



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL**  
**Campus Santo Domingo**  
**ARTURO RUIZ MORA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

Tesis de grado previo a la obtención del título de:

**INGENIERO ELECTROMECÁNICO**  
**MENCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**SIMULACIÓN EN SOFTWARE “MATLAB” DE UN SISTEMA DE  
CONTENIDO ARMÓNICO Y SUS EFECTOS EN LA COMPENSACIÓN  
REACTIVA UTE 2011**

**Estudiante:**

**ROBERTO CARLOS ORTEGA ORDOÑEZ**

**Director de Tesis:**

**ING. JORGE FABIÁN YUCCHA TORRES.**

Santo Domingo – Ecuador

Julio, 2012

**SIMULACIÓN EN SOFTWARE “MATLAB” DE UN SISTEMA DE  
CONTENIDO ARMÓNICO Y SUS EFECTOS EN LA COMPENSACIÓN  
REACTIVA UTE 2011.**

Ing. Jorge Fabián Yuccha Torres  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

**APROBADO**

Ing. Marcelo Estrella  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

Ing. Jorge Terán  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

---

Ing. Néstor Albán  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

---

Santo Domingo.....de.....del 2012.

**Autor: ROBERTO CARLOS ORTEGA ORDOÑEZ**  
**Institución: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL.**  
**Título de Tesis: SIMULACIÓN EN SOFTWARE “MATLAB” DE UN SISTEMA DE CONTENIDO ARMÓNICO Y SUS EFECTOS EN LA COMPENSACIÓN REACTIVA UTE 2011**  
**Fecha: JULIO, 2012**

El contenido del presente trabajo, está bajo la responsabilidad del autor.

---

**Roberto Carlos Ortega Ordoñez**

**1718966516**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL**  
**Campus Santo Domingo**  
**ARTURO RUIZ MORA**

**INFORME DEL DIRECTOR DE TESIS**

Santo Domingo....de.....del 2012.

Ing. Estrella Marcelo

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Estimado Ingeniero

Mediante la presente tengo a bien informar que el trabajo investigativo realizado por el señor **ROBERTO CARLOS ORTEGA ORDOÑEZ**, cuyo tema es: **“SIMULACIÓN EN SOFTWARE “MATLAB” DE UN SISTEMA DE CONTENIDO ARMÓNICO Y SUS EFECTOS EN LA COMPENSACIÓN REACTIVA UTE 2011”**, ha sido elaborado bajo mi supervisión y revisado en todas sus partes, por lo cual autorizo su respectiva presentación.

Particular que informo para fines pertinentes

Atentamente.

---

Ing. Jorge Fabián Yuccha Torres.  
**DIRECTOR DE TESIS**

# *Dedicatoria*

A mi familia, mi madre Lourdes Ordoñez quien con su apoyo incondicional no me negó el derecho y privilegio de seguir con mis estudios superiores, de ser comprensiva y paciente en todos estos momentos, también a mis hermanos, Danny Ortega y Cristian Ortega por ser tolerante y brindarme su apoyo incondicional.

Al Ing. Jorge Terán quien fue una guía importante para la culminación de mi tesis.

Así mismo a mi director de tesis Ing. Jorge Fabián Yuccha Torres, por su motivación e interés mostrado; que aportó con sus conocimientos, opiniones y sugerencias para lograr terminar el objetivo planteado.

Además quiero expresar el profundo sentimiento de gratitud y agradecimiento a la Institución y a mis profesores, quienes aportaron con sus conocimientos y desarrollaron en mí el espíritu de superación para llegar hasta este punto en mi vida, ser un profesional.

**Roberto Carlos Ortega Ordoñez**

# *Agradecimiento*

Primeramente agradezco a Dios por cuidarme en todo estos años de estudio y por haberme dado la fortaleza y sabiduría para culminar esta meta planteada de llegar hacer un profesional para beneficio de mi familia y de la comunidad.

Agradezco a mi madre, quien ha sido durante todos estos años de mi vida de estudio, la base de superación, que con su amor incondicional, apoyo y gran sacrificio ha sabido brindarme sus sabios consejos para seguir adelante en la lucha de alcanzar el objetivo de superación en mi vida.

A mí querida madre, Lourdes Ordoñez.

Roberto Carlos Ortega Ordoñez

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Tema</b>	<b>Página</b>
Portada .....	i
Hoja de sustentación y aprobación del tribunal.....	ii
Responsabilidad del Autor .....	iii
Aprobación del Director de Tesis .....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento .....	vi
Tabla De Contenido .....	vii
Resumen Ejecutivo .....	xvii
Executive Summary.....	xviii

### **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

1.1. Antecedentes y naturaleza del problema .....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.2.1. Diagnóstico.....	3
1.2.2. Diagnóstico.....	3
1.2.3. Control de pronóstico .....	4
1.3. Alcance .....	4
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo General .....	5
1.4.2. Objetivos Específicos .....	5
1.5. Justificación.....	5

## CAPÍTULO II

### TEORÍA Y METODOLOGÍA APLICADA

2.1.	Marco teórico .....	6
2.2.	Magnitudes eléctricas de señales no distorsionadas .....	6
2.2.1.	Valor RMS .....	6
2.2.2.	Valor pico (speak) .....	7
2.2.3.	Valor pico a pico (p-p) .....	7
2.2.4.	Valor promedio .....	7
2.2.5.	Potencia Instantánea .....	9
2.2.6.	Potencia Activa .....	10
2.2.7.	Potencia Reactiva .....	10
2.2.8.	Potencia Aparente .....	10
2.3.	Señales distorsionadas .....	11
2.3.1.	Definición de armónicos .....	11
2.3.2.	Tasa de distorsión armónica .....	11
2.3.3.	Distorsión Armónica Total .....	13
2.3.4.	Distorsión Armónica total de corriente (THD <sub>i</sub> ) .....	13
2.3.5.	Distorsión Armónica total de tensión (THD <sub>v</sub> ) .....	14
2.3.6.	Distorsión Total de Demanda (TDD) .....	15
2.4.	Clasificación de los armónicos .....	15
2.4.1.	Armónicas pares .....	16
2.5.	Normas del nivel de distorsión armónica .....	17
2.5.1.	Límites de distorsión en Voltaje .....	17
2.5.2.	Límites de distorsión en Corriente .....	18
2.6.	Onda de Corriente Ideal .....	20
2.7.	Indicadores Esenciales de la Distorsión Armónica .....	20
2.7.1.	Factor de Potencia .....	21
2.7.1.1.	Potencia fundamental y armónica .....	22
2.7.2.	Factor de Cresta .....	27
2.7.3.	Potencia de Distorsión .....	28
2.7.4.	Espectro en frecuencia .....	28

2.8.	Tipo de cargas .....	29
2.8.1.	Cargas Lineales .....	29
2.8.1.1.	Cargas resistivas.....	29
2.8.1.2.	Cargas inductivas.....	30
2.8.1.3.	Carga capacitiva .....	30
2.8.1.4.	Diagrama fasoriales del voltaje y la corriente.....	31
2.8.2.	Carga no Lineal.....	31
2.9.	Compensación reactiva.....	33
2.9.1.	Efectos de la carga no lineal en la compensación reactiva .....	35
2.9.1.1.	Bancos de condensadores y cables aislados.....	35
2.9.1.2.	Características de la Carga.....	35
2.10.	Resonancia .....	36
2.10.1.	Impedancia de transformadores.....	40
2.10.2.	Condiciones de resonancia .....	41
2.10.3.	Resonancia paralelo .....	42
2.10.4.	Resonancia Serie .....	43
2.10.5.	Componente resistiva .....	45
2.10.6.	Componente del motor.....	46
2.10.7.	Características del sistema de distribución típico.....	46
2.11.	Filtros de armónicas.....	47
2.11.1.	Tipos de filtros.....	48
2.11.1.1.	El tipo de tecnología (componentes) con que se fabrica el filtro ..	49
2.11.1.2.	Respuesta de frecuencia .....	58
2.12.	Características de los filtros .....	61
2.12.1.	Frecuencia central ( $f_0$ ).....	61
2.12.2.	Frecuencia de corte.....	61
2.12.3.	Ancho de banda (BW) .....	62
2.12.4.	Factor de calidad (Q).....	62
2.13.	Simulink .....	65
2.13.1.	Entorno Gráfico .....	65
2.13.2.	Bloques Principales.....	69
2.13.2.1.	Librería de Sumidero (Sink) .....	70

2.13.2.2.	Librería de Ruta de Señales (RoutingSignals).....	73
2.13.3.	Tiempo de simulación.....	74
2.14.	Analizador de energía .....	75
2.14.1.	Descripción.....	75
2.14.2.	Características .....	76
2.14.3.	Normativa Internacional IEC 61000-4-30 .....	77

### CAPÍTULO III

#### FACTOR DE POTENCIA CON ARMÓNICOS

3.1.	Introducción.....	80
3.2.	Calculo de la línea 1 .....	82
3.2.1.	Calculo de la distorsión armónica total $THD_i$ .....	83
3.2.2.	Calculo del factor de distorsión $f_{dist}$ .....	84
3.2.3.	Calculo de factor de potencia FP .....	84
3.2.4.	Calculo de potencia aparente $S_1$ .....	85
3.2.5.	Calculo de potencia reactiva Q1 (VAR) .....	85
3.2.6.	Calculo de potencia de distorsión (VA).....	86
3.2.7.	Cálculo de potencia aparente total ST .....	86
3.2.8.	Cálculo de potencia reactiva para compensar el factor de potencia FP .....	87
3.2.9.	Cálculo de la potencia reactiva para compensar el factor de potencia desplazamiento DFP .....	87
3.3.	Calculo de la línea 2.....	89
3.3.1.	Calculo de la distorsión armónica total $THD_i$ .....	90
3.3.2.	Calculo del factor de desplazamiento $f_{dist}$ .....	91
3.3.3.	Calculo de factor de potencia FP .....	91
3.3.4.	Calculo de potencia aparente $S_1$ .....	92
3.3.5.	Calculo de potencia reactiva Q1 (VA) .....	92
3.3.6.	Calculo de potencia de distorsión (VA).....	93
3.3.7.	Cálculo de potencia aparente total S .....	93

3.3.8.	Cálculo de potencia reactiva para compensar el factor de potencia FP .....	94
3.3.9.	Cálculo de la potencia reactiva para compensar el factor de potencia desplazamiento DFP .....	94
3.4.	Calculo de la línea 3 .....	96
3.4.1.	Calculo de la distorsión armónica total THDi .....	96
3.4.2.	Calculo del factor de desplazamiento fdist.....	97
3.4.3.	Calculo de factor de potencia FP .....	98
3.4.4.	Calculo de potencia aparente S1 .....	98
3.4.5.	Calculo de potencia reactiva Q1 (VAR).....	99
3.4.6.	Calculo de potencia de distorsión (VA) .....	99
3.4.7.	Cálculo de potencia aparente total S .....	100
3.4.8.	Cálculo de potencia reactiva para compensar el factor de potencia FP.....	100
3.4.9.	Cálculo de la potencia reactiva para compensar el factor de potencia desplazamiento DFP .....	101
3.5.	Resumen de calculados realizados .....	102
3.5.1.	Análisis Analítico .....	105

## **CAPÍTULO IV**

### **RESONANCIA EN PARALELOS CON ARMÓNICOS**

4.1.	Resonancia .....	108
4.1.1.	Calculo de la Impedancia interna del transformador .....	109
4.1.2.	Impedancia interna del secundario del transformador.....	110
4.1.3.	Reactancia interna del secundario del transformador .....	110
4.1.4.	Resistencia interna del secundario del transformador.....	111
4.1.5.	Impedancia base del transformador .....	111
4.1.6.	Impedancia por unidad del transformador .....	111
4.1.7.	Resistencia por unidad del transformador .....	111
4.1.8.	Reactancia por unidad del transformador.....	112

4.1.9.	Inductancia base del transformador .....	112
4.1.10.	Inductancia del transformador.....	112
4.1.11.	Inductancia por unidad del transformador.....	112
4.2.	Calculo de la corriente de transformador .....	114
4.3.	Calculo de Impedancia de la Acometidas .....	115
4.3.1.	Calculo de la impedancia por unidad del Acometida principal .....	116
4.3.2.	Calculo de Inductancia de la Acometida .....	116
4.4.	Calculo de la impedancia total del sistema .....	118
4.5.	Cálculo de potencia de cortocircuito .....	118
4.6.	Calculo número de armónico .....	119
4.7.	Calculo de frecuencia de resonancia .....	119
4.8.	Calculo de límites de distorsión.....	121
4.8.1.	Corriente de cortocircuito: .....	121
4.8.2.	Promedio de corrientes de fundamentales.....	121
4.8.3.	Relación Icc / IL es igual .....	121
4.9.	Calculo de Facto de calidad Q .....	123
4.10.	Análisis de la simulación .....	124

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1.	CONCLUSIONES .....	130
5.2.	RECOMENDACIONES .....	132
	BIBLIOGRAFIA .....	134
	ANEXOS .....	137

### **INDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1.	Clasificación de los armónicos.....	16
Tabla 2.2.	Clasificación de los armónicos impares.....	16
Tabla 2.3.	Efectos dependiendo del tipo de secuencia.....	17
Tabla 2.4.	Límites de distorsión en Voltaje bajo la norma IEEE 519.....	18
Tabla 2.5.	Límites de distorsión en Corriente bajo la norma IEEE 519.....	18
Tabla 2.6.	Impedancias porcentuales típicas de transformadores.....	41

Tabla 3.1. Valores de corrientes armónicas.....	81
Tabla 3.2. Valores de potencia y factor de potencia.....	81
Tabla 3.3. Resultados de simulación.....	103
Tabla 3.4. Resumen de los valores de la simulación.....	103
Tabla 3.5. Resumen de las formulas y unidades.....	104
Tabla 4.1. Tensión de cortocircuito ucc normalizada para transformadores MT/BT de distribución publica.....	110
Tabla 4.2. Resumen del cálculo de valores por unidad del transformador DESCRIPCION FORMULA RESULTADO.....	114
Tabla 4.3. Resumen de cálculo de Resonancia en paralelo.....	120

### INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Valores de la amplitud de una onda de CA senoidal.....	7
Figura 2.2. Señal fundamental más tercera armónica.....	11
Figura 2.3. Diagrama de secuencia positiva, negativa y cero.....	17
Figura 2.4. Triangulo de potencias .....	21
Figura 2.5. Tetraedro de potencias .....	23
Figura 2.6. Triángulo de Potencias Totales.....	23
Figura 2.7. Triángulo de Potencias Fundamentales.....	23
Figura 2.8. Triángulo de Potencias Fluctuante.....	24
Figura 2.9. Triangulo de Potencias Aparentes y Distorsión.....	24
Figura 2.10. Diagrama de espectro de frecuencia.....	28
Figura 2.11. Lámpara incandescente .....	30
Figura 2.12. Motor trifásico tipo jaula de ardilla.....	30
Figura 2.13. Capacitor trifásico.....	31
Figura 2.14. Diagrama fasoriales del voltaje y la corriente .....	31
Figura 2.15. Rectificador trifásico de media onda.....	32
Figura 2.16. Variador de Velocidad Sinamics G110 .....	32
Figura 2.17. Triangulo de potencia y $\cos \phi$ .....	33
Figura 2.18. Flujo Normal de Corriente Armónica.....	42

Figura 2.19. Condiciones de Resonancia Paralelo.....	43
Figura 2.20. Curva de resonancia Paralelo.....	43
Figura 2.21. Condiciones de Resonancia Serie.....	44
Figura 2.22. Curva de Resonancia serie.....	44
Figura 2.23. Respuesta del Sistema Ilustrando el Efecto de la Carga Resistiva en Paralelo con la Resonancia Pico.....	45
Figura 2.24. Representación esquemática de la función de un filtro.....	48
Figura 2.25. Posible combinación de elementos de elementos pasivos que pueden formar parte de un arreglo de un filtro pasivo.....	49
Figura 2.26. Filtro pasivo en serie.....	50
Figura 2.27. Circuito monofásico con la implementación de un filtro pasivo de potencia paralelo.....	51
Figura 2.28. Arreglo de una sola rama de un filtro pasivo de potencia paralelo.....	51
Figura 2.29. Filtro sintonizado simple (b) Comportamiento en frecuencia.....	52
Figura 2.30. Representación de la operación un filtro activo de potencia.....	54
Figura 2.31. Bosquejo de la conexión de un filtro activo de potencia paralelo Bosquejo de la conexión de un filtro activo de potencia se-rie...	55
Figura 2.32. Representación grafica de la acción de un filtro activo de potencia serie Este filtro también posee la característica de bloquear el paso hacia la fuente de las corrientes que se generan en la carga.....	55
Figura 2.33. Representación grafica de la acción de un filtro activo de potencia paralelo.....	56
Figura 2.34. Bosquejo de conexión de un filtro hibrido de potencia serie.....	57
Figura 2.35. Bosquejo de conexión de un filtro hibrido de potencia paralelo...	57
Figura 2.36. Curva característica del filtro de paso bajo.....	59
Figura 2.37. Curva característica del filtro de paso alto.....	59
Figura 2.38. Curva característica del filtro de paso banda.....	60
Figura 2.39. Curva característica del filtro de rechazo de banda.....	61
Figura 2.40. Determinación del Q mediante la curva de resonancia.....	63
Figura 2.41. Dos gráficos de dos filtros con la misma frecuencia central .....	63

Figura 2.42. Valores de Q con la misma frecuencia central .....	65
Figura 2.43. Ventana principal Matlab®.....	66
Figura 2.44. Ventana principal Simulink®.....	67
Figura 2.45. Librería Simulink®.....	68
Figura 2.46. Bloques principales .....	69
Figura 2.47. Librería Sink .....	70
Figura 2.48. Icono de parámetros vista general .....	71
Figura 2.49. Icono parámetros, vista date history .....	72
Figura 2.50. Librería Signal Routing .....	73
Figura 2.51. Parámetros del bloque Mux .....	74
Figura 2.52. Parámetro de configuración del programa Simulink®.....	75
Figura 2.53. Analizador de energía trifásico AEMC 3945.....	76
Figura 3.1. Cargas no lineales de la línea 1.....	82
Figura 3.2. Distorsión Armónica Total de Corriente de la línea 1.....	84
Figura 3.3. Corrientes Armónicas y Corriente total de la línea 1.....	88
Figura 3.4. Cargas no lineales de la línea 1.....	89
Figura 3.5. Distorsión Armónica Total de Corriente de la línea 2.....	91
Figura 3.6. Corrientes Armónicas y Corriente total de la línea 2.....	95
Figura 3.7. Cargas no lineales de la línea 3.....	96
Figura 3.8. Distorsión Armónica Total de Corriente de la línea 2.....	97
Figura 3.9. Corrientes Armónicas y Corriente total de la línea 3.....	102
Figura 3.10. Triangulo de Potencias Aparentes y Distorsión Armónica.....	105
Figura 3.11. Triangulo de Potencias Fundamentales .....	106
Figura 3.12. Triangulo de Potencias Totales .....	106
Figura 3.13. Triangulo de Potencias Fluctuantes .....	107
Figura 3.14. Tetraedro de potencias de la línea 1.....	107
Figura 4.1. Diagrama Unifilar de Potencia .....	108
Figura 4.2. Diagrama unifilar de fuentes de corrientes .....	109
Figura 4.3. Bloque de Parámetros del transformador .....	113
Figura 4.4. Bloque de parámetros de resistencia e inductancia de la acometida.....	117
Figura 4.5. Armónicos en porcentajes .....	122

Figura 4.6.	Banco de condensadores en Simulink .....	124
Figura 4.7.	Bloque de parámetros (three - Fhase / Parallel RCL Load).....	125
Figura 4.8.	Bloque Powergui Impedance vs Frequency Measurement Tool .....	126
Figura 4.9.	Banco de condensadores con filtro en paralelo (Simulink).....	127
Figura 4.10.	Bloque de parámetros Three - Phase Harminic Filter 1.....	128
Figura 4.11.	Curva de resonancia atenuada por el filtro en paralelo.....	129

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo investigativo está desarrollada en 5 capítulos, de los cuales a continuación se redacta un resumen de la obra.

En el **capítulo 1** se describe los objetivos y alcances para esta tesis.

En el **capítulo 2** se describe todo el marco teórico para el desarrollo de la tesis considerando también la deducción de formulas para los cálculos que se realizaran en el capítulo III y IV.

En el **capítulo 3** se realizara los cálculos correspondientes a los armónicos y el factor de potencia frente a las cargas no lineales. También se realizar la comparación de los datos obtenidos en la simulación con Simulink con los datos calculados.

En el **capítulo 4** se realizara los cálculos para el estudio de resonancia en paralelo de banco de condensadores considerando las impedancias de la fuente (transformador), del cable de alimentación y valores por unidad. También se realizar la comparación con los valores obtenidos en la simulación con Simulink con los datos calculados.

En el **capítulo 5** se expone las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado sobre los armónicos y sus efectos en la compensación reactiva.

## EXECUTIVE SUMMARY

This research work is developed in 5 chapters, which then writing a summary of the work.

Chapter 1 describes the objectives and scope for this thesis.

Chapter 2 describes the whole theoretical framework for the development of the thesis also considering the deduction of formulas for calculations to be undertaken in Chapter III and IV.

In Chapter 3 we perform the calculations for harmonics and power factor versus non-linear loads. Also perform the comparison of data obtained in the simulation with Simulink with the calculated data.

In Chapter 4 we will perform the calculations for the study of parallel resonance capacitor bank considering the impedances of the source (transformer), power cable and unit values. Also make the comparison with the values obtained in the simulation with Simulink with calculated data.

In Chapter 5 presents the conclusions and recommendations of the study of harmonics and their effects on reactive compensation.

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Antecedentes y naturaleza del problema

La implementación de sistemas de compensación reactiva en sistemas industriales se viene desarrollando por años de diferente forma dependiendo a cada caso con resultados positivos pero el desarrollo de equipos que contienen elementos electrónicos presenta grandes ventajas para el desarrollo del proceso industrial pero también son grandes fuentes de armónicos provocando diferentes problemas en el sistema eléctrico.

Buscar una correlación entre la compensación reactiva y los armónicos ayudará para la implementación de mejores métodos para el diseño y de esta forma poder mitigar los posibles daños a los sistemas eléctricos industriales.

Para desarrollar un análisis más profundos de la teoría es necesario la implementación de un aplicación que permita el procesar de la información que se obtiene de los sistemas eléctricos de forma clara y mediante graficas para lo cual Matlab (Simulink) es un software desarrollado para este tipo de aplicaciones.

Conocer los límites de distorsión de los armónicos tanto de corriente como de voltaje permitirá mejorar en el diseño de la compensación reactiva.

Como resultado de esto, surgen normas reguladoras internacionales, nacionales, regionales y militares, con la finalidad de limitar los niveles de distorsión armónica de corriente inyectada a la red y reducir el nivel de interferencia electromecánica.

En 1975 la norma europea EN50006 fue presentada por CENELEC (Comisión Europea para la Normalización Eléctrica) y sustituida en 1982 por la IEC-555 (Comisión Internacional de Electrotecnia) y revisada en 1991.

Desde 1996 existe normas mas estrictas sobre armónicos en el ámbito industrial tales como las normas IEEE – 519 (IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) en el apartado Recomendaciones Practicas y Requerimientos de la IEEE para Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia.

La norma europea IEC-61000-3-4 (Compatibilidad Electromagnética parte 3-4Limitación en Emisión de Corrientes Armónicas en Sistemas de Potencias para Bajo Voltaje en Equipos Electrónicos y Eléctricos con corriente de entrada menor igual a 16 amperios por fase) que aunque difiera de la IEEE-519 en su naturaleza, ambas fijan un máxima de distorsión armónica

En la mayoría de los países europeos, así como en Canadá, se rigen por los estándares publicados por la comisión Internacional Electrotécnica (IEC).

Para el caso de los límites de distorsión de armónicos de voltaje y corrientes se establece la Norma 61000-3-2 (que reemplaza a la Norma EN6055/2 a partir del año 2002).

El desarrollo de la aplicación en MATLAB permitirá manipular los valores de corrientes armónicas para observar el porcentaje de distorsión en cada caso y a su vez poder aplicar filtros para mitigar o eliminar los armónicos.

## **1.2. Planteamiento del problema**

### **1.2.1. Diagnóstico**

Durante muchos años, las cargas conectadas a los sistemas eléctricos se constituían básicamente de elementos con característica lineales, tanto resistivas (alumbrado incandescente, calefacción, etc.) como inductiva (motores, alumbrado fluorescente, etc.) siendo la corriente resultante en la mayoría de los casos atrasada en relación a la tensión debido al predominio de cargas inductivas. Como consecuencia, el factor de potencia (o simplemente el factor de desplazamiento) resultante es bajo, mas puede ser conducido a un valor próximo a la unidad por medio de la instalación de bancos de capacitores en paralelo con las cargas.

En los últimos años, con la utilización de convertidores estáticos en las diversas aplicaciones, la inyección de elevado contenido de armónicos de corriente al sistema eléctrico paso a ser un factor preocupante, pues el factor de potencia de las instalaciones se redujo por la distorsión de la forma de la onda de corriente. Esta inyección de armónicos se debe principalmente a la naturaleza no lineal de las cargas conectadas al sistema, por ejemplo, los equipos electrónicos industriales y rectificadores tanto monofásicos como trifásicos

### **1.2.2. Diagnóstico**

El análisis de las señales armónicas en los sistemas eléctricos de potencia ciertamente no es un tópico moderno, antiguamente la inyección de armónicas al sistema eléctrico solo consideraba a los circuitos rectificadores y los transformadores saturados como fuente de las señales armónicas. Actualmente gracias a una serie de estudios realizados sobre armónicas, se conoce que cualquier carga no lineal produce armónicos es decir, es una verdadera fuente de corriente armónica.

En los sistemas eléctricos de potencia A.C, las corrientes armónicas fluirán por el camino de menor impedancia. Estas armónicas se dividirán de acuerdo a la razón de impedancia de las ramas. Normalmente la fuente de potencia es el camino de baja impedancia, por lo tanto la mayoría de las corrientes armónicas fluirán hacia ella, sin embargo si existen instalaciones de capacitores de potencia, un problema podría ocurrir cuando la reactancia capacitiva de los capacitores de potencia es igual a la reactancia inductiva equivalente del sistema.

