



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

“Mejoramiento de la Calidad de la Energía en la Subestación Eléctrica Pachuca Utilizando un Filtro Pasivo de Potencia”

Tesis que para obtener el Título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

P r e s e n t a n :

Anastacio De la Cruz Estrada

Edgar García López

Director de Tesis:
M. en C. Jaime Barrera Rodríguez

Pachuca Hgo., Marzo 2007.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
COORDINACIÓN ADJUNTA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

P.D.L.I.E.T. Anastacio De la Cruz Estrada
P.D.L.I.E.T. Edgar García López
P R E S E N T E

Por este conducto le comunico que el jurado que le fue asignado a su trabajo de titulación denominado "**Mejoramiento de la Calidad de la Energía en la Subestación Eléctrica Pachuca Utilizando un Filtro Pasivo de Potencia**" y que después de revisarlo en reunión de sinodales han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado:

PRESIDENTE:	M. en C. Elías Varela Paz
PRIMER VOCAL:	M. en C. Jaime Barrera Rodríguez
SEGUNDO VOCAL:	Ing. Francisco Morales Jiménez
TERCER VOCAL:	Ing. Alejandro Cerón López
SECRETARIO:	Ing. Salvador Ávila Flores
PRIMER SUPLENTE	Ing. Omar Samperio Vázquez
SEGUNDO SUPLENTE:	Ing. Atanacio Muñoz Neri

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

A T E N T A M E N T E
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"
Pachuca, Hgo., a 30 de Enero del 2007


M. en C. Elías Varela Paz
Coordinador Adjunto

A mis padres y hermanos.

Índice General

Índice General	iv
Resumen	viii
Agradecimientos	ix
Introducción	10
1 Análisis Armónico en Sistemas Eléctricos	17
1.1 Armónico	18
1.1.1 Amplitud	18
1.1.2 Orden	19
1.2 Series de Fourier	19
1.3 Origen de los Armónicos	20
1.4 Distorsión Armónica Total	21
1.5 Efectos Causados por Influencia Armónica	21
1.5.1 Efectos Instantáneos	22
1.5.2 Efectos a Largo Plazo	23
1.6 Contenido Normal de Armónicos	23
2 Equipo de Medición y Monitoreo	25
2.1 Proceso de Adquisición de Datos	26
2.2 Analizador de Redes TR-2000	27
2.3 Display Station 32	28
2.3.1 Registro de Armónicos	29
2.3.2 Administrador de Comms	29
2.3.3 Nivel de Seguridad	30
3 Filtros Eléctricos Pasivos	32
3.1 Análisis de Filtros	33
3.1.1 Elementos Pasivos	33
3.2 Filtros	36

3.2.1	Filtro Pasa Bajas	37
3.2.2	Filtro Pasa Altas	41
3.2.3	Filtro Pasa Banda	45
3.2.4	Filtro Rechaza Banda	48
4	Selección de Filtros Pasivos	51
4.1	Subestación Eléctrica Pachuca	52
4.2	Selección de Filtros Pasivos	55
4.3	Análisis para el Cálculo del Filtro	56
4.3.1	Características del Filtro Rechaza Banda	56
5	Simulación del Filtro	59
5.1	Procedimiento	60
5.2	Circuit Maker	60
5.2.1	Elementos del Circuito y Configuración de sus Parámetros	61
5.3	Matlab/Simulink	66
	Conclusiones	71
	Glosario y Acrónimos	73
A	Terminología para la Descripción de Disturbios	77
B	Sistema de Adquisición de Datos TR-2000	82
	Bibliografía	86

Lista de Figuras

2.1	Analizador de Redes.	27
2.2	Pantalla Principal del DS32.	28
2.3	Pantalla de Registro de Armónicos.	29
2.4	Administrador de Comms.	30
2.5	Nivel de Seguridad.	31
3.1	Resistor.	33
3.2	Capacitor.	34
3.3	Inductor.	35
3.4	Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Bajas RL.	37
3.5	Impedancias Complejas.	38
3.6	Respuesta del Filtro Pasa Bajas.	39
3.7	Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Bajas RC.	40
3.8	Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Altas RL.	42
3.9	Respuesta del Filtro Pasa Altas.	43
3.10	Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Altas RC.	44
3.11	Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Banda RLC.	45
3.12	Respuesta del Filtro Pasa Banda.	47
3.13	Diagrama Eléctrico del Filtro Rechaza Banda.	48
3.14	Respuesta del Filtro Rechaza Banda.	50
4.1	Subestación Eléctrica Pachuca.	52
4.2	Comportamiento de la Carga en los Bancos T-82A, T-82B y T-82C.	53
4.3	Corriente de Fases A y C en los Bancos T-82A, T-82B y T-82C.	54
4.4	Distorsión Armónica.	54

4.5 Porcentaje de Distorsión Armónica Individual. 55

4.6 Corriente de Fase del Banco T-82B. 55

4.7 Gráfica de Respuesta en Frecuencia del Filtro Rechaza Banda. 57

4.8 Diagrama General del Filtro Rechaza Banda. 57

5.1 Circuito Generado en Circuit Maker para su Simulación. 61

5.2 Parámetros del Elemento Inductivo. 62

5.3 Parámetros del Elemento Capacitivo. 62

5.4 Parámetros del Elemento Resistivo. 63

5.5 Parámetros de la Fuente de Voltaje para la Señal Fundamental. 63

5.6 Señal Fundamental. 64

5.7 Parámetros de la Señal del Quinto Armónico. 64

5.8 Señal del Quinto Armónico. 65

5.9 Señal Distorsionada Obtenida. 65

5.10 Señal Obtenida Después del Proceso de Filtrado. 66

5.11 Diagrama a Bloques en Simulink. 66

5.12 Configuración para la Señal Fundamental. 67

5.13 Configuración para la Señal del Quinto Armónico. 67

5.14 Señal Fundamental y Señal del Quinto Armónico. 68

5.15 Señal Distorsionada Obtenida. 69

5.16 Parámetros para la Función de Transferencia. 69

5.17 Comparativo Señal de Entrada con Señal de Salida. 70

A.1 Interrupciones de Energía 78

A.2 Pico de Voltaje 78

A.3 Depresión de Voltaje (sags) 79

A.4 Dilatación de Voltaje (swell) 79

A.5 Sobrevoltaje 80

A.6 Parpadeo (flickers) 80

A.7 Ruido Eléctrico 81

A.8 Distorsión Armónica 81

Resumen

Este trabajo se dedica a la búsqueda de una solución que permita mejorar las condiciones de operación de la Subestación Eléctrica Pachuca, a nivel de calidad de la energía, particularmente disminuir la distorsión armónica del sistema eléctrico de distribución.

Es necesario para la realización de este proyecto, conocer las causas que producen distorsión armónica, los efectos que trae consigo y los niveles máximos recomendados para éstos valores.

La medición de los armónicos es de vital importancia, pues con ella se facilita su análisis y control. En la actualidad existe gran cantidad de equipos de medición de armónicos, equipo que en su mayoría, tiene interfaz a la computadora con el propósito de almacenar y procesar la información. Un sistema de adquisición de datos es un equipo que permite tomar señales físicas del entorno y convertirlas en datos que posteriormente se pueden procesar y presentar. Para este proyecto se ha utilizado un equipo analizador de redes modelo TR-2000 de la marca Rochester.

Los filtros son usados para dejar pasar solamente las frecuencias que pudieran resultar ser de alguna utilidad y eliminar cualquier tipo de interferencia o ruido ajeno a ellas. Como solución para mejorar las condiciones de operación de la Subestación Eléctrica Pachuca, se propone la aplicación de un filtro pasivo, cuyo propósito es eliminar la frecuencia del quinto armónico. La presencia no deseada de dicho armónico, contribuye a la deformación de la onda de corriente por exceder el valor recomendado, según los datos obtenidos en el estudio de calidad de energía llevado a cabo.

Agradecimientos

Después de largas jornadas de estudio, llega el momento culminante en el que tenemos la oportunidad de agradecer a todas las personas que nos han brindado su apoyo en la realización de este trabajo. Principalmente a nuestros padres y hermanos quienes siempre han mostrado un apoyo incondicional y desinteresado.

Agradecemos a nuestro asesor, M. en C. Jaime Barrera Rodríguez quien sin ningún tipo de egoísmo compartió sus conocimientos y empleó su valioso tiempo en apoyarnos en la realización de esta tesis.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y al cuerpo académico de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones por los conocimientos compartidos a lo largo de la carrera.

Al personal de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, en particular al Ing. Alejandro Trejo Chávez jefe del departamento de estudios y análisis de redes, por compartir sus experiencias que ayudaron al fortalecimiento de este trabajo.

A la familia Vergara Martínez por apoyarnos en todo momento.

Finalmente, a nuestros amigos y compañeros de generación con quienes convivimos gran parte del tiempo.

Introducción

El objetivo de este proyecto de tesis es plantear una solución al problema de contaminación armónica en la Subestación Eléctrica Pachuca mediante el cálculo de un filtro pasivo de potencia. El principio de la utilización de filtros consiste en conocer el ancho de banda de las frecuencias a las cuales trabaja el sistema, es decir, las frecuencias en las que se encuentra la señal de información, y aplicar un filtro que deje pasar dicho ancho de banda. En definitiva, eliminar cualquier otra frecuencia ajena a la de interés, independientemente de su vía de llegada. Los filtros pasivos son, cronológicamente, los primeros que se desarrollaron, ya que a principios del siglo XX no existían elementos activos, o estos eran muy caros y voluminosos. Por éste motivo, gran parte de la teoría clásica de filtros está desarrollada apuntando directa o indirectamente a la combinación de resistores (R), capacitores (C) e inductores (L).

Los problemas del sistema de potencia asociado con los armónicos comenzaron a ser de interés general en la década de los 70, cuando dos acontecimientos independientes tuvieron lugar. El primero era el embargo de petróleo, que condujo a incrementos en la electricidad y al ahorro de energía. El segundo involucrado, fue la llegada de la era tecnológica de los tiristores en bajo voltaje. En los años 60, los tiristores fueron desarrollados para motores en corriente directa (CD) y luego durante la década de los 70, utilizados para controlar la velocidad de motores de corriente alterna (CA). Esto resultó en una proliferación de pequeños convertidores operados independientemente sin técnicas de mitigación de armónicos. Uno de los fenómenos que con mayor frecuencia se presenta y que afecta la calidad de la energía eléctrica, es sin duda la distorsión de la forma de

onda de corriente y voltaje como resultado de la influencia armónica. Este problema no es nuevo, sin embargo, debido al notable incremento de cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico, el nivel promedio de armónicos se incrementa cada día más.

Finalmente hay dos grandes preocupaciones en el medio en que se elaboró esta tesis, las que contribuyeron a su enfoque. Como empresa suministradora de energía, es de suma importancia la protección de los transformadores de potencia (fuentes de alimentación) de sobrecalentamientos en los devanados, resultado de la influencia armónica. Mientras que como usuarios requerimos calidad de la energía acorde a las necesidades de los equipos de última generación tecnológica.

Para este trabajo se han revisado diversas fuentes de consulta para el sustento teórico del mismo y se ha estructurado la tesis de la siguiente manera:

En el **capítulo uno**, se dan a conocer las definiciones y relaciones para el análisis de armónicos; fundamentalmente se describen las causas que los originan y los efectos que producen. Las funciones y características del equipo analizador de redes utilizado para la medición y monitoreo de la distorsión armónica, aparecen en el **capítulo dos**, mientras que en el **capítulo tres** se hace referencia a la teoría de filtros eléctricos pasivos. En el **capítulo cuatro** se describe el análisis para el cálculo de un filtro pasivo como solución para disminuir la distorsión armónica. Así también, en el **capítulo cinco** se realizan las pruebas de simulación para condiciones reales de operación, los resultados se analizan y evalúan teniendo en cuenta los criterios de eficiencia establecidos. Finalmente, se exponen las **conclusiones** obtenidas en la realización de este trabajo.

Planteamiento del Problema

Para hablar de calidad de energía eléctrica a nivel de distribución, es necesario contemplar aspectos como son la regulación de voltaje, factor de potencia y distorsión armónica. Lo anterior con la finalidad de entregar niveles de voltaje con un estándar de calidad acorde a las necesidades de los equipos de última generación tecnológica, lograr la confiabilidad del suministro evitando fallas o disparos en equipo de seccionamiento automático y de protección, así también evitar daños por sobrecalentamiento en el aislamiento de transformadores de potencia.

La necesidad de contar con un buen nivel en la calidad de energía eléctrica, dentro de los límites permisibles en cuanto a sus parámetros se refiere, trajo consigo el estudio y análisis de la distorsión armónica en la Subestación Eléctrica Pachuca y con esto el cálculo de un filtro pasivo, para la disminución de este fenómeno.

Los filtros más empleados en la descontaminación armónica de los sistemas eléctricos debido a su bajo costo y facilidad de operación, son los filtros pasivos. Con el cálculo del filtro se busca la reducción de los efectos perjudiciales causados por la distorsión de la onda de corriente, y con esto brindar un servicio de calidad al usuario.

Objetivo General

Calcular un filtro pasivo de potencia que permita eliminar la frecuencia del quinto armónico, y con esto, reducir la distorsión de las ondas de corriente y de voltaje del sistema de distribución eléctrica.

Objetivos Particulares

- Identificar la necesidad de filtrar corrientes armónicas, producto de la operación de cargas no lineales y valorar las condiciones de operación bajo límites recomendados de los niveles de distorsión armónica total.
- Mostrar los fundamentos necesarios para el cálculo de un filtro pasivo rechaza banda como solución particular a la problemática que representa un alto índice de distorsión armónica en la Subestación Eléctrica Pachuca.
- Analizar y evaluar a nivel de simulación la eficiencia del filtro propuesto, validando para condiciones reales de operación al aplicar tensiones distorsionadas.

Hipótesis

La Subestación Eléctrica Pachuca, actualmente presenta problemas por tener niveles por arriba de los recomendados en cuanto a distorsión armónica se refiere, específicamente en el quinto armónico, producto de cargas no lineales conectadas al sistema de distribución eléctrica. Esto trae consigo problemas de operación en la subestación que se ven reflejados en el servicio al usuario.

Para poder dar solución a los problemas generados por altos índices de distorsión armónica, se realiza el cálculo de un filtro pasivo de potencia. Un filtro pasivo que bloquee la frecuencia del quinto armónico y atenúe sus frecuencias circundantes, la frecuencia a suprimir es de 300 Hz, la cual por ser superior al valor de la frecuencia de la señal fundamental, asegura que ésta salga sin distorsión alguna del filtro, pero el valor del quinto armónico será suprimido.

Con el cálculo del filtro se pretende eliminar la frecuencia del quinto armónico realizando las evaluaciones a nivel de simulación con el objeto de considerar su aplicación posterior y con esto mejorar la calidad de la energía en la Subestación Eléctrica Pachuca.

Justificación

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida, la cual es usada en la iluminación, en la operación de diversos equipos audiovisuales, aire acondicionado y sistemas de cómputo, así como en procesos industriales, entre otros, es primordial que dicha energía cuente con un buen nivel de calidad.

Bajo condiciones ideales de operación, un sistema eléctrico de potencia se espera sea completamente balanceado, de una frecuencia única y constante, las formas de onda de voltaje y corriente sinusoidales y de amplitud específica y constante. La calidad de la energía obtenida es entonces perfecta. Desafortunadamente, esta operación ideal no se presenta en sistemas de potencia prácticos debido a que todos los componentes de la red, en menor o mayor grado, poseen la indeseable característica de distorsionar las formas de onda sinusoidales. La mayor contribución a este efecto distorsionante, conocido como distorsión armónica de la forma de onda, proviene de cargas y componentes no lineales.

Por consiguiente, los disturbios y variaciones de voltaje que se producen en la red eléctrica afectan directamente al usuario. Un ejemplo de esto ocurre cuando existen depresiones de voltaje por sólo cinco milisegundos, las cuales son capaces de hacer que una computadora pierda su información o causar errores; es por esto que el incremento de los equipos de procesamiento de datos (computadoras) ha marcado al problema de la calidad de la energía como un problema muy serio.

De igual manera, los disturbios perjudican la operación de la red de suministro eléctrico al traer consigo problemas como los que se citan a continuación:

- Operación incorrecta de controles remotos en equipos de seccionamiento automático.
- Sobre calentamiento de cables.

- Errores en medición.
- Operación incorrecta de sistemas de protección.

