron los monitores de parámetros realizados en la red. El segundo punto cumplido es el diseño del filtro tomando en cuenta la sensibilidad de los dispositivos a los valores de corriente y tensión. El tercer paso fue la simulación del filtro para la obtención de la distorsión armónica total. En el último bloque del diagrama se muestra una decisión que toma en cuenta el desempeño del filtro. En el caso de que el filtro no cumpla con los requerimientos se regresa a una etapa en la cual se determinan los cambios necesarios para que el filtro cumpla con los requerimientos y continúa con el diseño del filtro nuevamente.

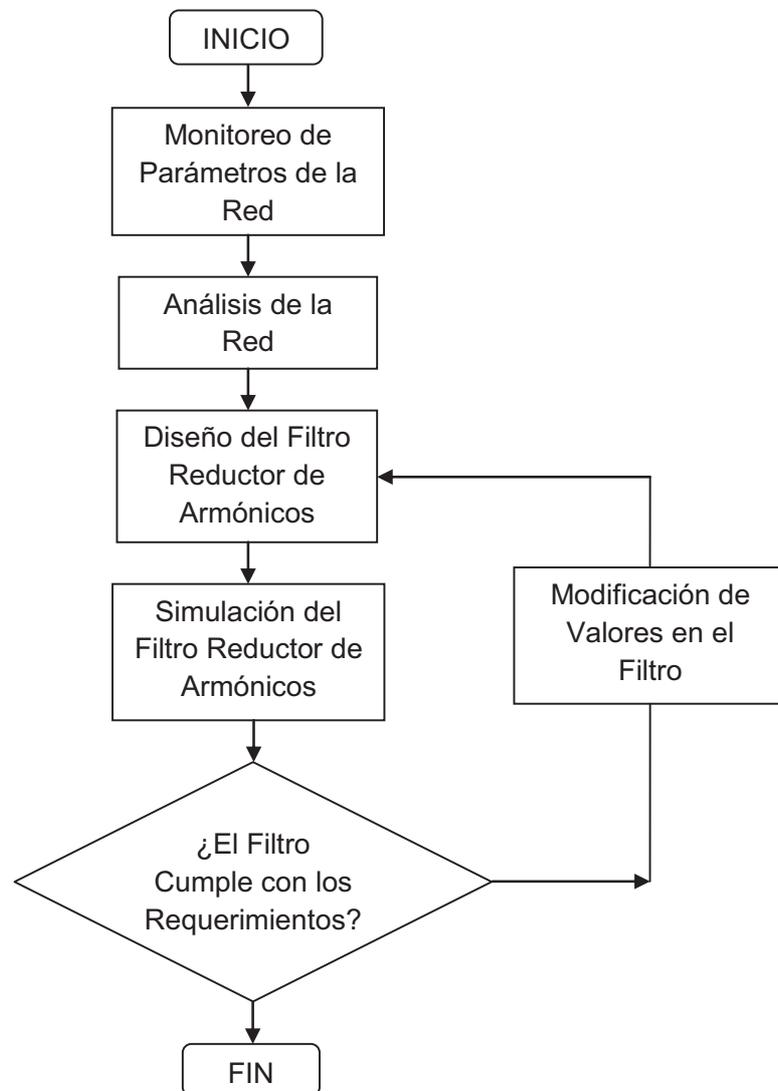
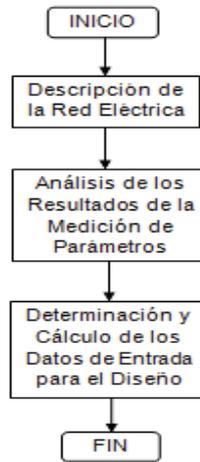


Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología general para el diseño del filtro.

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

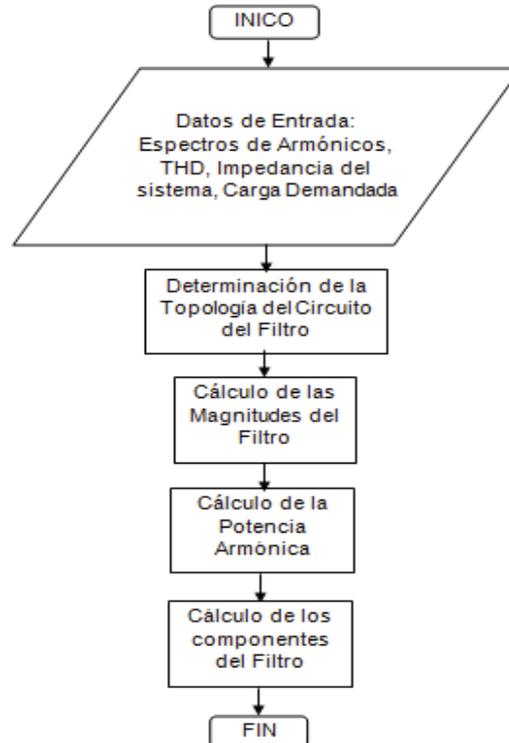
---

La figura 3.2 muestra el diagrama de flujo del análisis de la red de trenes eléctricos que se utilizó.



**Figura 3.2.** Diagrama de flujo del análisis del caso de estudio.

Para el diseño del filtro se realizó un diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.3, en este diagrama se describen todos los pasos que se siguieron durante el diseño del filtro.



**Figura 3.3.** Diagrama de flujo para el diseño del filtros.

Para verificar el funcionamiento correcto del filtro se utilizó la simulación como apoyo ya que con esta herramienta es posible observar el comportamiento del dispositivo. La figura 3.4 presenta el diagrama de flujo de la simulación del filtro. El diagrama comienza con el diseño del filtro el cual es el punto anterior es por ello que el primer bloque es el diseño del filtro.



**Figura 3.4.** Diagrama de flujo para la simulación del filtro.

En el último bloque del diagrama general se evalúa el desempeño del filtro, para considerar que el filtro cumple con los límites de distorsión armónica. Además se debe tomar en cuenta que los dispositivos operen a un  $\pm 5\%$  de sus valores nominales de capacitancia e inductancia. La tensión y corriente a la que trabajan estos dispositivos debe tomarse en cuenta también, para evitar sobrecalentamiento del filtro por un mal diseño.

### 3.2. ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO.

En este caso de estudio se realizó el monitoreo de parámetros con el objetivo de conocer el consumo de energía eléctrica y el factor de potencia debido a la aplicación de recargos en la facturación eléctrica por parte de la compañía suministradora de energía. Los resultados de la medición de parámetros demostraron que el factor de potencia era satisfactorio; sin embargo la distorsión armónica superó el límite por lo cual se recomendó instalar un filtro de armónicos para mitigar el efecto de este problema.

### 3.2.1. Descripción de la Red Eléctrica.

La Subestación Vallejo perteneciente al sistema eléctrico del tren suburbano es alimentada con una tensión de línea de 230 kV, la subestación tiene dos transformadores monofasicos de 20 MVA con niveles de tensión de 230/27.5 kV. Las catenarias del sistema de trenes están conectadas a una tensión de 27.5 kV, las cuales viajan por toda la trayectoria del tren. En la parte superior de los trenes se encuentran los pantógrafos, estos se conectan con las catenarias para alimentar los transformadores ubicados en las estructuras de los trenes. Los transformadores tienen la función de reducir la tensión proveniente de los pantógrafos y suministrar la energía al equipo de electrónica de potencia, el cual controla la velocidad de los motores asíncronos que impulsan los trenes.

La figura 3.5 muestra una representación del sistema eléctrico, en esta figura se observa que la alimentación individual de cada motor es mediante una configuración en paralelo. En el desarrollo de este trabajo se estudia el origen y el control de armónicos, por ello en el diagrama se muestra a las principales cargas generadoras de armónicos, para las demás cargas no se muestran los detalles de sus conexiones y se representan como si fuesen una carga lineal.

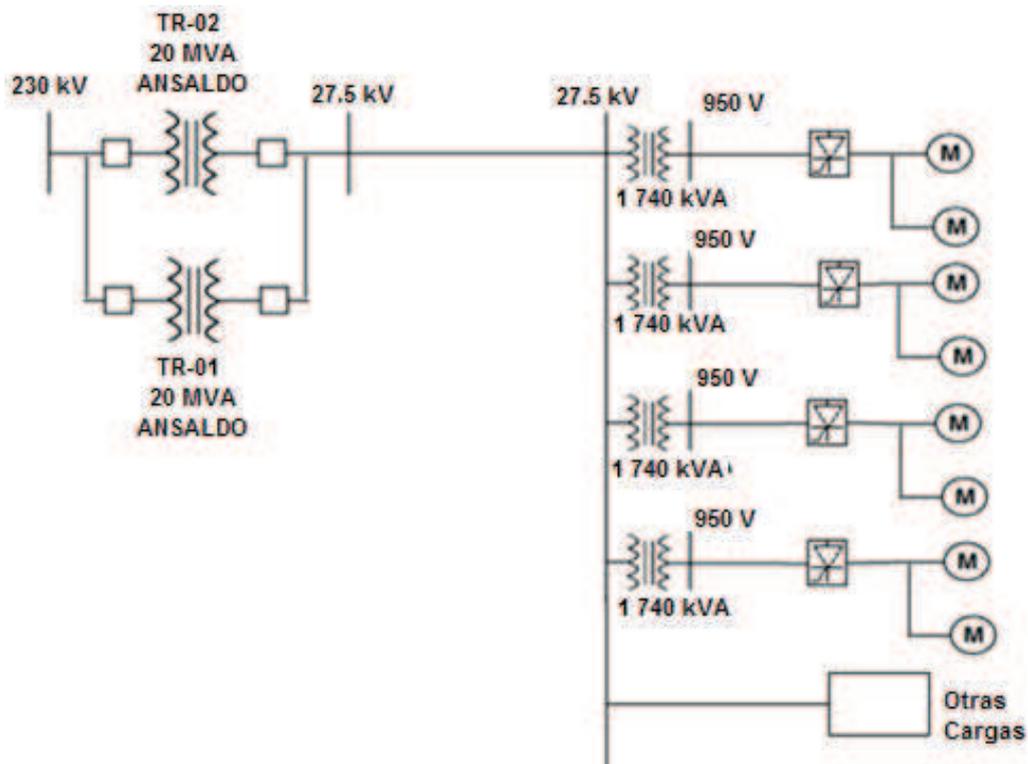


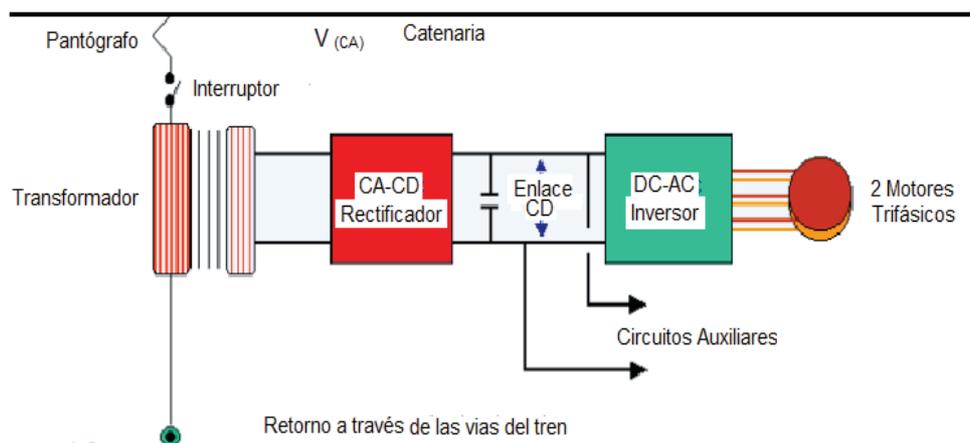
Figura 3.5. Diagrama del sistema suministrador de la red.