### **1.2.3. Control de pronóstico**

El estudio para la implementación de la simulación en “MATLAB” nos ayudara mejorar la delineación para la compensación reactiva y a su vez mitigar los problemas que se presentan cuando existen presencia de armónicos.

También permitirá reducir las pérdidas de energía eléctrica generadas por la distorsión de los armónicos en los sistemas eléctricos con cargas no lineales.

### **1.3. Alcance**

La presente tesis se desarrollara la simulación en software “MATLAB” de un sistema de contenido armónico y sus efectos en la compensación reactiva con elementos pasivos dirigido a sistemas eléctricos ya que a pesar de existir los parámetros para el diseño no se aplican por desconocimiento con esto se explicara con más claridad cada una de las condiciones que se puedan presentar.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Desarrollar la aplicación para la simulación en software “MATLAB” de un sistema de contenido armónico y sus efectos en la compensación reactiva, UTE 2011.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Establecer la simulación en “MATLAB” de la información obtenida del Bloque B de Cámara de Distribución de la Universidad Tecnológica equinoccial.
- Determinar los armónicos que afectan a la Compensación Reactiva.
- Determinar las fallas que producen los armónicos en los Bancos de Compensación Reactiva.
- Seleccionar el tipo analizador de energía para la obtención de armónicos.

## **1.5. Justificación**

El desarrollo de la simulación y la implementación de la teoría permitirán realizar un análisis más profundo de los sistemas eléctricos que contenga cargas no líneas y que este causando fallas a los equipos y elementos de la compensación reactiva.

## CAPÍTULO II

### TEORÍA Y METODOLOGÍA APLICADA

#### 2.1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detallara la teoría y formulas necesarias para el análisis armónico y estudio de resonancia en paralelo en un sistema con compensación reactiva con componentes pasivos la cual facilitara el análisis para el capítulo III y IV de esta tesis.

#### 2.2. Magnitudes eléctricas de señales no distorsionadas

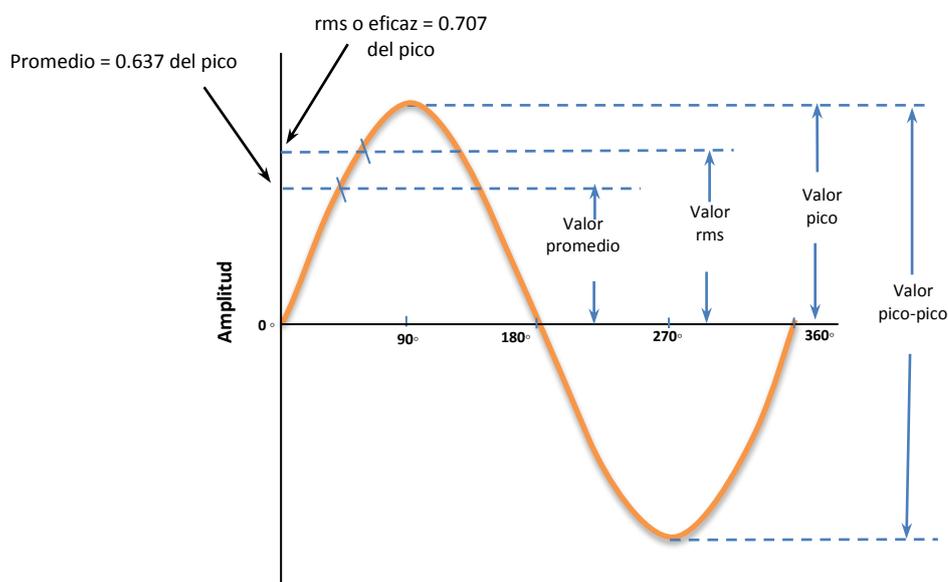
##### 2.2.1. Valor RMS

El valor RMS (Root Mean Square) de una forma de onda es una determinación de la distribución de amplitud de la forma de onda. Todas las señales eléctricas sin importar su forma de onda tienen un valor RMS. Para cualquier señal periódica el valor *RMS* se define como:

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S(t)^2 dt} \quad (1.0)$$

Como una senoide de voltaje o de corriente alterna tiene muchos valores instantáneos a lo largo del ciclo, es conveniente especificar las magnitudes con las que se pueda comparar una onda con otra. Se pueden especificar los valores pico, promedio y rms (Fig. 2.1). Estos valores se aplican a la corriente o al voltaje.

**Figura. 2.1**  
**Valores de la amplitud de una onda de CA senoidal**



**Fuente:** Investigación de Campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2011

### 2.2.2. Valor pico (speak)

Es el valor máximo  $V_{\text{máx.}}$  ó  $I_{\text{máx.}}$ . Se aplica tanto al pico positivo como al negativo

### 2.2.3. Valor pico a pico (p-p)

Es el doble del valor pico cuando los picos positivos y los negativos son simétricos

### 2.2.4. Valor promedio

Es el promedio aritmético de todos los valores de una onda senoidal durante medio ciclo. El medio ciclo se utiliza para obtener el promedio porque el valor promedio durante un ciclo completo es cero.

$$\text{Valor promedio} = 0,636 \times \text{valor pico} \quad (2.0)$$

$$V_{AC} = 0,637 \times V_{\text{máx}} \quad (2.1)$$

$$I_{AC} = 0,637 \times I_{\text{máx}} \quad (2.2)$$

**El valor RMS** de una onda senoidal alterna corresponde a la misma cantidad de corriente o voltaje continuos en Potencia de calentamiento. Por ejemplo, un voltaje alterno con un valor RMS de 115V es igualmente efectivo para calentar el filamento de un foco 115 V de una fuente estacionaria o estable de voltaje de CC. Por esta razón, el valor RMS se llama también el valor efectivo.

La raíz cuadrática media (RMS) o valor efectivo es 0,707 veces el valor pico.

$$\text{Valor}_{RMS} = 0,707 \times \text{valor pico} \quad (3.0)$$

$$V_{RMS} = 0,707 * V_{\text{máx}} \quad (3.1)$$

$$I_{RMS} = 0,707 * I_{\text{máx}} \quad (3.2)$$

A menos que se indique lo contrario, todas las mediciones de ondas de CA senoidales están dadas en valor RMS.

RMS verdadero es capaz de medir con exactitud el valor de voltaje de corriente alterna y corriente que tiene una forma de onda no sinusoidal así como forma de ondas sinusoidales.

Por definición, el valor RMS de una señal AC es el valor de tensión DC que debería aplicar a una carga resistiva para que produzca la misma disipación de energía que si conectásemos esa misma carga resistiva a la señal AC en cuestión. En otras palabras ya modo de ejemplo ilustrado, si aun resistor le conectamos una tensión continúa de 220 V, dicho resistor disipara la misma cantidad de energía que si conectamos una tensión alterna de 220V eficaces o RMS.

El valor no debe interpretarse como un valor promedio de la señal AC y su cálculo es complejo dependiendo de su forma con que dicha señal varía en el tiempo.

Para el caso particular de las señales de tensión y corriente a frecuencia fundamental están definidos como:

$$V_{RMS} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad (4.0)$$

$$I_{RMS} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad (5.0)$$

Y para frecuencia armónica;

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum h(V_{h_{RMS}})^2} \quad (6.0)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum h(I_{h_{RMS}})^2} \quad (7.0)$$

### 2.2.5. Potencia Instantánea

La potencia es la razón de cambio de la energía con respecto al tiempo. La unidad de potencia es el watt. La potencia instantánea en watt absorbida por una carga eléctrica es el producto de la tensión instantánea entre los extremos de la carga en volts, y la corriente instantánea hacia la carga en amperes definida así para caso sinusoidal:

$$p_t = v_t * i(t) \quad (8.0)$$

### 2.2.6. Potencia Activa

Es la potencia asociada con el trabajo que en circuitos eléctricos equivale a la consumida por la resistencia y corresponde al valor medio de la potencia instantánea. Se simboliza con la letra **P** y sus unidades son los vatios (**W**) y se define para el caso sinusoidal como:

$$P = V_{RMS} \cdot I_{1RMS} \cdot \cos \varphi \quad (9.0)$$

### 2.2.7. Potencia Reactiva

Esta potencia recibe este nombre puesto que está asociada con la reactancia de la carga, es decir ésta potencia cuantifica el efecto magnetizante de los equipos inductivos o el efecto del campo eléctrico para equipos capacitivos, la potencia reactiva no genera por si misma ningún trabajo. Se simboliza con la letra **Q** y sus unidades son los volts-ampers-reactivos (**VAR**) y se define para el caso sinusoidal como:

$$Q = V_{RMS} \cdot I_{1RMS} \cdot \sin \varphi \quad (10.0)$$

### 2.2.8 Potencia Aparente

Potencia aparente o total es la suma geométrica de la potencias activas y reactivas o bien el producto del voltaje por la corriente. La potencia aparente determina el dimensionamiento del sistema, aislamiento y capacidad amperimétrica. Su símbolo es **S** y su unidad es volts-ampers (**VA**) tanto para el caso sinusoidal como no sinusoidal se define en función de sus respectivas variables.

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (11.0)$$

## 2.3. Señales distorsionadas

### 2.3.1. Definición de armónicos

Los armónicos son corrientes o tensiones cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la alimentación. Por ejemplo si la frecuencia fundamental es de 60 Hz, la segunda armónica será de 120 Hz, la tercera de 180 Hz, etc. Las armónicas son originadas por cargas no lineales que absorben corriente en impulsos bruscos, a diferencia de hacerlo suavemente en forma sinusoidal, como lo haría una carga resistiva pura. Estos impulsos crean ondas de corriente distorsionadas que originan a su vez corrientes de armónicas de retorno hacia otras partes del sistema de distribución eléctrica.

### 2.3.2. Tasa de distorsión armónica

Antes de analizar en la que se evalúa la distorsión armónica en redes eléctricas vamos indicar la representación matemática de una señal eléctrica en dominio del tiempo.

En nuestro caso tomaremos como armónica a la frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental que opera en la red de distribución eléctrica (para nuestro caso 60 Hz).

Si el voltaje y la corriente en una red eléctrica está definida por:

$$v(t) = V * \cos(\omega_0 t) \quad (12.0)$$

$$i(t) = I * \cos(\omega_0 t) \quad (13.0)$$

Respectivamente, pero como en los sistemas eléctricos en estas podría darse la presencia de voltaje y corriente armónica, entonces el voltaje y la corriente se pueden representar por:

$$v t = V_1 * \cos w_0 t + \theta_1 + V_2 * \cos 2. w_0 t + \theta_2 + V_3 * \cos 3. w_0 t + \theta_3 + \dots$$

$$i t = I_1 * \cos w_0 t + \theta_1 + I_2 * \cos 2. w_0 t + \theta_2 + I_3 * \cos 3. w_0 t + \theta_3 + \dots$$

Que en forma compacta se podría escribir como:

$$v t = \sum_{n=1}^k V_n \cdot \cos(nw_0 t + \theta_n) \quad (14.0)$$

$$i t = \sum_{n=1}^k I_n \cdot \cos(nw_0 t + \theta_n) \quad (15.0)$$

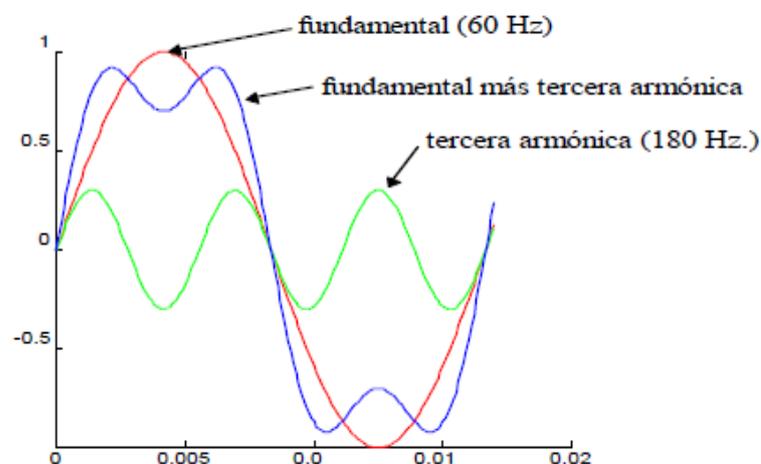
Donde:

$V_n$  se le define como armónica de voltaje de orden n

$I_n$  se le define como armónica de corriente de orden n

$\Theta_n$  como el ángulo de la armónica n

**Figura: 2.2**  
**Señal fundamental más tercera armónica**



**Fuente:** Armónico en la redes eléctricas capítulo II

**Elaborado por:** Universidad Politécnica Salesiana/2008

Los valores de distorsión están definidos en porcentaje (%) de cantidades eléctricas, estos valores son muy utilizados para conocer el grado de contaminación de las redes eléctricas.

### 2.3.3. Distorsión Armónica Total

THD (%THD, Distorsión Total Armónica) correspondiente a Distorsión Total Armónica (tasa de distorsión armónica global). La tasa de distorsión es frecuentemente utilizada para definir la importancia del contenido armónico de una señal alternativa.

### 2.3.4. Distorsión Armónica total de corriente (THD<sub>i</sub>)

Es un índice usado para medir la distorsión de una onda periódica de corriente, respecto a una onda senoidal de frecuencia fundamental. Este índice se obtiene la relación entre la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor RMS de cada armónicos y el valor RMS de la fundamental. Se expresa en porcentajes<sup>1</sup>.

En la norma IEEE-519-1992 establece la siguiente fórmula (16.0) para el THD<sub>i</sub>:

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \text{ RMS}}}{I_1} \quad (16.0)$$

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} * 100\% \quad (16.1)$$

$$\text{THD}_i = \frac{\text{Valor rms de la distorsión}}{\text{Valor rms de la fundamental}} = \frac{I_{\text{dist}}}{I_1} \quad (16.2)$$

Donde:

<sup>1</sup>[www.soitsha.org/.../Codigo-Electrico-Nacional%20200-20...](http://www.soitsha.org/.../Codigo-Electrico-Nacional%20200-20...) – Venezuela (FONDORANOR-MA, 2004,6)

**THD<sub>i</sub>**: Distorsión armónica total de corriente

**I<sub>h</sub>**: es el valor individual de cada componente

**I<sub>1</sub>**: es el valor fundamental (60 Hz)

**h**: orden armónico

**h<sub>máx</sub>**: es el máximo armónico

### 2.3.5. Distorsión Armónica total de tensión (THD<sub>v</sub>)

Es un índice usado para medir la distorsión de una onda periódica de tensión, respecto a una onda senoidal de frecuencia fundamental. Este índice se obtiene la relación entre la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor RMS de cada armónicos y el valor RMS de la fundamental. Se expresa en porcentajes<sup>2</sup>.

En la norma IEEE-519-1992 establece la siguiente fórmula (17.0) para el THD<sub>v</sub>:

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (17.0)$$

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} * 100\% \quad (17.1)$$

$$\text{THD}_v = \frac{\text{Valor rms de la distorsión}}{\text{Valor rms de la fundamental}} = \frac{V_{\text{dist}}}{V_1} \quad (17.2)$$

Donde:

**THD<sub>v</sub>**: Distorsión armónica total de voltaje.

**V<sub>h</sub>**: es el valor individual de cada componente.

**V<sub>1</sub>**: es el valor fundamental (60 Hz)

**h**: orden armónico.

**h<sub>máx</sub>**: es el máximo armónico.

<sup>2</sup>[www.soitsha.org/.../Codigo-Electrico-Nacional%202000-20...](http://www.soitsha.org/.../Codigo-Electrico-Nacional%202000-20...) – Venezuela (FONDORANOR-MA, 2004,6)

### 2.3.6. Distorsión Total de Demanda (TDD)

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga, de la cual, se deduce la ecuación (18.0).

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_{\text{dem máx}}} * 100\% \quad (18.0)$$

Cuando se efectúa mediciones relacionadas con armónicos en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye también es baja. Para valuar adecuadamente estas condiciones se definen el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión de corriente en la norma IEEE 519-1992<sup>3</sup>.

### 2.4. Clasificación de los armónicos

Cada armónica tiene un nombre, frecuencia y secuencia. La secuencia se refiere al giro del fasor con respecto a la fundamental (F), por ejemplo, en un motor de inducción, la armónica de secuencia positiva generaría un campo magnético que gira en la misma dirección que la fundamental. Una armónica de secuencia negativa giraría en forma contraria.

---

<sup>3</sup>Téllez Ramírez, Ing. Eugenio. *Distorsión Armónica*. Automatización, Productividad y Calidad S.A. De C.V.

**Tabla: 2.1**  
**Clasificación de los armónicos**

NOMBRE	1° (Fundamental)	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
FRECUENCIA (HZ)	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
SECUENCIA	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2011

#### 2.4.1. Armónicas pares

Solo existe cuando se produce asimetría en la señal debido a la componente continua. En general son escasa consideración en instalaciones eléctricas industriales. Como los armónicos circulantes de la red normalmente son impares se tiene que:

**Tabla: 2.2**  
**Clasificación de los armónicos impares**

NOMBRE	1° (Fundamental)	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°
FRECUENCIA (HZ)	60	180	300	420	540	660	780	900	1020
SECUENCIA	+	0	-	+	0	-	+	0	-

**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2011

Dependiendo de la secuencia, los armónicos presentan diferentes efectos los cuales se presentan en la siguiente tabla 2.3

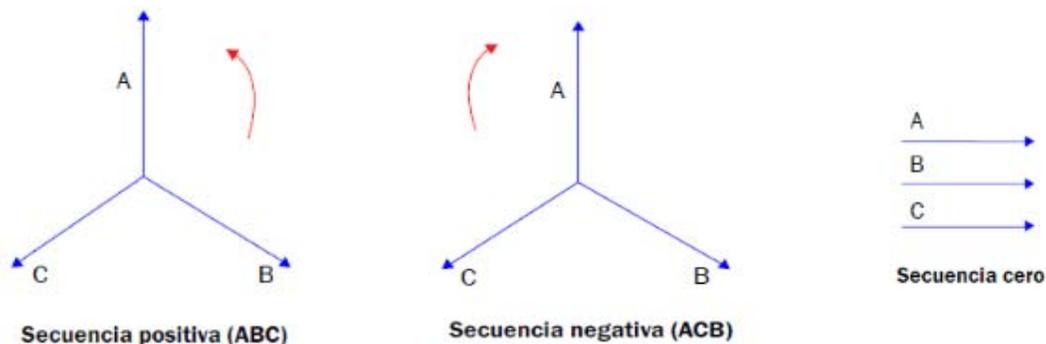
**Tabla: 2.3**  
**Efectos dependiendo del tipo de secuencia**

SECUENCIA	SENTIDO DE GIRO	EFFECTOS
POSITIVA (+)	Horario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calentamiento de conductores.</li> <li>• Rotura de circuitos.</li> </ul>
NEGATIVA (-)	Antihorario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frenado de motores.</li> <li>• Calentamiento de conductores.</li> <li>• Pueden quemar los motores de inducción trifásicos.</li> </ul>
CERO (0)	No giran	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se suman al neutro de la red (si tiene cuatro hilos) y causan sobrecalentamientos.</li> </ul>

**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2011

La secuencia de armónicas cero (múltiplos de la 3a) son llamados "Triplens".

**Figura: 2.3**  
**Diagrama de secuencia positiva, negativa y cero**



**Fuente:** Investigación de campo

**Elaborado por:** Roberto Ortega/2011

En el caso de banco de capacitores la 5 y 7 armónicos son los mayores causantes de efectos negativos produciendo fallas considerables.

## 2.5. Normas del nivel de distorsión armónica

### 2.5.1. Límites de distorsión en Voltaje

El suministrador es responsable de mantener la calidad del voltaje en el sistema global, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión.

Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>[www.soitsha.org/.../Codigo-Elctrico-Nacional%20200-20...](http://www.soitsha.org/.../Codigo-Elctrico-Nacional%20200-20...) – Venezuela (FONDORANORMA, 2004,6)

**Tabla 2.4**  
**Límites de distorsión en Voltaje bajo la norma IEEE 519**

IEEE 519

<b>Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal</b>		
<b>Nivel de tensión en la Acometida (<math>V_n</math>)</b>	<b>Distorsión armónica individual</b>	<b>Distorsión armónica total THD <math>V_n</math></b>
$V_n < 69$ kV	3.0%	5.0%
$69$ kV $< V_n < 161$ kV	1.5%	2.5%
$V_n > 161$ kV	1.0%	1.5%

**Fuente:** Distorsión Armónica

**Elaborado por:** Ing. Eugenio Téllez Ramírez/2003

### 2.5.2. Límites de distorsión en Corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

**Tabla: 2.5**  
**Límites de distorsión en Corriente bajo la norma IEEE 519**

IEEE 519

**Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida**

$I_{cc}/I_L$	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69$ kV						
<20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
>1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69$ kV $< V_n \leq 161$ kV						
<20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
>1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161$ kV						
<50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$\geq 50$	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%

**Fuente:** Distorsión Armónica

**Elaborado por:** Ing. Eugenio Téllez Ramírez/2003

Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de corriente, sin importar la relación  $I_{cc}/I_L$ .

- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla
- No se permite la existencia de componentes de corriente directa, que corresponden a la armónica cero.
- Si las cargas que producen las armónicas utilizan convertidores con número de pulsos  $q$  mayor a 6, los límites indicados en la tabla se incrementan por un factor

$$\frac{\bar{q}}{6}$$

- **I<sub>cc</sub>:** Debe utilizarse aquella que bajo condiciones normales de operación, resulte en la mínima corriente de cortocircuito en la acometida, ya que este valor reduce la relación  $I_{cc}/I_L$  y la evaluación es más severa.
- **I<sub>L</sub>:** Es la demanda máxima de la corriente fundamental en la acometida y puede calcularse como el promedio de las demandas máximas de corriente mensuales de los últimos 12 meses o puede estimarse para usuarios que inician su operación.
- Los límites son más estrictos para los usuarios que representan mayor carga al sistema, ya que la relación  $I_{cc}/I_L$  es menor.

Los sistemas más robustos pueden transmitir mayores niveles de corrientes armónicas sin producir una distorsión excesiva de voltaje que los sistemas más débiles.

## 2.6. Onda de Corriente Ideal

La Figura 2.2 muestra la onda de corriente AC ideal en un puente rectificador. Esta forma se basa en la asunción de que la corriente DC no tiene fluctuaciones (carga inductiva) y que la corriente DC es transferida de una fase a otra al momento en que el voltaje en la fase entrante excede el voltaje en la fase saliente. La fórmula para los componentes de corriente armónica de la onda de corriente AC es:

$$h = Kq \pm 1 \quad (19.0)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (20.0)$$

Donde:

**h:** es el orden del armónico

**k:** es algún entero positivo

**q:** es el número de pulso del circuito rectificador

**I<sub>h</sub>:** es la amplitud de la corriente armónica de orden h

**I<sub>1</sub>:** es la amplitud de la corriente fundamental

## 2.7. Indicadores Esenciales de la Distorsión Armónica

La existencia de indicadores permite cuantificar y evaluar la distorsión armónica de onda tensión y corriente, Estos son<sup>5</sup>:

---

<sup>5</sup> <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/3/CAPITULO%20II.pdf>

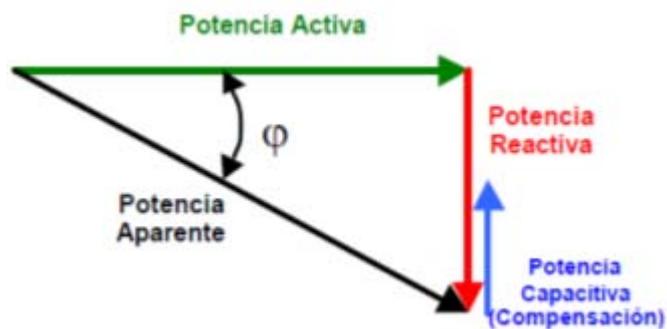
- 2.7.1. Factor de potencia
- 2.7.2. Factor de cresta
- 2.7.3. Potencia de distorsión
- 2.7.4. Espectro en frecuencia

Estos son los indicadores para la determinación de las acciones correctivas requeridas.

### 2.7.1. Factor de Potencia

Se define factor de potencia, FP, de un circuito de corriente alterna, como la relación o el cociente entre la potencia activa,  $P$ , y la potencia aparente consumida por una carga o instalación determinada,  $S$ , o bien como el coseno del ángulo que forman los fasores de la intensidad y el voltaje, designándose en este caso como  $\cos\phi$ , siendo  $\phi$  el valor de dicho.

**Figura: 2.4**  
**Triangulo de potencias**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2011

Tradicionalmente siempre se ha denominado “coseno de fi” ( $\cos \varphi$ ) dado que trigonómicamente coincide con el coseno del ángulo que forma ambos vectores de potencia, siendo  $\varphi$  el ángulo desfase entre la tensión y corriente.

Comúnmente, el factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo.

El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

A partir de esto se definen también el factor de potencia y coseno fi, que solo en esta condición numéricamente.

Recordando ambos conceptos, el coseno  $\varphi$ , es (trigonómicamente) el cociente entre la potencia activa fundamental y la potencia aparente fundamental. En cambio, el factor de potencia es el mismo cociente, pero de la potencia total activa y la total aparente.