Por otro lado, existen consumidores que requieren de un servicio ininterrumpido de energía eléctrica por la importancia de las actividades que desempeñan. A continuación se muestran algunos tipos de consumidores que requieren forzosamente recibir un buen nivel de calidad de energía eléctrica:

- Sistemas de información que utilizan equipo de cómputo.
- Departamentos de paramédicos y bomberos.
- Empresas públicas.
- Aeropuertos.
- Instituciones financieras.
- Departamento de policía, entidades gubernamentales.

Hasta aquí se ha plasmado, de forma sintética, una visión general de lo que constituye la utilización de filtros y su relación con la eficiencia y fiabilidad de las redes eléctricas. Se establecen los criterios para la mejora de la eficiencia del sistema eléctrico mediante la disminución de la contaminación armónica. También, se ha descrito el objetivo de éste trabajo.

Capítulo 1

Análisis Armónico en Sistemas Eléctricos



En un sistema de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa como por los clientes, están diseñados para operar a 50 ó 60 ciclos, con una tensión y corriente sinusoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias de 50 ó 60 ciclos sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación

de un usuario. La forma de onda existente está compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental.

1.1 Armónico

Se definen como tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia de suministro[1]. Las frecuencias de los armónicos que más problemas generan en el flujo de potencia, son aquellas que son múltiplos enteros de la fundamental como son: 120, 180, 240, 300 y 360 Hz y las que siguen. Obsérvese que la frecuencia del sistema es la del primer armónico. Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son:

- Amplitud.
- Orden.

1.1.1 Amplitud

Hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico. La amplitud de los armónicos es generalmente expresada en un porcentaje de la fundamental, estableciéndose mediante la siguiente relación:

$$A_n = Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \phi_n) \quad (1.1.1)$$

donde:

Y_n : Valor de la componente de rango n .

ϕ_n : Es el defasamiento del componente armónico.

1.1.2 Orden

Hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental ($60Hz$). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 \times 60 Hz = 180 Hz$. El orden del armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia de la señal fundamental ($60Hz$).

Por principio, la fundamental f_1 tiene rango 1.

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (1.1.2)$$

1.2 Series de Fourier

Cualquier señal periódica está formada por una serie infinita de componentes de frecuencia sinusoidales. El periodo de la señal determina la componente de frecuencia fundamental. Las demás componentes tienen frecuencias que son múltiplos de ésta y se denominan armónicos de la fundamental. En términos matemáticos se define mediante (1.2.1).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_0 t \quad (1.2.1)$$

donde:

$f(t)$: Representa la señal en función del tiempo.

w_0 : Componente de frecuencia fundamental en radianes sobre segundo.

Los términos a_0 , a_n y b_n , llamados coeficientes de las series de Fourier tienen el siguiente valor:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (1.2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (1.2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (1.2.4)$$

donde:

T : Periodo de la forma de onda.

a_0 : Es la media de la señal a lo largo del periodo T , llamándose componente de *DC*.

1.3 Origen de los Armónicos

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la frecuencia). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente defasada un ángulo ϕ respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red. Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores. Otro tipo de cargas tales como: equipos de soldadura, hornos de arco, también inyectan armónicos. Dichas cargas que por su condición de no linealidad, son la principal causa de tener altos índices de distorsión armónica por arriba de los límites recomendados. El resto de las cargas tienen un comportamiento lineal y no generan armónicos.

1.4 Distorsión Armónica Total

Los armónicos en los sistemas de potencia eléctrica se combinan con la frecuencia fundamental para crear distorsión. El nivel de distorsión esta directamente relacionado a las frecuencias y amplitudes de las corrientes armónicas. La contribución de todas las frecuencias de armónicos a la señal fundamental, es conocida como “Total Harmonic Distortion” (THD), en español Distorsión Armónica Total. La THD es expresada como un porcentaje de la corriente de la fundamental. Matemáticamente, el porcentaje de THD es la relación de la suma de la raíz media de los cuadrados (RMS) del contenido de armónicos con el valor cuadrático medio (RMS) de la señal fundamental.

$$THD(\text{corriente}) = \sqrt{\frac{(I_2)^2 + (I_3)^2 + (I_4)^2 + (I_5)^2 + \dots + (I_n)^2}{(I_1)^2}} \times 100 \quad (1.4.1)$$

$$THD(\text{voltaje}) = \sqrt{\frac{(V_2)^2 + (V_3)^2 + (V_4)^2 + (V_5)^2 + \dots + (V_n)^2}{(V_1)^2}} \times 100 \quad (1.4.2)$$

1.5 Efectos Causados por Influencia Armónica

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de voltaje deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes puramente sinusoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico de potencia, más distorsionados serán los voltajes en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

Los voltajes no sinusoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican los equipos

conectados al sistema. Entre estos efectos se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipamiento de potencia, así como la degradación de su eficiencia y funcionamiento en general.

Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tipo de carga encontrada, e incluye:

- Efectos Instantáneos.
- Efectos a Largo Plazo.

1.5.1 Efectos Instantáneos

Las corrientes armónicas provocan la distorsión de los voltajes en los nodos de alimentación, esta distorsión en el voltaje provoca la mala operación de dispositivos electrónicos más sensibles, tales como equipo de cómputo, PLC's (controladores lógicos programables), y equipos de control y procesos, pues requieren de una alimentación totalmente limpia.

Los armónicos pueden causar errores adicionales en los discos de inducción de los metros contadores. Por ejemplo, el error de medición será incrementado un 0.3 %, en presencia de una onda de tensión y corriente con una tasa del 5 % para el quinto armónico[2]. Los equipos de medición de energía más usados en México son los wathhorímetros de inducción, los cuales ocupan cerca del 99 % del total de los medidores. El principio de funcionamiento de un wathhorímetro de inducción se basa en que las formas de onda, tanto del voltaje como de la corriente, son totalmente sinusoidales.

Los armónicos son causantes de numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos esta la operación incorrecta de fusibles, de interruptores (breakers) y equipos o sistemas digitales de protección[3].

1.5.2 Efectos a Largo Plazo

El principal efecto a largo plazo provocado por la presencia de los armónicos, es el calentamiento. Por el hecho de incrementarse la corriente RMS en la presencia de armónicos, entonces las pérdidas se verán incrementadas de igual manera como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} P &= R(I_{RMS})^2 = R[(I_{1RMS})^2 + (I_{2RMS})^2 + (I_{3RMS})^2 + \dots + (I_{nRMS})^2] & (1.5.1) \\ &= R(I_{1RMS})^2 + R((I_{2RMS})^2 + (I_{3RMS})^2 + \dots + (I_{nRMS})^2) \\ &= P_{60Hz} + P_H \end{aligned}$$

1.6 Contenido Normal de Armónicos

Las normas estadounidenses con respecto a los armónicos, han sido agrupadas por la IEEE en la norma 519: IEEE Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia. Las compañías de distribución eléctrica, tienen la responsabilidad de proveer alta calidad de abastecimiento en lo que respecta al nivel del voltaje y su forma de onda. IEEE 519 hace referencia no solo al nivel absoluto de armónicos producidos por una fuente individual, sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento.

Se debe tomar en cuenta que la IEEE 519 está limitada por tratarse de una colección de recomendaciones prácticas, que sirven como guía tanto a consumidores como a distribuidores de energía eléctrica. Donde existan problemas a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión del voltaje, es obligatorio para el suministrador y el consumidor resolverlos.

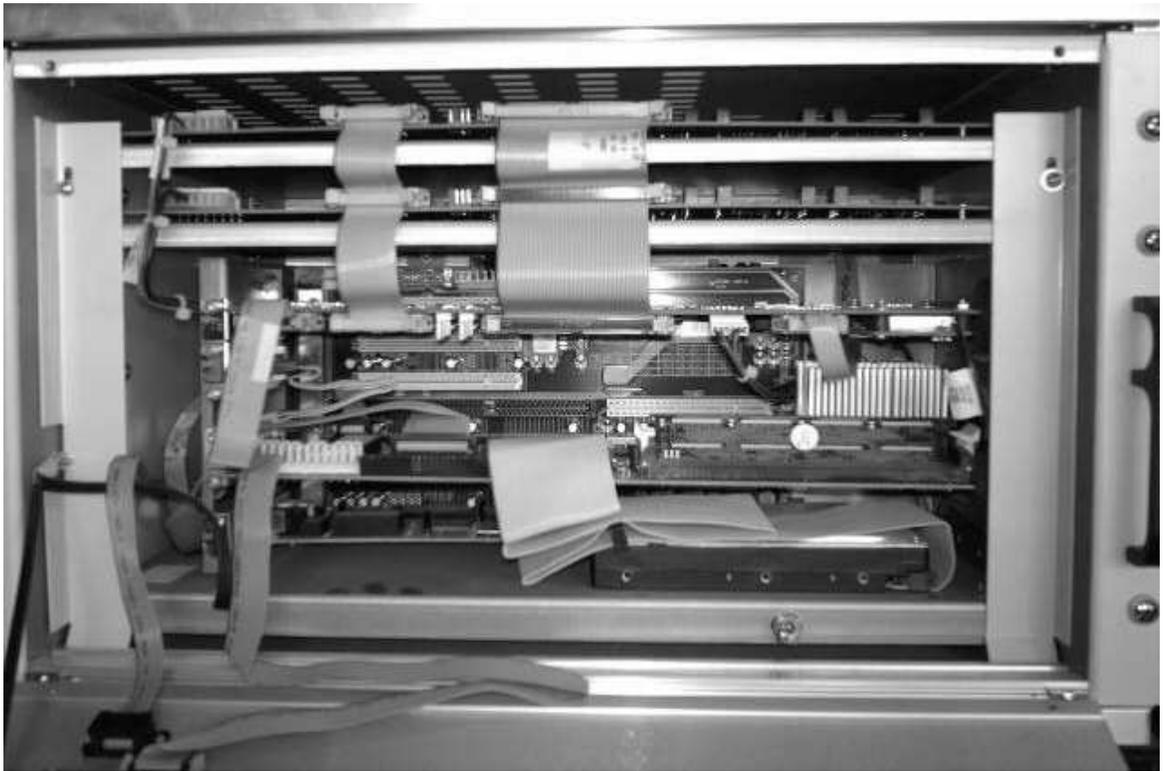
El propósito de la IEEE 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

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

Se recomienda no más del 5 % del total de distorsión armónica a nivel de distribución (todas las tensiones entre 2.3 kV y 69 kV), con no más del 3 % de distorsión atribuible a cualquier armónico. El nivel recomendado de THD es menor para tensiones mayores, 2.5 % de 69 kV a 138 kV con ninguna contribución individual mayor de 1.5 %, para mayores tensiones el límite es 1.5 % de THD total con no más del 1 % de cualquier armónica. En general los niveles de THD en un sistema de potencia son menores a mayores tensiones, esto se debe a que es menos posible que se disipe la energía de los armónicos y por tanto se propaga a través del sistema.

Capítulo 2

Equipo de Medición y Monitoreo



La medición de los armónicos es de vital importancia, pues con ella se facilita su análisis y control. En la actualidad existe gran cantidad de equipo de medición de armónicos, equipo que en su mayoría, tiene interfaz a la computadora con el propósito de almacenar y procesar información.

Un sistema de adquisición de datos es un equipo que permite tomar señales físicas del entorno y

convertirlas en datos que posteriormente se pueden procesar y presentar. Por lo general el sistema de adquisición es parte de un sistema de control, y por tanto la información recibida se procesa para obtener una serie de señales de control.

En este capítulo se plantea una descripción de las principales características que posee el equipo de medición TR-2000 para la adquisición de datos y el procesamiento de éstos con el software Display Station.

2.1 Proceso de Adquisición de Datos

El proceso de adquisición de datos se lleva a cabo como se describe a continuación: *el fenómeno físico*, lo constituye la variable que deseamos medir. Dependiendo del proceso, la naturaleza del fenómeno es muy diversa: presión, temperatura, flujo, potencia, intensidad de corriente, voltaje, pH, densidad. Este fenómeno debe traducirse a una variable que sea inteligible para el sistema, es decir, en una variable eléctrica. Para ello, se utilizan los sensores o transductores. *Los sensores o transductores* convierten las variaciones del fenómeno físico en variaciones proporcionales de una variable eléctrica. Las variables eléctricas más utilizadas son: voltaje, corriente, carga, resistencia o capacitancia. Sin embargo, esta variedad de tipos de señales eléctricas deben ser procesadas para ser entendidas por la computadora. Para ello se utilizan *acondicionadores de señal*, cuya función es la de referenciar estos cambios eléctricos a una misma escala de corriente o voltaje. Además, provee aislamiento eléctrico y filtraje de la señal con el objeto de proteger el sistema de transitorios y ruidos originados en el campo. Una vez acondicionada la señal, la misma se convierte en un valor digital equivalente en el bloque de *conversión de datos*. Generalmente, esta función es llevada a cabo por un circuito de conversión analógico/digital. La computadora almacena esta información, la cual es utilizada para su *análisis* y para la toma de decisiones. Simultáneamente, *se muestra la información* al usuario del sistema, en tiempo real. Con base en la información, en

forma automática o el operador puede *tomar la decisión* de realizar una acción de control sobre el proceso, se ordena a la computadora a realizarla y de nuevo debe convertirse la información digital a una señal eléctrica. Esta señal eléctrica es procesada por una *señal de control*, la cual funciona como un acondicionador de señal, siendo este último el que la escala para manejar un dispositivo dado: bobina de un relé o setpoint de un controlador.

2.2 Analizador de Redes TR-2000

El TR-2000, mostrado en la figura 2.1, es un equipo que contiene funciones de muchos instrumentos independientes para el monitoreo de un sistema de energía. Entre ellas las operaciones

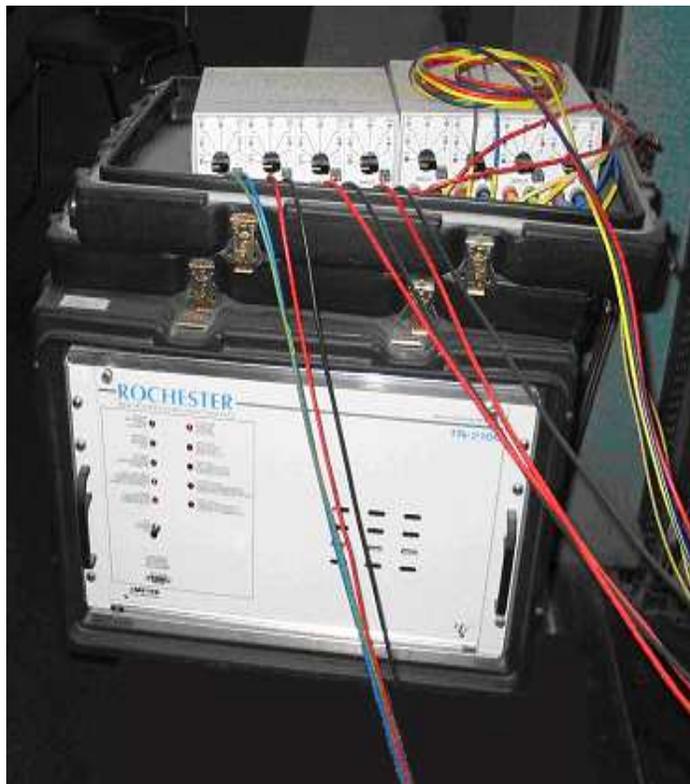


Figura 2.1: Analizador de Redes.

de protección y calidad de la energía. Las tensiones y corrientes de tres líneas de fase se registran por medio de transformadores de instrumentación estándar con una precisión de 16-bits. El TR-2000 se considera un instrumento muy rentable ya que proporciona todo un conjunto de funciones a partir de una sola conexión a la red de energía.

El TR-2000 también puede registrar el perfil de armónicos de entradas de tensión o corriente durante un intervalo fijado. Las caídas de tensión se pueden clasificar por la profundidad y duración para proporcionar un perfil de rendimiento de la subestación.

2.3 Display Station 32

El software utilizado en conjunto con el equipo TR2000 para el monitoreo de la Subestación Eléctrica Pachuca, ofrece funciones para manipular la información, la configuración y la comunicación entre la computadora y el equipo de medición TR2000. En la ventana principal del Display Station 32 (DS32), que aparece en la figura 2.2, se observan cuatro fichas, que separan los registros de acuerdo a su función[4].