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

Los trenes del Suburbano Cuautitlán-Buenavista son unidades de tren eléctricas para transporte rápido y masivo de pasajeros en líneas con distancias cortas entre estaciones. La composición mínima de las unidades es una composición M-R-M, y la máxima es una composición M-R-N-M, siendo M un coche motor con cabina, R un coche remolque y N un coche motor sin cabina. Se conectan hasta tres unidades, ya sea en la configuración M-R-M o M-R-N-M, con cualquier tipo de combinación. La conexión entre unidades se lleva a cabo mediante enganche automático, con acoplamiento eléctrico, neumático y mecánico.

El equipo eléctrico está compuesto principalmente por dos equipos convertidor-inversor utilizando como equipo de electrónica de potencia IGBT's (Transistor Bipolar de compuerta Aislada) por cada coche motor, a los que están conectados cuatro motores asíncronos (dos por cada convertidor-inversor). La tensión de alimentación es de 25 kV y se dispone de dos transformadores en el coche R. Los equipos convertidor-inversor se conectan al secundario de estos transformadores.

La figura 3.7 muestra el esquema del circuito eléctrico utilizado para el control de los motores del coche motor, al inicio el pantógrafo está conectado a la catenaria y conecta a esta con el transformador. El lado secundario del transformador se conecta al rectificador, este convierte la corriente alterna a corriente directa. Por medio de un inversor compuesto de IGBT's se convierte la corriente directa a corriente alterna, la cual es utilizada para suministrar de energía a dos motores asíncronos trifásicos. El fin de utilizar corriente alterna es que por medio del control de los IGBT's se puede suministrar corriente alterna trifásica variable en tensión y frecuencia a los motores asíncronos.

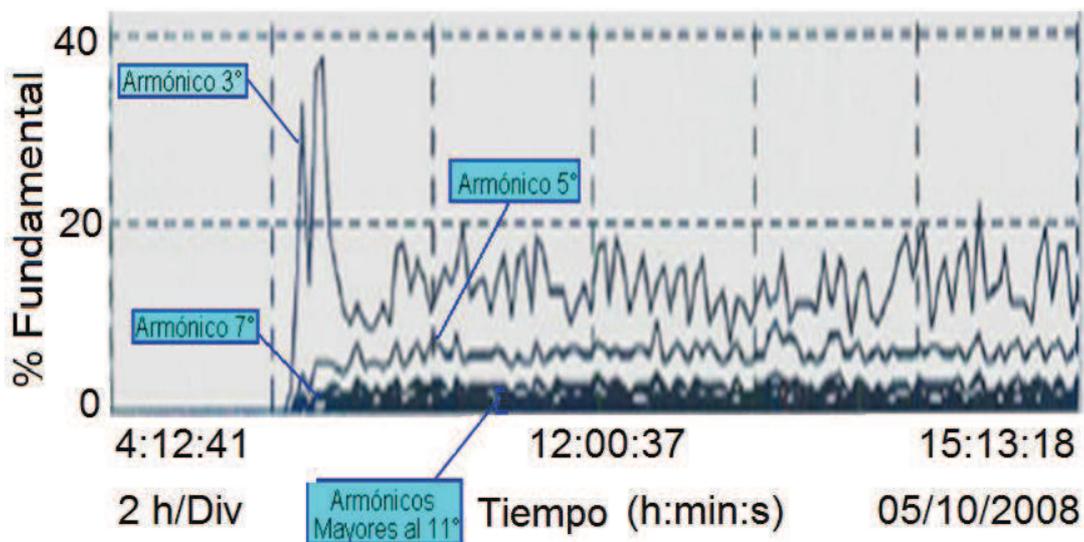


**Figura 3.6.** Diagrama esquemático del circuito para la alimentación de los motores.

### 3.2.2. Medición de los Parámetros del Sistema.

Para el monitoreo de los parámetros eléctricos se dispuso de un analizador de redes AEMC Modelo 3945, el cual fue colocado en el lado secundario del transformador TR-01 monofásico marca ANSALDO de 20 MVA, 230/27.5 kV. El periodo del monitoreo que se utilizó fue de una semana con un intervalo de 5 minutos entre medición. A partir de los datos registrados se obtuvo el análisis del consumo de energía, la regulación, la frecuencia, el factor de potencia y la distorsión armónica total.

Todos los parámetros monitoreados fueron satisfactorios excepto el de la distorsión armónica la cual sobrepasó su límite. La distorsión armónica total máxima obtenida en el monitoreo de parámetros fue de 37.7 % de distorsión de la onda fundamental. En la figura 3.7 se muestra la gráfica resultante del monitoreo de parámetros en el intervalo de tiempo en que se produjo la mayor contaminación armónica en el sistema.

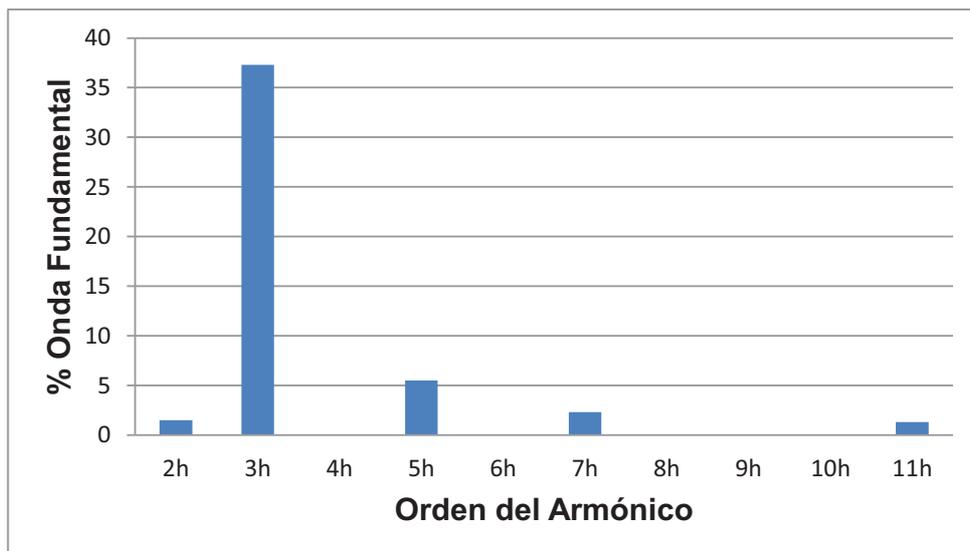


**Figura 3.7.** Valor máximo de la contaminación armónica obtenido en el monitoreo de parámetros.

La gráfica muestra los valores de la distorsión armónica de cada uno de los armónicos que estuvieron presentes durante este intervalo de tiempo, la figura 3.8 muestra el porcentaje de cada uno de los armónicos. Cabe mencionar que el tercer y quinto armónico son los de mayor magnitud con un valor de 37.3% y 5.5 % de distorsión de la onda fundamental.

Es posible determinar el tiempo que se presentó la mayor contaminación armónica calculando si se observa la gráfica de la figura 3.7, en esta el eje que representa al tiempo está dividido en segmentos equivalentes a dos horas, el tiempo en que hubo mayor contaminación armónica es aquel en que las curvas de cada armónico alcanzaron sus valores mayores. La gráfica muestra que el tiempo donde se tuvo la mayor contaminación fue en el segundo intervalo donde la distorsión mayor de cada armónico se presenta en aproximadamente un cuarto del segmento de tiempo, lo cual indica que la distorsión duró 30 min.

La gráfica de las barras de la figura 3.7 muestra el valor de cada uno de los armónicos de mayor magnitud, en esta gráfica se muestra solo hasta el armónico 12 debido a que la magnitud de los siguientes armónicos son menores a uno. Comparando los armónicos subsiguientes al armónico 12 con el armónico de mayor magnitud, se pueden omitir a estos en la gráfica debido a su magnitud.



**Figura 3.8.** Gráfica de los espectros armónicos de magnitud mayor.

### 3.2.3. Determinación de los Valores para el Diseño del Filtro.

El principal origen de la contaminación armónica dentro de la red se debe al uso de equipos convertidores electrónicos de potencia, este equipo está conformado por convertidores e inversores. Los rectificadores son utilizados en los trenes para rectificar la corriente alterna proveniente del lado secundario del transformador y hacerla pasar por el inversor, que la convierte de corriente directa a corriente alterna.

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

Los rectificadores no demandan una corriente senoidal debido a que este equipo está diseñado para lograr conmutaciones rápidas, el efecto de esta característica origina la distorsión de la onda de corriente que suministra el sistema. Tanto el usuario de energía como el suministrador son afectados por este fenómeno ya que los armónicos circulan por toda la red e incluso se propagan por redes vecinas, debido a que circulan por la red del suministrador.

La carga más grande conectada en el sistema son los motores que impulsan los trenes; sin embargo, el problema surge debido a que estos motores son alimentados y controlados por equipo de electrónica de potencia, por lo que este equipo es el principal causante de la contaminación armónica. El monitoreo de los armónicos fue realizado en el lado de baja tensión de los transformadores. Las mediciones mostraron que en los dos transformadores se tiene una distorsión armónica, en la que predomina el tercer y quinto armónico, estos son efecto del funcionamiento de los rectificadores e inversores.

Se tomó como el primer punto común de acoplamiento (PCC-1) el lado de alta tensión de los transformadores debido a que este es el punto donde el usuario y el suministrador se conectan, el segundo punto común de acoplamiento (PCC-2) designado fue el lado de baja tensión. Los niveles de cortocircuito fueron calculados en los dos puntos seleccionados y se presentan a continuación.

**Tabla 3.1.** Niveles de cortocircuito del punto PCC-1.

Punto de Interconexión PCC-1			
MVACC 3Φ	MVAICC 1Φ	ICC 3Φ (A)	ICC 1Φ (A)
3491.69	4829.4	8764.14	12120
Impedancia sec(+) pu		Impedancia sec(0) pu	
0.002283+j0.02058		0.008029+j0.04383	
ICC1Φ (pu)	ICC3Φ (pu)	Zbase	Ibase
34.91 cis-81.5	48.29 cis-83.6	529	251.02

**Tabla 3.2.** Niveles de cortocircuito del punto PCC-2.

Punto de Interconexión PCC-2			
MVACC 3Φ	MVAICC 1Φ	ICC 3Φ (A)	ICC 1Φ (A)
786	834	2093.94	1966.8
Impedancia sec(+)		Impedancia sec(0)	
0.002283+j0.11988		0.008029+j0.14313	
ICC pu 1Φ	ICC pu 3Φ	Zbase	Ibase
7.86 cis-88.1	8.34 cis-88.9	7.5625	1212.10909

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

La demanda máxima que se obtuvo durante el monitoreo de parámetros es la que se tomó para el cálculo de la corriente su valor es de 12 581.6 kW y 741.35 kvar lo que equivale a 12 603.5 kVA. El cálculo realizado para la obtención de la corriente fue el siguiente:

$$I_{PCC1} = \frac{12603.5 \times 10^3}{230 \times 10^3} = 54.8 \text{ A}$$

$$I_{PCC2} = \frac{12603.5 \times 10^3}{27.5 \times 10^3} = 458.3 \text{ A}$$

Para el cálculo de la impedancia equivalente del sistema se tomaron los valores de cortocircuito de la subestación que alimenta al usuario y se sumo el valor de impedancia de la línea de transmisión, el resultado obtenido se muestra en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Impedancia equivalente en el PCC-2.

Reactancia y Resistencia en PCC-2	
Impedancia (pu)	Impedancia ( $\Omega$ )
0.002283+j0.11988	1.2077+j63.416
Resistencia ( $\Omega$ )	Inductancia (H)
1.207707	0.16821715

El resultado del cálculo de la corriente de cortocircuito en el PCC-1 es 2 093 A, lo cual resultó en una relación ( $I_{cc}/I_L$ ) de 22. De acuerdo a la norma IEE 519. Para una relación de  $I_{cc}/I_L$  con un nivel de tensión de 230 kV, el límite para la distorsión demandada total ( $h < 11$ ) debe ser **< 2.5%**. El cálculo de la distorsión armónica total demandada resultó al utilizar la ecuación 2.10 como se muestra a continuación.

$$TDD = \frac{\sqrt{(460 \times 0.373)^2 + (460 \times 0.055)^2 + (460 \times 0.023)^2 + (460 \times 0.013)^2}}{460} \times 100 = 37.7\%$$

El resultado muestra que la distorsión armónica en la red supera el límite que marca la norma.