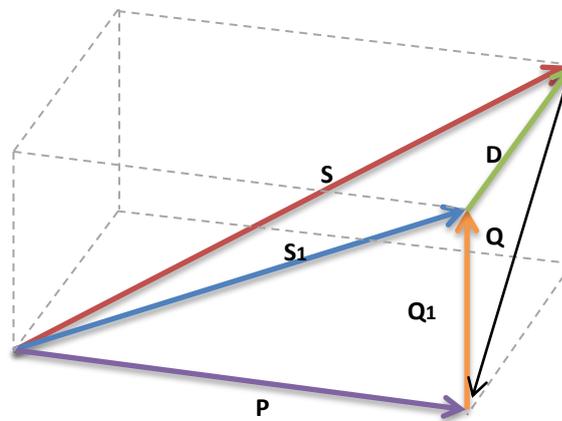
$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potencia activa fundamental}}{\text{Potencia Aparente Total}} \quad (21.0)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S_1} = \frac{\text{Potencia activa fundamental}}{\text{Potencia Aparente Fundamental}} \quad (22.0)$$

### 2.7.1.1. Potencia fundamental y armónica

Para definir la relación de potencias en sistemas eléctricos se utiliza ampliamente la relación:

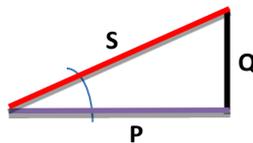
**Figura: 2.5**  
**Tetraedro de potencias**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

Relación entre Potencias:

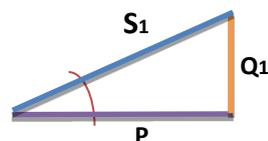
**Figura: 2.6**  
**Triángulo de Potencias Totales**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2012

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (23.0)$$

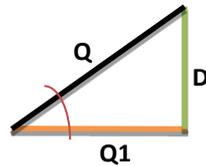
**Figura: 2.7**  
**Triángulo de Potencias Fundamentales**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2012

$$S_1^2 = P^2 + Q_1^2 \quad (24.0)$$

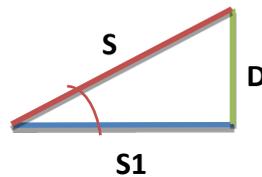
**Figura: 2.8**  
**Triángulo de Potencias Fluctuante**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2012

$$Q^2 = Q_1^2 + D^2 \quad (25.0)$$

**Figura: 2.9**  
**Triángulo de Potencias Aparentes y Distorsión**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2012

$$S^2 = S_1^2 + D^2 \quad (26.0)$$

De la ecuación de (24.0) y (26.0) se obtiene la ecuación (27.0);

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D^2 \quad (27.0)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (27.1)$$

Al remplazar la ecuación (27.1) en la ecuación (21.0) se obtiene la ecuación (28.0) factor de potencia en condiciones no sinusoidal;

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2}} = \cos \gamma \quad (28.0)$$

Al remplazar la ecuación (24.0) en la ecuación (22.0) se obtiene la ecuación (29.0) la cual nos permite diferencia entre el FP con armónicos con respecto  $\cos\varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q_1^2}} \quad (29.0)$$

Para la deducción del factor de distorsión y factor de desplazamiento reemplazamos en la ecuación (21.0) la ecuación (9.0) y (11.0) optemos la ecuación (30.0).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_{RMS} \cdot I_{1RMS} \cos \varphi}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (30.0)$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{I_{1RMS} \cos \varphi}{I_{RMS}} \quad (30.1)$$

$$FP = f_{dist} \cdot f_{desp} \quad (30.2)$$

**FP:** factor de potencia

**$f_{dist}$ :** factor de distorsión

**$f_{desp}$ :** factor de desplazamiento  $\cos \varphi$ .

El factor de distorsión  $f_{dist}$  es la relación del valor RMS de la componente fundamental  $I_1$  y el valor RMS total de corriente RMS.

Sustituyendo la ecuación (16.2) en la ecuación (7.0) se obtiene la ecuación (31.0):

$$I_{RMS} = I_{1RMS} \cdot \sqrt{1 + THD_1^2} \quad (31.0)$$

Sustituyendo la ecuación (17.2) en la ecuación (6.0) se obtiene la ecuación (32.0):

$$V_{RMS} = V_{1RMS} \cdot \sqrt{1 + THD_v^2} \quad (32.0)$$

Remplazamos en la ecuación (31.0) en la ecuación (30.1) y obtenemos la ecuación (33.0):

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{I_{1RMS} \cos \varphi}{I_{RMS}} \quad (30.0)$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{I_{1RMS} \cos \varphi}{I_{1RMS} \cdot \sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (33.0)$$

Simplificamos los  $I_{1RMS}$  en la ecuación y optemos la ecuación (33.1);

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \cdot \cos \varphi \quad (33.1)$$

De la misma podemos deducir la ecuación (34.0) la que describe que el factor de distorsión es:

$$f_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (34.0)$$

Al comparar las ecuaciones se observa que el factor de potencia total es menor que el coseno de  $\varphi$  o factor de potencia de la componente fundamental. El significado de esto es que para transmitir la misma potencia en vatios, en un circuito con armónicos, necesita dimensionar para una potencia aparente (en KVA) mayor.

En los circuitos armónicos seguiremos llamando al Factor de Potencia FP, a la relación de la potencia activa P y la potencia aparente total S. Obsérvese que cuando existe corriente armónica el FP ya no coincide con el coseno del ángulo  $\phi$  que forman las componentes fundamentales<sup>6</sup>.

### 2.7.2. Factor de Cresta

Se define como la relación entre el valor de cresta de corriente o de tensión ( $I_m$  o  $V_m$ ) y el valor eficaz<sup>7</sup>:

$$k = \frac{I_m}{I_{RMS}} \quad (35.0)$$

$$k = \frac{V_m}{V_{RMS}} \quad (36.0)$$

Para una señal sinusoidal el factor de cresta es igual a  $\sqrt{2}$ , para una señal no sinusoidal el factor de cresta puede tener un valor superior o inferior a  $\sqrt{2}$ . Este es particularmente útil para detectar la presencia de valores de cresta excepcionales con respecto al valor eficaz.

Interpretación del valor de factor de cresta: El factor de cresta tipo de corriente absorbida por carga no lineal es mucho mayor que  $\sqrt{2}$  puede tomar valores de 1.5 o 2, llegando incluso a 5 en casos críticos.

Un factor de cresta muy elevada implica sobre intensidades puntuales importantes. Estas sobre intensidades, detectadas por los dispositivos de protección, puede ser origen de desconexiones indeseadas.

---

<sup>6</sup>W. Mack Grady. (Noviembre de 1993). *Harmonics and how they Relate to Power Factor*: The University of Texas at Austin Austin, Texas

<sup>7</sup>*Armónicos en las Redes Eléctricas Capítulo 2*. Universidad Politécnica Salesiana

### 2.7.3. Potencia de Distorsión

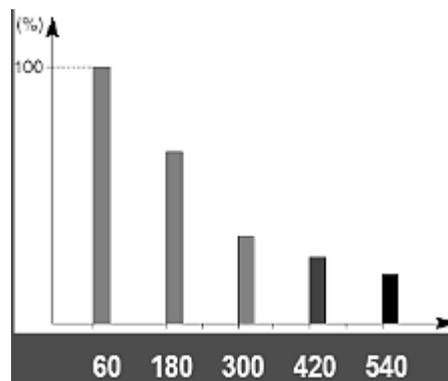
Como consecuencia, en presencia de armónicos, y despejando de la ecuación (29.0) se obtiene la potencia de distorsión en la ecuación (37.0):

$$D = \overline{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (37.0)$$

### 2.7.4. Espectro en frecuencia

El espectro en frecuencia es un método gráfico muy práctico que permite la representación de los armónicos que componen una señal periódica<sup>8</sup>.

**Figura: 2.10**  
**Diagrama de espectro de frecuencia**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

El espectro es un histograma que indica la amplitud de cada armónico en función de su rango. Este tipo de representación también se denomina análisis espectral.

El espectro en frecuencia indica que armónicos están presentes y su importancia relativa.

<sup>8</sup>Chilet L., Cesar. (28 Febrero2010). 4.0 Armónicos

Este tesis no se realizara estudio factor de cresta y espectro de frecuencia ya se concentra en los indicadores de potencia de distorsión y el factor de potencia.

## **2.8. Tipo de cargas**

### **2.8.1. Cargas Lineales**

Las cargas lineales están compuestas por componentes pasivos, o lo que es lo mismo por cargas Resistivas, Inductivas y Capacidad. Este tipo de cargas RLC se caracteriza por no deformar la señal, esto es, si la tensión en bornes de estas cargas es senoidal, la corriente que fluye por estas cargas senoidal, aunque desfasada con respecto a la tensión en una cantidad que depende de la proporción entre la cargas resistiva, inductivas y capacitivas de frecuencia y elementos de iluminación resistivo sin balasto son ejemplos de cargas lineales<sup>9</sup>.

#### **2.8.1.1. Cargas resistivas**

En las cargas resistivas como lámparas incandescentes. El voltaje y la corriente estas en fase. Por lo tanto  $\varphi = 0$ .

Este caso, se tiene un **factor de potencia unitario**.

---

<sup>9</sup> Lombarte Vidal, Daniel. (Noviembre del 2003). Estudio y eliminación de armónicos en el sistema de ayuda visuales a navegación aérea en el Aeropuerto de Valencia. Universidad Rovira I Virgili.

**Figura: 2.11**  
**Lámpara incandescente**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

### 2.8.1.2. Cargas inductivas

En las cargas inductivas como motores y transformadores, la corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje. Por lo tanto  $\phi < 0$ .

En este caso se tiene un factor de potencia **retrasado**.

**Figura: 2.12**  
**Motor trifásico tipo jaula de ardilla**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2012

### 2.8.1.3. Carga capacitiva

En las cargas capacitivas como los condensadores, la corriente se encuentra adelantada respecto al voltaje. Por lo tanto  $\phi > 0$ .

En este caso se tiene un factor de potencia **adelantado**.

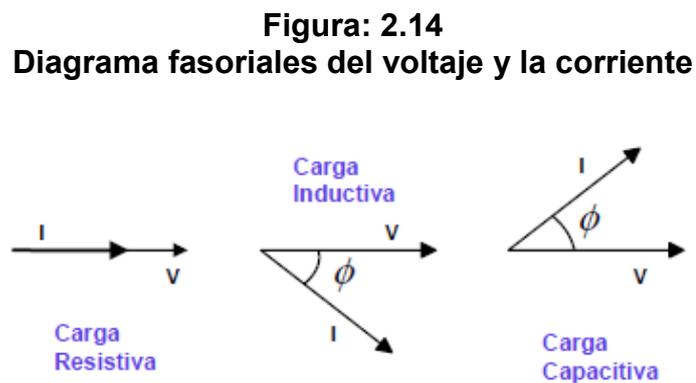
**Figura: 2.13**  
**Capacitor trifásico**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2012

#### 2.8.1.4. Diagrama fasoriales del voltaje y la corriente

Según el tipo de carga, se tiene los siguientes diagramas:



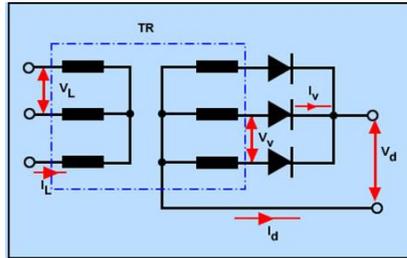
**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2011

#### 2.8.2. Carga no Lineal

Una carga que dibuja una onda de corriente no sinusoidal cuando es proporcionada por una fuente de voltaje sinusoidal<sup>10</sup>.

<sup>10</sup>Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia

**Figura: 2.15**  
**Rectificador trifásico de media onda**



**Fuente:** Electricidad y Automatismos

**Elaborado por:** Nichese/2012

Las cargas no lineales están compuestas por componentes pasivos y componentes activos, o lo que es lo mismo, por cargas con electrónica como diodos, transistores, tiristores, además de condensadores, bobinas, y resistencias.

A diferencia de las anteriores, las cargas no lineales se caracterizan por producir una deformación de la onda de corriente, hasta el punto de no tener nada que ver la señal de tensión de la fuente de alimentación.

Es decir, si la tensión en los bornes de estas cargas es senoidal, la corriente que fluye por las mismas no lo es. Además, puede suceder también que la tensión y la corriente pueden estar desfasadas.

**Figura: 2.16**  
**Variador de Velocidad Sinamics G110**



**Fuente:** Investigación de campo

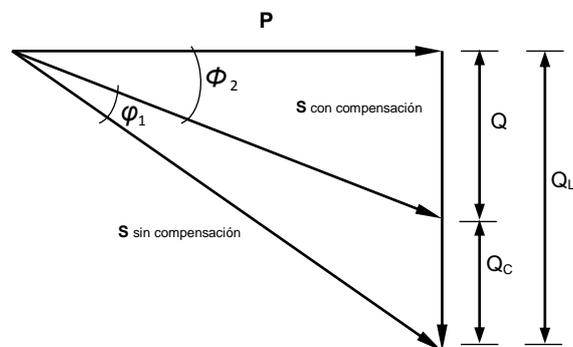
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2012

## 2.9. Compensación reactiva

Las cargas inductivas requieren potencia inductiva para su funcionamiento. Esta demanda de reactores se puede reducir e incluso anular si se colocan capacitores en paralelo a la carga<sup>11</sup>.

Cuando se reduce la potencia reactiva, se mejora el factor de potencia.

**Figura: 2.17**  
**Triangulo de potencia y  $\cos \phi$**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega/2011

En la figura 16 se tiene:

$Q_L$  es la **demanda de reactivos** (inductivos) de un motor y  $S$  la potencia aparente correspondiente.

$Q_c$  es la **potencia de reactivos** (capacitivos) del capacitor de compensación.

La compensación de reactivos no afecta el consumo de potencia activa, por lo que  $P$  es constante.

<sup>11</sup><http://roble.pntic.mec.es/jsalinas/factor%20potencia.pdf> - Factor de potencia Julio 2002

Como el efecto de empleo de los capacitores, el valor del ángulo  $\varphi_1$  se reduce a  $\varphi_2$ .

Deduciendo de la figura 2.17 se obtiene la ecuación (38.0):

$$Q_L = Q + Q_c \quad (38.0)$$

Despejando  $Q_c$  de la ecuación (38.0) obtenemos la ecuación (38.1):

$$Q_c = Q_L - Q \quad (38.1)$$

Deduciendo de la figura 2.17 se obtiene la ecuación (39.0):

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q_L}{P} \quad (39.0)$$

Despejando  $Q_L$  de la ecuación (39.0) obtenemos la ecuación (39.1):

$$Q_L = P \cdot \tan \varphi_1 \quad (39.1)$$

Deduciendo de la figura 2.17 se obtiene la ecuación (40.0):

$$\tan \varphi_2 = \frac{Q}{P} \quad (40.0)$$

Despejando  $Q$  de la ecuación (40.0) obtenemos la ecuación (40.1):

$$Q = P \cdot \tan \varphi_2 \quad (40.1)$$

Remplazando la ecuación (39.1) y la (40.1) en la ecuación (38.1) se obtiene la ecuación (41.0):

$$Q_C = P \cdot \tan \varphi_1 - P \cdot \tan \varphi_2 \quad (41.0)$$

Factorando obtenemos la ecuación (41.1):

$$Q_C(VAR) = P(W) \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (41.1)$$

## **2.9.1. Efectos de la carga no lineal en la compensación reactiva**

### **2.9.1.1. Bancos de condensadores y cables aislados**

Los Bancos de Condensadores usados para controlar el voltaje y mejorar el factor de potencia así como los cables aislados son los principales componentes que afectan las características de respuesta en frecuencia del sistema. La conexión de los condensadores puede causar condiciones de resonancia (tanto serie y como paralela) que pueden elevar los niveles de armónicos. Los efectos de las condiciones de resonancia.

Los bancos de condensadores son usados como una fuente de voltaje para la conmutación de algunos convertidores de potencia estáticos. Ellos pueden ser considerados en paralelo con el sistema cuando se calcula la reactancia de conmutación.

### **2.9.1.2. Características de la Carga**

La carga del sistema tiene dos efectos importantes sobre las características de respuesta en frecuencia del sistema:

- La porción resistiva de la carga proporciona una amortiguación que afecta la impedancia del sistema cerca de la frecuencia de resonancia.

La carga resistiva reduce la amplitud de los niveles de armónicos cerca de las frecuencias de resonancia paralelo.

- Las cargas de motores y otras cargas dinámicas que contribuyen a la capacidad de corto-circuito del sistema pueden cambiar las frecuencias a las que ocurren las resonancias. Las cargas de motores no proporcionan un amortiguamiento significativo de los picos de resonancia.

## 2.10. Resonancia

La presencia de condensadores, tales como los utilizados en la corrección del factor de potencia, da lugar a resonancias locales que pueden originar corrientes excesivas y el deterioro, o destrucción, de las baterías de condensadores. La mayoría de las fuentes de armónicos son de corriente, y como un sistema resonante -en paralelo- presenta gran impedancia a las intensidades inyectadas a la frecuencia de resonancia, ésta puede originar tensiones y corrientes armónicas elevadas en cada rama en derivación. Este problema se manifiesta de distintas formas, siendo la más común, cuando la batería de condensadores se conecta a la misma barra de la fuente de armónicos.

Reactancia Inductiva:

Donde;  $W = 2\pi f$ :

$$X_L = WL \quad (42.0)$$

$$X_L = 2\pi fL \quad (42.1)$$

Reactancia Capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (43.0)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (43.1)$$

La frecuencia de resonancia será:

$$X_L = X_C \quad (44.0)$$

Remplazando la ecuación (42.0) y (43.0) en la ecuación (44.0) se obtiene la ecuación (44.1):

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (44.1)$$

Despejamos la frecuencia de resonancia:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (44.1)$$

$$(2\pi f)^2 = \frac{1}{LC} \quad (44.2)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (44.3)$$

$$\omega_o = 2\pi f_o \text{ (Frecuencia fundamental)} \quad 2\pi = \frac{\omega_o}{f_o}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{f_o}{\omega_o \sqrt{LC}} = \frac{f_o}{\omega_o \frac{X_L * 1}{\omega * X_C \omega}} = f_o * \frac{\sqrt{X_C}}{X_L} \quad (44.4)$$

En el estudio por unidad los MVA de cortocircuito del sistema es:

$$MVA_{SC} = \frac{1}{X_L} \quad (45.0)$$

$$MVA_{CAP} = \frac{1}{X_C} \quad (46.0)$$

Así que la frecuencia de resonancia al remplazar la ecuación (45.0) y (46.0) en la ecuación (44.4) se obtiene la ecuación (47.0):

$$f_{res} = f_0 \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_{CAP}}} \quad (47.0)$$

Por lo tanto, de acuerdo a la ecuación (47.0), en sistemas “fuertes” o “rígidos” (con SC MVA relativamente alto) se tiene que las frecuencias de resonancia son altas. Cuando los capacitores son agregados la frecuencia de resonancia es reducida.

El riesgo de usar (47.0) es que representa solamente una pequeña parte de la situación verdadera de las armónicas. Tres puntos importantes para recordar son:

1. Mientras se pronostica la frecuencia de resonancia, esto no da información sobre la extensión de la curva de resonancia.
2. En cualquier momento puede haber frecuencia de resonancia donde haya capacitores shunt. A decir verdad todos los alimentadores de distribución son fuertemente resonantes al borde de la 5ª y 7ª armónicas. Sin embargo, la resonancia es un problema sólo si hay amperios armónicas suficientes para provocar los voltajes armónicas que pueden exceder los 5% de THD<sub>v</sub>.
3. La mayoría de las instalaciones de los alimentadores de distribución posee cinco o más banco de capacitores, que pueden estar muchos en paralelo y en serie a través de la trayectoria. Por lo tanto simulaciones

computacionales son requeridos para predecir con precisión niveles de distorsión a través del alimentador y alimentadores adyacentes conectados por el mismo transformador de la subestación.

Y el orden armónico al cual se produce la resonancia:

$$h_r = \frac{f_r}{f_o} = \frac{1}{\omega_o \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad (48.0)$$

Así que el orden armónico al remplazar la ecuación (45.0) y (46.0) en la ecuación (48.0) se obtiene la ecuación (48.1)<sup>12</sup>:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{Mvar_{cap}}} \quad (48.1)$$

Donde:

**$h_r$ :** es la frecuencia resonante como múltiplo de la frecuencia fundamental.

**$MVA_{sc}$ :** es la potencia de cortocircuito en el punto de estudio.

**$Mvar_{cap}$ :** es el valor nominal del condensador al voltaje del sistema.

**$X_c$ :** es la reactancia capacitiva del banco de condensadores a la frecuencia fundamental.

**$X_{sc}$ :** es la reactancia de cortocircuito de la subestación.

Considerando que el sistema es robusto, entonces los  $MVA_{cc}$  en el punto donde está conectado el capacitor depende solamente de la impedancia del transformador para ello se aplica la ecuación

$$Z = \frac{Z\%}{100} * \frac{KV^2}{MVA_T} \quad (49.0)$$

<sup>12</sup><http://www.megaupload.com/?d=R31YXVRS> - Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia

Donde

$Z_T$  : Impedancia del transformador

$Z\%$  : Impedancia porcentual de cortocircuito del transformador (%).

$U_L$  : Tensión entre fases del secundario del transformador (v)

$MVA_T$  : Potencia nominal del transformador (KVA).

Y los  $MVA_{CC}$  esta dados por la ecuación:

$$MVA_{CC} = \frac{KV^2}{Z} \quad (50.0)$$

Sustituyendo la ecuación (49.0) en la ecuación (50.0) se obtiene la ecuación (51.0):

$$MVA_{CC} = \frac{100MVA_T}{Z\%} \quad (54.0)$$

### 2.10.1. Impedancia de transformadores

La impedancia porcentual de cortocircuito del transformador, es un dato entregado por el fabricante ya sea en la placa característica de la maquina o bien en su catalogo o ficha técnica.

Lamentablemente la impedancia porcentual en el caso de los clientes de baja tensión, es prácticamente imposible de obtener, debido a la impedancia de estos, del transformador de distribución de la compañía eléctrica.

En el caso de desconocer la impedancia porcentual, se puede utilizar los siguientes valores indicados en la tabla siguiente, con un marguen de error aceptable:

**Tabla 2.6**  
**Impedancias porcentuales típicas de transformadores**

Rango de potencia (kVA)	Z%
$5 \leq S_T \leq 100$ kVA	3,5%
$100 < S_T \leq 400$ kVA	4,0%
$400 < S_T \leq 1000$ kVA	4,6%
$S_T > 1000$ kVA	5,0 %

**Fuente:** Cálculo de corriente de cortocircuito en baja tensión  
**Elaborado por:** Prof. Claudio González Cruz / 2001

Otra tabla de que podemos obtener la resistencia, reactancia e impedancia de transformadores de distribución se encuentra en el anexo 1.

### 2.10.2. Condiciones de resonancia

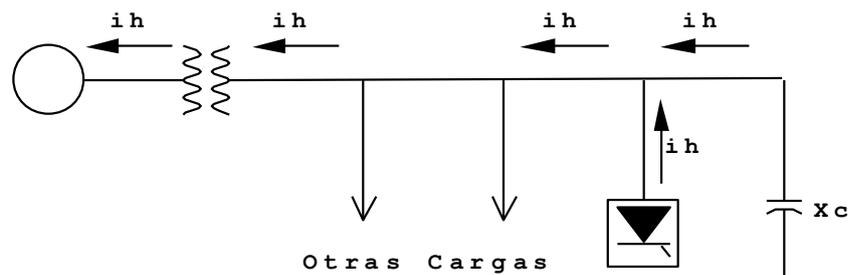
Las condiciones de resonancia del sistema son los factores más importantes que afectan los niveles de armónicos del sistema. La resonancia paralela es una impedancia alta para el flujo de corriente armónica, mientras la resonancia serie es una impedancia baja para el flujo de corriente armónica. Cuando las condiciones de resonancia no son un problema, el sistema tiene la capacidad de absorber cantidades significativas de corrientes armónicas. Esto es solo cuando estas corrientes ven altas impedancias debido a la resonancia paralelo que ocurren de significativas distorsiones de voltaje y ampliaciones de corriente. Por consiguiente, es importante poder analizar las características de respuesta en frecuencia del sistema y evitar problemas de resonancia del sistema<sup>13</sup>.

Flujo Normal de Corrientes Armónicas. Las corrientes armónicas tienden a fluir desde las cargas no lineales (fuentes armónicas) hacia las impedancias más bajas, usualmente la fuente de energía (ver Fig. 2.18). La impedancia de la

<sup>13</sup><http://www.oocities.org/stselectricos/clase3.pdf> - Cálculo de Corriente de Cortocircuito en Baja Tensión - Prof. Claudio González Cruz Pág. 11

fuente de energía es usualmente mucho más baja que los caminos ofrecidos por las cargas. Sin embargo, la corriente armónica se divide dependiendo de la proporción de impedancia. Los armónicos más altos fluirán hacia los condensadores que representan una impedancia baja a altas frecuencias.

**Figura: 2.18**  
**Flujo Normal de Corriente Armónica**



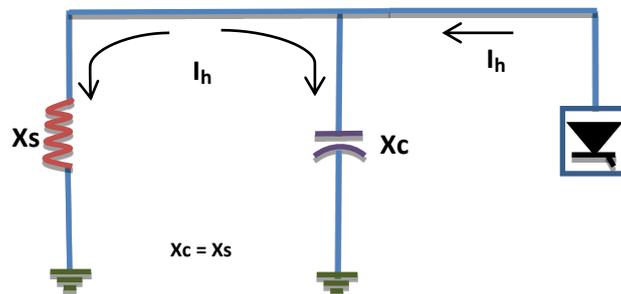
**Fuente:** Recomendaciones prácticas y requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

**Elaborado por:** Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos IEEE / 2008

### 2.10.3. Resonancia paralelo

La resonancia paralelo (ver Fig. 2.19) ocurre cuando la reactancia inductiva del sistema y las reactancias capacitivas son iguales a la misma frecuencia. Si la combinación de bancos de condensadores y la inductancia del sistema resultan en una resonancia paralelo cercana a los armónicos característicos generados por una carga no lineal cuya corriente armónica excitará el circuito “tanque” este provocará una corriente amplificada que oscilará entre la energía almacenada en la inductancia y la energía almacenada en la capacitancia. Esta alta oscilación de corriente puede causar distorsión de voltaje e interferencia telefónica cuando los circuitos de distribución y los circuitos de telefonía están físicamente próximos.