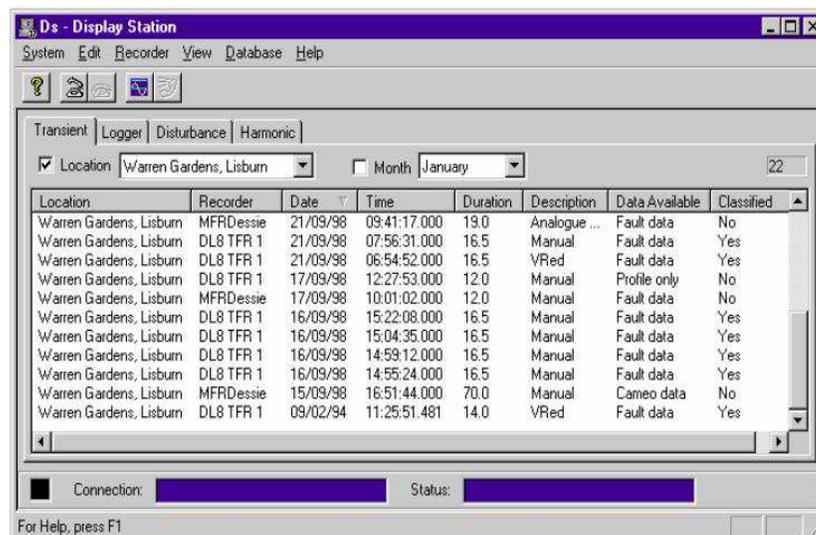


Figura 2.2: Pantalla Principal del DS32.

2.3.1 Registro de Armónicos

En lo referente a los registros de armónicos, al seleccionar uno de ellos podemos observar información referente a la fecha, hora y ubicación de ocurrencia del armónico, figura 2.3[4].

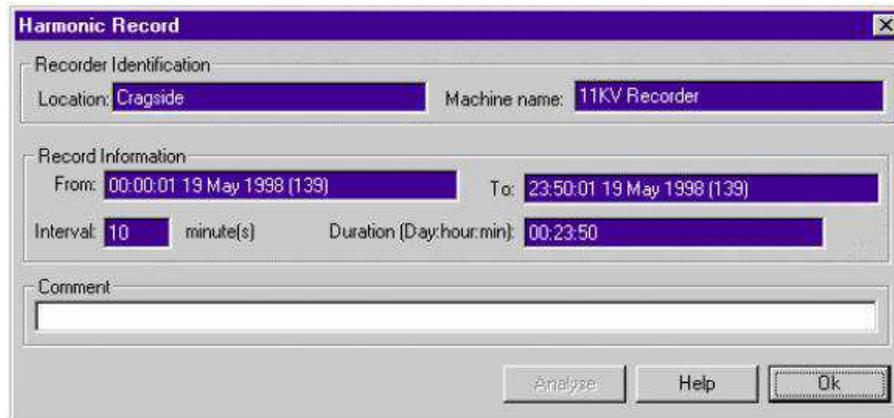


Figura 2.3: Pantalla de Registro de Armónicos.

2.3.2 Administrador de Comms

La comunicación con el equipo se configura mediante la opción *Comms-manager configuration* mostrada en el cuadro de diálogo de la figura 2.4. En ésta sección se describe los parámetros de conexión entre el DS32 y el equipo TR2000. Existen tres formas de comunicar el DS32 con el equipo TR2000[4].

- Utilizando la interfase RS232.
- Por medio de un MÓDEM.
- A través de una red basada en el protocolo TCP/IP.

Antes de haber establecido cualquier nivel de seguridad, DS32 tiene como predeterminado un nivel de seguridad 2. En la figura 2.5 se muestra como se puede asignar el nivel de seguridad, asignando una contraseña para cada nivel en la caja correspondiente[4].

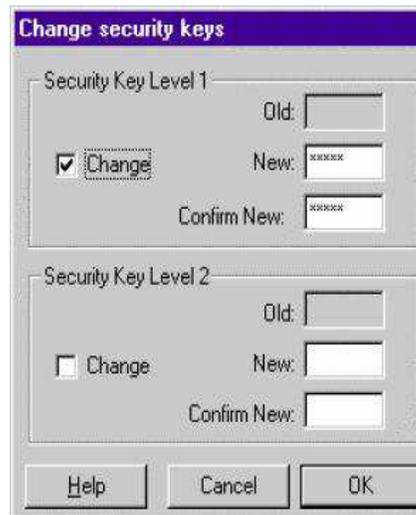


Figura 2.5: Nivel de Seguridad.

Capítulo 3

Filtros Eléctricos Pasivos



Los filtros son usados para dejar pasar solamente las frecuencias que pudieran resultar ser de alguna utilidad y eliminar cualquier tipo de interferencia o ruido ajeno a ellas. Cualquier combinación de elementos pasivos diseñados para dejar pasar una serie de frecuencias se denomina filtro.

3.1 Análisis de Filtros

Al desarrollar funciones de transferencia para redes eléctricas, frecuentemente se encuentra muy conveniente escribir directamente las Ecuaciones Transformadas de Laplace, sin plantear las ecuaciones diferenciales[5].

La *función de transferencia* $H(s)$, es el cociente de la transformada de Laplace del voltaje de salida y la transformada de Laplace del voltaje de entrada o, $H(s) = V_o(s)/V_i(s)$ [7].

3.1.1 Elementos Pasivos

Algunos de los elementos en un sistema (por ejemplo, capacidades e inductancias en un sistema eléctrico), acumulan energía. Esta energía posteriormente puede ser introducida al sistema: La cantidad de energía que puede introducirse no puede exceder de la que el elemento ha acumulado, y a menos que un elemento acumule energía antes, no puede entregar ninguna energía al sistema. Debido a ello, estos elementos son designados *elementos pasivos*. Un sistema que contiene sólo elementos pasivos, es denominado *sistema pasivo*. Ejemplos de elementos pasivos son las capacidades, resistencias e inductancias[5].

Resistencia

La Ley de Ohm dice que el voltaje v a través de una resistencia es igual a la corriente i por la resistencia misma R [6].

$$v = Ri \quad (3.1.1)$$

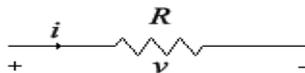


Figura 3.1: Resistor.

La transformada de Laplace da la siguiente relación:

$$V = RI \quad (3.1.2)$$

Capacitor

El voltaje v a través de un capacitor es igual a su carga Q dividida con la capacitancia C . La carga es igual a la integral de la corriente i [6].

$$v = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt \quad (3.1.3)$$

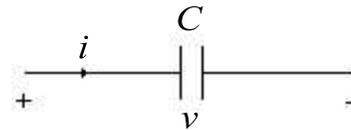


Figura 3.2: Capacitor.

La transformada de Laplace da la siguiente relación:

$$V = \frac{1}{Cs} I \quad (3.1.4)$$

Inductor

El voltaje v a través de un inductor es igual a la inductancia L por la derivada de la corriente i [6].

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (3.1.5)$$

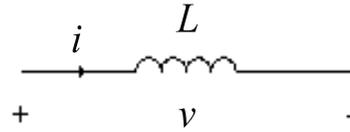


Figura 3.3: Inductor.

La transformada de Laplace da la siguiente relación:

$$V = LsI \quad (3.1.6)$$

Después de transformar los componentes básicos, se encuentra que la relación entre el voltaje V y la corriente I se puede escribir de forma parecida[6]:

Resistencia

$$\frac{V}{I} = R \quad (3.1.7)$$

Capacitor

$$\frac{V}{I} = \frac{1}{Cs} \quad (3.1.8)$$

Inductor

$$\frac{V}{I} = Ls \quad (3.1.9)$$

A los parámetros R , $1/Cs$ y Ls se les llama elementos de la impedancia compleja[6].

3.2 Filtros

La elección cuidadosa de los elementos de un circuito, sus valores y sus conexiones con otros elementos facilitará construir circuitos que dejen pasar a la salida sólo aquellas señales de entrada que permanecen en un intervalo de frecuencia deseado. Estos circuitos se conocen como circuitos selectivos de frecuencia, también llamados *filtros*, debido a su capacidad para filtrar ciertas señales de entrada con base en la frecuencia[7].

Todos los filtros que se consideraran en este capítulo son filtros pasivos, llamados de esa manera porque sus capacidades de filtrado dependen sólo de elementos pasivos[7].

Las señales que pasan de la entrada a la salida caen dentro de una banda de frecuencias denominada *banda de paso*. Los voltajes de entrada fuera de esta banda tienen sus magnitudes atenuadas por el circuito y, por ello, se evita efectivamente que alcancen las terminales de salida del circuito. Las frecuencias que no se encuentran en la banda de paso de un circuito se ubican en su *banda de supresión*[7].

La *frecuencia de corte* ω_c , es la frecuencia para la cual la magnitud de la función de transferencia se reduce en el factor $1/\sqrt{2}$ a partir de su valor máximo:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} H_{max} \quad (3.2.1)$$

donde H_{max} es la magnitud de la función de transferencia. Se concluye a partir de la ecuación 3.2.1 que la banda de paso de un filtro realizable se define como el intervalo de frecuencias en el cual la amplitud del voltaje de salida es al menos 70.7 % de la amplitud máxima posible.

Los circuitos selectivos de frecuencia (filtros) se clasifican por la ubicación de la banda de paso en cuatro principales categorías[7]:

- Pasa Bajas.
- Pasa Altas.
- Pasa Banda.
- Rechaza Banda.

3.2.1 Filtro Pasa Bajas

Se encarga de dejar pasar las bajas frecuencias y atenuar las frecuencias altas, esto es, deja pasar señales a frecuencias inferiores que la frecuencia de corte desde la entrada hasta la salida[7]. Se puede construir de dos formas, utilizando un circuito RL o un circuito RC , en ambos casos la respuesta del filtro es la misma.

Filtro Pasa Bajas RL

Un circuito RL como filtro pasa bajas se muestra en la figura 3.4. La entrada del circuito es

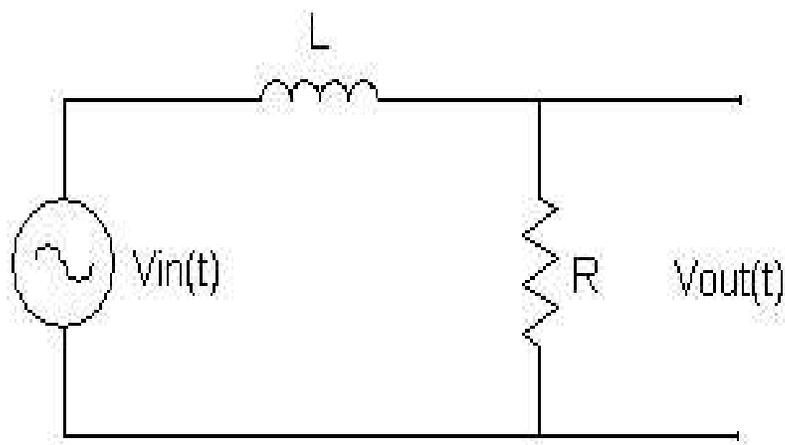


Figura 3.4: Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Bajas RL.

una fuente de voltaje sinusoidal con frecuencia variable. La salida del circuito se define como el voltaje a través de la resistencia[7].

Para realizar el análisis del circuito es necesario obtener la función de transferencia del mismo, por lo que es conveniente trasladar el circuito al dominio de la frecuencia s , como se muestra en la figura 3.5.

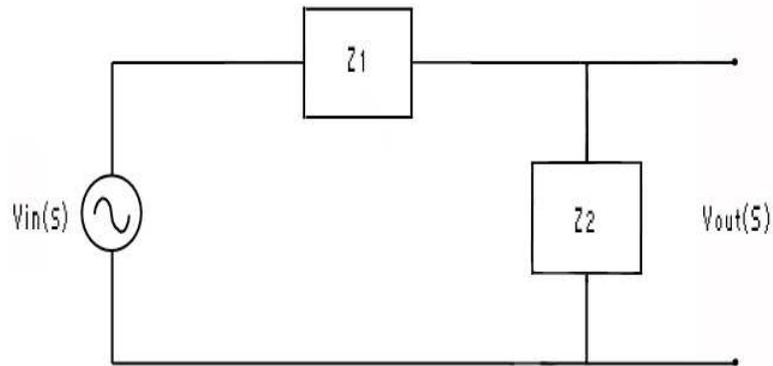


Figura 3.5: Impedancias Complejas.

donde:

$$Z_1 = Ls \quad (3.2.2)$$

$$Z_2 = R \quad (3.2.3)$$

$$V_{in}(s) = Is(Z_1 + Z_2) \quad (3.2.4)$$

$$V_{out}(s) = IsZ_2 \quad (3.2.5)$$

Para el circuito mostrado en la figura 3.4 la función de transferencia esta dada por:

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} \quad (3.2.6)$$

sustituyendo

$$H(s) = \frac{R}{Ls + R} \quad (3.2.7)$$

para quitar el coeficiente de s se multiplican ambos términos de la ecuación 3.2.7 por $1/L$.

$$H(s) = \frac{\frac{R}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (3.2.8)$$

Para estudiar la respuesta en frecuencia, hacemos la sustitución $s=j\omega$ en la ecuación anterior.

$$H(j\omega) = \frac{\frac{R}{L}}{j\omega + \frac{R}{L}} \quad (3.2.9)$$

En la figura 3.6 podemos observar de manera grafica la salida de este filtro en función de la frecuencia, obtenida del siguiente análisis: en la ecuación 3.2.9, se observa que si $\omega=0$, la función

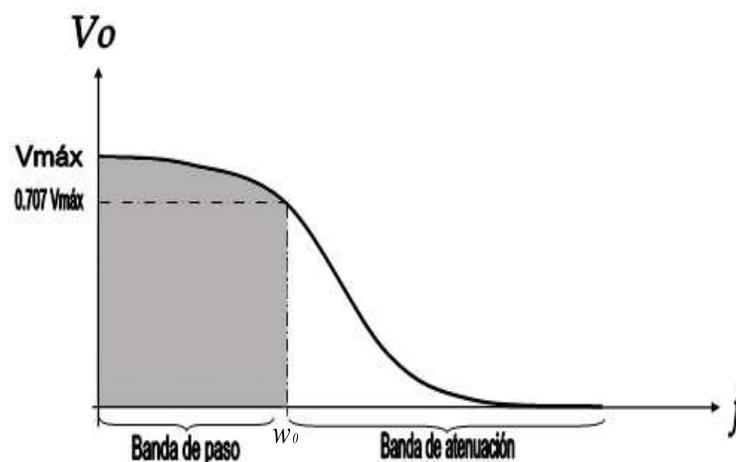


Figura 3.6: Respuesta del Filtro Pasa Bajas.

de transferencia $H(j\omega) = 1$, para este caso el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada del circuito; sin embargo cuando $\omega \approx \infty$ la función de transferencia $H(j\omega) \approx 0$, haciendo que las señales de alta frecuencia no se encuentren presentes a la salida del filtro, es decir son bloqueadas.

Filtro Pasa Bajas RC

Para el caso del filtro pasa bajas RC el análisis es similar, en la figura 3.7 se observa el diagrama eléctrico de un filtro pasa bajas RC . Al igual que en el caso anterior resulta conveniente trasladar el circuito al régimen de la frecuencia s , para la figura 3.5, el resultado de este procedimiento es el siguiente:

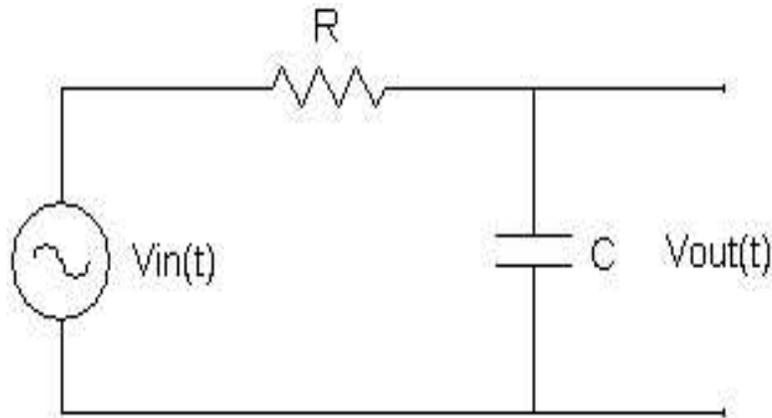


Figura 3.7: Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Bajas RC.

$$Z_1 = R \quad (3.2.10)$$

$$Z_2 = \frac{1}{Cs} \quad (3.2.11)$$

$$V_{in}(s) = Is(Z_1 + Z_2) \quad (3.2.12)$$

$$V_{out}(s) = IsZ_2 \quad (3.2.13)$$

la función de transferencia para este caso:

$$H(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} \quad (3.2.14)$$

se sustituye $s=j\omega$ en la ecuación 3.2.32.

$$H(j\omega) = \frac{\frac{1}{RC}}{j\omega + \frac{1}{RC}} \quad (3.2.15)$$

Se observa que cuando $\omega=0$ la función de transferencia $H(j\omega) = 1$, como en el caso anterior, la magnitud de entrada del filtro se mantiene a la salida. Cuando $\omega \approx \infty$ la función de transferencia cambia su salida aproximándose a cero $H(j\omega) \approx 0$, y la señal de entrada será obstaculizada por el filtro. La gráfica de la magnitud de salida en función de la frecuencia es exactamente igual a la del circuito pasa bajas RL , figura 3.6.