Se designó como el PCC-2 a la barra de baja tensión de los transformadores, lugar donde se realizó la medición de parámetros. La corriente de cortocircuito en este punto es de 10 108 A con una relación ( $I_{cc}/I_L$ ) 38. De acuerdo con la norma IEE 519, en este punto del sistema el límite de distorsión demandada total debe ser **< 8%**, sin embargo la distorsión demandada total es de **37.7 %**.

### 3.2.4. Simulación del Sistema de Suministro de Energía.

Calculados los componentes para el filtro del tercer armónico, se procedió a simular el sistema de suministro de energía de la red y así obtener los valores de la distorsión armónica demandada sin el filtro. En el estudio de la distorsión armónica de una red, la carga total que alimenta el sistema eléctrico de potencia (compañía suministradora) se puede representar como una serie de fuentes de corrientes armónicas que sumadas con la corriente fundamental originan una forma de onda de corriente distorsionada. En la figura 3.9 se muestra el circuito que representa el suministro de la red de trenes eléctricos.

En la figura 3.9 el sistema eléctrico de potencia es equivalente a una fuente en serie con una impedancia equivalente de Thevenin, que representa la impedancia equivalente del sistema eléctrico visto desde el PCC-2 hacia el sistema. Las fuentes de corriente conectadas en el lado derecho del PCC-2 representan la carga que alimenta la subestación eléctrica, que es la red de trenes eléctricos.

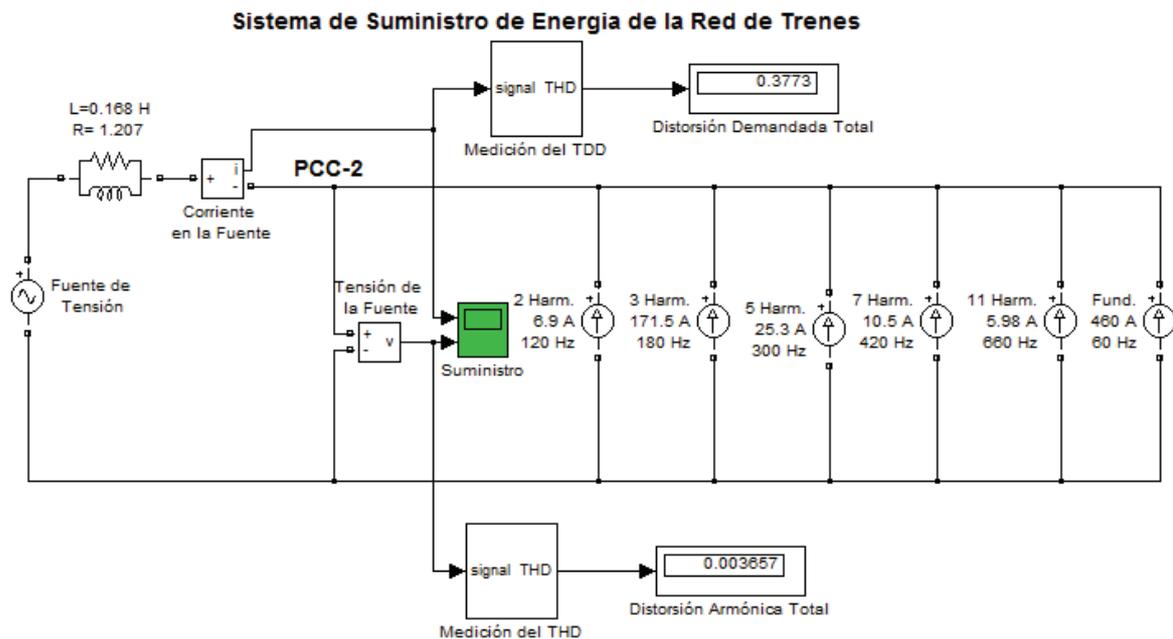
Cada fuente de corriente representa al armónico existente en la red, el cual, según el orden del armónico es un múltiplo de la forma de onda fundamental y donde la magnitud del armónico se calcula despejando la corriente armónica de la ecuación 3.12. A continuación se presenta el cálculo de la corriente de cada armónico, tomando los resultados de la distorsión armónica individual obtenidos en la medición de parámetros realizada.

$$I_{2h} = \frac{1.5\%}{100} \times 460 \text{ A} = 6.9 \text{ A} \qquad I_{3h} = \frac{37.3\%}{100} \times 460 \text{ A} = 171.58 \text{ A}$$

$$I_{5h} = \frac{5.5\%}{100} \times 460 \text{ A} = 25.3 \text{ A} \qquad I_{7h} = \frac{2.3\%}{100} \times 460 \text{ A} = 10.58 \text{ A}$$

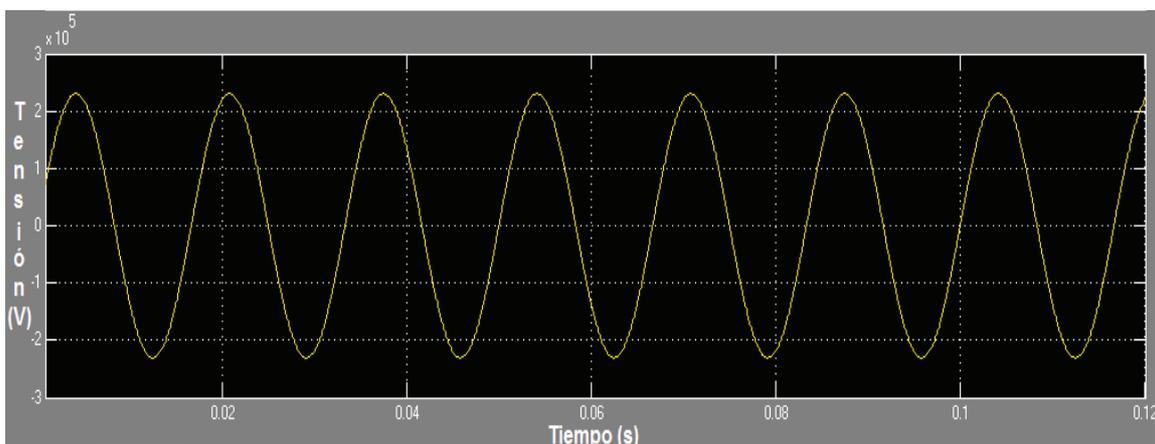
$$I_{11h} = \frac{1.3\%}{100} \times 460 \text{ A} = 5.98 \text{ A}$$

Estos resultados se insertaron en las características de cada una de las fuentes de corriente junto con la frecuencia, la cual se obtuvo multiplicando el orden del armónico por la frecuencia fundamental (60Hz).



**Figura 3.9.** Simulación del suministro de energía de trenes.

Como se observa en la figura 3.9 el valor del THD es de 0.36%, lo cual provoca la forma de onda de la tensión mostrada en la figura 3.10, en esta forma de onda la distorsión es mínima por lo que no existen perturbaciones considerables en la forma de onda. La figura 3.9 muestra también que el valor del TDD es de 37.7%, este porcentaje de distorsión provoca la forma de onda mostrada en la figura 3.11, en esta se observan perturbaciones considerables ya que en la distorsión en esta onda es del 37.7%. Se verificaron los valores del TDD y el THD con los resultados de la medición de parámetros, los cuales resultaron ser cercanos, por lo que con ello se pudo simular las condiciones del sistema.



**Figura 3.10.** Forma de onda de la tensión suministrada (sin el filtro).



Figura 3.11. Forma de onda de la corriente de alimentación (sin el filtro).

### Validación de la Simulación del Sistema.

Para sustentar la simulación del sistema de suministro de energía se comparó los valores de distorsión armónica medidos con los que resultaron de la simulación. Los valores de distorsión de la corriente (TDD) y la tensión (THD) son los que se tomaron para realizar la validación. La tabla 3.4 muestra los resultados. El error obtenido al comparar el THD es considerable, sin embargo, como el filtro tiene la finalidad de reducir la distorsión de la corriente principalmente se tomó como aceptable este valor. El error al comparar el TDD resultó ser aceptable, ya que su valor es mínimo, lo cual indica que la simulación tiene las características para representar el sistema.

Tabla 3.4. Resultados de la Validación de la Simulación

Factores de Distorsión			
	Medición	Simulación	% Error
THD %	0.3	0.3667	18.1892555
TDD %	37.7	37.73	0.07951232

## 3.3. PROPUESTA DEL DISEÑO DEL FILTRO.

### 3.3.1. Filtro para el Tercer Armónico.

La ubicación donde se propuso conectar el filtro es en el PCC-2, la figura 3.12 muestra un diagrama con el filtro conectado a la red en este diagrama se representa un equivalente de todas las cargas no lineales y un equivalente de las cargas lineales conectadas en paralelo con el filtro de armónicos.

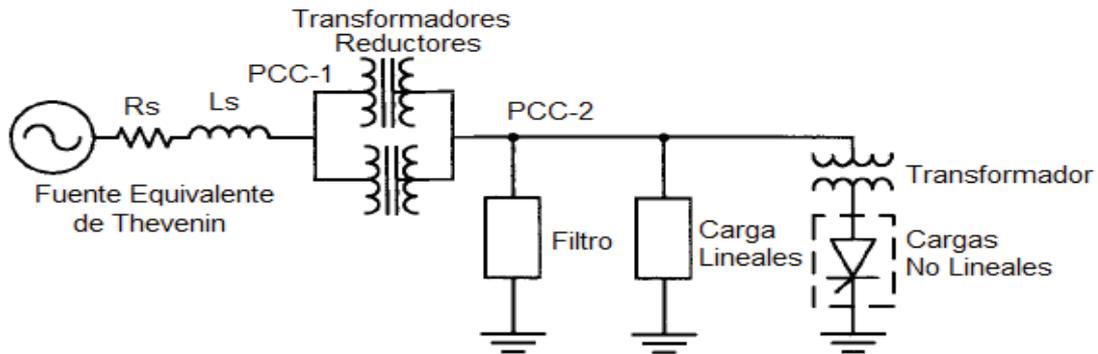


Figura 3.12. Punto de conexión de filtro.

El flujo de las corrientes armónicas en el sistema se presenta en la figura 3.13 donde la impedancia del filtro debe ser menor a la del sistema para que la mayoría corriente armónica circule por él y aislar al sistema de las corrientes armónicas.

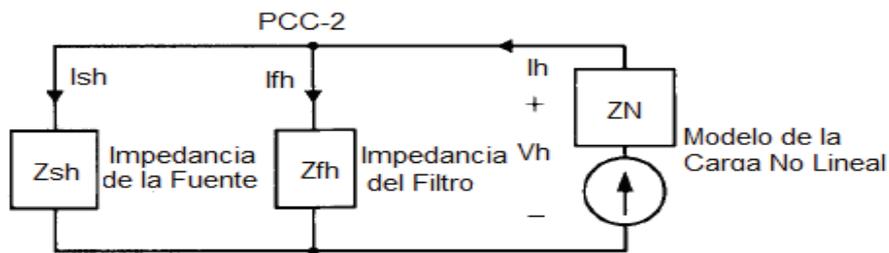
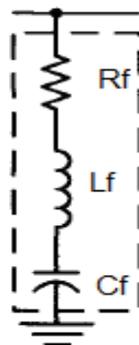


Figura 3.13. Flujo de las Corrientes armónicas.

El filtro propuesto es un filtro de ajuste simple diseñado para reducir el tercer armónico, ya que como se observa en la grafica de los espectros armónicos de la figura 3.8 éste armónico es el de mayor magnitud. Este filtro presenta un arreglo RLC que presenta una baja impedancia a tierra cuando entra en resonancia y una impedancia grande cuando existen otras frecuencias diferentes a la de resonancia. La figura 3.14 muestra la topología del filtro.



### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

**Figura 3.14.** Topología del filtro.

Para el cálculo del condensador se utilizó la potencia reactiva que demanda el sistema, la cual fue medida en los dos transformadores durante la medición de parámetros del sistema. El cálculo fue el siguiente.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 = 324.59 \text{ kvar} + 416.76 \text{ kvar} = 741.35 \text{ kvar}$$

La reactancia capacitiva se calculó tomando una tensión de 27.5 kV:

$$X_C = \frac{(27.5 \text{ kV})^2}{0.7413 \text{ Mvar}} = 1020.09 \Omega$$

La capacitancia en la frecuencia nominal (60Hz) es:

$$C = \frac{1}{2(\pi)(60 \text{ Hz})(1020.09 \Omega)} = 2.6 \times 10^{-6} \text{ F}$$

Con la ecuación 2.18 se calculó la reactancia inductiva del filtro:

$$X_L = \frac{1020.09 \Omega}{3^2} = 113.34 \Omega$$

Por lo que la inductancia del filtro es:

$$L = \frac{113.34 \Omega}{(2 \times \pi \times 60 \text{ Hz})} = 0.30065 \text{ H}$$

Utilizando la ecuación 2.17 se calculó la reactancia del filtro cuando entra en resonancia:

$$X_0 = \sqrt{\frac{300.65 \times 10^{-3} \text{ H}}{2.6 \times 10^{-6} \text{ F}}} = 340.05 \Omega$$

Para el cálculo de la resistencia se utilizó la ecuación 2.19 y se utilizó un valor típico del factor de calidad del filtro (Q) de 100.

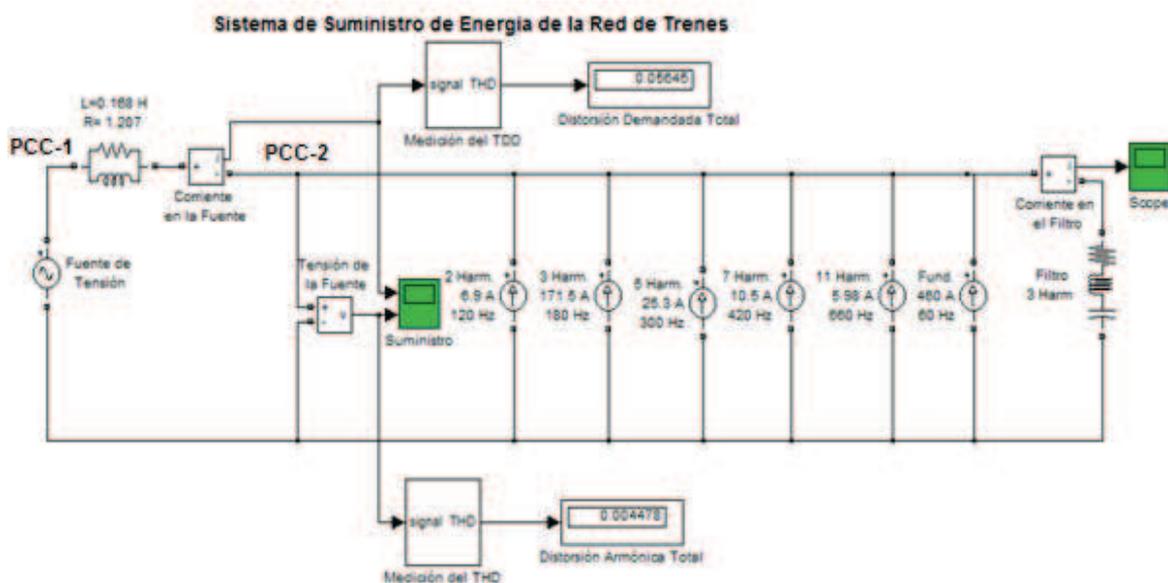
$$R = \frac{340.24 \Omega}{100} = 3.4 \Omega$$

La potencia reactiva que consumirá el filtro en la frecuencia nominal es la siguiente.

$$Q_{Filtro} = \frac{(27.5 \times 10^3 V)^2}{1020.09 \Omega - 113.47 \Omega} = 834\,142 \text{ var} = 834.14 \text{ kvar}$$

### Simulación del Filtro del Tercer Armónico.

El filtro calculado se conectó en paralelo con las fuentes de corrientes armónicas y el sistema de simunitro de energía, esto con el objetivo de que el filtro brinde una impedancia baja a la corriente del tercer armónico y con ello reducir el TDD a los niveles que marca la norma. El diagrama eléctrico para la simulación del filtro se muestra en la figura 3.15, la distorsión de la corriente disminuyó hasta un 5.64% y el valor de la distorsión de la tensión fue de 0.4%.



**Figura 3.15.** Diagrama eléctrico para la simulación del filtro del tercer armónico conectado a la red.

Como se observa en la figura anterior el TDD disminuye hasta a un valor de 5.64%. La norma IEEE 519 establece que para un sistema con un nivel de tensión menor a 69 kV y una relación  $I_{SC} / I_L$  mayor a 20, la distorsión demandada total debe ser menor a 8%, por lo que el sistema se encuentra dentro de los límites de la norma. Sin embargo en el PCC-1 se tiene un nivel de tensión y una relación  $I_{SC} / I_L$  diferente, para un nivel de tensión mayor a 161 kV y un relación  $I_{SC} / I_L$  mayor a 50 el TDD debe ser menor al 2.5%, por lo cual en el PCC-2 el filtro no reduce la

distorsión armónica en la corriente como para cumplir con la norma IEEE 519. Para reducir la distorsión armónica a un 2.5% se propuso diseñar un filtro para el tercer y quinto armónico, ya que el armónico que distorsiona más la onda de corriente después del tercer armónico es el quinto. Las formas de onda de la corriente y de la tensión resultante se muestra en el capítulo cuatro en la figura 4.3 b) y en la figura 4.2 respectivamente.

### 3.3.2. Filtro para el Tercer y Quinto Armónico.

La ubicación donde se propuso conectar este filtro es la misma que para el filtro del tercer armónico, donde las cargas no lineales conectadas en paralelo con el filtro de armónicos. Al igual que en el filtro del tercer armónico los flujos de corriente armónica se divide entre la rama del filtro y la rama del suministro eléctrico.

El filtro que se propuso son dos filtros de ajuste simple conectados en paralelo, los cuales uno se ajustó para reducir el flujo de corrientes del tercer armónico por la fuente y el otro para reducir el flujo de corrientes armónicas del quinto armónico por la fuente. Este filtro presenta dos arreglos RLC que presenta una baja impedancia a tierra cuando entra en resonancia y una impedancia grande cuando existen otras frecuencias diferentes a la de resonancia. La figura 3.16 muestra la topología del filtro.

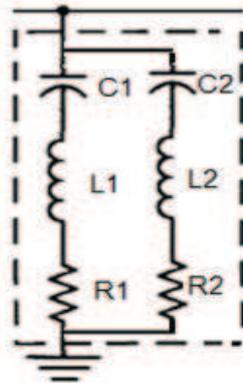


Figura 3.16. Topología del filtro del tercer y quinto armónico.

Para el cálculo de los capacitores se dividió la potencia reactiva total entre los dos filtros, ya que la potencia reactiva total que demanda el sistema debe ser la misma, por lo que varía el número de condensadores. El cálculo fue el siguiente.

$$Q_c = \frac{741.35 \text{ kvar}}{2} = 370.67 \text{ kvar}$$

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

La reactancia capacitiva se calculó tomando una tensión de 27.5 kV; teniéndose:

$$X_C = \frac{(27.5 \text{ kV})^2}{0.37067 \text{ Mvar}} = 2040.22 \Omega$$

La capacitancia en la frecuencia nominal (60Hz) resultó:

$$C = \frac{1}{2(\pi)(60 \text{ Hz})(2040.19 \Omega)} = 1.3 \times 10^{-6} \text{ F} = 1.3 \mu\text{F}$$

Este se tomo como el valor de los capacitores C1 y C2. De la ecuación 2.18 se calculó la reactancia inductiva  $X_{L1}$  y  $X_{L2}$ :

$$X_{L1} = \frac{2040.19 \Omega}{3^2} = 226.68 \Omega \qquad X_{L2} = \frac{2040.19 \Omega}{5^2} = 81.607 \Omega$$

Obtenidas las reactancias inductivas de cada inductor se calcularon las inductancias  $L_1$  y  $L_2$ .

$$L_1 = \frac{226.68 \Omega}{(2 \times \pi \times 60 \text{ Hz})} = 0.6013 \text{ H} = 601.3 \text{ mH}$$

$$L_2 = \frac{81.67 \Omega}{(2 \times \pi \times 60 \text{ Hz})} = 0.2164 \text{ H} = 216.4 \text{ mH}$$

Utilizando la ecuación 2.17 se calculó la reactancia del filtro del tercer y quinto armónico cuando entran en resonancia:

$$X_{03h} = \sqrt{\frac{601.3 \times 10^{-3} \text{ H}}{1.3 \times 10^{-6} \text{ F}}} = 680.1 \Omega$$

$$X_{05h} = \sqrt{\frac{216.4 \times 10^{-3} \text{ H}}{1.3 \times 10^{-6} \text{ F}}} = 407.99 \Omega$$

Para el cálculo de las resistencias R1 y R2 se utilizó la ecuación 2.19, además se empleó un valor típico del factor de calidad del filtro (Q) de 100.

$$R_1 = \frac{680.1 \Omega}{100} = 6.8 \Omega$$

## CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

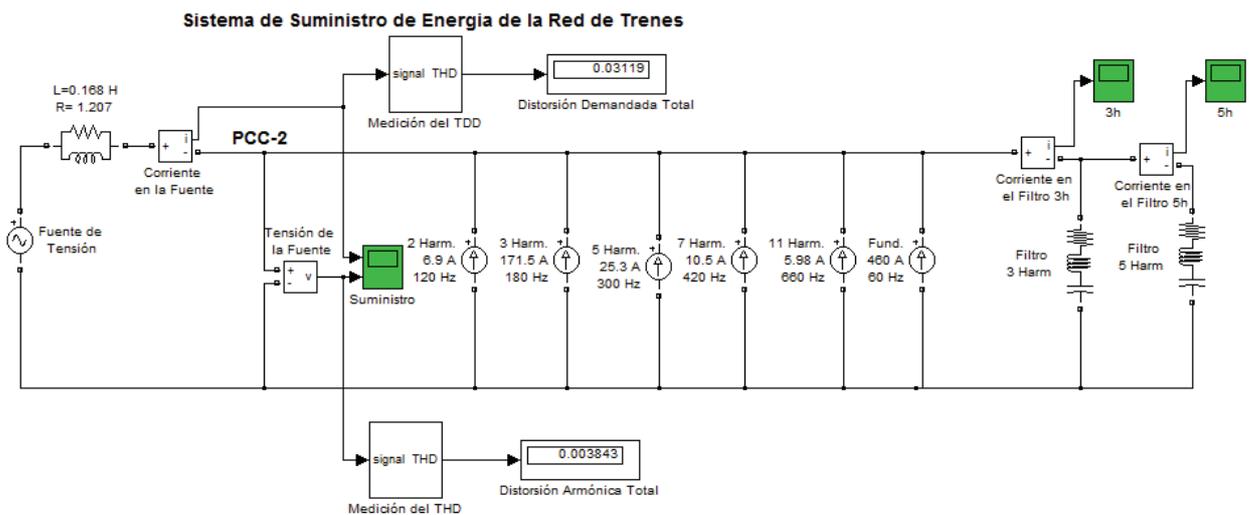
$$R_2 = \frac{407.99 \Omega}{100} = 4.07 \Omega$$

La potencia reactiva total que consumirá el filtro en la frecuencia nominal es la suma de la potencia del arreglo para el tercer armónico y el arreglo para el quinto armónico. A continuación se muestra el cálculo realizado.

$$Q_{Filtro} = \frac{(27.5 \times 10^3 V)^2}{2040.19 \Omega - 226.68 \Omega} + \frac{(27.5 \times 10^3 V)^2}{2040.19 \Omega - 81.607 \Omega} = 803\,129 \text{ var}$$

### Simulación del Filtro del Tercer y Quinto Armónico.

Con los datos del diseño del filtro del tercer y quinto armónico se conectó otro arreglo RLC en paralelo con el filtro que se había conectado en el arreglo anterior, así se cambiaron los datos de ambos arreglos para reducir la distorsión generada por el tercer y quinto armónico. El diagrama eléctrico para la simulación del filtro se muestra en la figura 3.17, la distorsión de la corriente disminuyó hasta un 3% y el valor de la distorsión de la tensión permaneció en un valor pequeño de 0.38%.