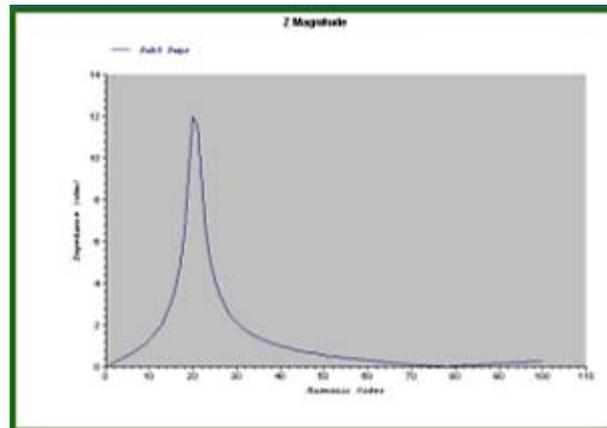
**Figura: 2.19**  
**Condiciones de Resonancia Paralelo**



**Fuente:** Recomendaciones practicas y requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

**Figura: 2.20**  
**Curva de resonancia Paralelo**



**Fuente:** Cómo evaluar la calidad de nuestro suministro eléctrico (III)

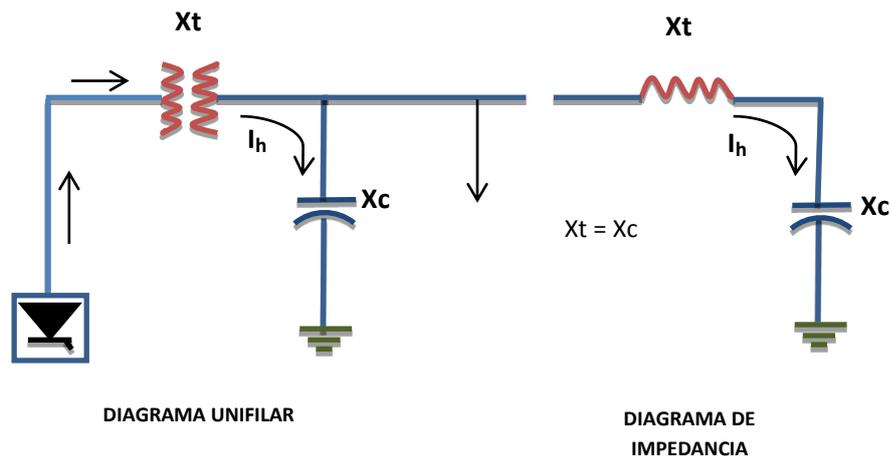
**Elaborado por:** Todo productividad / 2010

#### 2.10.4. Resonancia Serie

La resonancia serie es el resultado de combinaciones de bancos de condensadores y líneas ó inductancias de transformadores en series. La resonancia serie presenta un camino de baja impedancia para corrientes armónicas y tiende a “atrapar” alguna corriente armónica a la cual está se ha ajustado. La resonancia serie puede resultar en niveles de distorsión de alto voltaje entre la inductancia y la capacitancia del circuito serie. Un ejemplo de un

circuito serie es un transformador centro de carga con condensadores conectados a su secundario (Ver Fig. 2.21). Este aparece como un circuito serie cuando es vista desde el primario del transformador.

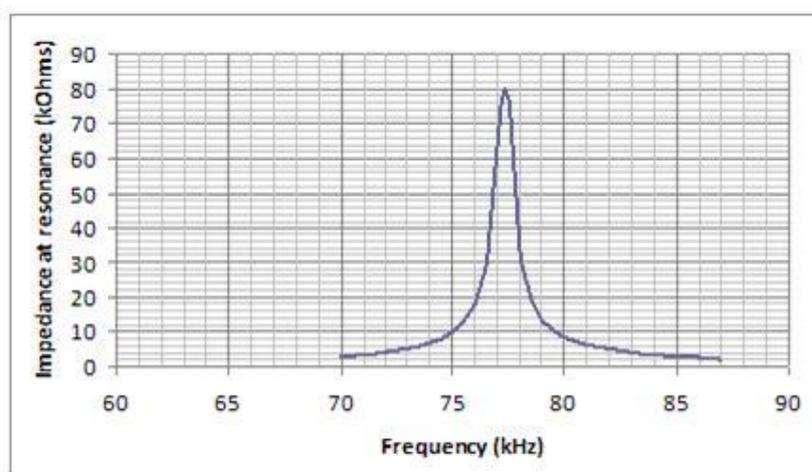
**Figura: 2.21**  
**Condiciones de Resonancia Serie**



**Fuente:** Recomendaciones prácticas y requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

**Figura: 2.22**  
**Curva de Resonancia serie**



**Fuente:** Cómo evaluar la calidad de nuestro suministro eléctrico (III)

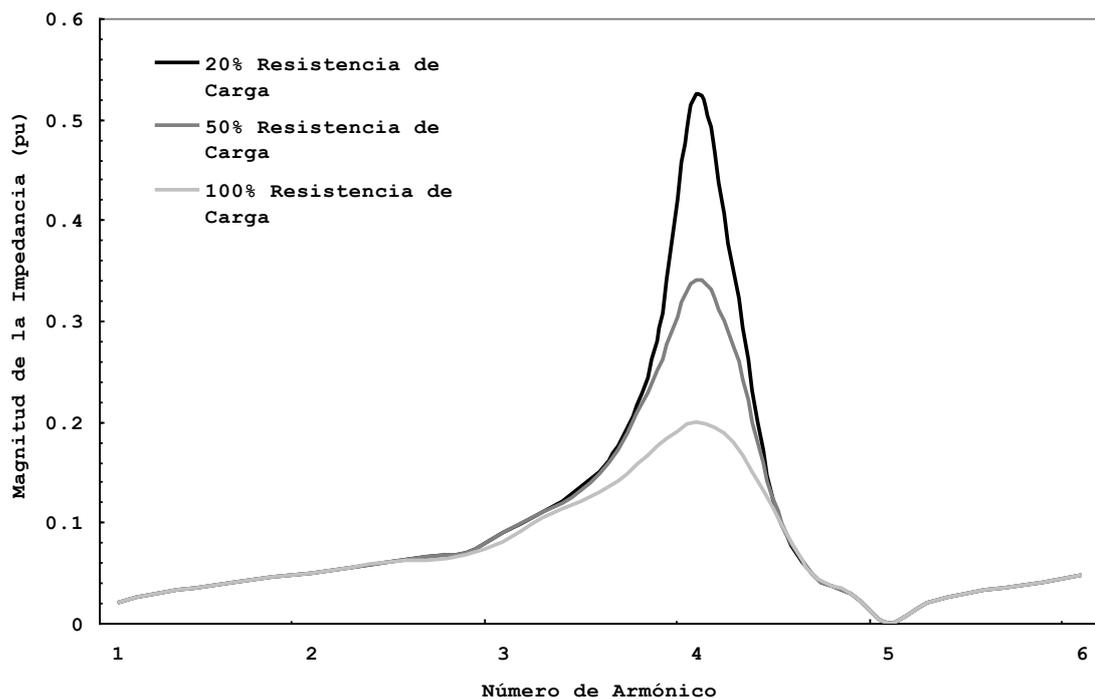
**Elaborado por:** Todo productividad / 2010

### 2.10.5. Componente resistiva

La componente resistiva de la carga viene a ser muy importante en un sistema de resonancia. El camino de la resistencia (el cual ofrece una baja impedancia) es tomado por los armónicos cuando existe una resonancia paralela. Así mismo, los niveles de sobrecarga sobre los sistemas resultan en una baja impedancia cerca de la resonancia paralela. La respuesta del sistema a niveles de variación de carga está ilustrada en la figura 2.23 para un sistema con una resonancia paralela cercana al cuarto armónico.

**Figura: 2.23**

#### **Respuesta del Sistema Ilustrando el Efecto de la Carga Resistiva en Paralelo con la Resonancia Pico**



**Fuente:** Recomendaciones prácticas y requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

**Elaborado por:** Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos IEEE / 2008

### **2.10.6. Componente del motor**

La carga del motor aparece primeramente inductiva a frecuencias armónicas. La representación correcta para los motores en frecuencias armónicas es una impedancia de cortocircuito (subtransitoria a rotor bloqueado). Esta inductancia no proporciona un significativo amortiguamiento de resonancias picos; pero cambia la frecuencia de resonancia algo porque está esencialmente en paralelo con la fuente de inductancia. Esto es importante si la resonancia esta cerca de un problema de armónicos - cambios en la carga del motor pueden cambiar la resonancia a la frecuencia armónica. La carga del motor es particularmente importante en los sistemas industriales y en los sistemas de distribuciones residenciales y comerciales con un alto porcentaje de carga de aire acondicionado, en los cuales la carga del motor es una porción significativa de la carga del sistema.

En el capítulo IV se analizara la teoría de resonancia en paralelo en un sistema trifásico mediante la simulación en simulink.

### **2.10.7. Características del sistema de distribución típico**

Las condiciones más severas de resonancia ocurren cuando un banco de condensadores grande es el principal medio de compensación paralela del sistema (un banco de condensador grande en una subestación, por ejemplo). En este caso, éste es un punto de resonancia del sistema, y la distorsión de voltaje significativa y el aumento de corrientes armónicas puede ocurrir si está resonancia corresponde a una corriente armónica generada por cargas no lineales. Es completamente común para está resonancia ocurrir cerca del quinto armónico.

Cuando un número de pequeños bancos de condensadores son aplicados a todo el sistema de distribución, habrá un número de frecuencias resonantes

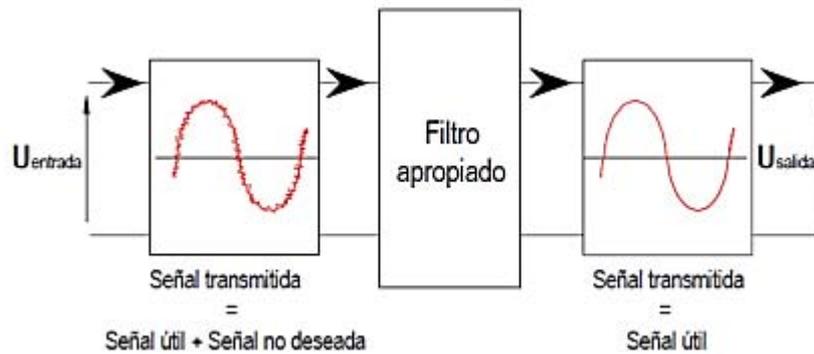
diferentes. Si estos condensadores son cambiados, la resonancia característica del sistema llegará a ser más difícil de determinar. Cada una de estas resonancias generalmente tiene magnitudes que son menores que las magnitudes que pueden ser asociadas con una resonancia mayor. Por tanto, el efecto de distribuir los condensadores por todo el sistema puede reducir el potencial para problemas debidos a una resonancia mayor. La colocación de un condensador introduce una resonancia paralela adicional que puede interactuar con las corrientes armónicas. La distorsión armónica de voltaje generalmente es peor cuando los condensadores están en servicio cerca de los extremos del alimentador, resultando en una mayor inductancia de línea, que ajusta la resonancia a bajas frecuencias e incrementa la distancia a la que fluirán las corrientes armónicas. Como se menciona previamente, la amortiguación proporcionada por las cargas es muy importante en sistemas de distribución. Este es a menudo el factor que previene a las condiciones de resonancia de causar significativos problemas de armónicos. La componente resistiva de la carga es el factor más importante.

### **2.11. Filtros de armónicas**

El objetivo del filtrado es reducir la distorsión de las ondas de tensión y corriente producidas por los componentes no lineales de la red eléctrica y proveer al sistema toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita. Cuando se pretende evitar que una determinada frecuencia penetre en algún elemento de la red, la solución más sencilla es el uso de un filtro de bloqueo en serie con el dispositivo; este filtro consiste en un circuito L-C en paralelo que presenta una impedancia elevada a la frecuencia seleccionada. Sin embargo, esta solución no es posible para eliminar la producción de armónicas en la fuente de origen porque la generación de armónicas por los componentes no

lineales de la red -tales como transformadores y convertidores estáticos es esencial para su normal funcionamiento<sup>14</sup>.

**Figura: 2.24**  
**Representación esquemática de la función de un filtro**



**Fuente:** Armónicos filtros  
**Elaborado por:** Donsión / 2007

Generalmente, el elemento no lineal es una fuente de armónicas de corriente y la solución ideal es la absorción local de las armónicas por medio de filtros activos. Sin embargo, la tecnología -más frecuente en la actualidad- elimina las armónicas de intensidad mediante filtros pasivos de baja impedancia, a las frecuencias requeridas, conectados en paralelo con la fuente de armónicas.

Una solución más efectiva para minimizar la penetración de armónicas de corriente en la red, independientemente de su impedancia, es el uso combinado de filtros serie-paralelo, pero resulta demasiado costosa.

### 2.11.1. Tipos de filtros

Los filtros se pueden clasificar atendiendo a dos conceptos distintos:

<sup>14</sup>Universidad Nacional de Asunción - Facultad Politécnica. Análisis y propuesta de solución al problema de alta distorsión armónica: caso industrial

### 2.11.1.1. El tipo de tecnología (componentes) con que se fabrica el filtro

Considerando el primer concepto de clasificación en:

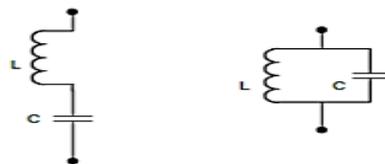
- a) Pasivos
- b) Activos
- c) Híbrido

#### a) Filtros pasivos

El filtro pasivo de potencia es un sistema que ha sido utilizado en la industria con el objetivo de disminuir las perturbaciones en redes eléctricas, se puede utilizar el filtro pasivo de dos formas ya sea reduciendo la circulación de la perturbación que genera la carga no lineal en dirección de la fuente, o reduciendo la circulación de la perturbación desde la fuente hacia la carga en el caso de que la fuente ya posea problemas con la calidad de su energía. Además este sistema puede proveer a la red eléctrica toda o parte de la potencia reactiva que esta necesita.

El filtro pasivo de potencia se caracteriza por estar compuesto por elementos pasivos, pudiendo ser estos arreglos diferentes combinaciones de tipo inductivo y capacitivo dependiendo de la necesidad.

**Figura: 2.25**  
**Posible combinación de elementos pasivos que pueden formar parte de un arreglo de un filtro pasivo.**



**Fuente:** Análisis y propuestas de solución al problema de alta distorsión armónica: caso industrial.

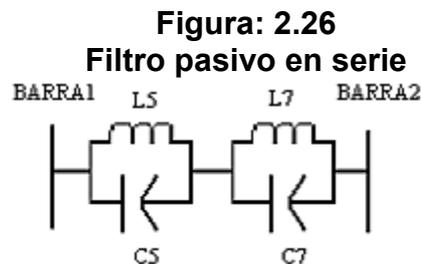
**Elaborado por:** Universidad Nacional de Asunción - Facultad Politécnica / 2009

Los filtros pasivos pueden ser, según el propósito particular que se persigue, de dos tipos:

- 1) Filtros Series.
- 2) Filtros "Shunt" o paralelo.

### 1) Los filtros en series

Los Filtros Series evitan el paso de una componente de frecuencia particular, desde el contaminante hacia alguna componente de la planta o parte del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada. Estos constan de un inductor y un capacitor en paralelo que se posicionan en serie a la parte de la red que se desea proteger.



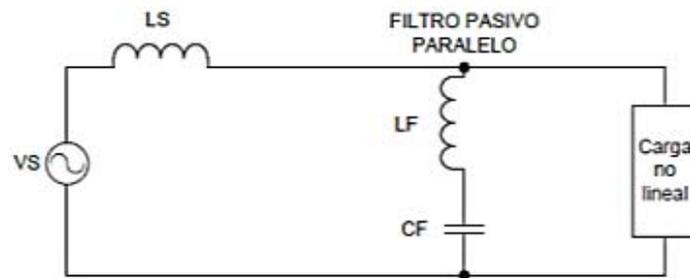
**Fuente:** Análisis y propuestas de solución al problema de alta distorsión armónica: caso industrial.

**Elaborado por:** Universidad Nacional de Asunción - Facultad Politécnica / 2009

### 2) Filtros "shunt" o paralelos

Los Filtros "Shunt" o paralelo proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante serie, compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación, entre otros.

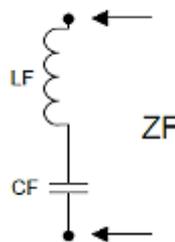
**Figura: 2.27**  
**Circuito monofásico con la implementación de un filtro pasivo de potencia paralelo.**



**Fuente:** Diseño y modelado de filtro para corrección de distorsión armónicos  
**Elaborado por:** Gonzalo Zumbo, Jorge Andrés / 2008

La estructura de una rama del filtro Shunt paralelo consta de un elemento inductivo y un elemento capacitivo ambos conectados en serie.

**Figura: 2.28**  
**Arreglo de una sola rama de un filtro pasivo de potencia paralelo.**



**Fuente:** Diseño y modelado de filtro para corrección de distorsión armónicos  
**Elaborado por:** Gonzalo Zumbo, Jorge Andrés / 2008

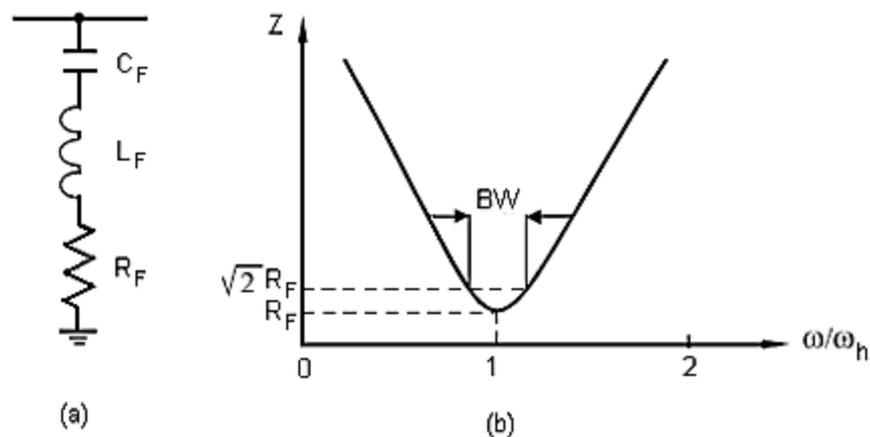
El filtro Shunt paralelo presenta una impedancia  $Z_F$  en sus terminales esta dado por la ecuación

El filtro paralelo presenta mayores ventajas que el filtro serie porque: es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado, proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema.

Existe una gran variedad de configuraciones de filtros, pero las más utilizadas son los Filtros Sintonizados Simples y los Pasa Altos.

El Filtro Sintonizado Simple de la figura 2.29 (a), elimina una armónica determinada; consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor.

**Figura: 2.29**  
**(a) Filtro sintonizado simple (b) Comportamiento en frecuencia**



**Fuente:** Análisis y propuestas de solución al problema de alta distorsión armónica: caso industrial.

**Elaborado por:** Universidad Nacional de Asunción - Facultad Politécnica / 2009

Por lo expuesto arriba, un filtro pasivo en derivación está sintonizado a la frecuencia que iguala sus reactancias inductiva y capacitiva.

Como muestra la figura 2.29 (b), el paso de banda del filtro  $BW$ , es el grupo de frecuencias limitado por los puntos donde la reactancia iguala a la resistencia, es decir, cuando el ángulo de la impedancia es de  $45^\circ$  y su módulo  $\sqrt{2} R$ .

## **A) Inconvenientes de los filtros pasivos**

La ventaja de utilizar filtros pasivos estriba, básicamente, en su bajo coste; sin embargo, tienen muchos inconvenientes, entre ellos:

- La impedancia de la fuente resulta muy afectada por las características del filtro.
- La resonancia serie entre el filtro y la impedancia de la fuente puede causar amplificaciones de las tensiones armónicas a ciertas frecuencias.
- El filtro pasivo puede provocar una resonancia paralela con la red de suministro, con amplificación de las corrientes armónicas.
- Los filtros pasivos, debido a la componente resistiva, tienen un consumo de componente fundamental, lo que provoca armónicos de tensión
- El número de secciones del filtro será tanto más elevado cuanto mayor sea el número de armónicos a eliminar, lo que supone aumentar los problemas anteriormente mencionados.
- En el caso de compensaciones centralizadas, el filtro de absorción (que es, generalmente, el utilizado a nivel industrial), está adaptado a una configuración concreta de red y estado de cargas. Por lo tanto, no podrán eliminarse ni añadirse cargas a un grupo compensado de esta forma.

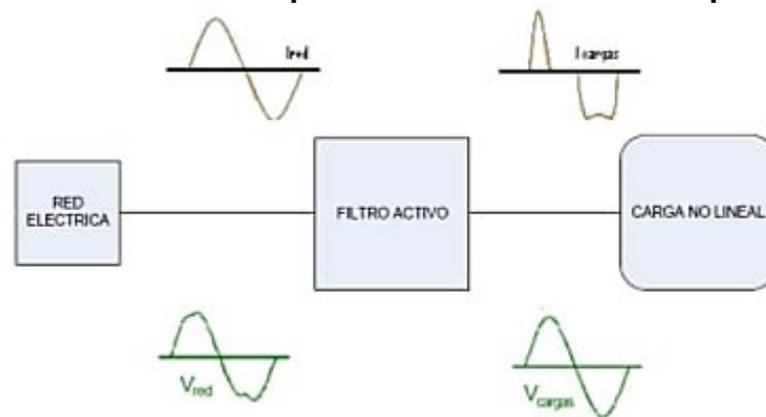
## **b) Filtros activos**

Para contrarrestar una situación de una mayor contaminación de la red eléctrica se puede utilizar un sistema más eficiente que los filtros pasivos, un sistema muy efectivo utilizando cada vez más en la actualidad es el Filtro Activo de Potencia, el mismo que los últimos años ha tenido un gran desarrollo. El filtro Activo de Potencia es un sistema compuesto por un generador de señales eléctricas comúnmente conocido como inversor, además forma parte

del sistema un control electrónico que se encarga de indicar al inversor de forma de onda debe generar.

El propósito del filtro activo es el de reducir los problemas de forma que la corriente que circule por la red eléctrica sea sinusoidal y que la tensión aplicada a las cargas también lo sea, mejorándose así la eficiencia del sistema eléctrico aguas arriba del punto de conexión del compensador, Figura 2.30.

**Figura: 2.30**  
**Representación de la operación un filtro activo de potencia**



**Fuente:** Diseño y modelado de filtro para corrección de distorsión armónicos

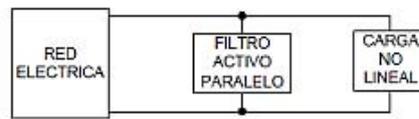
**Elaborado por:** Gonzalo Zumbo, Jorge Andrés / 2008

Al igual que los filtros pasivos los filtros activos también se puede clasificar, (ver Figura 2.31):

- 1) Filtro activo de potencia en serie
- 2) Filtro activo de potencia en paralelo

**Figura: 2.31**

- a) Bosquejo de la conexión de un filtro activo de potencia paralelo  
 b) bosquejo de la conexión de un filtro activo de potencia serie



a)



b)

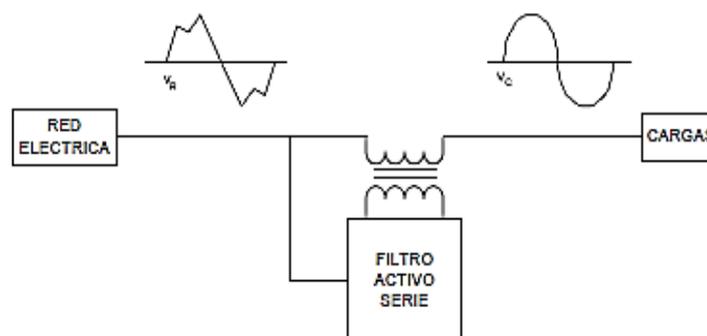
**Fuente:** Diseño y modelado de filtro para corrección de distorsión armónicos  
**Elaborado por:** Gonzalo Zumbo, Jorge Andrés / 2008

### 1) Filtro Activo de potencia serie

Cuando en nuestra red eléctrica el voltaje está muy distorsionado causado por componentes armónicos lo recomendable es utilizar un filtro activo serie el cual compensara la red a la fuente de armónicos entregado a la carga un voltaje únicamente con la componente fundamental, Figura 2.32.

**Figura: 2.32**

**Representación grafica de la acción de un filtro activo de potencia serie**  
**Este filtro también posee la característica de bloquear el paso hacia la fuente de las corrientes que se generan en la carga**

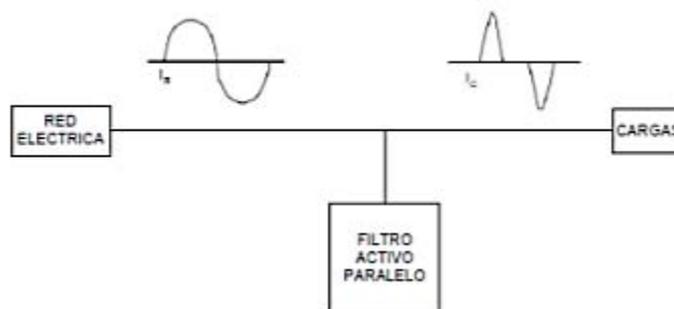


**Fuente:** Diseño y modelado de filtro para corrección de distorsión armónicos  
**Elaborado por:** Gonzalo Zumbo, Jorge Andrés / 2008

## 2) Filtro activo de potencia paralelo

Cuando tenemos una carga no lineal que genera una distorsión armónica de corriente es necesario utilizar un filtro activo paralelo., Figura 2.33.

**Figura: 2.33**  
**Representación grafica de la acción de un filtro activo de potencia paralelo.**



**Fuente:** Diseño y modelado de filtro para corrección de distorsión armónicos  
**Elaborado por:** Gonzalo Zumbo, Jorge Andrés / 2008

## c) Filtro híbridos

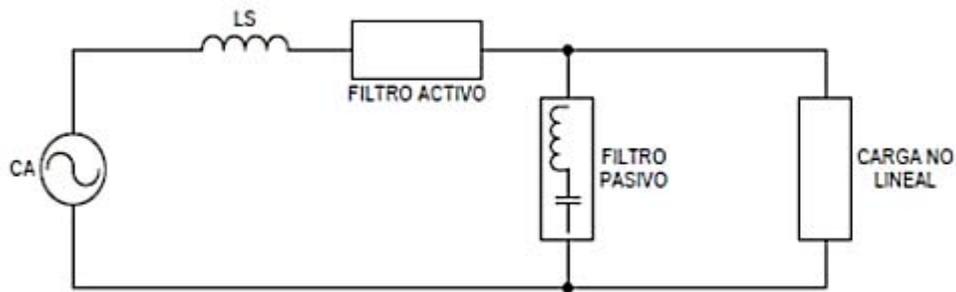
El filtro híbrido es la combinación de un filtro pasivo y un filtro activo, esta combinación permite reducir el tamaño y por lo tanto el costo de los filtros con parte activa manteniendo las ventajas de los filtros pasivos. Clasificándose en:

- 1) Filtro Híbrido serie
- 2) Filtro Híbrido paralelo

### 1) Filtro Híbrido serie

Esta configuración está compuesta de un filtro activo conectado en serie con la impedancia de fuente y el filtro pasivo en paralelo con la carga.