3.2.2 Filtro Pasa Altas

Se encarga de dejar pasar las altas frecuencias y atenuar las frecuencias bajas, lo que significa que deja pasar señales a frecuencias mayores que la frecuencia de corte[7]. A continuación se examina dos circuitos que funcionan como un filtro pasa altas dependiendo en que punto se defina el voltaje de salida. De nueva cuenta, éstos son el circuito RL en serie y RC en serie.

Filtros Pasa Altas RL

En la figura 3.8 se muestra un circuito pasa altas RL , el cual es similar al circuito pasa bajas RL , solo que en este caso la salida la obtenemos en la inductancia.

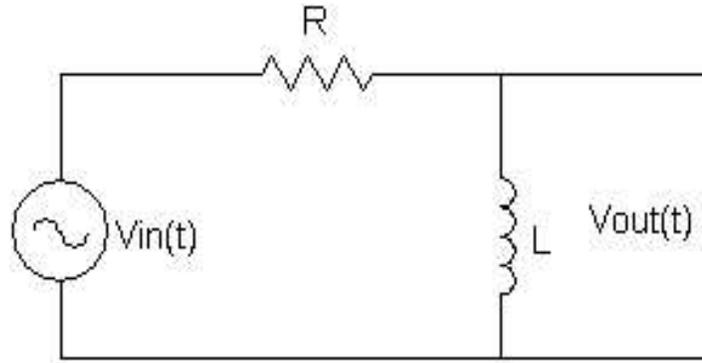


Figura 3.8: Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Altas RL.

El proceso para obtener la función de transferencia es igual que en los casos anteriores, trasladamos el circuito al régimen de la frecuencia s y obtenemos la relación salida/entrada del circuito. Al retomar la figura 3.5, los valores de Z_1 y Z_2 , son los siguientes:

$$Z_1 = R \quad (3.2.16)$$

$$Z_2 = Ls \quad (3.2.17)$$

$$V_{in}(s) = Is(Z_1 + Z_2) \quad (3.2.18)$$

$$V_{out}(s) = IsZ_2 \quad (3.2.19)$$

la función de transferencia es:

$$H(s) = \frac{s}{s + \frac{R}{L}} \quad (3.2.20)$$

se sustituye $s=j\omega$ en la ecuación anterior.

$$H(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + \frac{R}{L}} \quad (3.2.21)$$

Un análisis de la ecuación anterior en $\omega=0$ indica que $H(j\omega)=0$, por lo que a la salida del filtro no se encuentra ninguna magnitud de la señal de entrada. Cuando $\omega \gg R/L$, $H(j\omega) \approx 1$ y a la salida del filtro se obtiene una señal de magnitud muy similar a la de la señal de entrada. La figura 3.9 muestra gráficamente la magnitud de la salida del filtro en función de la frecuencia.

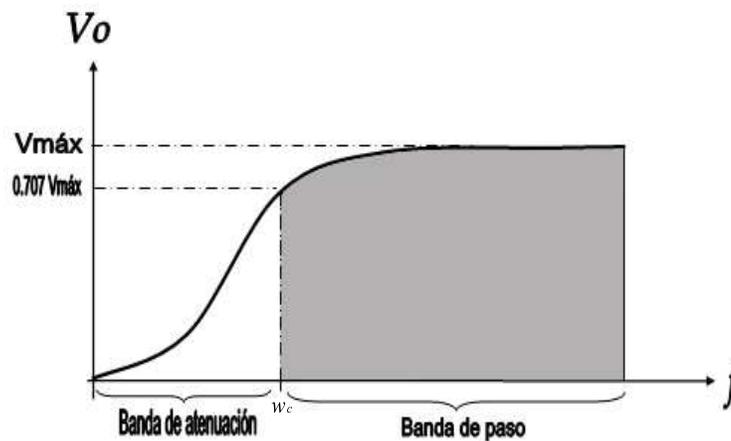


Figura 3.9: Respuesta del Filtro Pasa Altas.

Filtros Pasa Altas RC

El circuito RC correspondiente al filtro pasa altas es el que se muestra en la figura 3.10, donde se observa la similitud con el filtro RC pasa bajas, pero en este caso la salida la obtenemos en la resistencia.

Resulta conveniente trasladar el circuito al régimen de la frecuencia s .

$$Z_1 = \frac{1}{Cs} \quad (3.2.22)$$

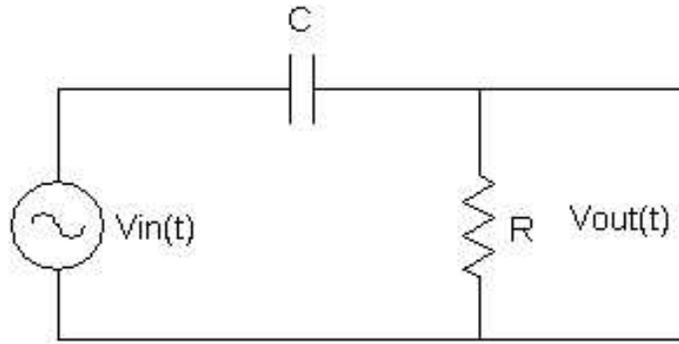


Figura 3.10: Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Altas RC.

$$Z_2 = R \quad (3.2.23)$$

$$V_{in}(s) = Is(Z_1 + Z_2) \quad (3.2.24)$$

$$V_{out}(s) = IsZ_2 \quad (3.2.25)$$

función de transferencia:

$$H(s) = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} \quad (3.2.26)$$

sustituyendo $s=j\omega$ se obtiene:

$$H(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + \frac{1}{RC}} \quad (3.2.27)$$

El análisis en frecuencia para este filtro es exactamente el mismo que el anterior, cuando $\omega=0$ la función de transferencia $H(j\omega)=0$ y la salida del filtro es nula; por el contrario cuando $\omega \gg$

$1/RC$ la función de transferencia $H(j\omega) \approx 1$ y a la salida del filtro se obtiene la señal de entrada. La magnitud de la salida del filtro en función de la frecuencia se observó en la figura 3.9.

3.2.3 Filtro Pasa Banda

Deja pasar un voltaje de fuente hasta la salida sólo cuando la frecuencia de la fuente está dentro de la banda definida por las dos frecuencias de corte, ω_{c1} y ω_{c2} , las cuales identifican a la banda de paso[7].

Existen tres importantes parámetros que caracterizan a un filtro pasa banda. El primero es la *frecuencia central* o *frecuencia de resonancia*, ω_0 , que se define como la frecuencia para la cual la función de transferencia del circuito es puramente real. El segundo parámetro es el *ancho de banda*, β , el cual es el ancho de la banda de paso. El parámetro final es el *factor de calidad*, que es la proporción entre la frecuencia central y el ancho de banda[7]. El circuito *RLC* en serie de la figura 3.11 representa un filtro pasa banda.

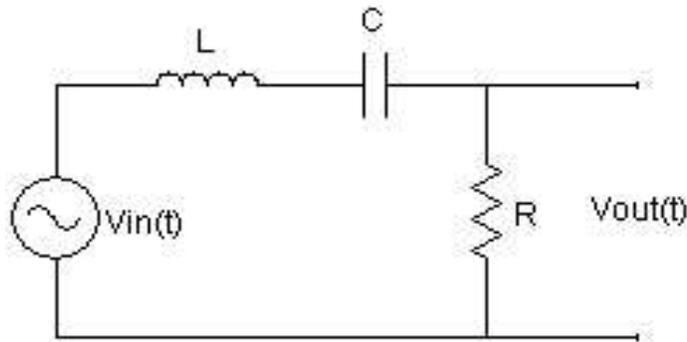


Figura 3.11: Diagrama Eléctrico del Filtro Pasa Banda RLC.

Para obtener la función de transferencia del filtro, es necesario trasladar el circuito al régimen de la frecuencia s .

$$Z_1 = Ls + \frac{1}{Cs} \quad (3.2.28)$$

$$Z_2 = R \quad (3.2.29)$$

$$V_{in}(s) = Is(Z_1 + Z_2) \quad (3.2.30)$$

$$V_{out}(s) = IsZ_2 \quad (3.2.31)$$

la función de transferencia:

$$H(s) = \frac{\frac{R}{L}s}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (3.2.32)$$

sustituyendo $s=j\omega$ en la ecuación 3.2.32, y generandose así la ecuación para la magnitud de la función de transferencia.

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega \frac{R}{L}}{\sqrt{(\frac{1}{LC} - \omega^2)^2 + (\omega \frac{R}{L})^2}} \quad (3.2.33)$$

La función de transferencia para el circuito RLC de la figura 3.11 será real cuando la frecuencia de la fuente de voltaje haga que la suma de las impedancias del capacitor y del inductor sean igual a cero:

$$j\omega_0 L + \frac{1}{j\omega_0 C} = 0 \quad (3.2.34)$$

Resolviendo la ecuación 3.2.34 para ω_0 , se obtiene:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (3.2.35)$$

Las ecuaciones para el cálculo de las frecuencias de corte ω_{c1} y ω_{c2} son:

$$\omega_{c1} = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \quad (3.2.36)$$

$$\omega_{c2} = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \quad (3.2.37)$$

Para el cálculo del ancho de banda β se tiene la relación siguiente:

$$\beta = \frac{R}{L} \quad (3.2.38)$$

y para el factor de calidad Q la ecuación es:

$$Q = \sqrt{\frac{L}{CR^2}} \quad (3.2.39)$$

La magnitud de la salida del filtro en función de la frecuencia se observa en la figura 3.12.

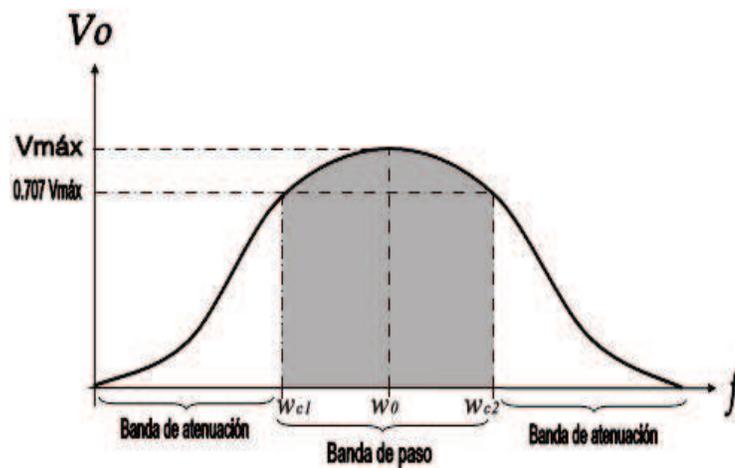


Figura 3.12: Respuesta del Filtro Pasa Banda.

3.2.4 Filtro Rechaza Banda

Este filtro deja pasar un voltaje de fuente hasta la salida únicamente cuando la frecuencia de la fuente se encuentra fuera de la banda definida por las dos frecuencias de corte. De ese modo el filtro rechaza banda detiene el voltaje de la fuente, para que éste no alcance la salida cuando su frecuencia está dentro de la banda definida por las frecuencias de corte[7].

El circuito eléctrico correspondiente al filtro rechaza banda se muestra en la figura 3.13.

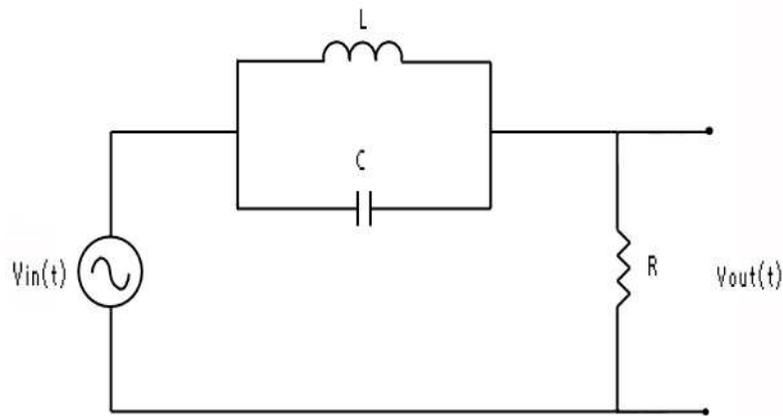


Figura 3.13: Diagrama Eléctrico del Filtro Rechaza Banda.

La función de transferencia de este circuito se obtiene de la siguiente manera:

$$Z_1 = \frac{Ls}{s^2LC + 1} \quad (3.2.40)$$

$$Z_2 = R \quad (3.2.41)$$

$$V_{in}(s) = Is(Z_1 + Z_2) \quad (3.2.42)$$

$$V_{out}(s) = IsZ_2 \quad (3.2.43)$$

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} \quad (3.2.44)$$

la función de transferencia es:

$$H(s) = \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (3.2.45)$$

Sustituimos $s = j\omega$ y generamos las ecuaciones para la magnitud de la función de transferencia:

$$|H(s)| = \frac{|\frac{1}{LC} - \omega^2|}{\sqrt{(\frac{1}{LC} - \omega^2)^2 + (\frac{\omega}{RC})^2}} \quad (3.2.46)$$

La frecuencia central ω_0 esta dada por la misma expresión que se utilizó en el filtro pasa banda,
3.2.35. Las frecuencias de corte para este caso son ω_{c1} y ω_{c2} :

$$\omega_{c1} = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \quad (3.2.47)$$

$$\omega_{c2} = \frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \quad (3.2.48)$$

Para el cálculo del ancho de banda β se tiene la relación siguiente:

$$\beta = \frac{1}{RC} \quad (3.2.49)$$

y para el factor de calidad Q la ecuación es:

$$Q = \sqrt{\frac{CR^2}{L}} \quad (3.2.50)$$

La magnitud de la salida del filtro en función de la frecuencia se observa en la figura 3.14.

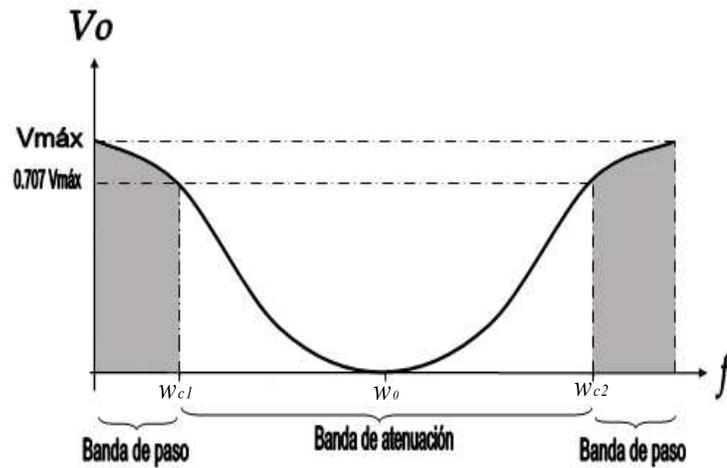
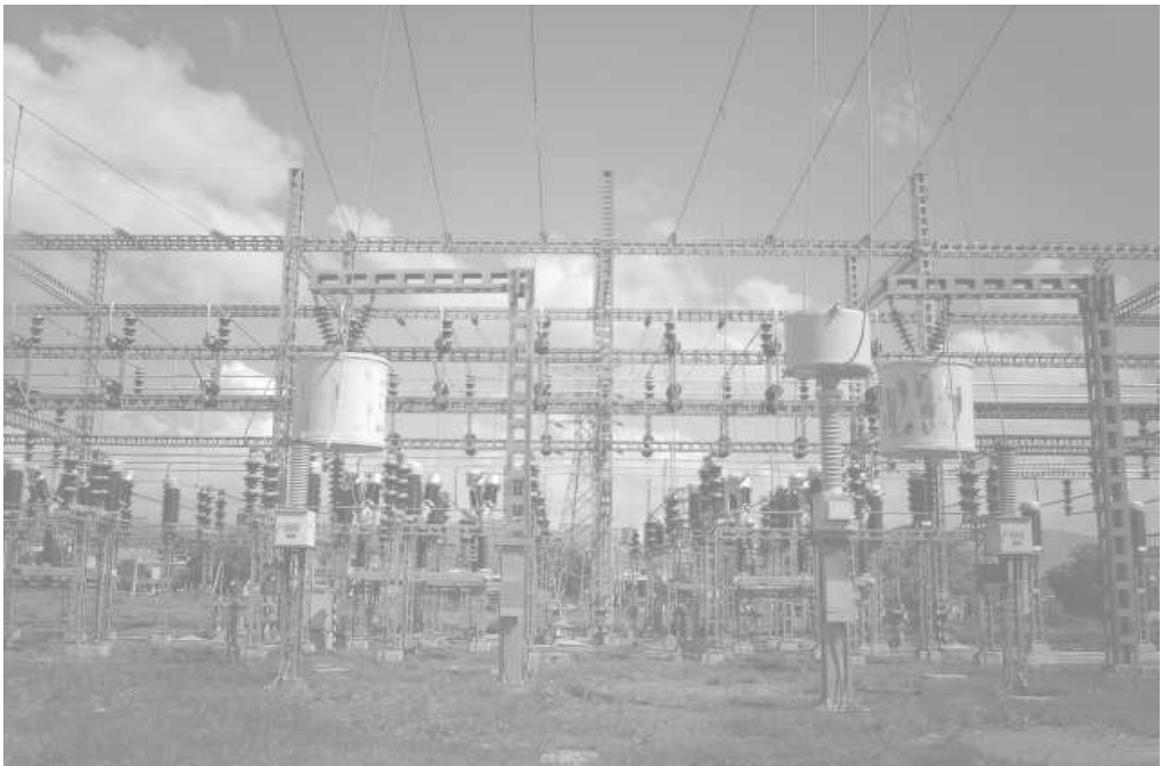


Figura 3.14: Respuesta del Filtro Rechaza Banda.