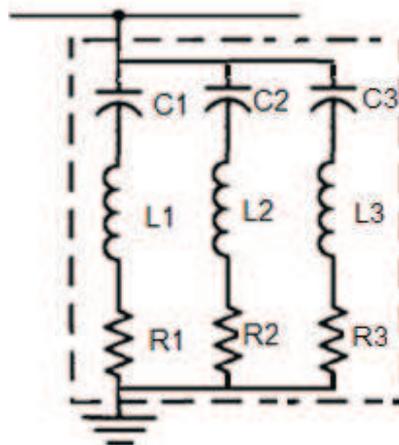
**Figura 3.17.** Diagrama eléctrico para la simulación del filtro del tercer y quinto armónico conectado a la red.

Como se observa en la figura 3.17 el TDD disminuye a un valor de 3% y el THD disminuyó a un valor del 0.38%, sin embargo el valor del TDD no cumplía con las indicaciones norma IEEE 519 para las condiciones del sistema. Es por ello que se decidió plantear un nuevo arreglo RLC para reducir la distorsión provocada por el armónico séptimo ya que este es el de mayor magnitud des pues del tercer y quinto armónico. Las formas de onda de la corriente y de la tensión resultante se muestra en el capítulo cuatro en la figura 4.6 b) y en la figura 4.5 respectivamente.

**3.3.3. Filtro para el Tercer, Quinto y Séptimo Armónico.**

La ubicación donde se propuso conectar este filtro es la misma que para los filtros anteriormente planteados, donde las cargas no lineales conectadas en paralelo con el filtro de armónicos. Al igual que en el filtros anteriores los flujos de corriente armónica se dividirá entre la rama del filtro y la rama del suministro eléctrico.

El filtro que se propuso son tres filtros de ajuste simple conectados en paralelo, los cuales uno se ajustó para reducir el flujo de corrientes del tercer armónico, otro para reducir la corriente del quinto armónico y el último para reducir la corriente del séptimo armónico. Este filtro presenta tres arreglos RLC que presenta una baja impedancia a tierra cuando entra en resonancia y una impedancia grande cuando existen otras frecuencias diferentes a la de resonancia en que se ajustaron. La figura 3.18 muestra la topología del filtro.



**Figura 3.18.** Topología del filtro del tercer, quinto y séptimo armónico.

Para el cálculo de los condensadores se dividió la potencia reactiva total entre los tres filtros, ya que la potencia reactiva total que demanda el sistema debe ser la misma, puesto solo varía el número de condensadores. El cálculo fue el siguiente.

$$Q_c = \frac{741.35 \text{ kvar}}{3} = 247.11 \text{ kvar}$$

La reactancia capacitiva se calculó tomando una tensión de 27.5 kV:

$$X_c = \frac{(27.5 \text{ kV})^2}{0.247116 \text{ Mvar}} = 3\,060.295 \, \Omega$$

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

La capacitancia en la frecuencia nominal (60Hz) resultó de la siguiente operación en:

$$C = \frac{1}{2(\pi)(60 \text{ Hz})(3060.37 \Omega)} = 0.86677 \times 10^{-6} F = 0.86677 \mu F$$

Este se tomo como el valor de los condensadores C1, C2 y C3. De la ecuación 2.18 se calculó la reactancia inductiva  $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$ , y  $X_{L3}$  el cálculo fue el siguiente:

$$X_{L3} = \frac{3060.295 \Omega}{3^2} = 340.0328 \Omega \qquad X_{L5} = \frac{3060.295 \Omega}{5^2} = 122.4118 \Omega$$

$$X_{L7} = \frac{3060.37 \Omega}{7^2} = 62.455 \Omega$$

Así al haber obtenido las reactancias inductivas de cada inductor se calcularon las inductancias  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ .

$$L_1 = \frac{340.04 \Omega}{(2 \times \pi \times 60 \text{ Hz})} = 0.90196 H = 901.96 mH$$

$$L_2 = \frac{122.41 \Omega}{(2 \times \pi \times 60 \text{ Hz})} = 0.324707 H = 324.707 mH$$

$$L_3 = \frac{62.455 \Omega}{(2 \times \pi \times 60 \text{ Hz})} = 0.16566 H = 165.66 mH$$

Utilizando la ecuación 2.17 se calculó la reactancia del filtro del tercer, quinto y séptimo armónico cuando entran en resonancia, lo que resultó en lo siguiente:

$$X_{03h} = \sqrt{\frac{0.9019 H}{0.866 \times 10^{-6} F}} = 1020.51 \Omega$$

$$X_{05h} = \sqrt{\frac{0.3247 H}{0.866 \times 10^{-6} F}} = 612.32 \Omega$$

$$X_{07h} = \sqrt{\frac{0.1656 H}{0.866 \times 10^{-6} F}} = 437.29 \Omega$$

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

Para el cálculo de las resistencias R1, R2 y R3 se utilizó la ecuación 2.19, además se utilizaron valores del factor de calidad del filtro (Q) de 1000 para el arreglo del tercer armónico y de 200 para los arreglos del quinto y séptimo armónico. El valor del factor de calidad del tercer armónico se determinó por el valor de la impedancia de thevenin, debido a que esta es muy pequeña y el filtro debe tener una impedancia menor.

$$R_1 = \frac{1020.57 \Omega}{1000} = 1.02 \Omega$$

$$R_2 = \frac{612.3 \Omega}{200} = 3.06 \Omega$$

$$R_3 = \frac{437.2 \Omega}{200} = 2.18 \Omega$$

La potencia reactiva total que consumirá el filtro en la frecuencia nominal es la suma de la potencia del arreglo para el tercer armónico y el arreglo para el quinto armónico. A continuación se muestra el cálculo realizado.

$$Q_{Filtro} = \frac{(27.5 \times 10^3 V)^2}{3060.37 \Omega - 1020.51 \Omega} + \frac{(27.5 \times 10^3 V)^2}{3060.37 \Omega - 612.3 \Omega} + \frac{(27.5 \times 10^3 V)^2}{3060.37 \Omega - 437.2 \Omega}$$
$$Q_{Filtro} = 790\,949.2 \text{ var} = 790.94 \text{ kvar}$$

#### **Simulación del Filtro del Tercer, Quinto y Séptimo Armónico.**

Para la simulación del filtro del tercer, quinto y séptimo armónico se conectó otro arreglo RLC en paralelo con los dos arreglos que ya estaban conectados, además se introdujeron los valores de los elementos del filtro. La simulación del filtro se muestra en la figura 3.19, donde es posible observar que la distorsión de la corriente disminuyó hasta un valor de 2.59% y el valor de la distorsión de la tensión cambió a un valor de 0.37%.

Como se observa en la figura 3.19 el TDD disminuyó a un valor de 2.4% y el THD disminuyó a un valor del 0.37%, con la obtención de estos valores se determinó que el TDD está dentro de los límites establecidos para un nivel de tensión de 230 kV y una relación  $I_{CC}/I_L$  de 129, por lo cual con las condiciones en que se encuentra el sistema y conectando este filtro el sistema cumplió con las indicaciones norma IEEE 519. Las formas de onda de la corriente y de la tensión resultante se muestra en el capítulo cuatro en la figura 4.8 b) y en la figura 4.9 respectivamente.

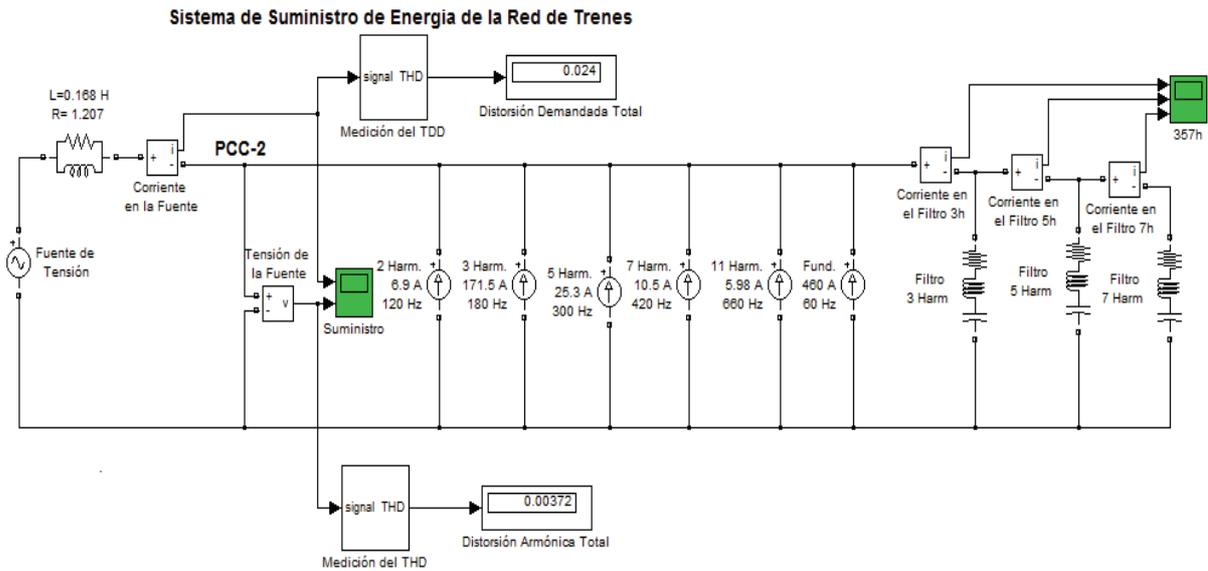


Figura 3.19. Simulación del filtro del tercer, quinto y séptimo armónico.

### 3.4. PÉRDIDAS EN EL FILTRO PROPUESTO.

Con el cálculo de la potencia total del filtro es posible determinar el tamaño, sin embargo no se tiene una estimación de las pérdidas generadas por cada uno de los arreglos para los tres armónicos que fueron reducidos. Es por ello que se realizó el cálculo de las pérdidas de cada elemento que constituye al filtro. Tomando en cuenta que el filtro tiene tres arreglos en paralelo, se consideró que la tensión en los tres arreglos es la misma, además debido a que cada arreglo consume una potencia en la frecuencia fundamental se consideró que la suma de las tres potencias de cada arreglo es la potencia total del filtro. El análisis de las pérdidas se realizó analizando cada uno de los arreglos por separado. Así el análisis fue el que se muestra a continuación.