**Figura 2.34**  
**Bosquejo de conexión de un filtro híbrido de potencia serie.**



**Fuente:** Diseño y modelado de filtro para corrección de distorsión armónicos

**Elaborado por:** Gonzalo Zumbo, Jorge Andrés / 2008

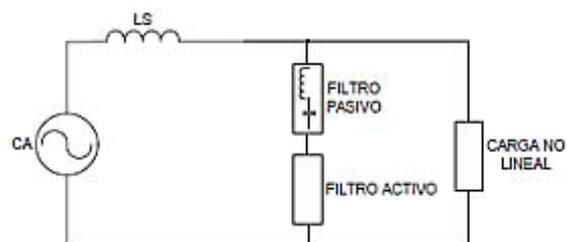
En general las aplicaciones de las distintas estructuras son las siguientes:

- Reducción de armónicos de tensión en la carga.
- Regulación de la tensión
- Reducción del Flicker y los microcortes de tensión.

## 2) Filtro híbrido paralelo

La configuración de filtro paralelo consta de un filtro activo y un filtro pasivo que se conectan en serie formando el híbrido, para conectarse luego en paralelo con la carga no lineal.

**Figura: 2.35**  
**Bosquejo de conexión de un filtro híbrido de potencia paralelo**



**Fuente:** Diseño y modelado de filtro para corrección de distorsión armónicos

**Elaborado por:** Gonzalo Zumbo, Jorge Andrés / 2008

En general las aplicaciones de las distintas estructuras son las siguientes:

- Reducción de los armónicos de corriente
- Compensación del factor de potencia
- Reducción de la corriente por el neutro

#### **2.11.1.2. Respuesta de frecuencia**

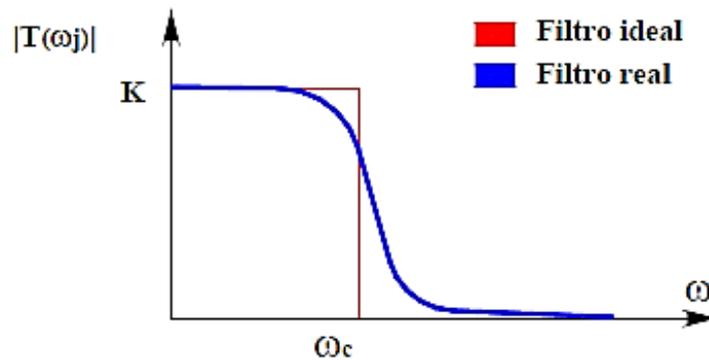
Atendiendo al segundo concepto de clasificación los filtros también se dividen en 4 tipos distintos:

- a) Filtro de paso bajo
- b) Filtro de paso alto
- c) Filtro de paso banda
- d) Filtro de rechazo de banda

##### **a) Filtro de paso bajo**

Son aquellos destinados a transmitir con atenuación despreciable señales cuyas frecuencias se encuentran comprendidas entre corriente continua y un cierto valor denominado frecuencia de corte  $w_c$ . Las componentes de la señal cuyas frecuencias superan a  $w_c$  se verán fuertemente rechazadas. Ver Figura 2.36.

**Figura: 2.36**  
**Curva característica del filtro de paso bajo**

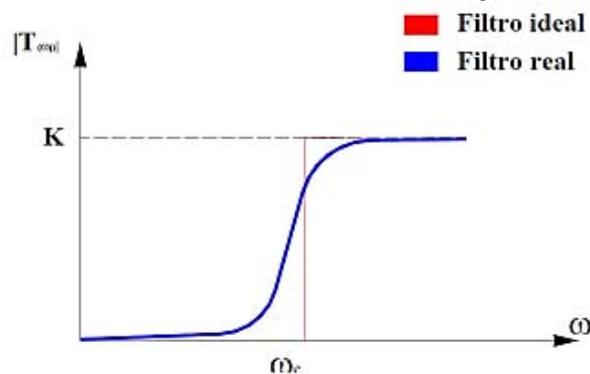


**Fuente:** Armónicos filtros  
**Elaborado por:** Donsión / 2007

#### b) Filtro paso alto

Están destinados a transmitir con atenuación despreciable señales cuyas frecuencias se encuentran entre una cierta frecuencia de corte  $\omega_c$  y frecuencias muy altas (teóricamente infinito). Las componentes de la señal cuyas frecuencias están por debajo de  $\omega_c$  se verán fuertemente rechazadas. El módulo de la transferencia se representa en la Figura 2.37.

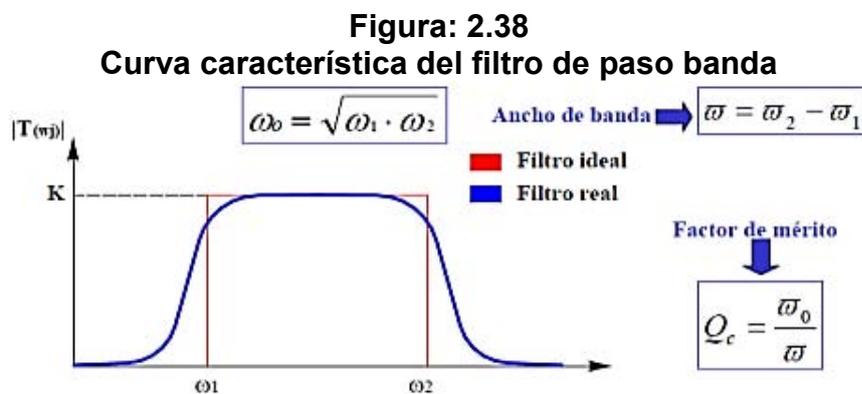
**Figura: 2.37**  
**Curva característica del filtro de paso alto**



**Fuente:** Armónicos filtros  
**Elaborado por:** Donsión / 2007

### c) Filtro paso banda

Se utilizan para transmitir con atenuación despreciable señales cuyas frecuencias se encuentran entre  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , (frecuencias de corte inferior y superior respectivamente), fuera de dicho intervalo, las componentes de la señal se verán fuertemente rechazadas. La Figura 2.38, muestra la transferencia correspondiente.

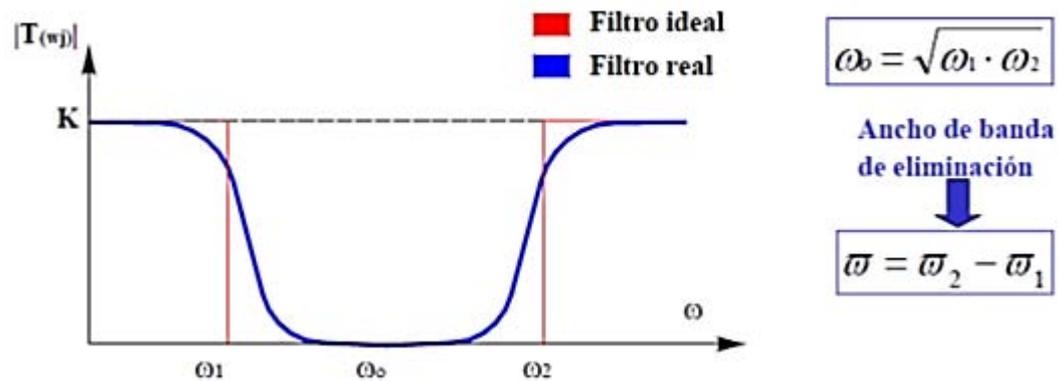


**Fuente:** Armónicos filtros  
**Elaborado por:** Donsión / 2007

### d) Filtro de rechazo de banda

Son aquellos destinados a transmitir con atenuación despreciable componentes de la señal cuyas frecuencias se encuentran fuera de un intervalo de eliminación dado definido por dos valores de corte  $\omega_1$  y  $\omega_2$ ; todas aquellas componentes de la señal cuyas frecuencias caen dentro de dicho intervalo se verán fuertemente rechazadas. La Figura 2.39 muestra la función de transferencia correspondiente a este tipo de filtros.

**Figura: 2.39**  
**Curva característica del filtro de rechazo de banda**



**Fuente:** Armónicos filtros  
**Elaborado por:** Donsión / 2007

## 2.12. Características de los filtros

Para cualquier tipo de filtros se emplean las siguientes definiciones:

### 2.12.1. Frecuencia central ( $f_0$ )

Se define como aquella frecuencia que permite al paso de las frecuencias inferiores a una frecuencia conocida (frecuencia central o frecuencia de resonancia), atenuado enormemente las frecuencias superiores a dicha frecuencia central.

### 2.12.2. Frecuencia de corte

Es aquella en que la ganancia del filtro cae a - 3 dB por debajo de la máxima ganancia alcanzada. En los filtros pasa y elimina banda existen dos: una superior y otra inferior<sup>15</sup>.

<sup>15</sup><http://senales.galeon.com/aficiones1349723.html>

### 2.12.3. Ancho de banda (BW)

El ancho de banda es la anchura, medida en Hertz, del grupo de frecuencia que realiza trabajo útil, figura 2.40. Este grupo de frecuencias es en donde se encuentra concentrada la mayoría de energía de la señal.

Es la gama de frecuencia a las cuales se las permitirá el paso, es igual a la diferencia de las frecuencias de corte superior e inferior que se expresa en la ecuación (60.0).

$$B_W = f_2 - f_1 \quad (60.0)$$

### 2.12.4. Factor de calidad (Q)

Especifica la eficacia del filtro, es decir, la idealidad de su presupuesta. Es la proporción establecida entre la energía acumulada en el circuito y la disipa durante un ciclo. Dicho con otras palabras es la relación entre la frecuencia de corte o central y el ancho de banda, ecuación (61.0).

$$Q = \frac{f_0}{B_W} \quad (61.0)$$

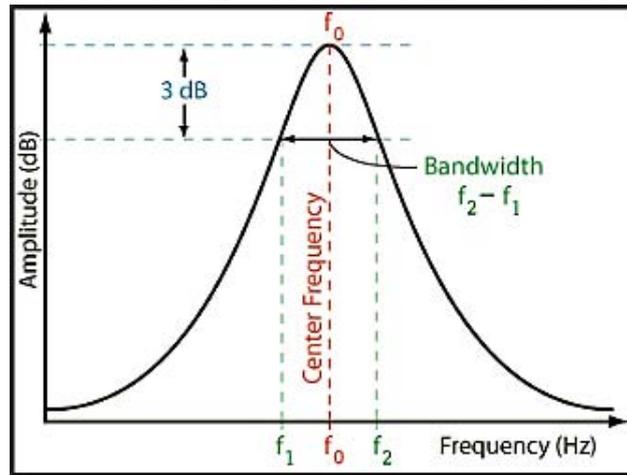
Remplazando la ecuación (60.0) en la ecuación (61.0) y optemos la ecuación (61.1):

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (61.1)$$

En conclusión la calidad (Q) en filtros sirve para ver lo selectivo que son, es decir, para ver el ancho de banda. En principio, un filtro con menor ancho de

banda (mayor Q), será mejor que otro con más ancho. También, como se puede deducir de la ecuación anterior, es más fácil hacer filtros de calidad (porque requieren una Q mayor) a alta frecuencia que la de baja frecuencia

**Figura: 2.40**  
**Determinación del Q mediante la curva de resonancia**

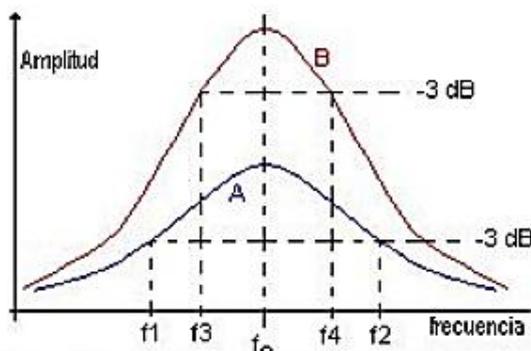


Fuente: Ampliación - Elementos generales de un EQ  
Elaborado por: Alternative Silence/2012

**El gráfico A:**

Muestra, figura 2.41, una frecuencia central  $f_0$  (también llamada frecuencia de resonancia) ancho de banda va de  $f_1$  a  $f_2$ .

**Figura: 2.41**  
**Dos gráficos de dos filtros con la misma frecuencia central**



Fuente: Filtros eléctricos / electrónicos: concepto, tipos, características  
Elaborado por: Electrónica UNICROM/2012

### El gráfico B:

Muestra una frecuencia central  $f_0$  (también llamada frecuencia de resonancia), figura 2.41, ancho de banda va de  $f_3$  a  $f_4$ .

Las frecuencia utilizadas para determinar el ancho de banda ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ ) se llaman frecuencias de corte o frecuencias de mediana potencia y se obtienen cuando la amplitud de la onda (ver el gráfico) cae en 3 dB de su máxima amplitud.

El gráfico B muestra un filtro de mayor selectividad, pues las frecuencias de corte están más cerca de la frecuencia central  $f_0$  (ver el gráfico). En este caso el ancho de banda del filtro es menor.

El gráfico A muestra un filtro de menor selectividad, pues sus frecuencias están más alejadas de la frecuencia central, pero su ancho de banda es mayor.

Para encontrar el factor de calidad de un filtro se utiliza la fórmula:  $Q = f_0 / Bw$

Donde:

$f_0$  = frecuencia de central o de resonancia

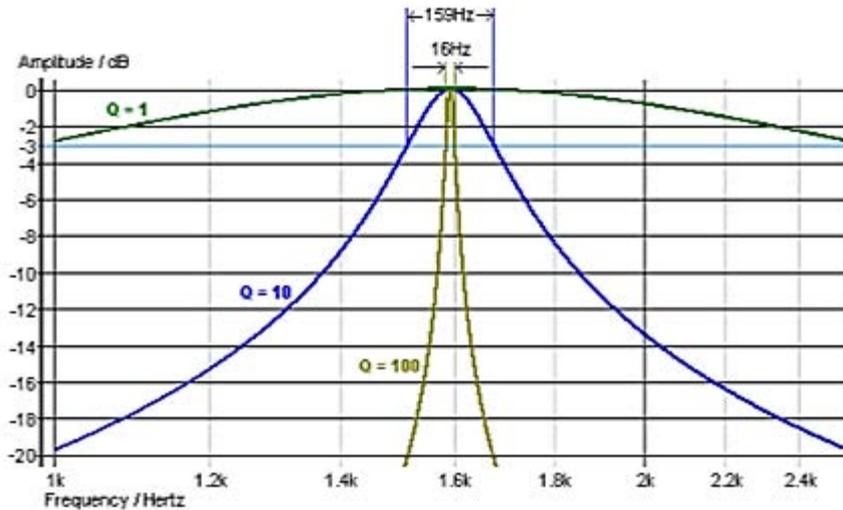
$Bw$  = Ancho de banda ( $f_2 - f_1$ ) o ( $f_4 - f_3$ ).

El factor de calidad de circuitos pasivos formados con resistencias, bobinas y condensadores es bajo, inferior a 100, por el efecto de la resistividad del hilo de las bobinas, principalmente, ya que para valores elevados de inductancia se necesitan grandes longitudes de hilo. El uso de circuitos activos, que funcionan como multiplicadores de inductancia o capacidad puede mejorar el  $Q$ <sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup><http://www.datuopinion.com/factor-q>

**Figura: 2.42**  
**Valores de Q con la misma frecuencia central**



**Fuente:** Filtros

**Elaborado por:** Apuntes para clases de Ricardo Teruel/2010

## 2.13. Simulink

### 2.13.1. Entorno Gráfico

Para poder utilizar el programa Simulink<sup>®</sup> correctamente es importante estar familiarizado con las ventanas y las herramientas. Al programa Simulink<sup>®</sup> se accede a través del programa Matlab<sup>®</sup>. En la figura 2.43 se muestra el entorno gráfico de la ventana principal del programa Matlab<sup>®</sup> desde donde se accede al programa Simulink<sup>®</sup> de varias formas; en el menú 'File' (marcado en la figura como 'Archivo') se desprende un listado de opciones donde en la opción 'New' se debe elegir la sub-opción 'Model', inmediatamente se abrirá otra ventana correspondiente a la figura 2.44, la cual es la ventana principal del programa Simulink<sup>®</sup>; por otro lado también se puede acceder a dicho programa mediante la librería de Simulink<sup>®</sup> seleccionando el icono marcado en la figura 2.43 como 'Librería de simulink<sup>®</sup>', se abre una ventana que corresponde a la figura 2.45, y desde esa ventana se debe seleccionar el menú 'Archivo', la opción 'New' y sub-opción 'Model', o bien pinchar directamente el icono que representa una página en blanco que se marca en la figura 2.45 como 'Nuevo modelo'. Una

vez que se llega al programa Simulink® es importante tener claro cuáles son las opciones más importantes para realizar correctamente las simulaciones.

La figura 2.44 muestra la ventana principal de Simulink®. En esta ventana se encuentra el icono marcado como 'Librería de Simulink®'. Haciendo clic en esta opción se abre la librería (figura 2.45) donde se encuentran los bloques que permiten crear cualquier tipo de modelo o controlador que se desee simular. También son importantes las opciones marcadas como 'Activar simulación', 'Parar simulación' y 'Tiempo de simulación' que permiten comenzar a simular cualquier archivo Simulink® creado en esa misma ventana, parar esa simulación en cualquier momento o bien cambiar el tiempo que se desea simular correspondientemente<sup>17</sup>.



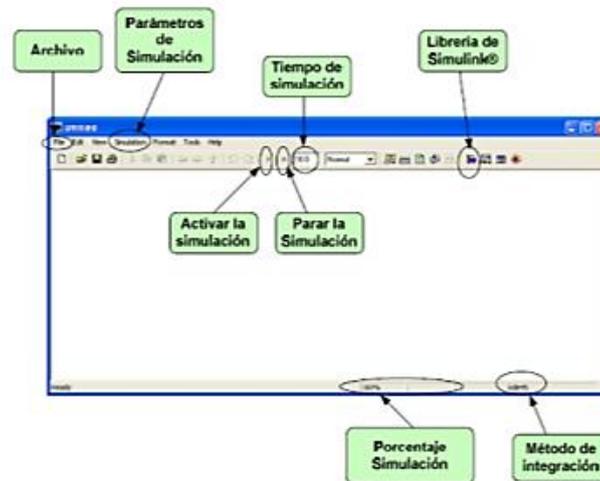
**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas  
**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

'Porcentaje simulación' y 'Método de integración' informan durante la simulación del sistema, en concreto de cuanto porcentaje de la simulación ha

<sup>17</sup><http://personal.us.es/aarce/ManualSimulink.pdf>

sido realizada y el método de integración seleccionado previamente en las opciones de la simulación.

**Figura: 2.44**  
**Ventana principal Simulink®.**



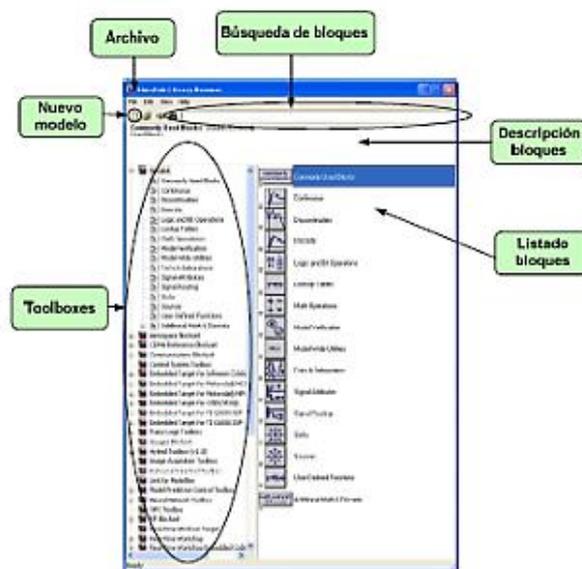
**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas  
**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

La figura 2.45 muestra la librería de Simulink® donde se encuentran los bloques que se utilizan para crear los archivos de Simulink®. Como se ha comentado anteriormente desde esta librería se pueden abrir archivos Simulink® y también crear nuevos archivos mediante las opciones marcadas como 'Archivo' y 'Nuevo modelo'. Cada uno de los bloques, que serán detallados en el siguiente capítulo, tienen referenciado un nombre para poder ser buscados de forma más rápida a través de la casilla marcada en la figura 2.45 como 'Búsqueda de bloques', donde escribiendo el nombre y haciendo clic en el icono que representa unos catalejos se realiza la búsqueda del bloque que tenga el nombre especificado entre todos los 'toolboxes'. Los resultados de la búsqueda se mostrarán en la sub-ventana marcada en la figura 2.45 como 'Listado bloques'.

En la sub-ventana marcada como 'toolboxes' se encuentran listados todos los 'toolboxes', herramientas, de Simulink® disponibles para la versión instalada. Si se hace clic en cada herramienta o 'toolbox' se desplegará en la sub-ventana

‘*Listado de bloques*’ los bloques que están dentro de ese ‘toolbox’ y que podrán ser utilizados para crear archivos de Simulink®. Por último remarcar que la sub-ventana ‘*Descripción de bloques*’ describe los bloques que se marquen en la sub-ventana ‘*Listado bloques*’ y será de ayuda para entender el funcionamiento de estos mismos, describiendo la funcionalidad, las entradas y las salidas.

**Figura: 2.45**  
**Librería Simulink®**



**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas  
**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

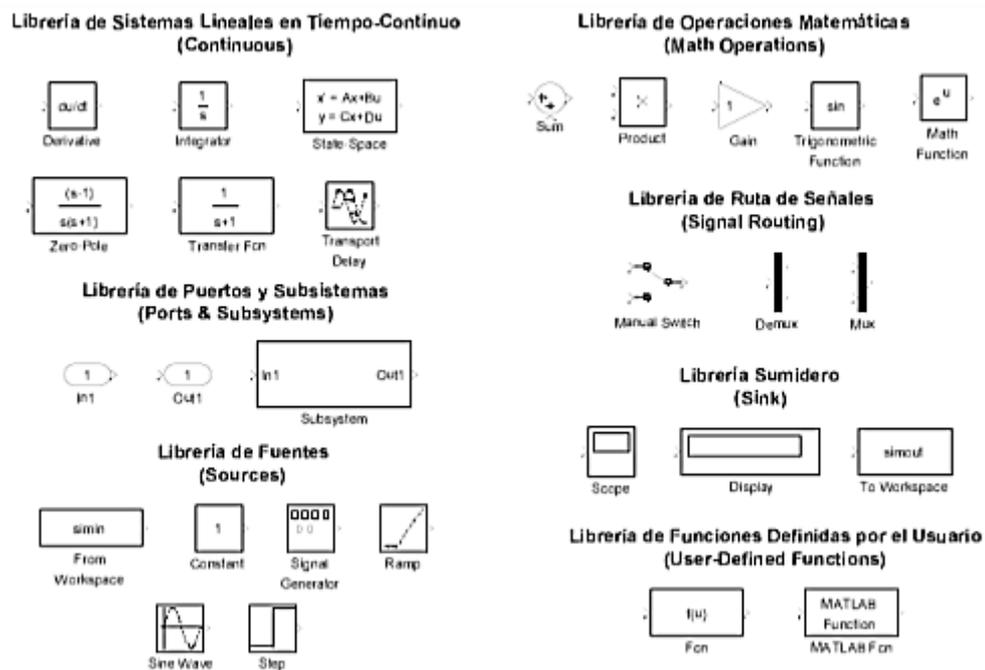
Las opciones ‘*Help*’ que aparecen en cada una de las ventanas descritas en este capítulo son de gran ayuda para profundizar en la programación de Simulink®.

Todas la ventanas mostradas en las figuras han sido obtenidas de la versión Matlab/Simulink®7.1, puede que difieran un poco con otras versiones pero la mayoría de las opciones pueden ser encontradas con la misma apariencia.

### 2.13.2. Bloques Principales

En este capítulo serán presentados los bloques más utilizados en Simulink® y necesarios para la asignatura de Teoría de Sistemas. En la figura 2.46 se ilustran los bloques que se detallarán en este capítulo. Cada uno de estos bloques podrán ser configurados por el alumno dependiendo de las exigencias del problema que se pretenda resolver mediante la ventana de dialogo de configuración de cada bloque. A esta ventana se accede haciendo doble clic sobre el bloque seleccionado.

**Figura: 2.46**  
**Bloques principales**



**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas

**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

### 2.13.2.1. Librería de Sumidero (Sink)

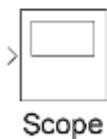
Este apartado describirá los bloques más utilizados de la librería 'Sink'. Los bloques detallados son presentados en la figura 2.47.

**Figura: 2.47**  
**Librería Sink.**



**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas  
**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

### Bloque Scope



El bloque 'Scope' representa gráficamente la entrada conectada a este bloque con respecto al tiempo de simulación. Este bloque permite representar varias variables a la vez para el mismo periodo de tiempo. El 'Scope' permite ajustar el tiempo y el rango de los valores de entrada presentados. Se puede mover y redefinir el tamaño de la ventana 'Scope' y se puede modificar los valores de sus parámetros durante la simulación.

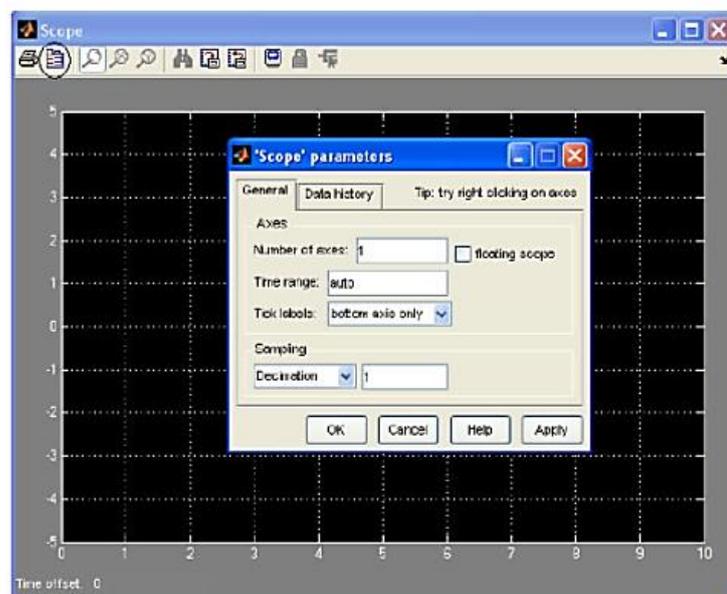
Si la señal de entrada al bloque 'Scope' está formada por varias variables (en lugar de un vector es una matriz), éste asigna colores a cada elemento de la señal en el siguiente orden: amarillo, magenta, cian, rojo, verde y azul oscuro. Cuando la señal posee más de seis elementos, se repite el orden de los

colores. Se pueden ajustar los límites del eje-y pulsando el botón derecho sobre la gráfica y seleccionando la opción 'Axis Properties'.