Capítulo 4

Selección de Filtros Pasivos



En el capítulo uno se dijo que los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal. También se mencionaron los problemas que se generan a partir de la aparición de corrientes armónicas en

el sistema eléctrico tales como, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos.

Ahora bien, en este capítulo, se presenta una solución al problema, buscando reducir las pérdidas y mantener los niveles armónicos por debajo de los límites permitidos, en este caso, se trata de un filtro pasivo. Así también, en el capítulo anterior se dieron a conocer los tipos de filtros que podemos encontrar de acuerdo a su configuración, dando la pauta a que en este capítulo se realice la selección del filtro de acuerdo a las necesidades propias del sistema.

4.1 Subestación Eléctrica Pachuca



Figura 4.1: Subestación Eléctrica Pachuca.

En la Subestación Eléctrica Pachuca (figura 4.6) existen tres bancos de transformadores monofásicos denominados **T-82A**, **T-82B** y **T-82C**. Los cuales reducen la tensión de 85 kV a 23 kV. De estos bancos se desprenden siete alimentadores (PAC-21, PAC-22, PAC-23, PAC-24, PAC-25, PAC-26, PAC-27), que abastecen de energía eléctrica a la región de Pachuca.

La Subestación Eléctrica Pachuca cuenta con un equipo analizador de redes, cuyas características se mencionaron en el capítulo dos. Una de las funciones de éste equipo es el análisis en tiempo real de señales continuas, útil por ejemplo, en el monitoreo de corrientes y voltajes en los bancos de transformadores **T-82A**, **T-82B** y **T-82C** (gráficas en colores rojo, verde y azul respectivamente de la figura 4.2) de la subestación eléctrica. Los marcadores (líneas verticales de color blanco) delimitan una desconexión del banco **T-82C** y como resultado de ésta el banco **T-82A** absorbe su carga, debido a su configuración en paralelo.

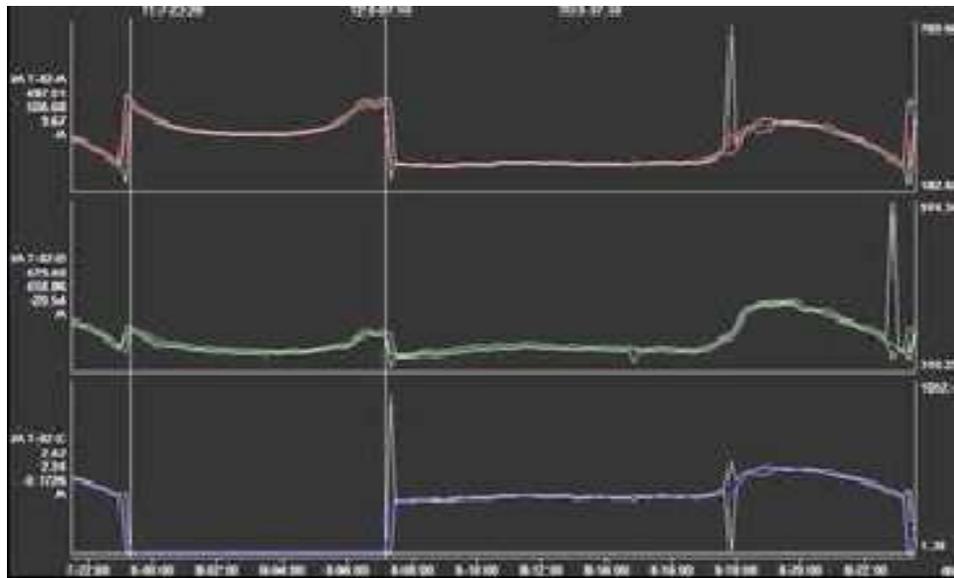


Figura 4.2: Comportamiento de la Carga en los Bancos T-82A, T-82B y T-82C.

Otra de las funciones de este equipo permite estudiar el comportamiento armónico en el sistema, por ejemplo pueden registrarse las corrientes de las fases A y C del banco **T-82C** (gráfica verde superior y azul inferior respectivamente de la figura 4.3) que poseen una THD considerable. A simple vista se observa una clara deformación de la onda sinusoidal por la influencia armónica. Se puede apreciar una deformación de la corriente en la fase A y C del banco **T-82B**, como resultado de la THD.

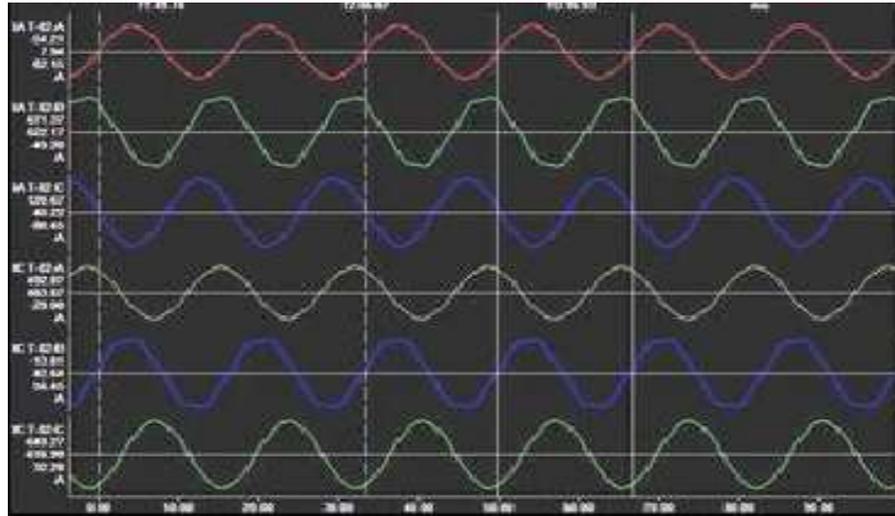


Figura 4.3: Corriente de Fases A y C en los Bancos T-82A, T-82B y T-82C.

Un análisis más completo de la magnitud de las componentes armónicas se muestra en la figura 4.4, donde podemos apreciar que el valor de la THD es del 6.2 % así como el correspondiente porcentaje en las componentes pares e impares, siendo estas últimas las que afectan más a la fundamental, y el principal causante de la deformación, el quinto armónico.

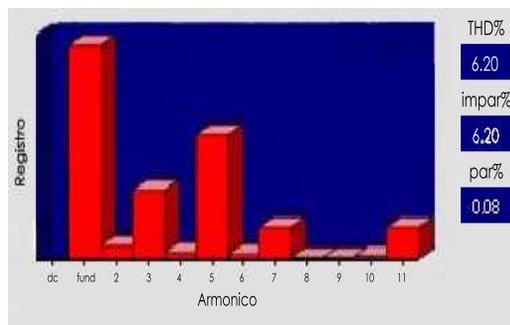


Figura 4.4: Distorsión Armónica.

El horario que se ve más afectado por la influencia de armónicos coincide con el horario normal de una jornada de trabajo en empresas y comercios, donde la principal carga instalada es no lineal, trayendo consigo valores altos de la distorsión armónica total. La figura 4.5 muestra la magnitud de cada componente armónico en un día normal de operación.

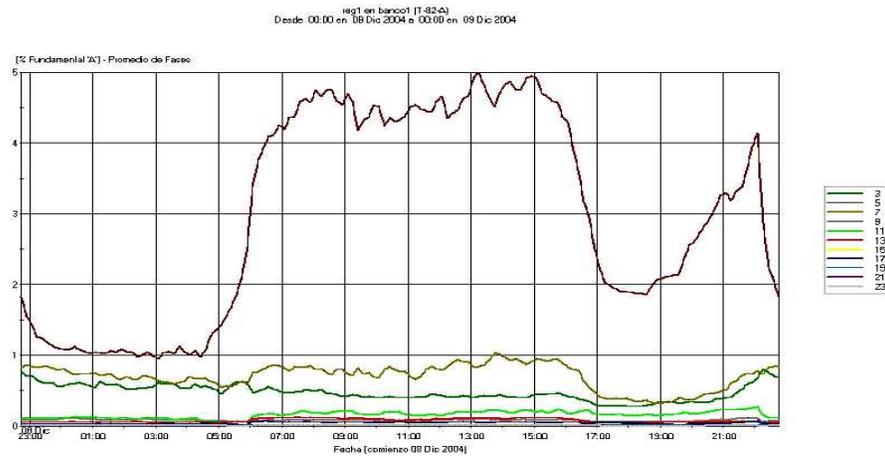


Figura 4.5: Porcentaje de Distorsión Armónica Individual.

Si se observa una fase del banco T-82B (figura 4.6), la señal es claramente deformada por la distorsión armónica total, siendo el quinto armónico el que influye más en este efecto.

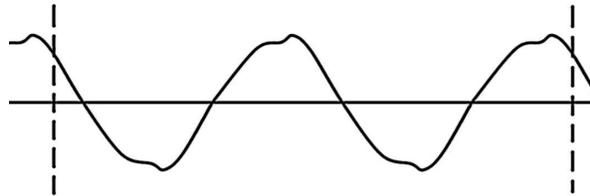


Figura 4.6: Corriente de Fase del Banco T-82B.

4.2 Selección de Filtros Pasivos

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

- El número de armónicos del sistema a atenuar. Dependiendo del número de armónicos existentes en el sistema, se puede determinar la cantidad de filtros que se podrían ubicar

para obtener una atenuación de las componentes armónicas. Esta minimización debe estar acorde con los límites establecidos por las normas o recomendaciones.

- Los requerimientos del filtro. Se hace referencia a la acción correctiva que se desee del filtro. Cada requerimiento del filtro implica un diseño específico, tal que el objetivo para el cual se quiere, se cumpla.
- La energía de cada armónico. La magnitud de cada armónico está directamente relacionada con las pérdidas que estos componentes armónicos ocasionan en el sistema de potencia.

4.3 Análisis para el Cálculo del Filtro

Un filtro pasivo que rechace la banda del quinto armónico representa la mejor opción para este caso, a continuación se presenta el análisis que se uso para el cálculo del filtro. Si el valor eficaz de la fundamental es de 23 kV y sabiendo que el valor eficaz del quinto armónico es de aproximadamente el 5 % de la fundamental, entonces la influencia es de una magnitud considerable en el sistema, por lo que es conveniente suprimir la frecuencia de ésta señal. Estos resultados justifican el cálculo del filtro pasivo rechaza banda, el cual bloquea específicamente la frecuencia del quinto armónico y atenúa sus frecuencias circundantes. La frecuencia a suprimir es de 300 Hz, la cual por ser superior al valor de la frecuencia de la señal fundamental, asegura que ésta salga sin distorsión alguna del filtro, pero el valor del quinto armónico será suprimido.

4.3.1 Características del Filtro Rechaza Banda

Los filtros de banda de atenuación o filtros rechaza banda son conformados por un filtro pasa bajas y un filtro pasa altas. La unión de estos presenta una respuesta en frecuencia similar a la que se muestra en la figura 4.7.

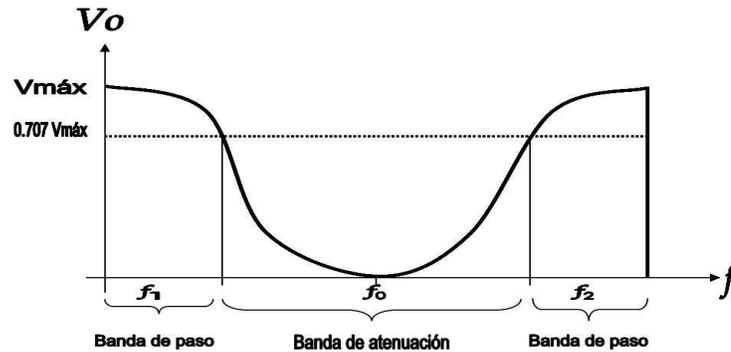


Figura 4.7: Gráfica de Respuesta en Frecuencia del Filtro Rechaza Banda.

Una frecuencia f_1 puede pasar por el filtro pasa bajas y una frecuencia f_2 más alta puede usar la trayectoria en paralelo como se observa en la figura 4.8. Sin embargo una frecuencia f_0 en la

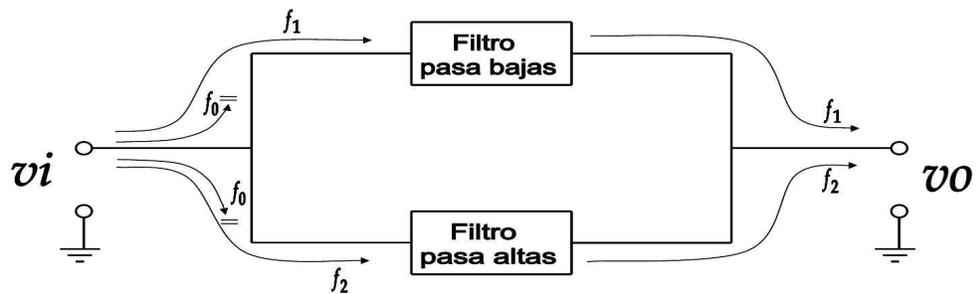


Figura 4.8: Diagrama General del Filtro Rechaza Banda.

banda de atenuación es más alta que la frecuencia de corte pasa baja y menor que la frecuencia crítica pasa altas, lo cual evita que contribuya a los niveles de V_o superiores a $0.707 V_{máx}$.