#### Arreglo del Circuito del Tercer Armónico.

La potencia consumida por este arreglo se calculó utilizando la ecuación 2.39, obteniéndose:

$$S_{3h} = \frac{(27.5\text{ kV})^2}{3060.295\ \Omega} \left[ \frac{3^2}{(3^2 - 1)} \right] = 0.278\text{ Mvar} = 278\text{ kvar}$$

#### Capacitor.

La tensión en el capacitor se cálculo con la ecuación 2.41 como se muestra a continuación:

$$V_C = 27.5\text{ kV} \left[ \frac{3^2}{(3^2 - 1)} \right] = 30.937\text{ kV}$$

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

La carga que representa el capacitor en la onda fundamental se obtuvo con la ecuación 2.42 resultando lo siguiente:

$$S_{60Hz} = 0.278 \text{ Mvar} \left[ \frac{3^2}{(3^2 - 1)} \right] = 0.3127 \text{ Mvar} = 312 \text{ kvar}$$

La carga que representa el capacitor de este arreglo en la corriente armónica fue calculada por la ecuación 2.43 y tomando la corriente del tercer armónico que se calculó en la simulación del filtro, el resultando fue:

$$S_{180Hz} = (171.58)^2 \left( \frac{3060.295 \Omega}{3} \right) = 30.031 \text{ kvar}$$

#### **Inductor.**

La potencia consumida por este arreglo en la frecuencia fundamental se obtuvo utilizando la ecuación 2.46, el resultado fue el siguiente:

$$S_L = \frac{278 \text{ kvar}}{3^2} \left[ \frac{3^2}{(3^2 - 1)} \right] = 34.75 \text{ kvar}$$

La carga que representa el inductor de este arreglo en la corriente armónica es la misma que para el capacitor ya que son la misma puesto que tienen la misma reactancia. Las pérdidas causadas por la resistencia del circuito se obtuvieron por medio de la ecuación 2.49 el resultado es:

$$S_R = \left[ \left( \frac{278 \text{ kvar}}{3 \times 1000} \right) + \frac{(27.5 \text{ kV})^2 \times 171.58^2}{(3 \times 278 \times 1000)} \right] \left[ \frac{(3^2)}{(3^2 - 1)} \right] = 30.12 \text{ kW}$$

#### **Arreglo del Circuito del Quinto Armónico.**

Para el cálculo de las pérdidas de este arreglo se utilizaron las mismas ecuaciones del arreglo anterior, donde el resultado de la potencia consumida por este arreglo fue el siguiente:

$$S_{5h} = \frac{(27.5)^2}{3060.295} \left[ \frac{5^2}{(5^2 - 1)} \right] = 0.2574 \text{ Mvar} = 257.4 \text{ kvar}$$

#### **Capacitor.**

La tensión en el capacitor fue calculada como se muestra a continuación:

$$V_C = 27.5 \left[ \frac{5^2}{(5^2 - 1)} \right] = 28.64 \text{ kV}$$

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

La carga que representa el capacitor en la onda fundamental resultó del siguiente cálculo:

$$S_{60Hz} = 0.2574 \left[ \frac{5^2}{(5^2 - 1)} \right] = 0.2681 \text{ Mvar} = 268.1 \text{ kvar}$$

La carga que presenta el capacitor de este arreglo en la corriente armónica fue calculada tomando en cuenta la corriente del quinto armónico calculada en la simulación del sistema.

$$S_{300Hz} = (25.3)^2 \left( \frac{3060.295}{5} \right) = 39.17 \text{ kvar}$$

#### **Inductor.**

La potencia consumida por inductor en la frecuencia fundamental fue el siguiente:

$$S_L = \frac{257.4 \text{ kvar}}{5^2} \left[ \frac{5^2}{(5^2 - 1)} \right] = 10.725 \text{ kvar}$$

La carga que representa el inductor de este arreglo en la corriente armónica es la misma que para el capacitor ya que son la misma puesto que tienen la misma reactancia. Las pérdidas causadas por la resistencia del circuito resultaron:

$$S_R = \left[ \left( \frac{257.4 \text{ kvar}}{5 \times 200} \right) + \frac{27.5 \text{ kV}^2 \times 25.3^2}{(5 \times 257.4 \times 200)} \right] \left[ \frac{(5^2)}{(5^2 - 1)} \right] = 2.216 \text{ kW}$$

#### **Arreglo del Circuito del Séptimo Armónico.**

Para el cálculo de las pérdidas de este arreglo se utilizaron las mismas ecuaciones de los arreglos anteriores, donde el resultado de la potencia consumida por este arreglo fue el siguiente:

$$S_{7h} = \frac{(27.5)^2}{3060.295} \left[ \frac{7^2}{(7^2 - 1)} \right] = 0.2522 \text{ Mvar} = 252.2 \text{ kvar}$$

#### **Capacitor.**

La tensión en el capacitor fue calculada como se muestra a continuación:

$$V_C = 27.5 \text{ kV} \left[ \frac{7^2}{(7^2 - 1)} \right] = 28.07 \text{ kV}$$

La carga que representa el capacitor en la onda fundamental resultó del siguiente cálculo:

$$S_{60Hz} = 0.2522 \text{ Mvar} \left[ \frac{7^2}{(7^2 - 1)} \right] = 0.2575 \text{ Mvar} = 257.5 \text{ kvar}$$

### CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

---

La carga que presenta el capacitor de este arreglo en la corriente armónica fue calculada tomando en cuenta la corriente del quinto armónico calculada en la simulación del sistema.

$$S_{420Hz} = (10.58)^2 \left( \frac{3060.295}{7} \right) = 48.93 \text{ kvar}$$

#### **Inductor.**

La potencia consumida por inductor en la frecuencia fundamental fue el siguiente:

$$S_L = \frac{252.2}{7^2} \left[ \frac{7^2}{(7^2 - 1)} \right] = 5.25 \text{ kvar}$$

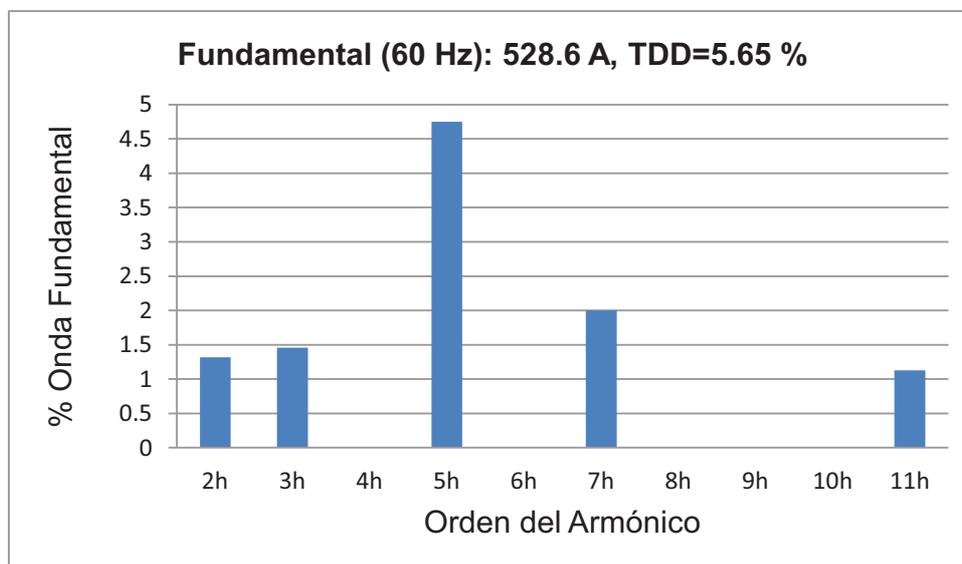
La carga que representa el inductor de este arreglo en la corriente armónica es la misma que para el capacitor ya que son la misma puesto que tienen la misma reactancia. Las pérdidas causadas por la resistencia del circuito resultaron:

$$S_R = \left[ \left( \frac{252.2}{7 \times 200} \right) + \frac{27.5^2 \times 10.58^2}{(7 \times 252.2 \times 200)} \right] \left[ \frac{(7^2)}{(7^2 - 1)} \right] = 0.044 \text{ kW}$$

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.**

#### 4.1. Filtro para la Reducción del Tercer Armónico.

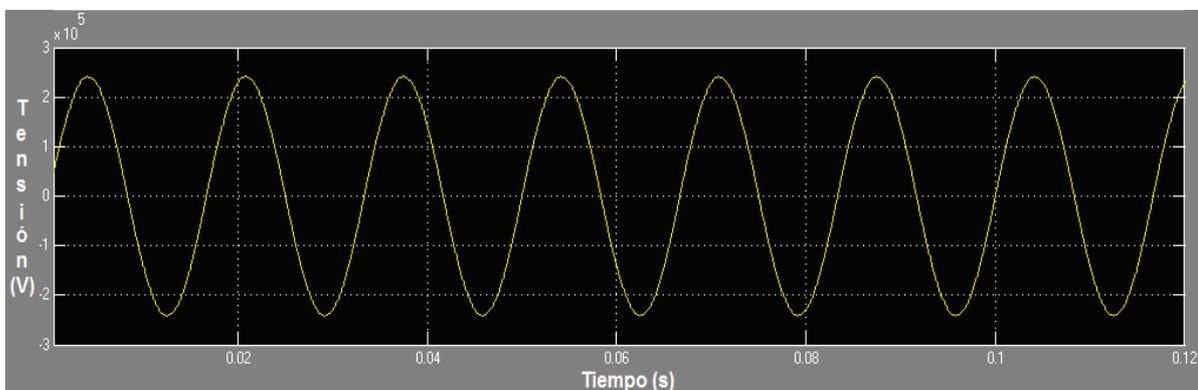
En el diseño de este filtro se propuso reducir la distorsión generada por el tercer armónico, ya que este era el de mayor magnitud. La figura 4.1 muestra la gráfica de la distorsión armónica, donde en el eje X se representa el orden del armónico y el eje Y representa el porcentaje de distorsión de cada armónico con respecto a la fundamental. En la figura 4.1 no se muestra en su totalidad la barra que representa a la onda fundamental (60Hz), ya que su porcentaje con respecto al eje Y es de 100% y comparada con las barras de cada armónica es de una magnitud mayor. Así para propósito de tener una mejor apreciación de cada armónico no se presenta la barra de la onda de frecuencia fundamental.



**Figura 4.1.** Magnitud de las distorsiones armónicas al reducir el tercer armónico.

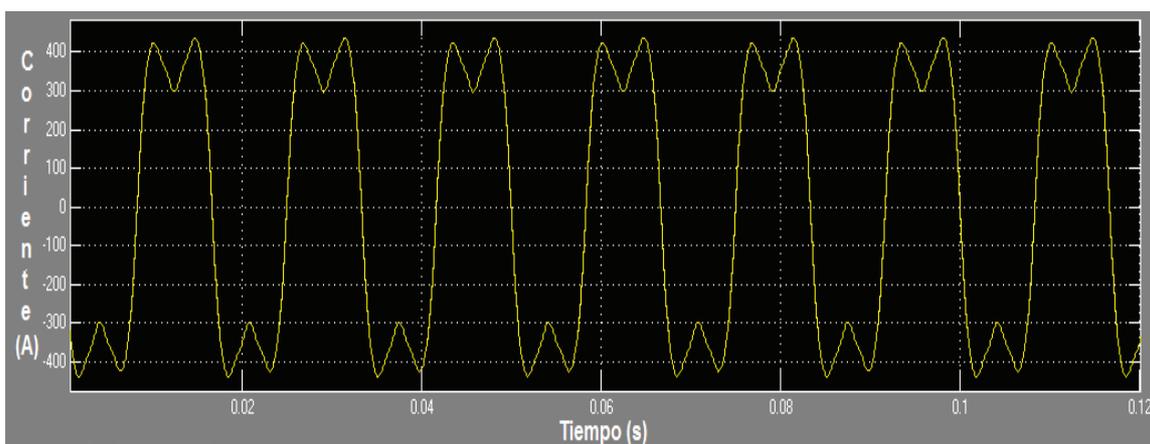
Como se observa en la figura 4.1 la distorsión originada por el tercer armónico disminuye hasta el 1.5%, debido a que existen otros armónicos en el sistema el valor del TDD no pudo disminuir hasta 1.5%. Así el filtro propuesto cumplió con su función disminuyendo la distorsión para los límites marcados para el PCC-2. Sin embargo para el PCC-1 la norma especifica que la distorsión total de la onda de corriente debe ser menor a 2.5% y el sistema en estas condiciones tiene una distorsión total de 5.65%. Por lo que no se cumple con las indicaciones de la norma. Para lograr entrar dentro de los límites del PCC-1 fue necesario proponer otro arreglo para disminuir el armónico de magnitud subsecuente al tercer armónico, es por ello que se determinó un arreglo RLC para disminuir la magnitud del quinto armónico.