La ventana del bloque 'Scope' posee varios iconos en la barra de herramienta que permiten realizar 'zoom' en la gráfica, preservar las configuraciones de los ejes para la simulación siguiente, limitar los datos presentados y guardar los datos en el espacio de trabajo.

Entretanto, el icono con mayor utilidad es el denominado 'Parameters'. Si se pulsa este botón, la primera pestaña que aparece es la de los parámetros generales. En esta pestaña un parámetro importante es el 'Number of axes' que permite seleccionar el número de ejes que se desean representar en la gráfica del bloque 'Scope'.

**Figura: 2.48**  
**Icono de parámetros vista general**



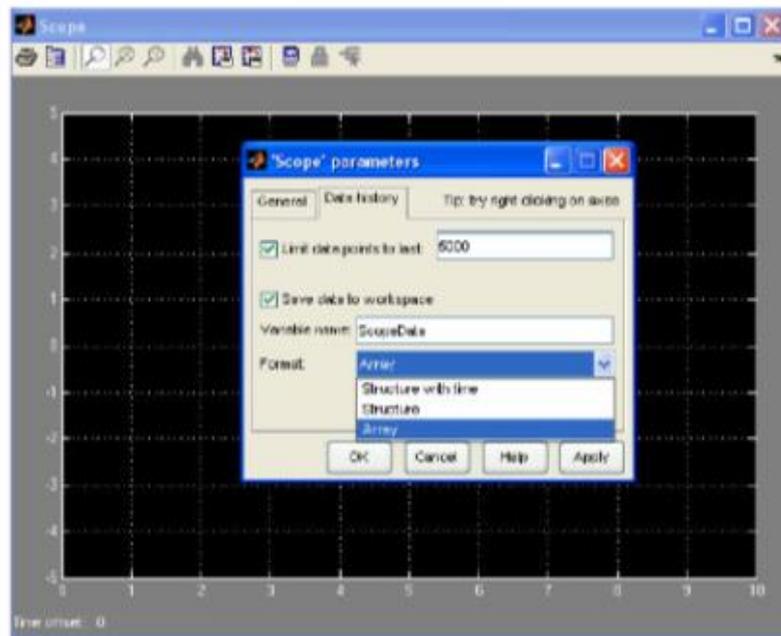
**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas  
**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

En la figura 2.49 se presentan los parámetros de la pestaña 'Data history'. El parámetro 'Limit data pointstolast' permite especificar cuantos puntos serán

representados durante la simulación. Por ejemplo, si la simulación posee un periodo de muestreo muy pequeño, durante la simulación se genera un número muy grande de puntos, lo que implica que esta opción debe tener un número muy elevado para poder visualizar toda la simulación correctamente. Si esta opción aparece como no seleccionada, el bloque 'Scope' por defecto representará todos los puntos generados.

A través de este cuadro de diálogo es posible también guardar los datos de las variables representadas en el espacio de trabajo del programa Matlab®. En la opción '*Variable name*' se define el nombre de la variable y en '*Format*' se configura el formato con el se guardarán los datos: '*Structure with time*', '*Structure*' y '*Array*'. Por ejemplo, si se selecciona el formato '*Array*', los datos serán guardados en una matriz, donde en la primera columna se almacenan el vector del tiempo de simulación, y de la segunda columna el vector de la señal de entrada del bloque.

**Fig. 2.49:**  
**Icono parámetros, vista date history**



**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas  
**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

### Bloque *Display*

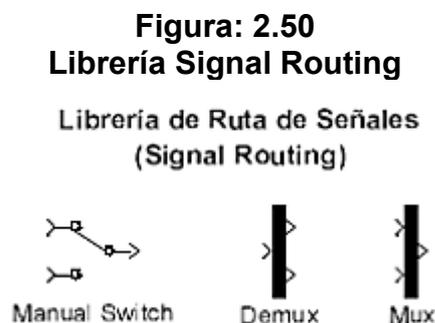


El bloque '*Display*' muestra por pantalla el valor de su entrada. Los formatos de los datos visualizados son los mismos utilizados en MatLab®. El parámetro '*Decimation*' habilita la visualización de los datos con la  $n$ -ésima muestra, donde  $n$  es el factor de conversión al sistema decimal. El parámetro '*Sample time*' sirve para especificar el intervalo de muestreo para cual cada punto es visualizado.

Se puede modificar el tamaño del bloque para visualizar correctamente los valores mostrados por pantalla. Es posible modificarlo tanto vertical como horizontalmente. La presencia de un pequeño triángulo negro indica que el bloque no está mostrando todos los elementos por pantalla.

#### 2.13.2.2. Librería de Ruta de Señales (*RoutingSignals*)

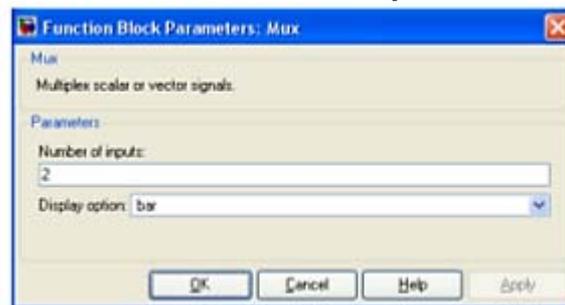
En este apartado se presentarán tres bloques de la librería '*SignalRouting*': '*Manual Switch*', '*Mux*' y '*Demux*'.



**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas  
**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

El bloque *'Manual Switch'* conmuta sus entradas pasando sólo una de ellas a través de su salida. No existe ventana de dialogo para este bloque, por lo que para conmutar entre las entradas se debe pulsar dos veces sobre el bloque. Este bloque mantiene el estado determinado cuando el archivo Simulink es guardado.

**Figura: 2.51**  
**Parámetros del bloque Mux**



**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas  
**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

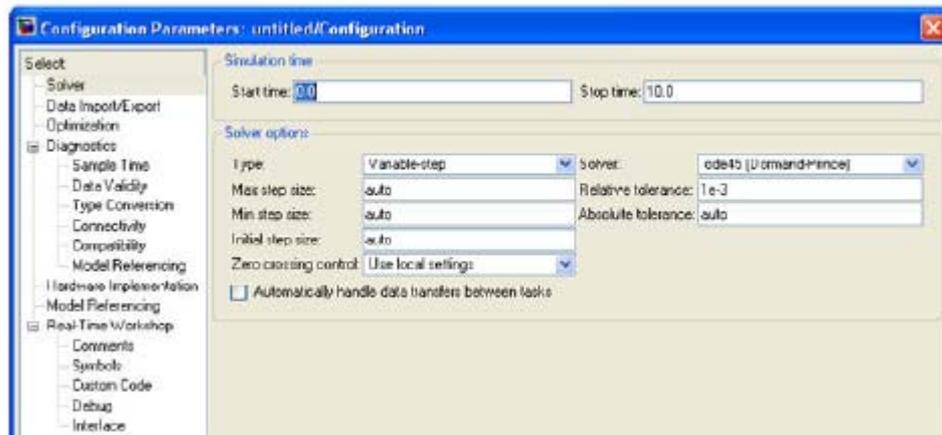
El bloque *'Demux'* extrae las componentes de una señal de entrada y provee las componentes en separadas señales. El bloque acepta tanto señales vectoriales como buses de señales. El parámetro *'Number of outputs'* permite especificar el número y dimensión de cada puerto de salida. Si no se configura la dimensión de las salidas, el bloque lo determina automáticamente.

### 2.13.3. Tiempo de simulación

El tiempo de simulación es un parámetro que hay que definir antes de comenzar las simulaciones. El tiempo de simulación puede ser modificado en la casilla marcada en la figura 2.44 como *'Tiempo de simulación'* o bien en la ventana *'ConfigurationParameters'* que se muestra en la figura 2.52 y a la que se accede a través de la opción marcada como *'Parámetros de simulación'* en la figura 2.44 y en la sub-opción *'ConfigurationParameters'*.

El tiempo de simulación puede configurarse en esta ventana modificando el tiempo de comienzo de la simulación y el de parada, casillas denominadas 'Start time' y 'Stop time' de la figura 2.52. Por defecto siempre el tiempo de simulación será 10 segundos.

**Figura: 2.52**  
**Parámetro de configuración del programa Simulink®**



**Fuente:** Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas

**Elaborado por:** Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo/2009

## 2.14. Analizador de energía

### 2.14.1. Descripción

El PowerPad® Modelo 3945 es un analizador de calidad de potencia trifásica fácil de usar, compacto y resistente a golpes. Está dirigido a técnicos e ingenieros para medir y realizar trabajos de diagnóstico y calidad de potencia en redes de bajo voltaje mono, bi y trifásicas.

Los usuarios pueden obtener ondas instantáneas de las principales características de una red eléctrica y también monitorear sus variaciones en el tiempo. El sistema de medición de multitareas maneja simultáneamente todas las funciones de medición y presentación de formas de ondas diferentes

magnitudes, su detección, su registro continuo y su presentación sin limitaciones.

**Figura: 2.53**  
**Analizador de energía trifásico AEMC 3945**



**Fuente:** Analizador de calidad de energía eléctrica trifásica PowerPad™ modelo 3945  
**Elaborado por:** AEMC Instruments

#### 2.14.2. Características

- Medición de Voltajes RMS hasta 480V (fase-a-neutro) o 380V (fase-a-fase) para sistemas de dos, tres o cuatro hilos
- Medición de corrientes RMS hasta 6500Arms
- Medición de frecuencia (sistema de 41 a 70 Hz)
- Calculo de corriente neutra en configuraciones Y
- Calculo de Factor de Cresta de corriente y Voltaje
- Calculo de factor K de corriente y voltaje
- Calculo de parpadeos (flickers) de voltaje de corta duración
- Calculo de desbalance de fases de voltaje y corriente (sistema de 3 fases solamente)
- Medición de ángulo y razones de armónicos (referidos a la fundamental o al valor RMS) de voltaje, corriente o potencia, hasta los 50º armónicos
- Calculo de factor de distorsión armónica total

- Monitoreo del valor promedio de cualquier parámetro, calculado en periodos de 1 segundos hasta 2 horas
- Medición de la potencia activa, reactiva y aparente por fase y sus respectivas sumas totales.
- Calculo del factor de potencia, factor de potencia de desplazamiento y factor de tangente
- Potencia total un instante de tiempo elegido por el operador
- Registro, marcación en el tiempo y características de perturbaciones (alzas, caídas e interrupciones, superaciones de umbral de potencia y de armónicos)
- Detección de transientes y registro de las formas de onda asociadas

### **2.14.3. Normativa Internacional IEC 61000-4-30**

Esta norma se refiere a los métodos de medición para los parámetros que permiten estudiar la calidad de la energía en un sistema de potencia, sin embargo esta norma se refiere a ajuste de umbrales que se deben considerar para capturar o reconocer un evento como fenómeno electromagnéticos.

Según la norma, los parámetros de interés son las frecuencias del sistema, magnitud del voltaje, parpadeos (flicker), interrupciones de voltaje, armónicas, interarmónico, huecos y picos de voltaje, transitorios y cambios rápidos de voltaje.

La norma IEC 61000-4-30 divide las clases de mediciones en dos tipos según la necesidad.

- La clase A de medición son aquellos en los cuales los datos adquiridos tienen que ser de alta precisión. Estos protocolos de medición deben ser

seguidos en aplicaciones de comprobación de cumplimiento de los estándares, o en la resoluciones de algún tipo de problema.

- La clase B de medición, son aquellos que se utilizan para un análisis estadístico, por lo que la precisión en la medición no debe ser tan estricta. La clase B será omitida al describir los protocolos de medición ya que no es de interés en el presente trabajo.

El PowerPad<sup>®</sup> Modelo 3945 trabaja las normalIEC 61000-4-30 de clases A ya trabaja con una alta precisión en cada uno de los parámetros medidos, la cual, nos permite obtener información real, confiable y segura para nuestro análisis caso que no sucede con los medidores de clase B que solo nos permite un análisis estadístico.

**Tabla: 2.7**  
**Especificación de Exactitud (excluyendo los sensores de corriente)**

Función	Rango	Resolución del Display	Exactitud
Frecuencia	40 a 69Hz	0.01Hz	±0.01Hz
Voltajes RMS monofásicos (Vrms, Vdem)	15V a 480V	0.1V	±0.5% ± 2cts
Voltaje RMS Fase-a-fase (Urms, Udem)	15V a 960V	0.1V	±0.5% ± 2cts
Componente de voltaje CD	15V a 680V	0.1V	±1% ± 5cts
Voltajes de pico monofásicos (Vpp, Vpm)	15V a 680V	0.1V	±1% ± 5cts
Voltajes de pico fase-a-fase (Upp, Upm)	15V a 1360V	0.1 V si I < 1000 V 1 V si I ≥ 1000 V	±1% ± 5cts
Sensores de corriente (Arms, Adem)	Inom/1000 a 1.2 Inom	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±0.5% ± 2cts
AmpFlex® (Arms, Adem)	10A a 6500A	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±0.5% ± 1A
Corriente CD (MR193)	1A a 1400A	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±(1% + 1A)
Corriente de pico (App, Apm)	0 a 1.7 x Inom	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±(1% + 1A)
Corriente de pico (AmpFlex®)	10 a 9190A	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±(1% + 1A)
Factor de Cresta (Vcf, Ucf, Acf)	1.00 a 9.99	0.01	±1% ± 2cts
Potencia Real (W) Tenaza y AmpFlex® Tenaza AmpFlex®	0W a 9999kW Cos φ ≥ 0.8 Cos φ 0.2 a < 0.8 Cos φ 0.5 a < 0.8	4 dígitos (10000cuentas)	±1% ± 1ct ±1.5% ± 10cts ±1.5% ± 10cts
Energía Activa (Wh) Tenaza y AmpFlex® Tenaza AmpFlex®	0Wh to 9999MWh Cos φ ≥ 0.8 Cos φ 0.2 a < 0.8 Cos φ 0.5 a < 0.8	0.01 Tan φ < 10 4 dígitos (10000cuentas)	±1° en φ ±1% ± 1ct ±1.5% ± 1ct ±1.5% ± 1ct
Energía Aparente (Vah)	0Vah a 9999MVAh	4 dígitos	±1% ± 1ct
Desbalance (Vunb, Aunb) fuente trifásica	0% a 100%	0.1%	±1% ± 1ct
Ángulo de fase (V/I; I/I; V/V)	-179° a +180°	1°	±2°
Razones de armónicos F = 40 a 69Hz (Vrms > 50V) (rms > Inom/100)	0% a 999% 1 a 50° armónico	0.1%	±1% + 5cts
Ángulos de armónicos F = 40 a 69Hz (Vrms > 50V) (rms > Imax/100)	-179° a +180° 1 a 25 a 50	1°	±3° ± 10°
Distorsión armónica total (Vthd, Athd, Uthd)	0% a 999% 50° armónico	0.1%	±1% + 5cts
Factor de corriente K (Akf)	1 a 99.99	0.01	±5% ± 1ct
Parpadeo de voltaje (Vflk)	0.00 a 9.99	0.01	no especificado

Vdem, Adem y Udem = Valores medidos en medio ciclo (permite obtener una medición con valores positivos y negativos)

Vpm, Upm y Apm = Valores de pico mínimos

**Fuente:** Analizador de calidad de energía eléctrica trifásica PowerPad™ modelo 3945  
**Elaborado por:** AEMC Instruments

## CAPÍTULO III

### FACTOR DE POTENCIA CON ARMÓNICOS

#### 3.1. Introducción

Esta tesis se aplica la teoría ya existente sobre armónicos en cada uno de los capítulos y con mayor énfasis en este capítulo ya que el cálculo del factor de potencia se lo hace de forma tradicional considerando solo cargas lineales caso que no sucede en la realidad ya las cargas no lineales esta presentes en casi todos los sistemas eléctricos de esta forma se deja un precede para que los ingenieros encargados de parte de diseño implanten esta teoría.

En el presente capítulo se presentará la forma de cálculo para el factor de potencia y las variables que intervienen en el análisis de armónicos de un sistema trifásico calculado fase por fase.

La información se obtuvo del bloque B de la cámara de distribución de la Universidad Tecnológica Equinoccial bajo condiciones normales de trabajo y de forma continua sin implementar filtros en ningún punto del sistema medido para verificar el comportamiento de cada uno de los parámetros para su posterior análisis.

Los datos obtenidos en el analizador de energía serán utilizados para calcular los valores de  $THD_i$ , FP, DFP, S1, Q1, D, Qc que permitirá analizar los posible problemas que generan los armónicos.

Los datos de corrientes armónicas de primer, tercer, quinto, séptimo, noveno y onceavo armónico se encuentran graficadas en histogramas en los Anexos 5 al 10 cual y seleccionado los puntos críticos para la línea uno.

**Datos Obtenidos:** “PowerPad® Modelo 3945” Analizador de Calidad de Potencia Trifásica.

**Fecha:** 29/06/2011

**Horario:** 17:30

**Tabla: 3.1**  
**Valores de corrientes armónicas**  
**VALOR DE CORRIENTES ARMÓNICAS**

Nombre	Primer o fundamental (1 <sup>ra</sup> )	Tercera (3 <sup>ra</sup> )	Quinta (5 <sup>ta</sup> )	Séptima (7 <sup>ma</sup> )	Novena (9 <sup>na</sup> )	Onceava (11 <sup>va</sup> )
<b>Frecuencia (Hz)</b>	60	180	300	420	540	600
<b>L1</b>	11.3000	6.4297	5.9777	2.8250	0.5537	0.6893
<b>L2</b>	10.1000	9.8071	5.6863	2.3836	0.4141	0.7878
<b>L3</b>	8.2000	5.3300	3.7556	1.5334	0.2542	0.6150

**Fuente:** Investigación de campo

**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

El analizador de energía nos permite obtener valores hasta la 50 armónica pero a partir de 11 armónica los valores son despreciables, por tal motivo, no se considera para el cálculo en este capítulo. Pero toca considerar que si los valores de las corrientes armónicas son elevadas se deben considerar ya esto implicaría un análisis incorrecto en cálculos futuros.

**Tabla: 3.2**  
**Valores de potencia y factor de potencia**

<b>VALORE DE CORRIENTES RMS, THDi, POTENCIAS, FP Y DFP</b>							
Línea	I <sub>rms</sub> (A)	THDi %	P ( W )	Q ( VAR )	S <sub>T</sub> ( VA )	FP	DFP
<b>L1</b>	14.80	82.70	1299.5923	1333.5535	1862.1111	0.6970	0.900
<b>L2</b>	15.50	115.50	1274.7744	1497.5011	1966.7173	0.6470	0.979
<b>L3</b>	12.40	82.50	1040.7438	1185.8774	1577.9131	0.6590	0.988

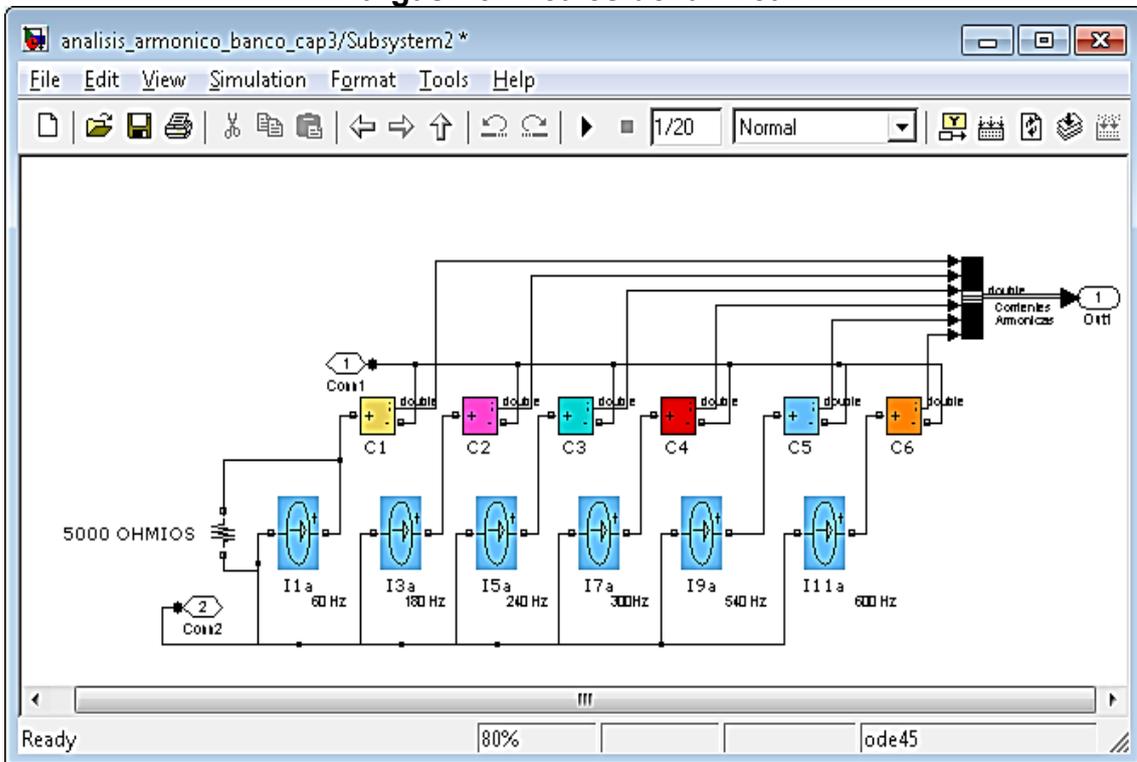
**Fuente:** Investigación de campo

**Elaborado:** Roberto Ortega / 2011

### 3.2. Cálculo de la línea 1

Se calculará de la línea 1 la Distorsión Armónica Total de Corriente (THDi), el Factor de Potencias de Distorsión ( $f_{dis}$ ), El Factor de Potencia (FP), Potencia Aparente ( $S_1$ ), Potencia Reactiva ( $Q_1$ ), Potencia de Distorsión (D) y Potencia Total. Los datos obtenidos se compararán con datos obtenidos con analizador para su respectiva interpretación.

**Figura: 3.1**  
**Cargas no lineales de la línea 1**



**Fuente:** Investigación de campo

**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

En la figura 3.1 se puede observar las cargas no lineales de la línea 1 del sistema en simulink mediante fuentes de corrientes que nos permitirá obtener la onda distorsionada de corriente resultante.

### 3.2.1. Cálculo de la distorsión armónica total $THD_i$

Bajo la norma Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE 519-1992 para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia tenemos que la distorsión armónica total de corriente es.

El  $THD_i$  es un parámetro que nos indica la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental y su ecuación (16.0) se describe en el capítulo II:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n\ RMS}^2}}{I_1} \quad (16.0)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_{2\ RMS}^2 + I_{3\ RMS}^2 + I_{4\ RMS}^2 + \dots}}{I_1}$$

Remplazando los valores de corrientes armónicas obtenemos:

$$THD_i = \frac{\sqrt{(6.4297)^2 + (5.9777)^2 + (2.8250)^2 + (0.5537)^2 + (0.6893)^2}}{11.30}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{(41.3410 + 35.7329 + 7.9806 + 0.3066 + 0.4751)}}{11.30}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{85.8362}}{11.30}$$

$$THD_i = \frac{9.2648}{11.30}$$

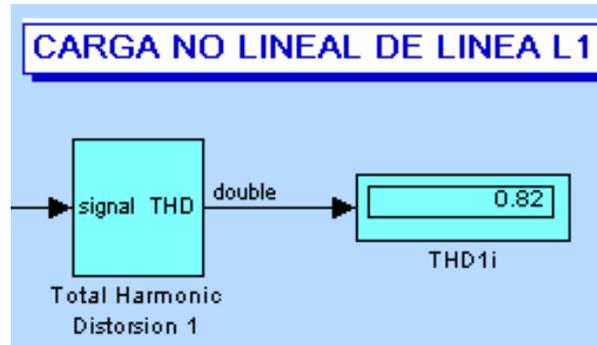
$$THD_i = 0.8199$$

$$THD_i = 0.8199 \times 100\%$$

$$THD_i = 81.99\%$$

El dato obtenido del cálculo de  $THD_{1i}$  son aproximadamente igual a la información obtenida el programa de Simulink como se puede observar el la figura 3.2.