Para el cálculo del filtro se propone el valor del capacitor de $2.26 \mu\text{F}$ y así podemos calcular el valor de la inductancia mediante la ecuación 3.2.35, resolviendo para L del capítulo anterior:

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} \quad (4.3.1)$$

donde:

$$\omega_0 = 2\pi f \quad (4.3.2)$$

$$L = \frac{1}{(2 \times \pi \times 300)^2 (2.26 \times 10^{-6})} = 124.5mH$$

se propone el valor de $\beta = 70Hz$, entonces se calcula R de la siguiente expresión:

$$R = \frac{1}{\omega C} = 1.010k\Omega$$

para fines prácticos, el valor de R se considerará igual a $1k\Omega$. Por lo tanto el valor de β será $70.42 Hz$, para éste nuevo valor. Sabiendo que la frecuencia del quinto armónico es de $300 Hz$, que corresponde al valor de la frecuencia central ω_0 , se procede al cálculo de las expresiones obtenidas en el capítulo anterior:

para las frecuencias de corte ω_{c1} y ω_{c2} se tiene:

$$\begin{aligned} \omega_{c1} &= -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \\ &= -\frac{1}{(2)(1x10^3)(2.26^{-6})} + \sqrt{\left(\frac{1}{(2)(1x10^3)(2.26^{-6})}\right)^2 + \frac{1}{(124.5^{-3})(2.26^{-6})}} = 226.8Hz \end{aligned}$$

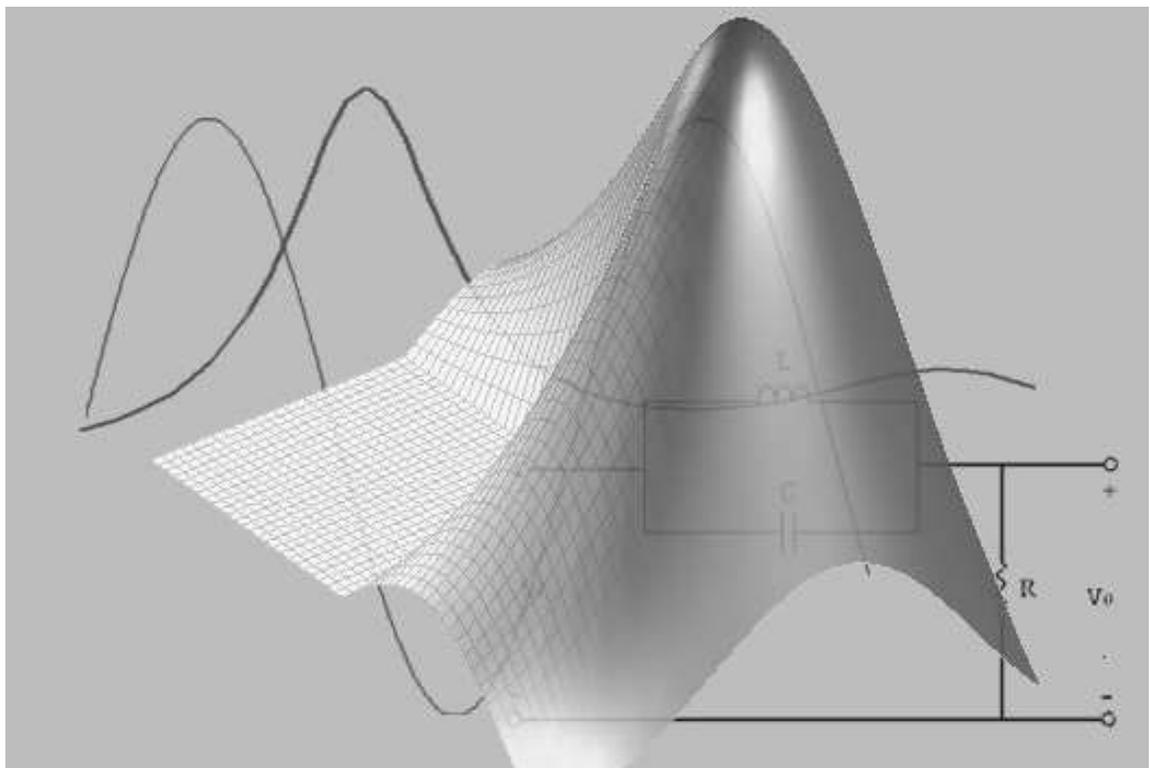
$$\begin{aligned} \omega_{c2} &= \frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \\ &= \frac{1}{(2)(1x10^3)(2.26^{-6})} + \sqrt{\left(\frac{1}{(2)(1x10^3)(2.26^{-6})}\right)^2 + \frac{1}{(124.5^{-3})(2.26^{-6})}} = 337.3Hz \end{aligned}$$

para el factor de calidad la expresión es:

$$Q = \sqrt{\frac{CR^2}{L}} = \sqrt{\frac{(2.26x10^{-6})(1x10^3)^2}{124.5x10^{-3}}} = 4.26$$

Capítulo 5

Simulación del Filtro



En este capítulo se desarrolla el entorno de simulación, a partir del modelo obtenido en el capítulo anterior. Se han elegido, a manera de comparar la funcionalidad del filtro, dos programas para llevar a cabo las simulaciones, estos programas son:

- **Circuit Maker.** Laboratorio electrónico virtual para el desarrollo de diseños, permitiendo probar en el mundo real a través de mezclas de señales. Circuit Maker es una suite de exploración de diseño que contiene las herramientas necesarias para la creación y simulación de diseños electrónicos.
- **Matlab/Simulink.** Es una herramienta para el modelado, análisis y simulación de una amplia variedad de sistemas físicos y matemáticos, inclusive aquellos con elementos no lineales y aquellos que hacen uso de tiempos continuos y discretos. Como una extensión de MatLab, Simulink adiciona muchas características específicas a los sistemas dinámicos, mientras conserva toda la funcionalidad de propósito general de MatLab. Así Simulink no es completamente un programa separado de MatLab, sino un anexo a él. El ambiente de MatLab está siempre disponible mientras se ejecuta una simulación en Simulink.

5.1 Procedimiento

En ambos programas se simula una señal de voltaje deformada, para una fase del banco T-82B, esta señal será objeto del proceso de filtrado para la obtención de una forma de onda sin distorsión. Se muestra la configuración de los parámetros de los elementos involucrados en cada una de las simulaciones. De igual manera, se realiza el comparativo de la señal de entrada con la señal de salida para observar los resultados que produce el filtro.

5.2 Circuit Maker

De acuerdo a los valores de los elementos que componen el filtro, obtenidos en el capítulo anterior, los cuales cumplen con la misión de eliminar la frecuencia del quinto armónico, se genera el circuito correspondiente al filtro rechaza banda, en el programa Circuit Maker para llevar a

cabo la simulación, figura 5.1.

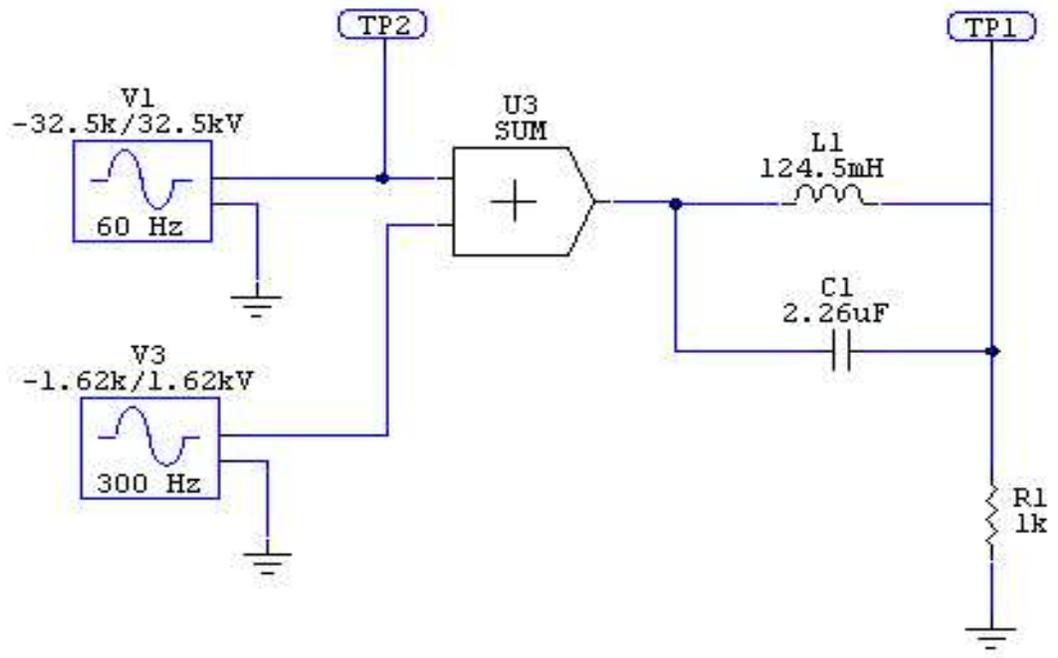


Figura 5.1: Circuito Generado en Circuit Maker para su Simulación.

5.2.1 Elementos del Circuito y Configuración de sus Parámetros

Del modelo matemático se obtuvieron los valores de los elementos pasivos que conforman el filtro y con base a estos se realiza la configuración de los parámetros en la simulación, estos valores son los siguientes:

- $L=124.5 \text{ mH}$
- $C=2.26 \mu\text{F}$
- $R=1\text{k} \Omega$

Dicha configuración de los elementos inductivo, capacitivo y resistivo respectivamente son mostrados en los cuadros de diálogos que aparecen a continuación. En la figura 5.2, se muestra la

configuración del elemento inductivo.

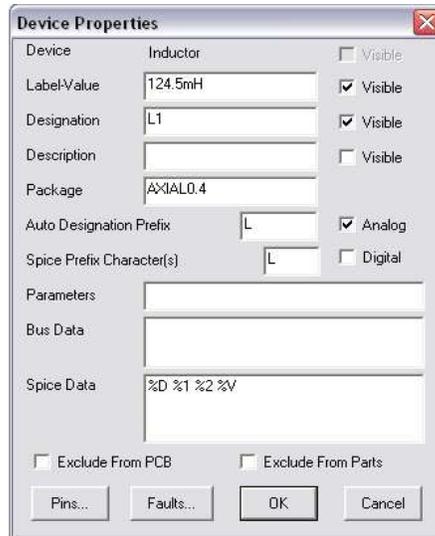


Figura 5.2: Parámetros del Elemento Inductivo.

Aquí se observa algunos campos fundamentales en la configuración del elemento componente del filtro. La figura 5.3 muestra la configuración del elemento capacitivo.

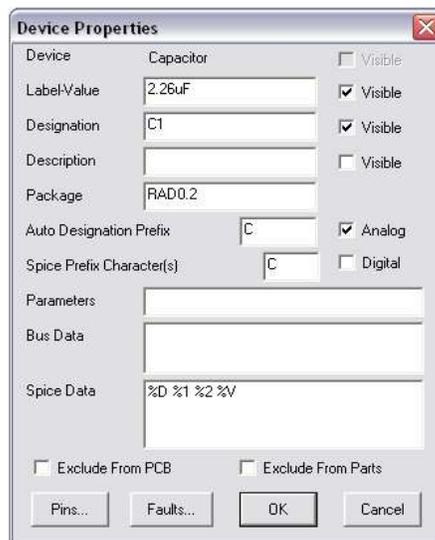


Figura 5.3: Parámetros del Elemento Capacitivo.

El siguiente cuadro de diálogo (figura 5.4), corresponde a la configuración del elemento resistivo. Los campos de mayor importancia son el correspondiente al valor en microhenrys, microfarads y

ohms, de los elementos inductivo, capacitivo y resistivo, respectivamente; este campo muestra la etiqueta “Label-Value”. Así también, el campo donde se asigna el nombre al elemento, “Designation”.

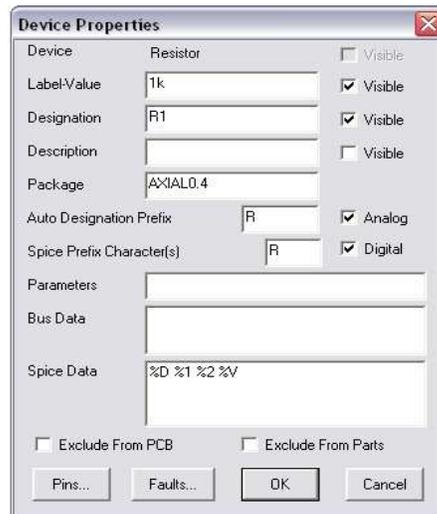


Figura 5.4: Parámetros del Elemento Resistivo.

En la figura 5.5 se muestra el cuadro de diálogo donde se lleva a cabo la configuración de los



Figura 5.5: Parámetros de la Fuente de Voltaje para la Señal Fundamental.

parámetros correspondientes a la señal fundamental. Aquí se observa el campo “Peak Amplitude” referido a la amplitud de la señal, siendo ésta de 32.5 kV valor pico, un segundo campo es donde se asigna la frecuencia “Frequency”, para este caso de 60 Hz. Una vez realizada la configuración, la señal resultante es la mostrada en la figura 5.6 que aparece a continuación:

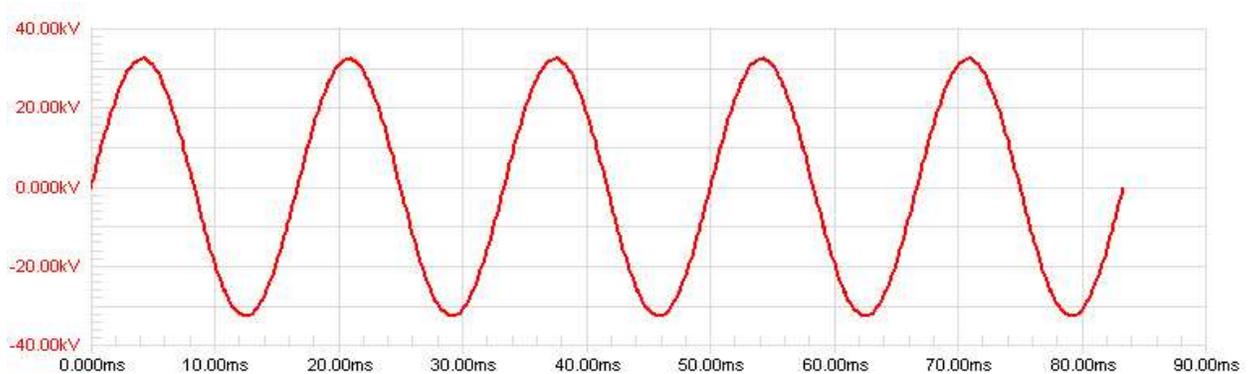


Figura 5.6: Señal Fundamental.

El cuadro de diálogo en la figura 5.7, corresponde a la configuración de la señal del quinto armónico, con amplitud de 1.62 kV de valor pico y 300 Hz de frecuencia.



Figura 5.7: Parámetros de la Señal del Quinto Armónico.

Para este caso se hace necesario hacer uso del campo “Start Delay” el cual describe un defasamiento de valor 2.500 mS valor arrojado por el equipo de medición.

En la figura 5.8 se muestra la gráfica correspondiente al quinto armónico.

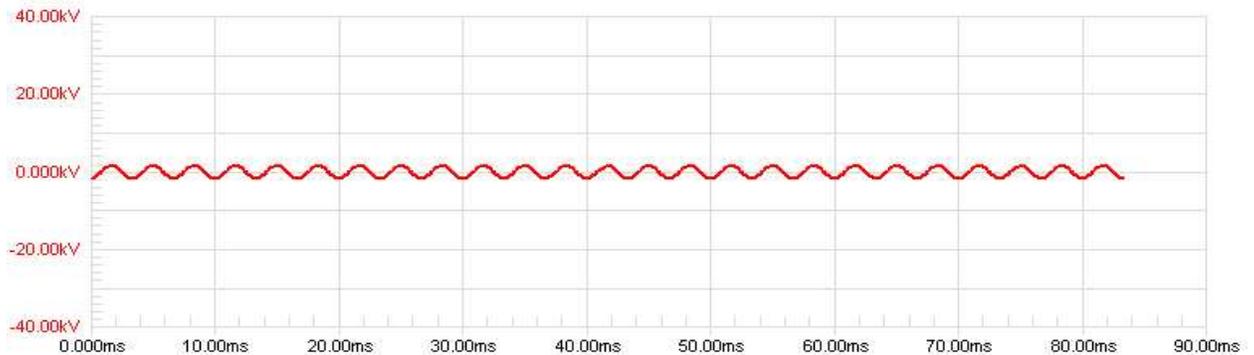


Figura 5.8: Señal del Quinto Armónico.

En el circuito la señal de entrada (figura 5.9), es obtenida de la suma de dos señales; una primer señal con amplitud de 32.5 kV de valor pico con una frecuencia de 60 Hz (fundamental), y otra de amplitud 1.62 kV de valor pico con frecuencia de 300 Hz (quinto armónico).