La figura 4.2 muestra la forma de onda de la tensión obtenida en el PCC-2 con el filtro para el tercer armónico conectado. Debido a que la distorsión de la tensión es 0.4% la gráfica de la figura 4.2 muestra una señal casi sinusoidal

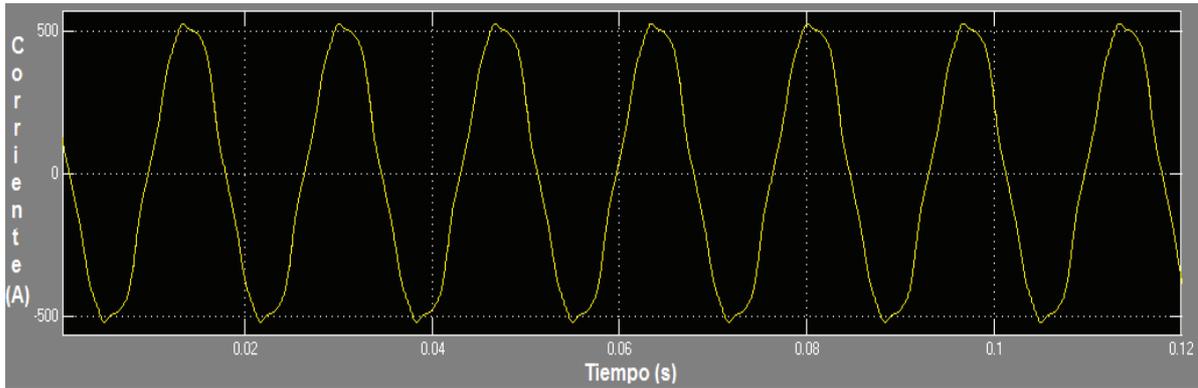


**Figura 4.2.** Tensión suministrada al conectar el filtro de tercer armónico.

La figura 4.3 b) muestra la forma de onda de la corriente suministrada a la red resultante al conectar el filtro del tercer armónico, para apreciar el cambio que existe al conectar el filtro la figura 4.3 a) muestra la forma de onda de la corriente sin la conexión del filtro conectado a la red. Como se puede observar existe una distorsión en la forma de onda de la corriente ya que aun prevalece un valor considerable de la distorsión en la corriente, que en este caso es de 5.65%. Si comparamos esta grafica con la obtenida al simular el sistema sin conectar el filtro se observa que la forma de onda cambia a una senoidal debido a que se ha disminuido el armónico de mayor magnitud y con ello la distorsión armónica también ha disminuido.



a)



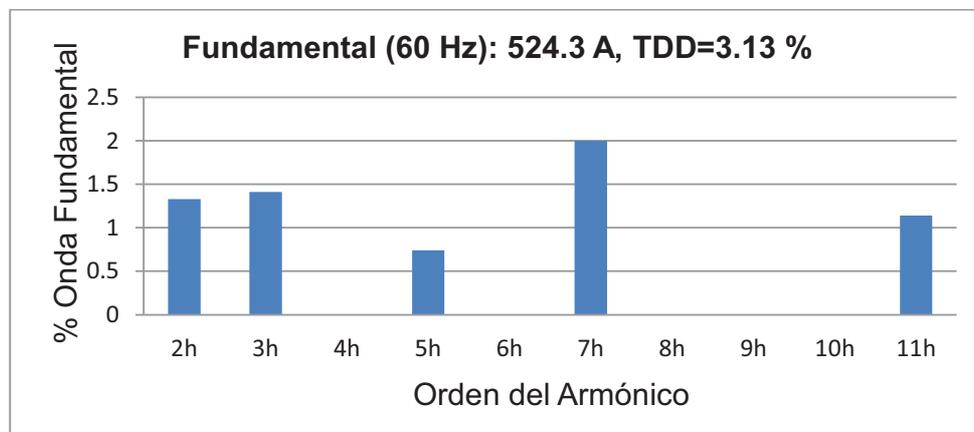
b)

**Figura 4.3.** Forma de onda de la corriente suministrada a la red a) sin el filtro conectado, b) con el filtro del tercer armónico conectado.

#### 4.2. Filtro para la Reducción del Tercer y Quinto Armónico.

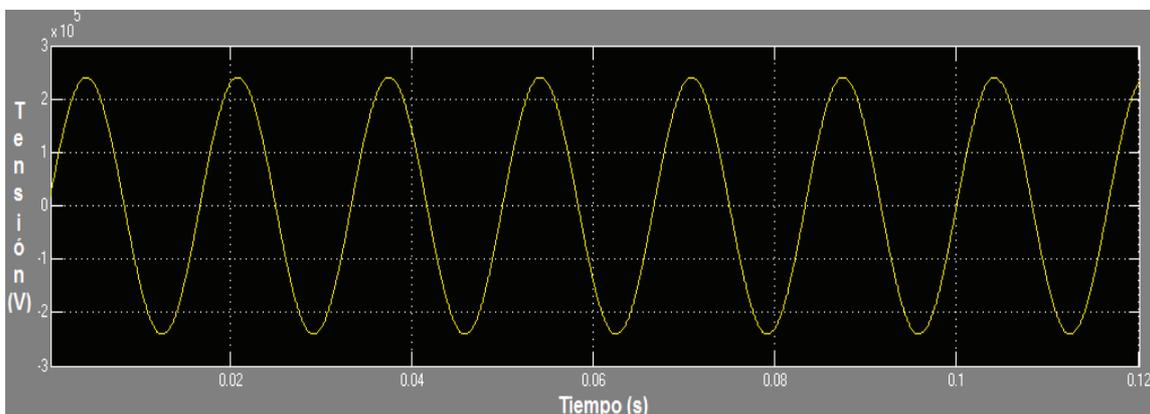
Con los resultados obtenidos al reducir el tercer armónico, se determinó que era necesario, para cumplir con las indicaciones de la norma, reducir el armónico de mayor magnitud después del tercer armónico. Se seleccionó el quinto armónico ya que su magnitud era de 5.5%, para esto se planteó un arreglo RLC conectado en paralelo con el arreglo colocado para reducir el tercer armónico y se calcularon nuevamente los valores de cada elemento de los dos arreglos.

El resultado que se obtuvo después de simular el filtro del tercer y quinto armónico se presenta en la figura 4.4. La figura 4.4 muestra como la distorsión del quinto armónico disminuyó hasta un 0.7%, lo que provocó que la distorsión total de la onda de corriente disminuyera hasta un 3.13%. Además la magnitud corriente fundamental aumenta, ya que se conectan dispositivos adicionales a la red, sin embargo existe una menor distorsión en la onda de corriente



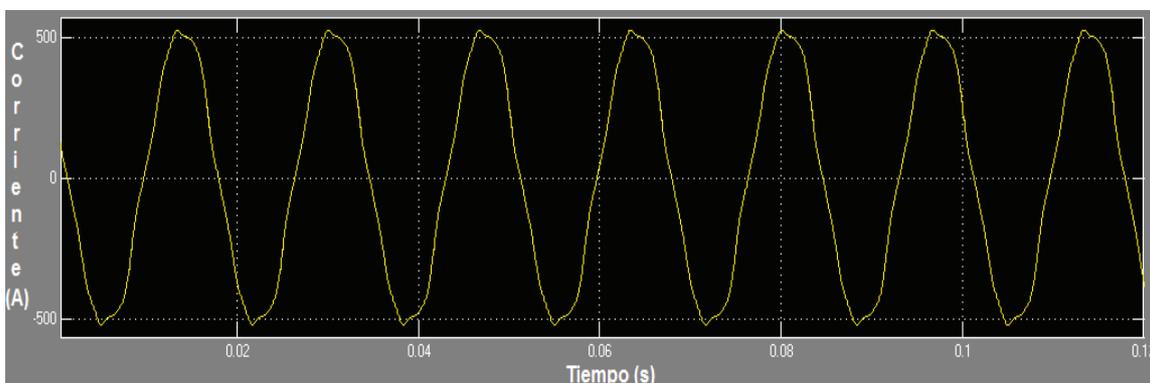
**Figura 4.4.** Magnitud de las distorsiones armónicas al reducir el tercer y quinto armónico.

La forma de onda de la tensión cuando se conecta el filtro reductor del tercer y quinto armónico se muestra en la figura 4.5. La forma de la onda de la tensión es casi senoidal debido a que la distorsión armónica total de la tensión permanece en un valor bajo, por lo cual la tensión no fue afectada.

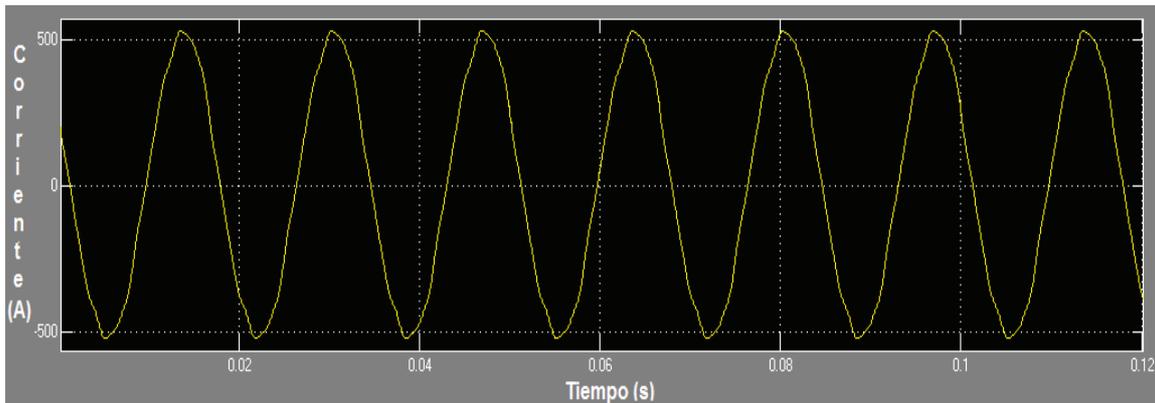


**Figura 4.5.** Tensión suministrada al conectar el filtro del tercer y quinto armónico.

La forma de la corriente suministrada al conectar el filtro del tercer y quinto armónico se muestra en la figura 4.6 b), para poder observar el cambio de la forma de onda la figura 4.6 a) muestra la forma de onda de corriente resultante al conectar el filtro del tercer armónico. Se puede observar un mejoramiento de la onda al conectar el filtro del tercer y quinto armónico, puesto que solo se observa una deformación en los picos de la onda. Sin embargo la distorsión demandada total (3%) obtenida no alcanzó a entrar dentro del límite que marca la norma. Esto se debió a que la distorsión que originaba el quinto armónica no era lo suficientemente grande para alcanzar una disminución de la distorsión total del 2.5%.



a)

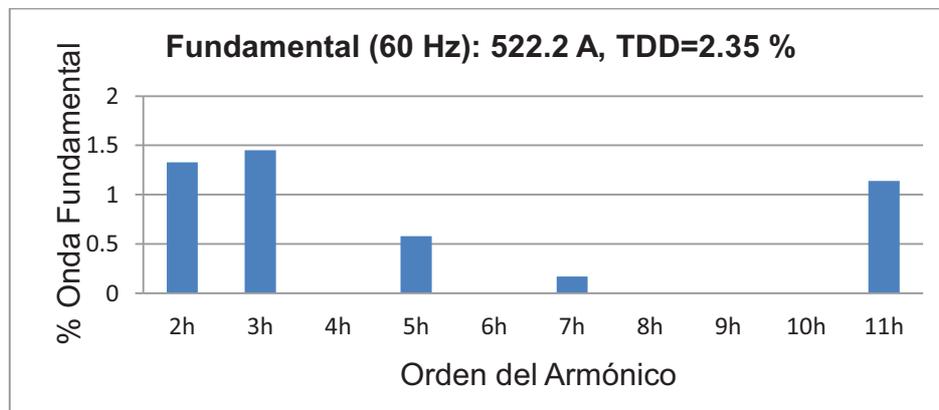


b)

**Figura 4.6.** Forma de onda de la corriente suministrada a la red a) con el filtro del tercer armónico conectado, b) con el filtro del tercer y quinto armónico.