**Figura: 3.2**  
**Distorsión Armónica Total de Corriente de la línea 1**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

### 3.2.2. Calculo del factor de distorsión $f_{dist}$

Mediante el  $THD_i$  procedemos a calcular nuestro factor de distorsión. La deducción de la ecuación (34.0) se explico en el capítulo II:

$$f_{dist} = \frac{1}{1+(THD_i)^2} \quad (34.0)$$

$$f_{dist} = \frac{1}{1 + (0.8199)^2}$$

$$f_{dist} = \frac{1}{1 + 0.6722}$$

$$f_{dist} = \frac{1}{1.2932}$$

$$f_{dist} = \mathbf{0.7733}$$

### 3.2.3. Calculo de factor de potencia FP

Al multiplicar el factor de distorsión por factor desplazamiento obtenemos el factor de potencia de la línea 1. La deducción de la ecuación (30.2) se explico en el capítulo II:

$$FP = f_{dist} \cdot f_{desp} \quad (30.2)$$

$$FP = 0.7733 \times 0.90$$

$$\mathbf{FP = 0.696}$$

### 3.2.4. Calculo de potencia aparente $S_1$

De la ecuación (22.0), del capítulo II, del factor de desplazamiento despejamos la potencia activa para calcular su valor:

$$f_{desp} = \frac{P}{S_1} \quad (22.0)$$

Despejando obtenemos;

$$S_1 = \frac{P}{f_{desp}}$$

$$S_1 = \frac{1299.5923}{0.9}$$

$$\mathbf{S_1 = 1443.9914 VA}$$

### 3.2.5. Calculo de potencia reactiva $Q_1$ (VAR)

De la ecuación (24.0), del capítulo II, de la potencia aparente despejamos la potencia reactiva para calcular su valor:

$$S_1^2 = P^2 + Q_1^2 \quad (24.0)$$

Despejando obtenemos;

$$Q_1^2 = S_1^2 - P^2$$

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2}$$

$$Q_1 = \sqrt{1443.9914^2 - 1299.5923^2}$$

$$Q_1 = 629.4212 \text{ VAR}$$

### 3.2.6. Cálculo de potencia de distorsión (VA)

De la ecuación (26.0), del capítulo II, de la potencia aparente total despejamos la potencia de distorsión para calcular su valor:

$$S^2 = S_1^2 + D^2 \quad (26.0)$$

Despejando obtenemos;

$$D^2 = S^2 - S_1^2$$

$$D = \sqrt{S^2 - S_1^2}$$

$$D = \sqrt{1862.1111^2 - 1443.9914^2}$$

$$D = 1175.7324 \text{ VA}$$

### 3.2.7. Cálculo de potencia aparente total ST

De la ecuación (27.1), del capítulo II, calculamos el valor de potencia aparente total del sistema:

$$S_T = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (27.1)$$

$$S_T = \sqrt{(1299.5923)^2 + (629.4212)^2 + (1175.7324)^2}$$

$$S_T = \sqrt{3467457.87}$$

$$S_T = 1862.1111 \text{ VA}$$

### 3.2.8. Cálculo de potencia reactiva para compensar el factor de potencia FP

Con el dato del factor de potencia total FP de 0.696 del sistema y la potencia activa de 1299.5923 W calculamos la potencia reactiva necesaria para llegar a un factor de potencia de 0.95.

$$Q_c(VAR) = P(W) \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$Q_c(VAR) = 1299.5923 \text{ W} \cdot (\tan(45.89) - \tan(18.19))$$

$$Q_c(VAR) = 1299.5293 \text{ W} \cdot (1.032 - 0.329)$$

$$Q_c = 913.56 \text{ VAR}$$

$$Q_c = \mathbf{0.91 \text{ KVAR}}$$

Ya que la carga analizada es baja el valor de potencia reactiva de compensación es bajo pero para cargas altas el valor de potencia reactiva se incrementa significativamente.

### 3.2.9. Cálculo de la potencia reactiva para compensar el factor de potencia desplazamiento DFP

Con el dato del factor de desplazamiento de 0.90 del sistema y la potencia activa de 1299.5923 W calculamos la potencia reactiva necesaria para llegar a un factor de potencia de 0.95.

$$Q_c(VAR) = P(W) \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$Q_c(VAR) = 1299.5923 \text{ W} \cdot (\tan(25.84) - \tan(18.19))$$

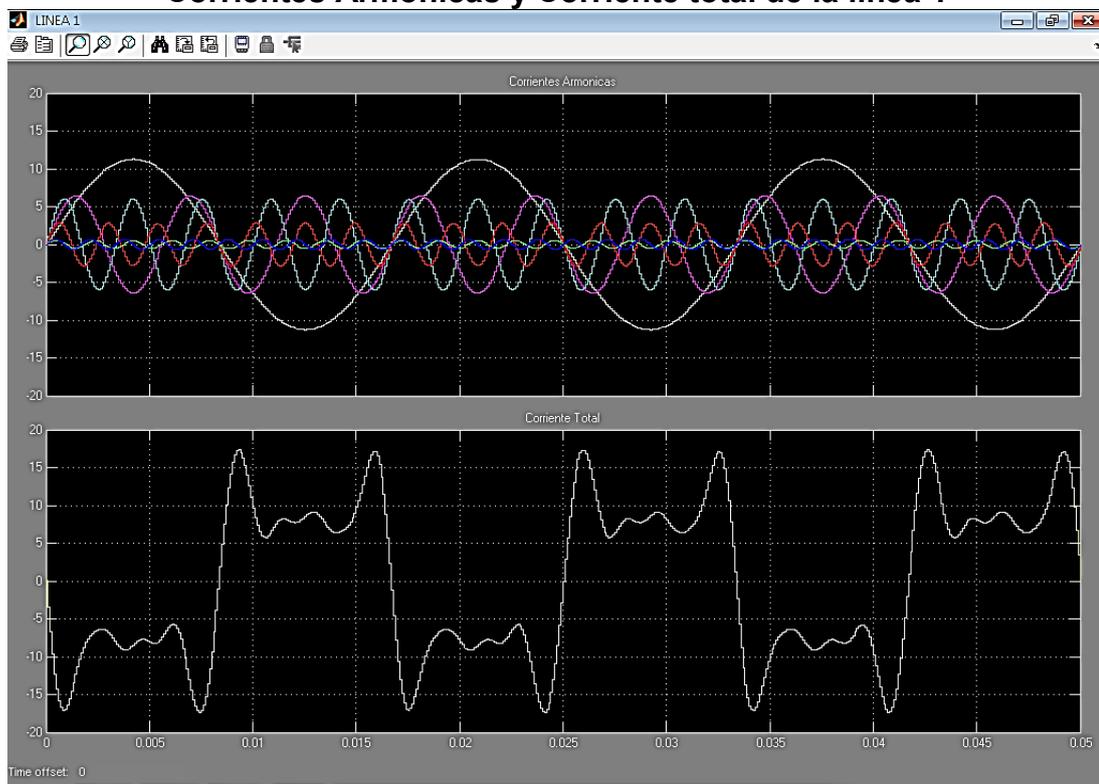
$$Q_c(VAR) = 1299.5293 \text{ W} \cdot (0.484 - 0.329)$$

$$Q_c = 201.427 \text{ VAR}$$

$$Q_c = \mathbf{0.20 \text{ KVAR}}$$

Comparando el valor de potencia reactiva de compensación sin armónicos 0.20 KVAR con la potencia reactiva de compensación con armónicos 0.91 KVAR observamos que su valor disminuye significativamente sin presencia de armónicos y por eso se debe tomar en cuenta el tipo de cargas que se tiene en el sistema que se va a compensar ya si no tómanos la información correcta no vamos a compensar nuestro sistema al valor deseado.

**Figura: 3.3**  
**Corrientes Armónicas y Corriente total de la línea 1**



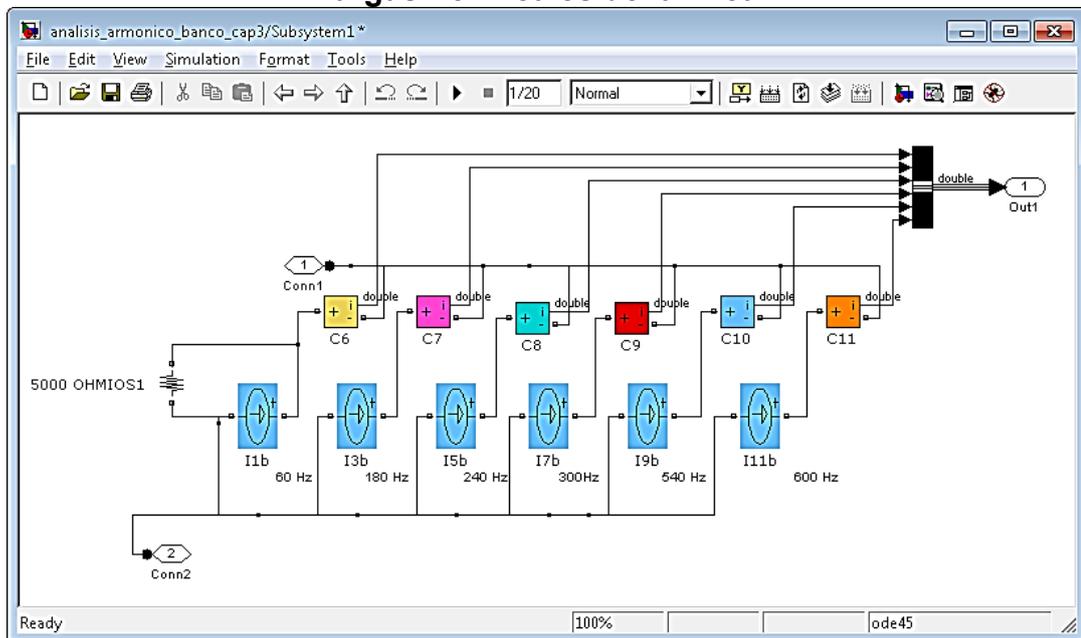
**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

En la figura 3.3 podemos observar las curvas de las corrientes armónicas de primer, tercer, quinto, séptimo, noveno, onceavo orden y la curva de la corriente total es decir de curva distorsionada la cual presenta valores pico aproximado de 18A considerando que la corriente de la fundamental es 11.30A podemos ver que el valor se incrementa por las corrientes armónicas del de la línea 1.

### 3.3. Cálculo de la línea 2

Se calculará de la línea 2 la Distorsión Armónica Total de Corriente (THDi), el Factor de Potencias de Distorsión (fdi), El Factor de Potencia (FP), Potencia Aparente ( $S_1$ ), Potencia Reactiva ( $Q_1$ ), Potencia de Distorsión (D) y Potencia Total. Los datos obtenidos se compararán con datos obtenidos con analizador para su respectiva interpretación.

**Figura: 3.4**  
**Cargas no lineales de la línea 1**



**Fuente:** Investigación de campo

**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

En la figura 3.4 se puede observar las cargas no lineales de la línea 2 del sistema en simulink mediante fuentes de corrientes que nos permitirá obtener la onda distorsionada de corriente resultante.

### 3.3.1. Cálculo de la distorsión armónica total THDi

Bajo la norma Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE 519-1992 para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia tenemos que la distorsión armónica total de corriente es.

El THDi es un parámetro que nos indica la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental:

$$THD_i = \frac{\sqrt{(I_3)^2 + (I_5)^2 + (I_7)^2 + (I_9)^2 + (I_{11})^2}}{I_1}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{(9.8071)^2 + (5.6863)^2 + (2.3836)^2 + (0.4141)^2 + (0.7878)^2}}{10.10}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{(96.1792 + 32.3340 + 5.6815 + 0.1715 + 0.6206)}}{10.10}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{134.9868}}{10.10}$$

$$THD_i = \frac{11.6184}{10.10}$$

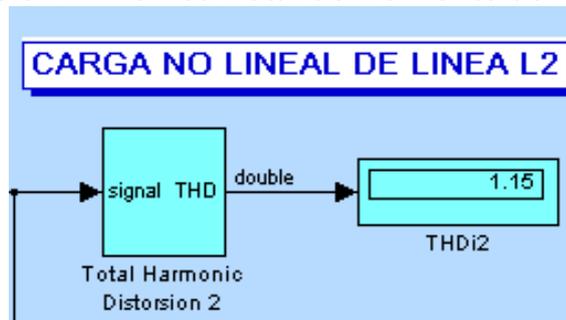
$$THD_i = 1.1503$$

$$THD_i = 1.1503 \times 100\%$$

$$THD_i = 115.03\%$$

El dato obtenido del cálculo de THDi son aproximadamente igual a la información obtenida el programa de Simulink como se puede observar el la figura 3.5.

**Figura: 3.5**  
**Distorsión Armónica Total de Corriente de la línea 2**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

### 3.3.2. Calculo del factor de desplazamiento $f_{dist}$

Mediante el  $THD_i$  procedemos a calcular nuestro factor de distorsión:

$$f_{dist} = \frac{1}{1 + (THDi)^2}$$

$$f_{dist} = \frac{1}{1 + (1.1503)^2}$$

$$f_{dist} = \frac{1}{1 + 1.3232}$$

$$f_{dist} = \frac{1}{1.5242}$$

$$f_{dist} = \mathbf{0.6561}$$

### 3.3.3. Calculo de factor de potencia FP

Al multiplicar el factor de distorsión por factor desplazamiento obtenemos el factor de potencia de la línea 2.

$$FP = f_{dist} \cdot f_{desp}$$

$$FP = 0.6561 \times 0.9790$$

$$FP = 0.6423$$

### 3.3.4. Calculo de potencia aparente S1

De la ecuación del factor de desplazamiento despejamos la potencia activa para calcular su valor:

$$f_{desp} = \frac{P}{S_1}$$

Despejando obtenemos:

$$S_1 = \frac{P}{f_{desp}}$$

$$S_1 = \frac{1274.7744}{0.979}$$

$$S_1 = 1302.1189 \text{ VA}$$

### 3.3.5. Calculo de potencia reactiva Q1 (VA)

De la ecuación de la potencia aparente uno despejamos la potencia reactiva uno para calcular su valor:

$$S_1^2 = P^2 + Q_1^2$$

Despejando obtenemos;

$$Q_1^2 = S_1^2 - P^2$$

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2}$$

$$Q_1 = \sqrt{1302.1189^2 - 1274.7744^2}$$

$$Q_1 = 265.4503 \text{ VAR}$$

### 3.3.6. Cálculo de potencia de distorsión (VA)

De la ecuación de la potencia aparente total despejamos la potencia de distorsión para calcular su valor:

$$S^S = S_1^2 + D^2 \quad (24.0)$$

Despejando obtenemos;

$$D^2 = S^2 - S_1^2$$

$$D = \sqrt{S^2 - S_1^2}$$

$$D = \sqrt{1966.7173^2 - 1302.1189^2}$$

$$D = 1473.9279 \text{ VA}$$

### 3.3.7. Cálculo de potencia aparente total S

De la ecuación calculamos el valor de potencia aparente total del sistema:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2}$$

$$S = \sqrt{(1274.7744)^2 + (265.4503)^2 + (1473.9279)^2}$$

$$S = \sqrt{3867977.087}$$

$$S = 1966.7173 \text{ VA}$$

### 3.3.8. Cálculo de potencia reactiva para compensar el factor de potencia FP

Con el dato del factor de potencia total FP de 0.6423 del sistema y la potencia activa de 1274.7744 W calculamos la potencia reactiva necesaria para llegar a un factor de potencia de 0.95.

$$Q_c(VAR) = P(W) \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$Q_c(VAR) = 1274.7744 W \cdot (\tan(50.04) - \tan(18.19))$$

$$Q_c(VAR) = 1274.7744 W \cdot (1.193 - 0.329)$$

$$Q_c = 1101.4051 VAR$$

$$\mathbf{Q_c = 1.10 KVAR}$$

Ya que la carga analizada es baja el valor de potencia reactiva de compensación es bajo pero para cargas altas el valor de potencia reactiva se incrementa significativamente.

### 3.3.9. Cálculo de la potencia reactiva para compensar el factor de potencia desplazamiento DFP

Con el dato del factor de desplazamiento de 0.979 del sistema y la potencia activa de 1274.7744 W calculamos la potencia reactiva necesaria para llegar a un factor de potencia de 0.95.

$$Q_c(VAR) = P(W) \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$Q_c(VAR) = 1274.7744 W \cdot (\tan(11.76) - \tan(18.19))$$

$$Q_c(VAR) = 1274.7744 W \cdot (0.208 - 0.329)$$

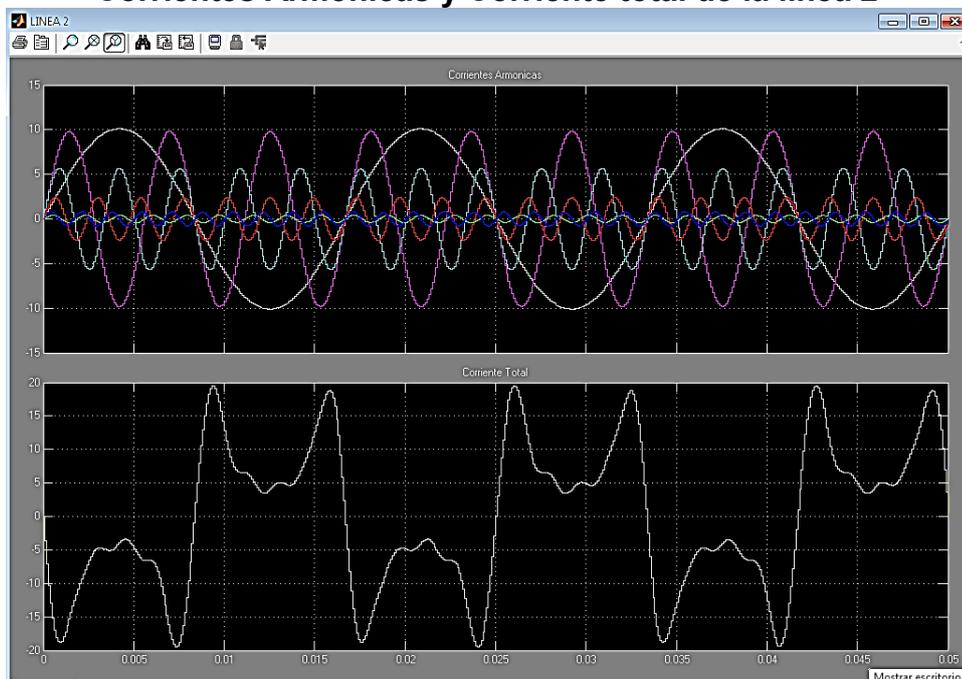
$$Q_c = -154.2477 VAR$$

$$\mathbf{Q_c = -0.15 KVAR}$$

Comparando el valor de potencia reactiva de compensación sin armónicos -0.15 KVAR con la potencia reactiva de compensación con armónicos 1.10 KVAR observamos no se requiere carga capacitiva para compensar en la línea dos sin armónicos ya el factor de potencia desplazamiento es mayor el factor de potencia deseado y por consiguiente obtenemos un  $Q_c$  negativo pero se debe tomar en cuenta el tipo de cargas que se tiene en el sistema que se va a compensar ya que cuando hay presencia de armónicos el  $Q_c$  de compensación aumenta significativamente como caso de línea dos.

En la Figura 3.6 podemos observar las curvas de las corrientes armónicas de primer, tercer, quinto, séptimo, noveno, onceavo orden y la curva de la corriente total es decir de curva distorsionada la cual presenta valores pico aproximado de 20A considerando que la corriente de la fundamental es 10.10 A podemos ver que el valor se incrementa por las corrientes armónicas de la línea dos.

**Figura: 3.6**  
**Corrientes Armónicas y Corriente total de la línea 2**

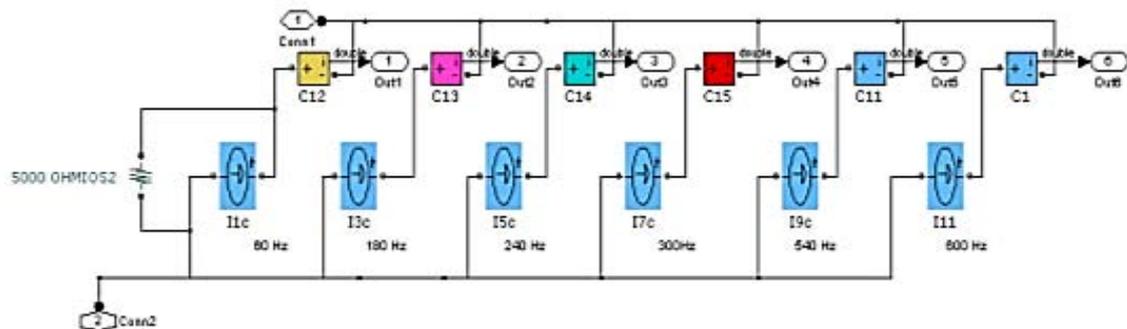


**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

### 3.4. Cálculo de la línea 3

Se calculará de la línea 3 la Distorsión Armónica Total de Corriente (THDi), el Factor de Potencias de Distorsión (fd<sub>is</sub>), El Factor de Potencia (FP), Potencia Aparente ( $S_1$ ), Potencia Reactiva ( $Q_1$ ), Potencia de Distorsión (D) y Potencia Total. Los datos obtenidos se compararán con datos obtenidos con analizador para su respectiva interpretación.

**Figura: 3.7**  
**Cargas no lineales de la línea 3**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado:** Roberto Ortega / 2011

En la figura 3.7 se puede observar las cargas no lineales de la línea 3 del sistema en simulink mediante fuentes de corrientes que nos permitirá obtener la onda distorsionada de corriente resultante.

#### 3.4.1. Cálculo de la distorsión armónica total THDi

Bajo la norma Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE 519-1992 para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia tenemos que la distorsión armónica total de corriente es.

El  $THD_i$  es un parámetro que nos indica la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2}}{I_1}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{5.3300^2 + (3.7556)^2 + (1.5334)^2 + (0.2542)^2 + (0.6150)^2}}{10.10}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{(28.4089 + 14.1045 + 2.3513 + 0.0646 + 0.3782)}}{10.10}$$

$$THD_i = \frac{45.3075}{8.20}$$

$$THD_i = \frac{6.7311}{8.20}$$

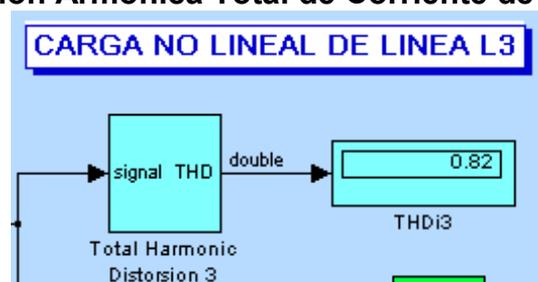
$$THD_i = 0.8209$$

$$THD_i = 0.8209 \times 100\%$$

$$THD_i = 82.09 \%$$

El dato obtenido del cálculo de  $THD_{1i}$  son aproximadamente igual a la información obtenida el programa de Simulink como se puede observar el la figura 3.8.

**Figura: 3.8**  
**Distorsión Armónica Total de Corriente de la línea 2**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2011

### 3.4.2. Cálculo del factor de desplazamiento $f_{dist}$

Mediante el  $THD_i$  procedemos a calcular nuestro factor de distorsión:

$$f_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THDi)^2}}$$

$$f_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.8209)^2}}$$

$$f_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.6739}}$$

$$f_{dist} = \frac{1}{1.2938}$$

$$f_{dist} = \mathbf{0.7729}$$

### 3.4.3. Calculo de factor de potencia FP

Al multiplicar el factor de distorsión por factor desplazamiento obtenemos el factor de potencia de la línea 3.

$$FP = f_{dist} \cdot f_{desp}$$

$$FP = 0.7729 \times 0.988$$

$$FP = \mathbf{0.7636}$$

### 3.4.4. Calculo de potencia aparente S1

De la ecuación del factor de desplazamiento despejamos la potencia activa para calcular su valor:

$$f_{desp} = \frac{P}{S_1}$$

Despejando obtenemos;

$$S_1 = \frac{P}{f_{desp}}$$

$$S_1 = \frac{1040.7438}{0.988}$$

$$S_1 = 1053.3844 \text{ VA}$$

### 3.4.5. Calculo de potencia reactiva Q1 (VAR)

De la ecuación de la potencia aparente despejamos la potencia reactiva para calcular su valor:

$$S_1^2 = P^2 + Q_1^2$$

Despejando obtenemos;

$$Q_1^2 = S_1^2 - P^2$$

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2}$$

$$Q_1 = \sqrt{1053.3844^2 - 1040.7438^2}$$

$$Q_1 = 162.6992 \text{ VAR}$$

### 3.4.6. Calculo de potencia de distorsión (VA)

De la ecuación de la potencia aparente total despejamos la potencia de distorsión para calcular su valor:

$$S_T^2 = S_1^2 + D^2$$

Despejando obtenemos;

$$D^2 = S_T^2 - S_1^2$$

$$D = \sqrt{S_T^2 - S_1^2}$$

$$D = \sqrt{1577.9031^2 - 1053.3844^2}$$

$$D = 1174.8019 VA$$

### 3.4.7. Cálculo de potencia aparente total S

De la ecuación calculamos el valor de potencia aparente total del sistema:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2}$$

$$S = \sqrt{(1040.7438)^2 + (162.6992)^2 + (1174.8019)^2}$$

$$S = \sqrt{2489778.191}$$

$$S = 1577.9031 VA$$

### 3.4.8. Cálculo de potencia reactiva para compensar el factor de potencia FP

Con el dato del factor de potencia total FP de 0.7636 del sistema y la potencia activa de 1040.7438W calculamos la potencia reactiva necesaria para llegar a un factor de potencia de 0.95.

$$Q_c(VAR) = P(W). (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$Q_c(VAR) = 1040.7438W. (\tan(40.22) - \tan(18.19))$$

$$Q_c(VAR) = 1040.7438 W \times (0.8457 - 0.329)$$

$$Q_c = 555.3201 VAR$$

$$Q_c = 0.56 KVAR$$

Ya que la carga analizada es baja el valor de potencia reactiva de compensación es bajo pero para cargas altas el valor de potencia reactiva se incrementa significativamente.