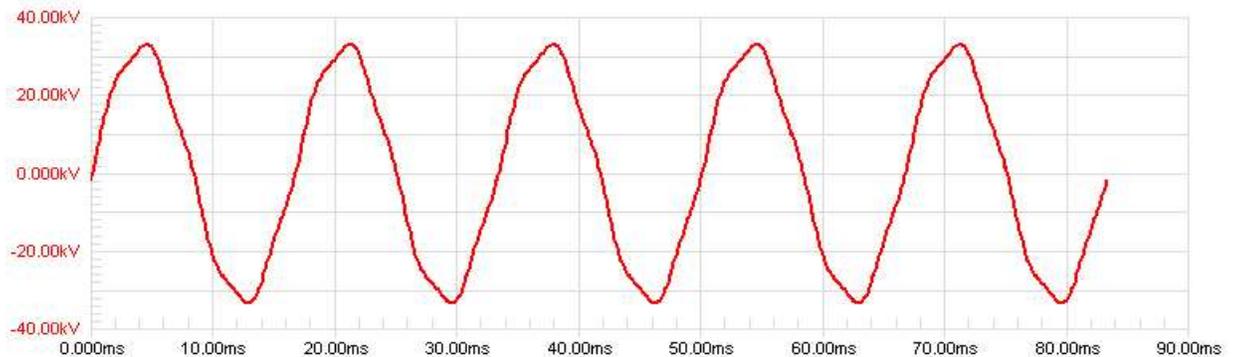


Figura 5.9: Señal Distorsionada Obtenida.

La señal resultante a la salida del filtro, es la que aparece en la figura 5.10, en ella se puede apreciar una señal sin distorsión alguna. Es importante hacer notar que el funcionamiento del filtro, para este programa, se considera aceptable.

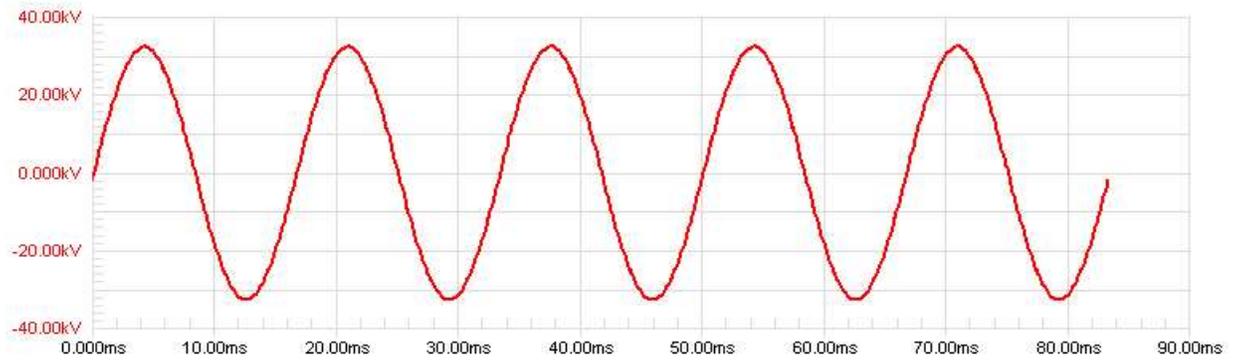


Figura 5.10: Señal Obtenida Después del Proceso de Filtrado.

5.3 Matlab/Simulink

Con el objetivo de comparar resultados, se decidió realizar la simulación en este segundo programa, tomando como base el procedimiento utilizado en el entorno de simulación anterior.

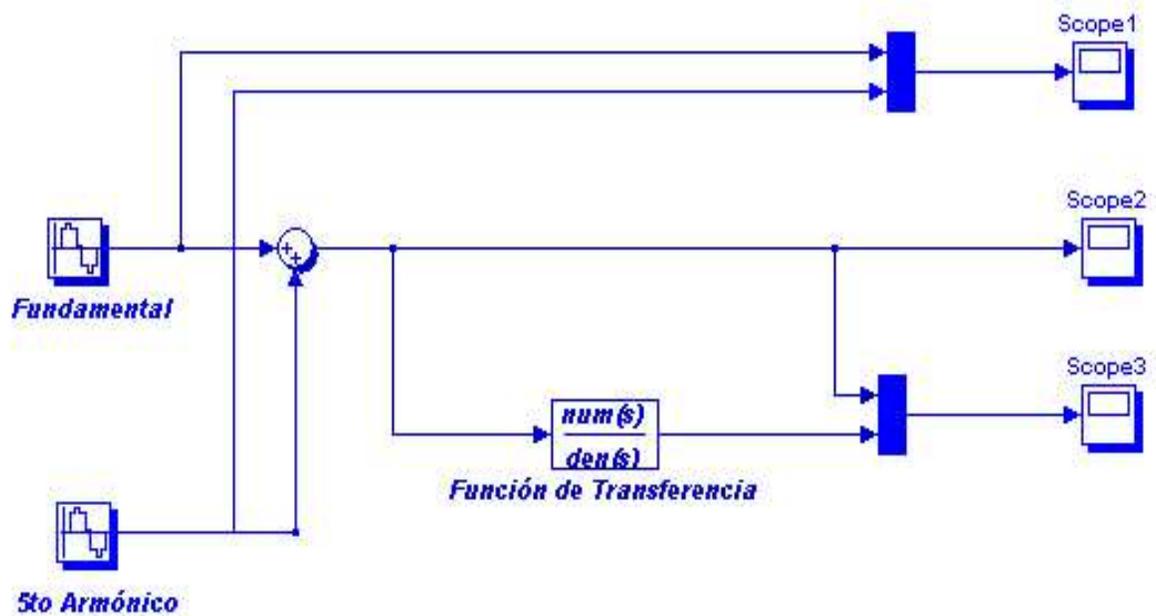


Figura 5.11: Diagrama a Bloques en Simulink.

La figura 5.11 muestra el diagrama a bloques realizado en Simulink, se trata de la señal

fundamental, cuya configuración es realizada conforme al cuadro de diálogo mostrado en la figura 5.12, aquí los campos a considerar son los referidos a la amplitud (Amplitude), para este caso de 32526.911 Volts de valor pico. Frecuencia (Frequency) 120π rad/sec.

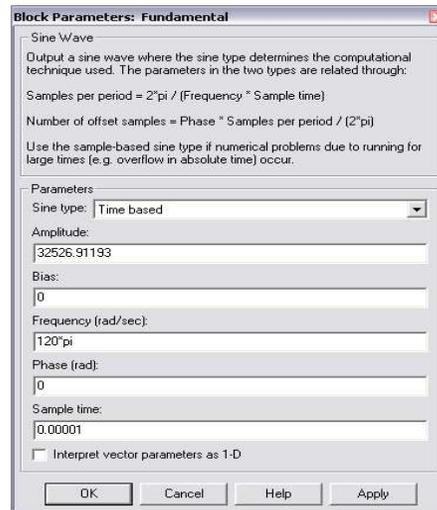


Figura 5.12: Configuración para la Señal Fundamental.

Para el quinto armónico, se tiene el siguiente cuadro de diálogo (figura 5.13), donde la amplitud

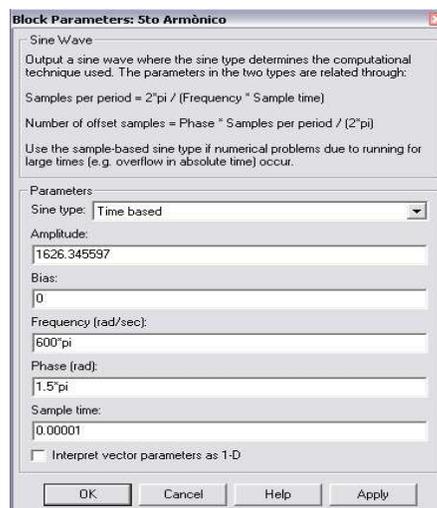


Figura 5.13: Configuración para la Señal del Quinto Armónico.

y frecuencia tienen valores de 1626.345 Volts de valor pico y 600π rad/sec respectivamente. Haciendo la observación de la existencia de un defasamiento en esta señal, siendo de un valor igual a 1.5π rad/sec.

Las gráficas de ambas señales que se obtienen como resultado de la configuración realizada anteriormente, se muestran en la figura 5.14 que aparece a continuación. Aquí se puede apreciar en color negro la señal fundamental y en color rojo la señal del quinto armónico.



Figura 5.14: Señal Fundamental y Señal del Quinto Armónico.

Estas dos señales se suman con el propósito de generar la señal de entrada al filtro, la figura 5.15 muestra el resultado de esta adición. Esta es una señal distorsionada, la cual será objeto del proceso de filtrado con la finalidad de obtener a la salida una señal puramente sinusoidal, como se verá posteriormente.

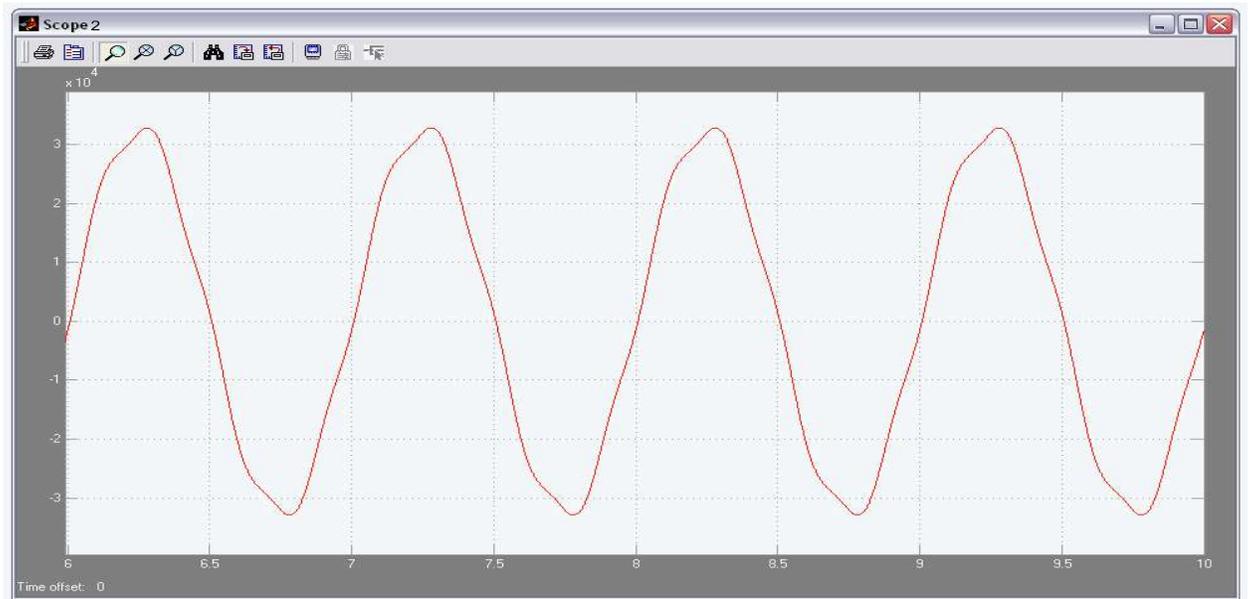


Figura 5.15: Señal Distorsionada Obtenida.

El filtro se simula mediante la función de transferencia, esto es, se colocan los coeficientes tanto del numerador, como los del denominador, como se muestra en el siguiente cuadro de diálogo (figura 5.16).

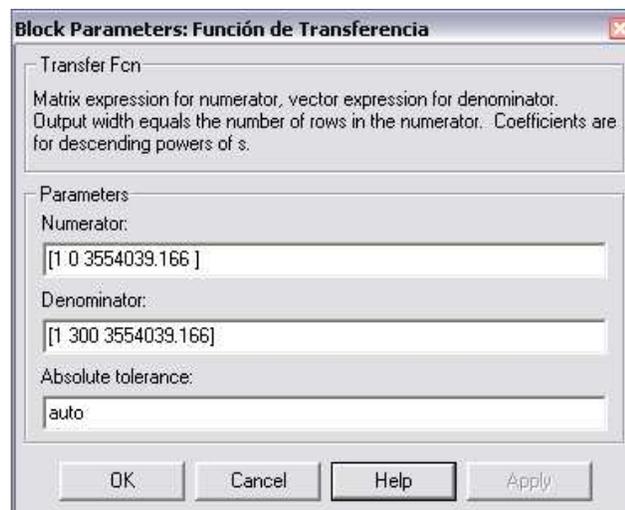


Figura 5.16: Parámetros para la Función de Transferencia.

En la Figura 5.17 es donde se realiza la comparación real de la señal de salida (en color negro), respecto de la señal de entrada (en color rojo), pudiéndose observar como realmente se logra eliminar la distorsión armónica, logrando reafirmar los resultados arrojados por la simulación en el programa Circuit Maker.



Figura 5.17: Comparativo Señal de Entrada con Señal de Salida.

Conclusiones

- Para poder dar solución a los problemas generados por altos índices de distorsión armónica (principalmente en el quinto armónico), producto de cargas no lineales conectadas al sistema de distribución eléctrica, se realizó el cálculo de un filtro pasivo rechaza banda en la Subestación Eléctrica Pachuca para disminuir este problema.
- El Mejoramiento de la Calidad de la Energía en la Subestación Eléctrica Pachuca Utilizando un Filtro Pasivo de Potencia, requirió que se plantearan los fundamentos sobre la teoría de filtros, necesarios para los cálculos de los elementos que conforman el filtro pasivo rechaza banda.
- Se ha investigado en diversas fuentes de consulta, haciendo la observación de que el tema es frecuentemente abordado por distintos autores e investigadores, que plantean diferentes estudios y propuestas relacionados con la calidad de la energía. La importancia de este trabajo es proporcionar los elementos necesarios que permitan la aplicación posterior de esa teoría para un caso real y concreto.
- En el capítulo cinco se desarrollo el entorno de simulación, a partir del modelo matemático obtenido. Se utilizaron, a manera de comparar la funcionalidad del filtro, dos programas para llevar acabo las simulaciones. Ambos entornos de simulación proveen un alto grado de confiabilidad, lo que hace que los resultados sean exactamente los mismos.

- A nivel de simulación los valores obtenidos para los parámetros correspondientes a los elementos que conforman el filtro calculado, responden satisfactoriamente; esto significa que es posible la eliminación del quinto armónico del sistema, con lo que se logra mejorar la calidad de la energía en la Subestación Eléctrica Pachuca.

Glosario y Acrónimos

Amplitud. El tamaño de una onda de corriente o tensión.

Armónico. Señal Sinusoidal, cuya frecuencia es múltiplo de la señal fundamental. Filtro Dispositivo eléctrico que permite, entre otras cosas, mejorar la calidad de las señales que pasan por él.

CA. Corriente Alterna.

Capacitor (C). Es un conjunto de dos conductores, separados por un medio dieléctrico, que sirve para almacenar cargas eléctricas.

CD. Corriente Directa.

Circuit Maker. Laboratorio electrónico virtual para el desarrollo de diseños, permitiendo probar en el mundo real a través de mezclas de señales. Circuit Maker es una suite de exploración de diseño que contiene las herramientas necesarias para la creación y simulación de diseños electrónicos.

DS32. Display Station 32.

Frecuencia. El número de veces que se repite un fenómeno en la unidad de tiempo, se mide en *Hertz*.

Hardware. Es la parte tangible de una computadora (teclado, monitor, unidades de disco.)

IEEE. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Impedancia. La impedancia eléctrica mide la oposición de un circuito o de un componente eléctrico al paso de una corriente eléctrica alterna sinusoidal. El concepto de impedancia generaliza la ley de Ohm en el estudio de circuitos en corriente alterna (CA).

Inductor (L). Un inductor o bobina es un componente pasivo de un circuito eléctrico que almacena energía en forma de campo magnético.

MatLab. Es un programa de cálculo numérico, orientado a matrices y vectores. Creado por The MathWorks.

MÓDEM. Acrónimo de las palabras modulador/demodulador. Actúa como equipo terminal del circuito de datos permitiendo la transmisión de un flujo de datos digitales a través de una señal analógica.

PLC. Controladores Lógicos Programables.

PPS. Pulso Por Segundo.

Resistencia (R). Componente usado en electricidad y electrónica asociado a las pérdidas de voltaje entre dos puntos de un circuito.

RS-232. Es una interfaz que designa una norma para el intercambio serie de datos binarios.

Señal Continua. Señal continua o analógica es aquella que representa una magnitud de manera continua.

Señal Discreta. Señal Discreta o digital es aquella que toma valores sólo para una cantidad discreta de puntos, y además sus valores son únicamente discretos.

Simulación. Es una técnica numérica para conducir experimentos, que comprenden ciertas relaciones matemáticas y lógicas, en una computadora.

Software. Es la parte intangible de una computadora, los programas y aplicaciones que utilizamos a diario.

Subestación Eléctrica. Instalación empleada para la transformación del voltaje de la energía eléctrica. El componente principal de una Subestación Eléctrica es el transformador.

TCP/IP. Protocolo de comunicación de redes que permite la transmisión de información en redes de computadoras. El nombre TCP/IP proviene de dos protocolos importantes de la familia, el Transmission Control Protocol (TCP) y el Internet Protocol (IP).

THD. Total Harmonic Distortion.