#### 4.3. Filtro para la Reducción del Tercer, Quinto y Séptimo Armónico.

Debido a que al plantear un filtro que redujera el tercer y quinto armónico no se cumplió con lo estipulado en la norma, se procedió a reducir el armónico de mayor magnitud después del tercer y quinto armónico. El armónico seleccionado fue el séptimo con una distorsión de 2.3%. Así se planteó conectar un nuevo arreglo RLC conectado en paralelo con los dos arreglos anteriores, además se calculó de nuevo los valores de los elementos del filtro. Los resultados al simular el filtro del tercer, quinto y séptimo armónico se muestran en la figura 4.7. Como se observa en la figura las magnitudes de todos los armónicos se encuentran por debajo del 1.5%, esto al conectar el filtro del tercer, quinto y séptimo armónico. Esto se debe a que el armónico que tenía mayor magnitud al reducir el tercer y el quinto armónico era el séptimo armónico con un 2.3%, con la implementación del filtro la distorsión de este armónico se alcanzó un valor de 0.2%.

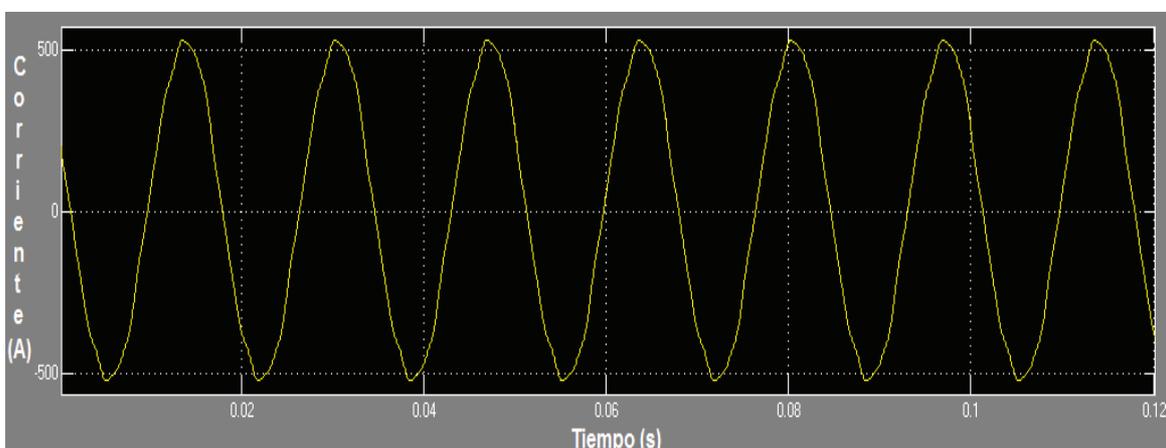


**Figura 4.7.** Magnitud de las distorsiones armónicas al reducir el tercer, quinto y séptimo armónico.

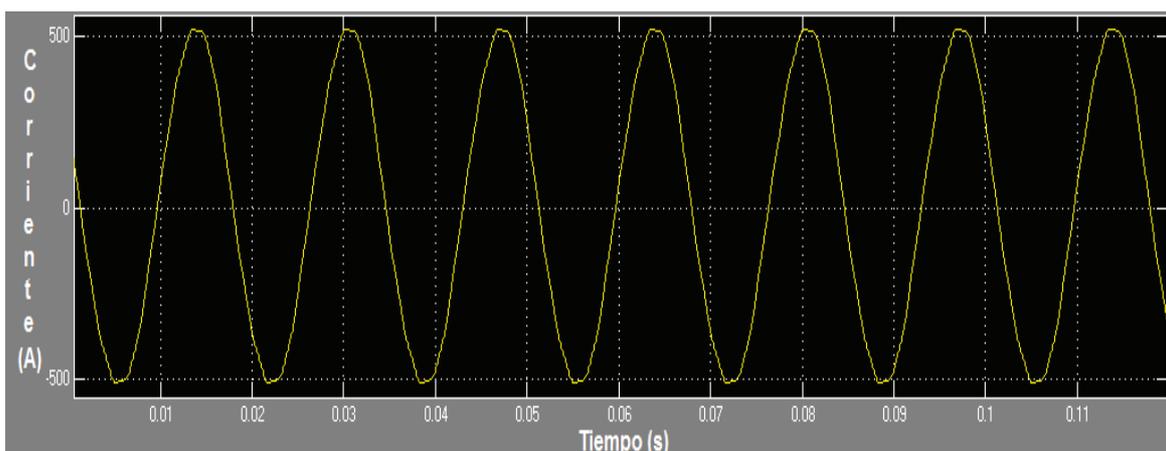
## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

La distorsión total obtenida con la implementación del filtro propuesto en esta parte del diseño fue de 2.35% por lo cual cumplió con la indicación de la norma para el PCC-1 (2.5%). Con ello se alcanzó el objetivo planteado al inicio del trabajo. Cabe mencionar que no es posible reducir completamente la distorsión armónica a cero en el sistema debido a que aun en las frecuencias de resonancia el filtro presenta una impedancia muy pequeña, pero que ocasiona que exista flujo de corrientes armónicas hacia la compañía suministradora.

Para observar el cambio de la forma de onda la figura 4.8 a) muestra la forma de la corriente con el filtro del tercer y quinto armónico conectado y la figura 4.8 b) muestra la forma de onda obtenida al conectar el filtro del tercer, quinto y séptimo armónico, en la cual se puede observar una forma de onda casi senoidal.



a)

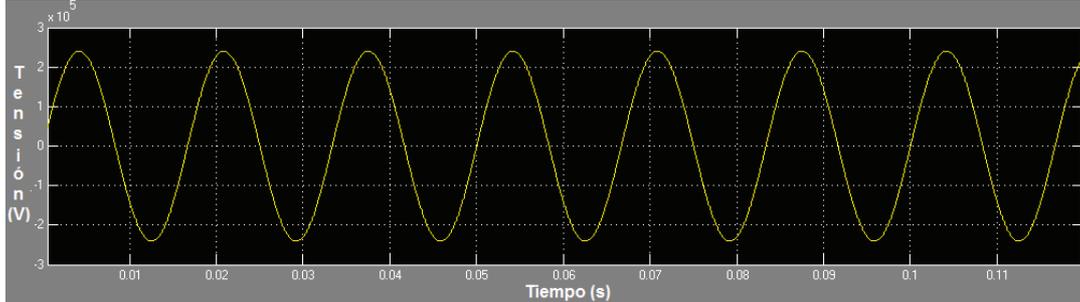


b)

**Figura 4.8.** Forma de onda de la corriente suministrada a la red a) sin el filtro conectado, b) con el filtro conectado.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

La forma de onda de la tensión al conectar el filtro se muestra en la figura 4.9, donde se observa que tiene una forma casi senoidal debido a su bajo valor de la distorsión (0.37%).



**Figura 4.9.** Tensión al Conectar el Filtro del Tercer, Quinto y Séptimo Armónico.

El filtro que resultó para la disminución de la distorsión armónica en la red fue uno con tres arreglos RLC conectados en paralelo con el sistema de suministro. El cual tiene las características mostradas en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Características de los componentes del filtro diseñado.

<b>FILTRO</b>			
Tres Arreglos de Ajuste Simple			
Elementos	Tercer Armónico	Quinto Armónico	Séptimo Armónico
Capacitancia ( $\mu\text{F}$ )	0.8667	0.8667	0.8667
Resistencia ( $\Omega$ )	1.02	3.06	2.18
Inductancia (mH)	901.96	324.7	165.66
Frecuencia (Hz)	180	300	420
Factor de Calidad	1000	200	200
Tamaño del Filtro		<b>787.6 kvar</b>	

Los cálculos de la potencia que consumirá el filtro se muestran en la tabla 4.2. Esta carga es demandada por el sistema aun sin conectar el filtro por cada uno de los armónicos. Por lo cual este valor representa la magnitud de la contaminación en el sistema si se toma en cuenta que la potencia consumida es de 12 581 kVA el potencia armónica representa un 6.25% de la potencia total consumida, el cual es la magnitud del filtro.

### 4.2. Potencia calculada de cada elemento del filtro.

<b>Potencia de los Elementos del Filtro</b>						
Elementos	Tercer Armónico		Quinto Armónico		Séptimo Armónico	
	f= 60Hz	f= 180Hz	f= 60Hz	f= 300Hz	f= 60Hz	f= 420Hz
Capacitor (kvar)	312	30.031	268.1	39.17	257.5	48.93
Inductor (kvar)	34.75	30.031	10.725	39.17	5.25	48.93
Resistencia (kW)	30.12		2.216		0.044	

---

## CONCLUSIONES

Al realizar el diseño del filtro reductor de armónicos para una red de trenes eléctricos, se concluye lo siguiente:

- La principal causa de la generación de armónicos en una red de trenes eléctricos es el uso de rectificadores, los cuales demandan una corriente no senoidal al sistema de suministro de la red, provocando la inserción de armónicos a la red de los cuales el tercero es el de mayor magnitud.
- La necesidad de tener un control de armónicos en la redes de trenes eléctricos radica en que estos sistemas están conectados a niveles de tensión de transmisión, por lo cual la contaminación armónica puede propagarse a una mayor cantidad de usuarios de energía eléctrica.
- Es necesario conectar un filtro de armónicos que reduzca el tercer, quinto y séptimo armónico para que un sistema de suministro de energía de una red de trenes entre dentro de los límites de distorsión de corriente que marca la norma IEEE 519. Ya que a pesar de que la distorsión del tercer armónico era de 37.3% se tuvo que reducir los armónicos quinto y tercero de 5.5% y 2.3 % respectivamente, para cumplir con el límite de 2.5% que indica la norma.
- La distorsión armónica de la corriente nunca se eliminara por completo, debido a que aun cuando los filtros de armónicos entran en resonancia siempre hay una resistencia presente en el filtro. Además las impedancias equivalentes de thevenin de los puntos donde se interconecta el usuario y la compañía suministradora son valores pequeños, lo que provoca que la corriente armónica se divida hacia el filtro y la red del suministrador.
- El buen diseño de un filtro depende principalmente de la resistencia del arreglo RLC, ya que en condiciones de resonancia el flujo de las corrientes armónicas dependerá del valor de la resistencia del filtro. Un factor de calidad del filtro alto asegura un mayor flujo de la corriente armónica por el filtro, debido a que la resistencia es calculada a través de este factor.

- 
- El tamaño del filtro, el cual es dado en kvar, depende de la distorsión armónica total que se pretende reducir debido a que está se traducen en perturbaciones de una cierta potencia del sistema del usuario. La potencia de estas perturbaciones circulará por el filtro y no por el sistema evitando con ello los problemas que puede causar al sistema eléctrico de la compañía suministradora y al sistema del usuario. La potencia de estas anomalías fue de 787 kvar, lo que indica que al instalar el filtro se evitara que esta potencia entre al sistema del suministrador y evitar las fallas que esta pudiera ocasionar.

---

## RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO

- Realizar el diseño del filtro utilizando filtros pasivos de sintonía doble.
- Realizar el diseño del filtro reductor de armónicos utilizando un filtro activo.
- Se recomienda realizar la propuesta de control automático para la activación del filtro cuando la red excede los límites de distorsión armónica.
- Se recomienda realizar el diseño del filtro utilizando como punto de conexión el lado secundario del transformador ubicado en el carro remolque del tren.

---

## REFERENCIAS

- (1) IEEE. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems, 1992. Standard 519.
- (2) Das, J. C., "Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics New York" , Marcell Dekker, New York, 2002.
- (3) Rashid, M. , "Power Electronics Handbook", Academic Press, Florida, 2001.
- (4) Moreno A., "Calidad de la Energia: Tecnologias de Mitigación en un Ambiente Distribuido", Springer press, España, 2007.
- (5) Sanchez, A., Propuesta para la implementación de un Filtro Pasivo para Lamparas Fluorescentes Tipo T8, Tesis de Licenciatura, IPN – ESIME, Mexico, 2007.
- (6) <http://www.caf.es/caste/productos/proyecto.php?cod=3&id=617&sec=desc&pais=19>, octubre 2010.
- (7) <http://www.railway-technical.com/tract-02.shtml#AsynchronousMotor>, octubre 2010.
- (8) Ariillaga, J., "Power System Harmonics" , John Wiley & Sons, Segunda Edición, 2003.