Transductor. Dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida. Usado principalmente en las ciencias eléctricas para obtener la información de entornos físicos y conseguir (a partir de esta información) señales o impulsos eléctricos o viceversa.

Transformador. Máquina electromagnética que permite aumentar o disminuir el voltaje o tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia.

Voltaje Pico. Es la magnitud que existe en una onda sinusoidal, entre los extremos superior e inferior.

Voltaje RMS. Es el valor que produce la misma disipación de calor que una corriente directa de la misma magnitud.

Watt. Unidad de energía eléctrica. Las lámparas se clasifican en watts para indicar su consumo de energía. La energía consumida a través del tiempo es igual a la energía utilizada.

Wattthorímetros. Dispositivo que se encarga de registrar el consumo diario de energía, en este caso la unidad de medida es kw/h.

Apéndice A

Terminología para la Descripción de Disturbios

Un problema de calidad de energía eléctrica se puede entender como una perturbación que hace que la tensión, o corriente, del sistema difiera de su apariencia ideal. Sin embargo, es necesario disponer de una catalogación más detallada de dichas perturbaciones para poder clasificar su medida y describir cada fenómeno electromagnético que provoca problemas en la calidad de energía.

Los términos usados para describir los disturbios frecuentemente tienen diferente significado para distintos usuarios. Pero muchos atributos de calidad de energía son comúnmente reconocidos.

A continuación se da una breve descripción de algunos de los disturbios más comunes.

Interrupciones

Es la pérdida total de potencia. Por lo general se considera interrupción cuando el voltaje ha decrecido a un 15 % del valor nominal o menos. Este es debido a aperturas de líneas, daño de transformadores, operación de fusibles o equipos de protección de la red, entre otras posibilidades. También se consideran interrupciones de energía aquellas que duran milisegundos.

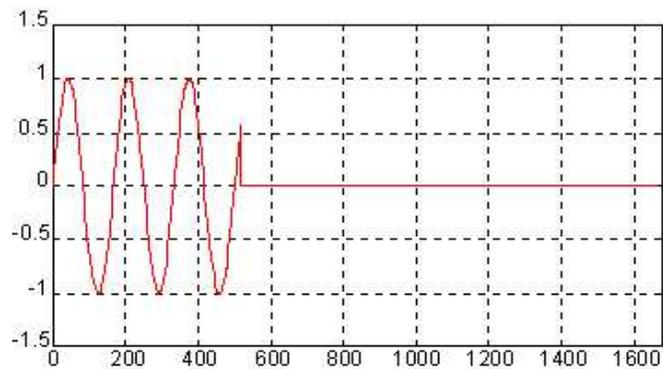


Figura A.1: Interrupciones de Energía

Pico de Voltaje

Es un incremento en el nivel de voltaje que dura microsegundos. Es debido principalmente por fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas y switcheo de grandes cargas.

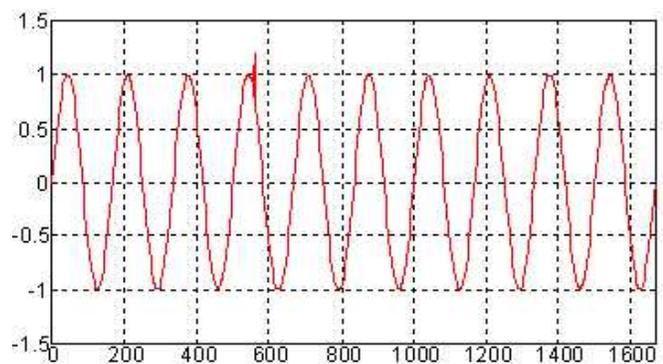


Figura A.2: Pico de Voltaje

Depresión de Voltaje (sags)

Es un decremento momentáneo (varios ciclos de duración) en el nivel de voltaje. Es debido a la conexión de grandes cargas, descargas atmosféricas y fallas en la red eléctrica.

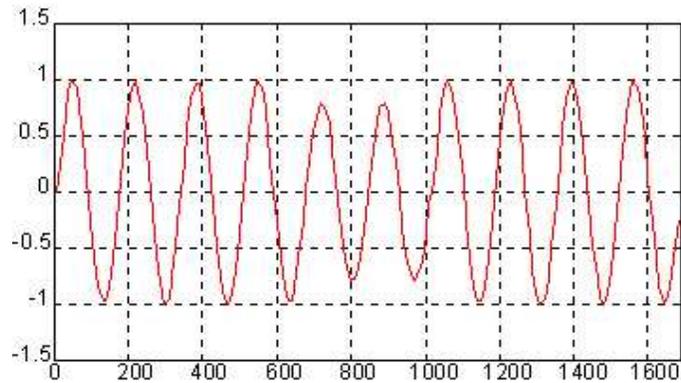


Figura A.3: Depresión de Voltaje (sags)

Dilatación de Voltaje (swell)

Es un incremento del voltaje de varios ciclos de duración. Es ocasionado por la desconexión de cargas grandes y no llega a ser un sobrevoltaje.

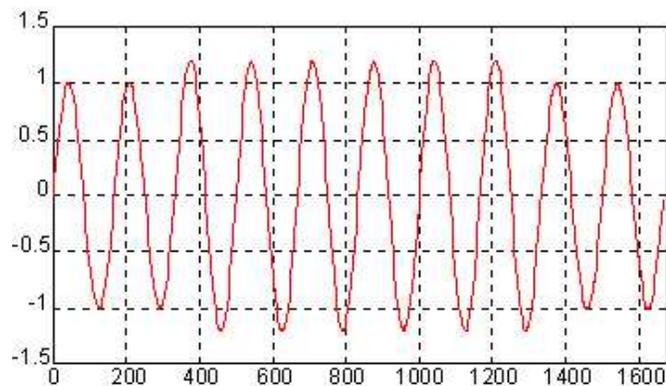


Figura A.4: Dilatación de Voltaje (swell)

Sobrevoltaje

Es una condición de voltaje elevado (arriba del valor nominal) que a diferencia del swell de voltaje, dura mucho más tiempo. Es causado por una pobre regulación de voltaje.

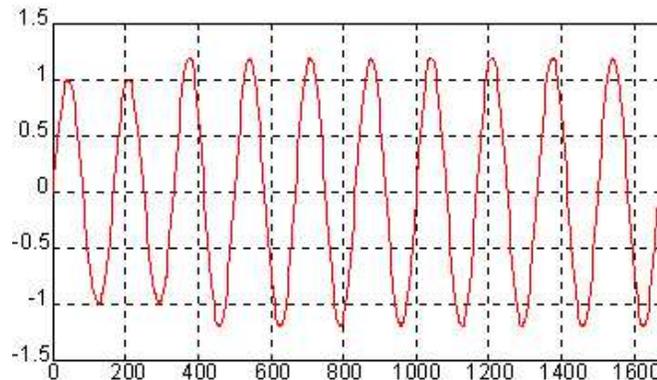


Figura A.5: Sobrevoltaje

Parpadeo (flickers)

Se refiere a las fluctuaciones en el nivel de voltaje. Estas son debidas a la conexión de cargas cíclicas como hornos eléctricos o por oscilaciones subarmónicas (subarmónicas se refiere a señales de frecuencia menor a la fundamental). Por lo general este efecto se observa fácilmente en el cambio de intensidad bajo y alto de lámparas y ruido acelerado y desacelerado de motores.

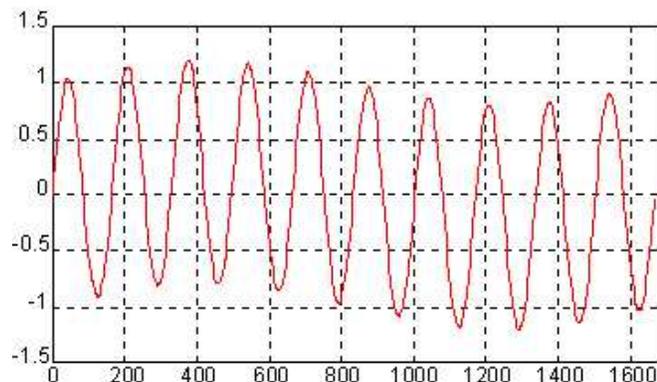


Figura A.6: Parpadeo (flickers)

Ruido Eléctrico

Es la distorsión (no necesariamente periódica) de la forma sinusoidal del voltaje. Éste es debido a switcheo, transmisores de radio y equipo industrial de arco eléctrico.

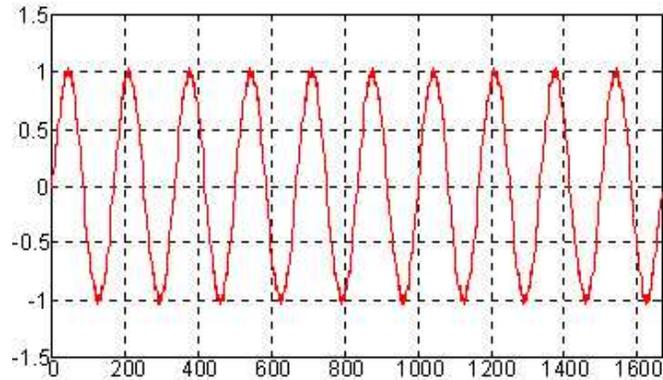


Figura A.7: Ruido Eléctrico

Distorsión Armónica

Es la distorsión (periódica) de la forma de onda senoidal del voltaje o corriente. Ésta es causada por la operación de equipos no lineales como lo son rectificadores y hornos de arco eléctrico. Este es un fenómeno en estado estable.

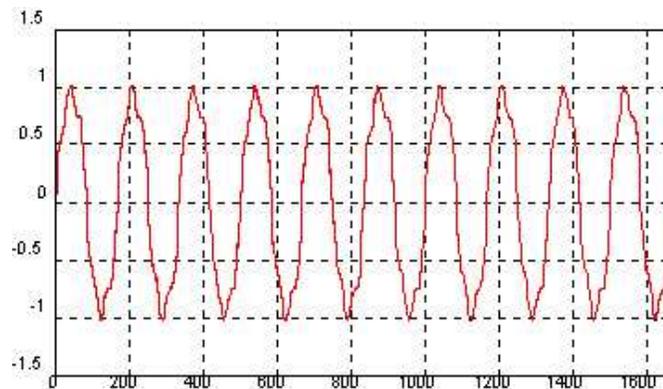


Figura A.8: Distorsión Armónica

Apéndice B

Sistema de Adquisición de Datos

TR-2000

Un sistema de adquisición de datos es un equipo que permite tomar señales físicas del entorno y convertirlas en datos que posteriormente se pueden procesar y presentar. Para la obtención de dichos datos se uso un equipo de adquisición de datos modelo TR-2000 de la marca Rochester, el cual posee muchas características para el desarrollo de esta actividad[8].

Registros

Cada minuto se registran las tensiones y corrientes de entrada al TR-2000 como un valor de RMS máximo, mínimo y promedio. También se registra la frecuencia máxima, mínima y promedio de dos canales seleccionados. Del TR-2000 se pueden descargar bloques seleccionados de datos para su visualización gráfica. También se registran datos de energía, descompensación y armónicos en registros independientes[8].

Transductores

El TR-2000 computa una amplia gama de valores de las tensiones y corrientes registrados. Se pueden conectar transductores externos al TR-2000 para ampliar el rango de funciones. Estas funciones podrían incluir presión, temperatura y posición[8].

Almacenamiento en el Disco Duro

El TR-2000 se encuentra equipado con una unidad de disco duro. Esto proporciona una gran capacidad de almacenamiento de datos estables para registros de falla de transientes y de perturbación [8].

Capacidad de Trabajo en Red

El TR-2000 se puede configurar como parte de una red de monitoreo integrado con múltiples registradores en las subestaciones de una región. Las comunicaciones entre la Display Station y los TR-2000 pueden efectuarse por medio de un módem o por medio de una conexión de red TCP/IP en una red de área amplia[8].

Impresión

Los registros de falla de transientes pueden ser impresos localmente por el TR-2000 o remotamente en la Display Station. Cada registro incluye la ubicación del TR-2000, la hora y fecha del registro, y la fuente de la activación[8].

Registro de Evento

El TR-2000 mantiene un registro de evento y mensajes de error que se pueden leer a través de la Display Station. Si se detecta una falla interna durante una auto-comprobación, se envía un mensaje a la impresora (si se encuentra instalada) y se archiva en el registro de evento[8].

Instalación

El TR-2000 está disponible en un chasis portátil. Todas las conexiones de fuente de alimentación principal, de entrada y salida se hacen por medio de terminales atornillados en la parte trasera del chasis. Las comunicaciones, la impresora y otros conectores auxiliares también se encuentran en el panel trasero[8].

Conexiones de Entrada Analógica y Digital

Los cables de entrada analógica se acoplan a los conectores en la parte posterior del TR-2000. El tamaño del cable para todas las entradas analógicas y digitales es 1.5 mm² (14 AWG)[8].

Entradas Digitales

Hay dos veces más entradas digitales que analógicas. Las mismas se utilizan normalmente para supervisar el funcionamiento de los relevadores y los interruptores de protección a través de los contactos auxiliares. Las entradas digitales deben tener una fuente de alimentación de CD conectada externamente[8].

Puerto de Serie de Código Horario

Cuando se utilizan varios registradores en un solo sitio, puede utilizarse un solo receptor de GPS para proporcionar una sincronización horaria sumamente exacta entre las unidades. Esto requiere una conexión de una antena de satélite externa a un chasis TR-2000, que llamaremos registrador “maestro” [8].

Puerto 1 PPS Óptico

En el puerto óptico situado en la parte posterior del TR-2000 se proporciona una señal exacta de 1 pulso por segundo (1 PPS). La salida de 1 PPS del registrador maestro se conecta a todos los demás a través de un cable de fibra óptica para suministrar la referencia de tiempo [8].

Antena de GPS

El TR-2000 utiliza un receptor de GPS interno como fuente muy exacta de tiempo. La antena debe colocarse verticalmente en un lugar dónde tenga máxima visibilidad del cielo sin obstrucciones. Una buena visibilidad del cielo es el requisito para la fiabilidad a largo plazo [8].

Visualización en tiempo real

La función de Visualización en tiempo real en el Display Station puede utilizarse para verificar que los niveles de señales reportados por el TR-2000 son correctos [8].

Bibliografía

- [1] Gómez A., *Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica*, Mc Graw Hill, 2002.
- [2] Merlin G., *Harmonic in Industrial Networks*, Groupe Schneider.
- [3] González J., *Tesis, Compensación de Potencia Reactiva en Sistemas Contaminados con Armónicos*, Universidad Central de las Villas, 1998 .
- [4] Ametex Power Instruments., *Display Station 32, Manual de Operación de Software*, Ametex, 2000.
- [5] Ogata K., *Ingeniería de Control Moderno*, Prentice Hall, 1980.
- [6] Navarro R., *Ingeniería de Control Analógica y Digital*, Mc. Graw Hill, 2000.
- [7] Nilsson W., Riedel A., *Circuitos Eléctricos*, Pearson Education, 2001.
- [8] Ametex Power Instruments., *TR2000 Registrador Multifunción, Manual de Operación*, Ametex, 2000.
- [9] Duncan J., *Power System Analysis and Design*, Brooks/cole, 2002.
- [10] Murray R., *Transformadas de la Place*, Mc Graw Hill, 1998.
- [11] Mark A., *Introducción al Análisis de Fourier y las ondas complejas*, International/Thomson Editores.
- [12] Buban P., Malvino A., Schmitt M., *Electricidad y Electrónica Aplicaciones Prácticas*, Mc Graw Hill, 1987.

-
- [13] Johnson D., Milburn J., Johnson J., *Análisis Básico de Circuitos Eléctricos*, Prentice Hall, 1987.
- [14] Anderson J., *Circuitos y Medidas de Corriente Alterna: Manual de Auto Enseñanza Programada*, Paraninfo, 1973.
- [15] Boylestad R., *Análisis Introductorio de Circuitos*, Trillas, 1995.
- [16] Edminister J., Nahvi M., *Circuitos Eléctricos*, McGraw-Hill, 1997.
- [17] Richard C., *Circuitos Eléctricos: Introducción al Análisis y Diseño*, Alfaomega, 1992.
- [18] Zeines B., *Análisis de Circuitos Eléctricos*, Continental, 1983.
- [19] Irwin D., *Análisis Básico de Circuitos en Ingeniería*, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997.
- [20] Hwei P. Hsu., *Análisis de Fourier*, Addison-Wesley Iberoamericana, 1987.
-