### 3.4.9. Cálculo de la potencia reactiva para compensar el factor de potencia desplazamiento DFP

Con el dato del factor de desplazamiento de 0.988 del sistema y la potencia activa de 1274.7744 W calculamos la potencia reactiva necesaria para llegar a un factor de potencia de 0.95.

$$Q_c(VAR) = P(W) \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$Q_c(VAR) = 1040.7438 \text{ W} \cdot (\tan(8.885) - \tan(18.19))$$

$$Q_c(VAR) = 1040.7438 \text{ W} \cdot (0.156 - 0.329)$$

$$Q_c = -26.7707 \text{ VAR}$$

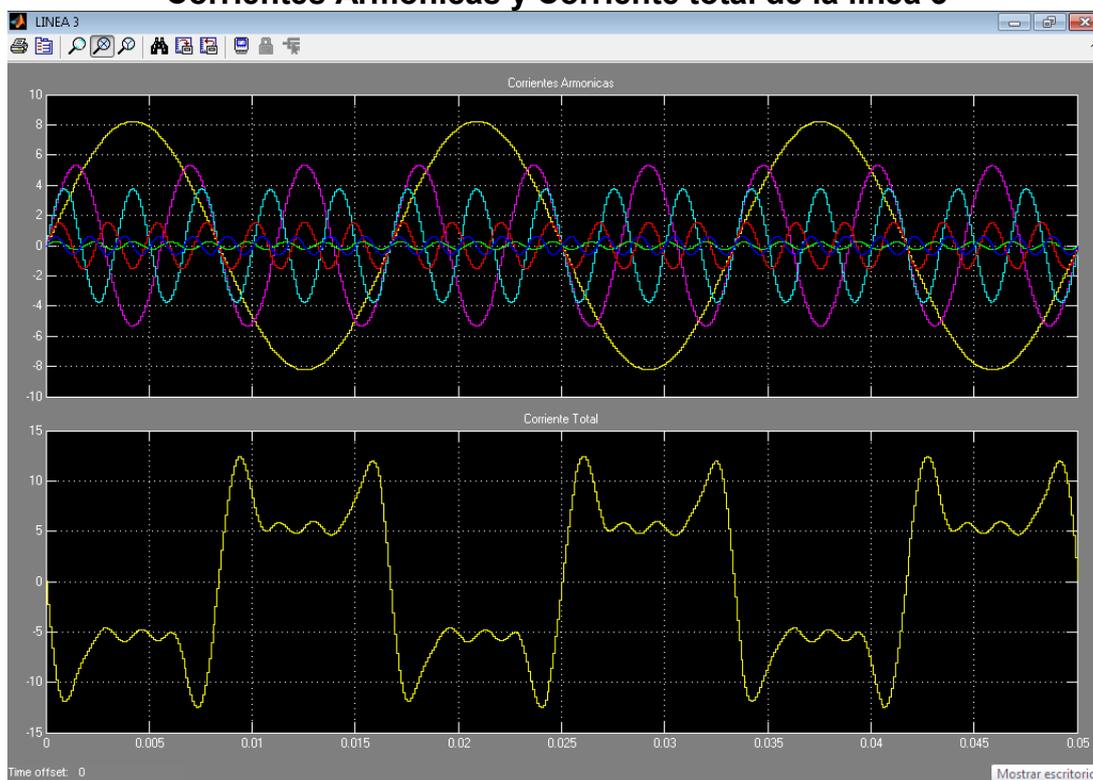
$$Q_c = -0.03 \text{ KVAR}$$

Comparando el valor de potencia reactiva de compensación sin armónicos -0.03 KVAR con la potencia reactiva de compensación con armónicos 0.56 KVAR observamos no se requiere carga capacitiva para compensar en la línea tres sin armónicos ya el factor de potencia desplazamiento es mayor el factor de potencia deseado y por consiguiente obtenemos un  $Q_c$  negativo pero se debe tomar en cuenta el tipo de cargas que se tiene en el sistema que se va a compensar ya que cuando hay presencia de armónicos el  $Q_c$  de compensación aumenta significativamente como caso de línea tres.

En la figura 3.9 podemos observar las curvas de las corrientes armónicas de primer, tercer, quinto, séptimo, noveno, onceavo orden y la curva de la corriente total es decir de curva distorsionada la cual presenta valores pico aproximado de 13A considerando que la corriente de la fundamental es 8.20A

podemos ver que el valor se incrementa por las corrientes armónicas de la línea tres.

**Figura: 3.9**  
**Corrientes Armónicas y Corriente total de la línea 3**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

### 3.5. Resumen de calculados realizados

En la tabla 3.3 y 3.4 se encuentra el resumen de los cálculos realizados en este capítulo para realizar un análisis más generalizados de las tres líneas se calcula la suma total y el promedio de cada una de las variables analizadas.

**Tabla: 3.3**  
**Resultados de simulación**

Líneas	THDi	$f_{dist}$	$f_{desp}$	FP	D (VA)	Q1 (VAR)	S1 (VA)
L1	0.8199	0.7733	0.9000	0.6960	1175.7324	629.4212	1443.9914
L2	1.1503	0.6561	0.9790	0.6423	1473.9279	265.4503	1302.1189
L3	0.8209	0.7729	0.9880	0.7636	1174.8019	162.6962	1053.3844
<b>Suma</b>	2.7911	2.2023	2.8670	2.1019	3824.4622	1057.5677	3799.4947
<b>Promedio</b>	0.9304	0.7341	0.9557	0.7006	1274.8207	352.5226	1266.4982

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Roberto Ortega / 2012

Podemos observar un FP promedio de 0.7006 en la tabla 3.3 que está por debajo de factor de potencia deseado para lo cual se requeriría realizar compensación reactiva de 2570.2852 VAR como indica en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4**  
**Resumen de los valores de la simulación**

Líneas	$S_T$ (VA)	Qc (VAR) (con armónicos)	Qc (VAR) (sin armónicos)
L1	1862.1111	913.5600	201.427
L2	1966.7173	1101.4051	-154.2477
L3	1577.9031	555.3201	-26.7707
<b>Suma</b>	5406.7315	2570.2852	20.4086
<b>Promedio</b>	1802.2438	856.7617	6.8029

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Roberto Ortega / 2012

Existe un THDi promedio de 0.9304 en la tabla 3.3 con respecto a las tres líneas que en porcentajes es 93.04 % y representa una alta distorsión en la onda de corriente total con respecto a la fundamenta.

También podemos observar la tabla 3.4 valores de potencia de distorsión son altas con respecto a la potencia activa de las tres líneas esto nos indica que se está consumiendo más energía para realizar el mismo trabajo.

**Tabla: 3.5**  
**Resumen de las formulas y unidades**

Descripción	Formula	Observaciones
<b>Distorsión Armónica Total de Corriente</b>	$THD_i = \frac{\sqrt{(I_3)^2 + (I_5)^2 + (I_7)^2 + (I_9)^2 + (I_{11})^2 \dots (I_n)^2}}{I_1}$	Por unidad
<b>Factor de Potencia de Distorsión</b>	$f_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_i)^2}}$	Por unidad
<b>Factor de Potencia Desplazamiento</b>	$f_{desp} = \frac{P}{S_1}$	Por unidad
<b>Factor de Potencia</b>	$FP = f_{dist} \cdot f_{desp}$	Por unidad
<b>Potencia Aparente</b>	$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2}$	En VA
<b>Potencia Aparente total</b>	$S_T = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2}$ $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ $S = I_{RMS} \cdot V_{RMS}$	En VA
<b>Potencia Reactiva</b>	$Q_1 = \sqrt{Q^2 - D^2}$	En VAR
<b>Potencia Reactiva Total</b>	$Q = \sqrt{Q_1^2 + D^2}$	En VAR
<b>Potencia de Distorsión</b>	$D = \sqrt{S_T^2 - S_1^2}$	En VA
<b>Potencia Reactiva de Compensación</b>	$Q_C(VAR) = P(W) \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$	En VAR

Fuente: Investigación de campo

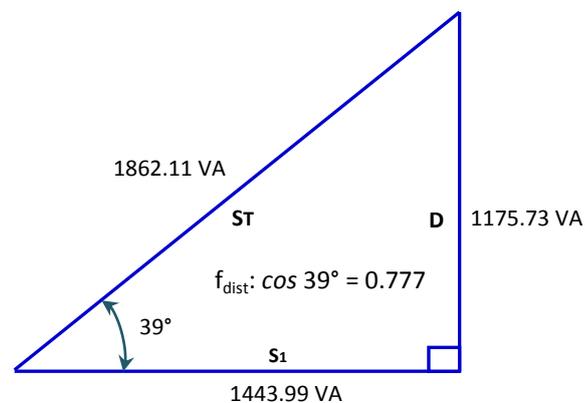
Elaborado por: Roberto Ortega / 2012

### 3.5.1. Análisis Analítico

Otro análisis aparte del cálculo se debe realizar es de forma analítica mediante los triángulos de potencia para lo cual procederemos con los datos obtenidos de la línea 1 para realizar las gráficas:

En la figura 3.10 tenemos el triángulo de potencias aparentes y de distorsión la cual nos permite calcular muestra factor de potencia de distorsión  $f_{dist}$  como resultado tenemos 0.777 comparando el factor de distorsión cálculo de 0.7733 de la tabla 3.3 la diferencia es mínima y por lo cual podemos considerar que mediante el análisis de triángulos de potencias vamos a obtener datos aproximados y reales para nuestro análisis.

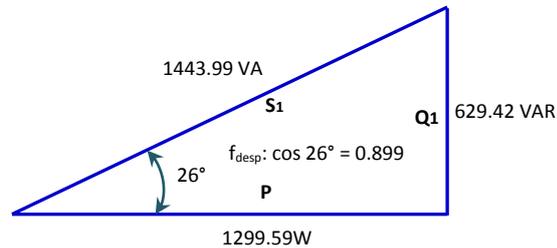
**Figura: 3.10**  
**Triangulo de Potencias Aparentes y Distorsión Armónica**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 3.11 tenemos el triángulo de potencias fundamentales la cual nos permite calcular muestra factor de potencia de desplazamiento  $f_{desp}$  como resultado tenemos 0.899 comparando el factor de desplazamiento cálculo de 0.90 de la tabla 3.3 la diferencia es mínima y por lo cual podemos considerar que mediante el análisis de triángulos de potencias vamos a obtener datos aproximados y reales para nuestro análisis. Con los datos obtenidos podemos certificar que sin presencia de armónicos el factor de potencia es elevado.

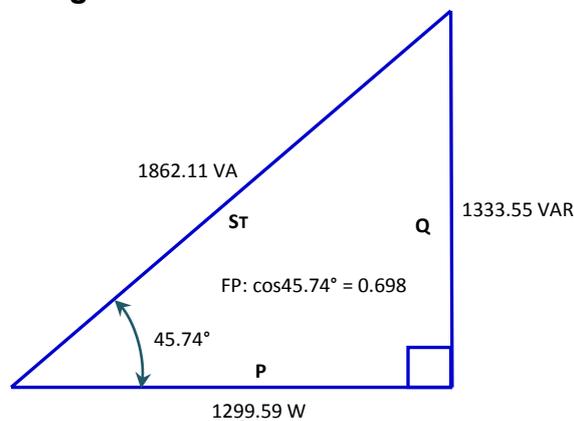
**Figura: 3.11**  
**Triangulo de Potencias Fundamentales**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 3.12 tenemos el triángulo de potencias totales la cual nos permite calcular muestra factor de potencia de potencia FP como resultado tenemos 0.695 comparando el factor de desplazamiento cálculo de 0.6960 de la tabla 3.3 la diferencia es mínima. Con los datos obtenidos podemos certificar que el factor de potencia resultante es bajo por la presencia de una elevada potencia de distorsión causada por las corrientes armónicas.

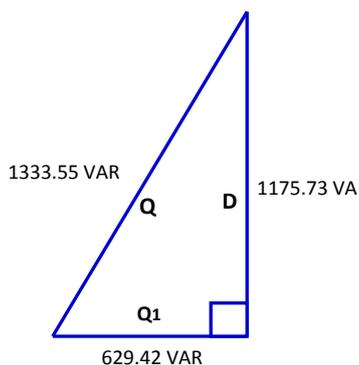
**Figura: 3.12**  
**Triangulo de Potencias Totales**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 3.13 tenemos el triángulo de potencias fluctuantes la cual nos permite calcular muestra obtener muestra potencia de distorsión.

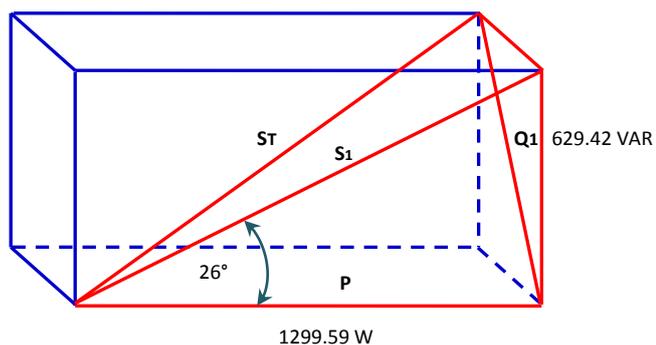
**Figura: 3.13**  
**Triangulo de Potencias Fluctuantes**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 3.14 tenemos el tetraedro de potencia de la línea 1 la cual es el resultado de todas las potencias antes calculadas y se puede observar el valor de  $f_{\text{desp}}$ ,  $Q_1$  y  $P$  potencia activa de la cual podemos observar que al eliminar la potencia de distorsión  $D$  el tetraedro desaparece y solo que el triangulo de potencia fundamentales.

**Figura: 3.14**  
**Tetraedro de potencias de la línea 1**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

## CAPÍTULO IV

### RESONANCIA EN PARALELO CON ARMÓNICOS

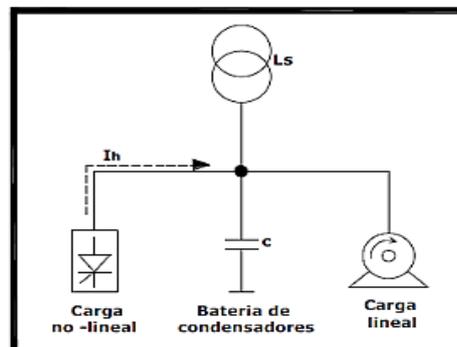
#### 4.1. Resonancia

La utilización de dispositivos tanto capacitivos como inductivos en sistemas de distribución provoca el fenómeno de la resonancia, teniendo como resultado valores extremadamente altos o bajos de impedancia. Estas variaciones en la impedancia modifican la corriente y la tensión en el sistema de distribución. Aquí únicamente se discutirán los fenómenos de resonancia-paralelo, que son los más frecuentes.

Se considera en la figura 4.1 de abajo, donde se muestra una instalación constituida por:

1. Un transformador que suministra potencia,
2. Cargas lineales,
3. Cargas no-lineales generadoras de corrientes armónicas,
4. Condensadores de compensación.

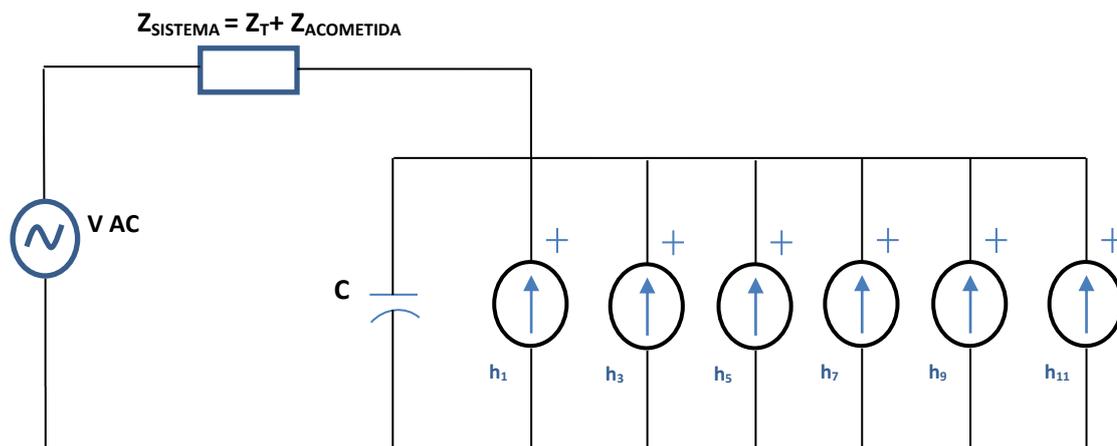
**Figura: 4.1**  
**Diagrama Unifilar de Potencia**



**Fuente:** Diseño e implementación de filtros en áreas estratégicas para la atenuación de armónicos en las TIC'S y laboratorios de la ESPE-L.

**Elaborado por:** Cristian Ramiro Paredes León y Jonathan Paúl Jiménez Gonzales/2011  
 Para propósitos de análisis armónico, el diagrama equivalente se muestra sistema de estudio es el siguiente:

**Figura: 4.2**  
**Diagrama unifilar de fuentes de corrientes**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

#### 4.1.1. Calculo de la Impedancia interna del transformador

Esta impedancia se calcula a partir de la tensión de cortocircuito  $u_{cc}$  expresada en %<sup>18</sup>:

$$Z_T = U_{CC} \cdot \frac{U^2}{S_n} \quad (62.0)$$

Siendo:

U = tensión de línea, en vacío, del transformador.

S<sub>n</sub> = potencia aparente del transformador.

<sup>18</sup>Cuaderno Técnico Schneider n° 158 / p. 18

$U_{cc}$  = tensión que debemos aplicar al primario del transformador para que el secundario sea recorrido por la intensidad nominal  $I_n$ , estando los bornes del secundario BT en cortocircuito.

Para los transformadores de distribución MT/BT, las normas armonizadas (HD 428.1S1) fijan los valores de  $u_{cc}$  (tabla 4.1).

Es importante destacar que la precisión de estos valores influye directamente en el cálculo de la  $I_{cc}$ , puesto que un error de % sobre  $u_{cc}$  induce a un error del mismo orden (%) sobre  $Z_T$ .

**Tabla: 4.1**  
**Tensión de cortocircuito  $u_{cc}$  normalizada para transformadores MT/BT de distribución pública**

Potencia del transformador MT/BT (en kVA)	≤ 630	800	1000	1250	1600	2000
Tensión de cortocircuito $u_{cc}$ (en %)	4	4,5	5	5,5	6	7

**Fuente:** Cuaderno técnico nº 158 calculo de corrientes de cortocircuito

**Elaborado por:** Schneider Electric (B. de Metz-Noblat, F. Dumas, G. Thomasset) / 2001

#### 4.1.2. Impedancia interna del secundario del transformador

$$Z_T = U_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} \quad (62.0)$$

$$Z_T = \frac{4 \times 218V^2}{100 \times 100000VA}$$

$$Z_T = 0.0190096 \Omega$$

#### 4.1.3. Reactancia interna del secundario del transformador

$$X_T = 0.98 \times Z_T$$

$$X_T = 0.98 \times 0.0190096 \Omega$$

$$X_T = 0.018629408 \Omega$$

#### 4.1.4. Resistencia interna del secundario del transformador

$$R_T = 0.2 \times X_T$$

$$R_T = 0.2 \times 0.018629408 \Omega$$

$$R_T = \mathbf{0.003725881 \Omega}$$

#### 4.1.5. Impedancia base del transformador

$$Z_{BASE} = \frac{V_n^2}{P_n}$$

$$Z_{BASE} = \frac{(218V)^2}{100000VA}$$

$$Z_{BASE} = \mathbf{0.47524 \Omega}$$

#### 4.1.6. Impedancia por unidad del transformador

$$Z_{pu} = \frac{Z_T}{Z_{BASE}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0.0190096 \Omega}{0.47524 \Omega}$$

$$Z_{pu} = 0.04$$

$$Z_{pu} = \mathbf{4.0 \%}$$

#### 4.1.7. Resistencia por unidad del transformador

$$R_{pu} = \frac{R_T}{R_{BASE}}$$

$$R_{pu} = \frac{0.003725881 \Omega}{0.47524 \Omega}$$

$$R_{pu} = \mathbf{0.00784}$$

$$R_{pu} = \mathbf{0.784 \%}$$

#### 4.1.8. Reactancia por unidad del transformador

$$X_{pu} = \frac{X_T}{X_{BASE}}$$

$$X_{pu} = \frac{0.018629408}{0.47524}$$

$$X_{pu} = \mathbf{0.0392}$$

$$X_{pu} = \mathbf{3.92\%}$$

#### 4.1.9. Inductancia base del transformador

$$L_{BASE} = \frac{X_{BASE}}{2\pi f_n}$$

$$L_{BASE} = \frac{0.47524 \Omega}{2\pi 60 \text{ Hz}}$$

$$L_{BASE} = \mathbf{0.001260613 \text{ Henrios}}$$

#### 4.1.10. Inductancia del transformador

$$L_T = \frac{X_T}{2\pi f_n}$$

$$L_T = \frac{0.018629408 \Omega}{2\pi 60 \text{ Hz}}$$

$$L_T = \mathbf{4.94160395e^{-5} \text{ Henrios}}$$

#### 4.1.11. Inductancia por unidad del transformador

$$L_{pu} = \frac{L_T}{L_{BASE}}$$

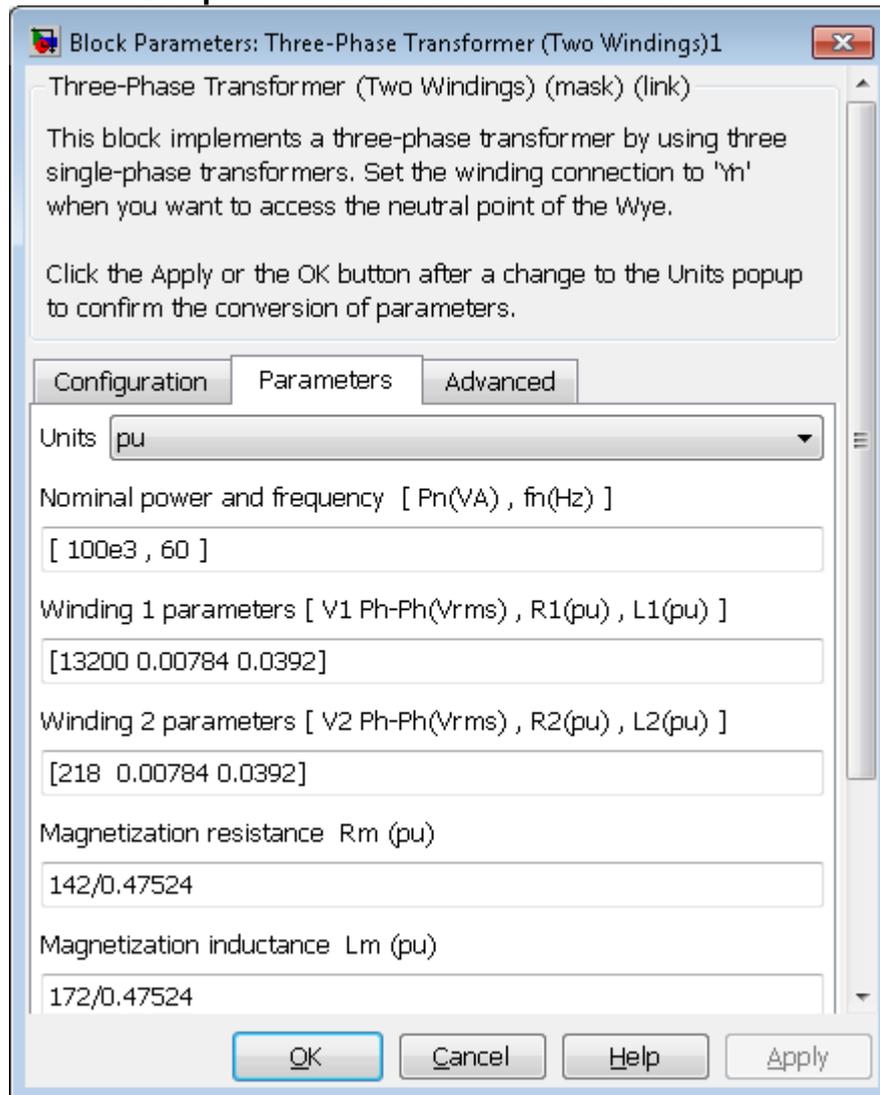
$$L_{pu} = \frac{4.94160395e^{-5} \text{ Henrios}}{0.003725881 \text{ Henrios}}$$

$$L_{pu} = 0.039922573$$

$$L_{pu} = 3.99\%$$

Los valores de resistencia e inductancia del transformador son ingresados en el bloque de parámetros de simulink que se puede observar en la figura 4.3.

**Figura: 4.3**  
**Bloque de Parámetros del transformador**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la tabla 4.2 se encuentra el resumen de los parámetros del transformador:

**Tabla: 4.2**  
**Resumen del cálculo de valores por unidad del transformador**

DESCRIPCION	FORMULA	RESULTADO
Impedancia interna del secundario del transformador.	$Z_T = U_{CC} \cdot \frac{U^2}{S_n}$	$Z_T = 0.0190096$
Reactancia interna del secundario del transformador.	$X_T = 0.98 \times Z_T$	$X_T = 0.018629408$
Resistencia interna del secundario del transformador.	$R_T = 0.2 \times X_T$	$R_T = 0.003725881 \Omega$
Impedancia base del transformador.	$Z_{BASE} = \frac{V_n^2}{P_n}$	$Z_{BASE} = 0.47524 \Omega$
Impedancia por unidad del transformador.	$Z_{pu} = \frac{Z_T}{Z_{BASE}}$	$Z_{pu} = 0.04$
Resistencia por unidad del transformador.	$R_{pu} = \frac{R_T}{R_{BASE}}$	$R_{pu} = 0.00784$
Reactancia por unidad del transformador.	$X_{pu} = \frac{X_T}{X_{BASE}}$	$X_{pu} = 0.0392$
Inductancia base del transformador.	$L_{BASE} = \frac{X_{BASE}}{2\pi f_n}$	$L_{BASE} = 0.001260613 \text{ Henrios}$
Inductancia del transformador.	$L_T = \frac{X_T}{2\pi f_n}$	$L_T = 4.94160395e^{-5} \text{ Henrios}$
Inductancia por unidad del transformador;	$L_{pu} = \frac{L_T}{L_{BASE}}$	$L_{pu} = 0.039922573$
Valores bases	$Z_{BASE} = X_{BASE} = R_{BASE} = \frac{V_n^2}{P_n}$	

Fuente: Investigación de campo  
Elaborado por: Roberto Ortega / 2012

#### 4.2. Cálculo de la corriente de transformador

Considerando que el sistema analizado se tiene un transformador de 100 KVA trifásico la corriente se calcula de la siguiente forma:

$$S = \sqrt{3}xV_LxI_L$$

Despejando obtenemos

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3}xV_L}$$

$$I_L = \frac{100000VA}{\sqrt{3}x218V}$$

$$I_L = \mathbf{264.84 A}$$

Con la corriente del transformador procedemos a seleccionar la sección del conductor para lo cual utilizaremos la tabla de Capacidad Máxima de Corriente (A) Superflex que se encuentra en el anexo 2 bajo las condiciones de Ducto Enterrado (TEM. 20°C) Triplexado seleccionando el conductor 4/0 AWG que nos da una corriente de 280 A no se considero la corriente 247 A del conductor 3/0 AWG ya por debajo de la corriente del transformador.

#### 4.3. Cálculo de Impedancia de la Acometidas

Una vez seleccionada la sección del conductor nos dirigimos a la tabla que se encuentra en el anexo 3 la cual bajo las mismas condiciones que se selecciono el conductor se obtendrá la Reactancia Inductiva de  $X_L = 0.081\Omega / \text{Km}$  y la Resistencia de  $R = 0.172\Omega / \text{Km}$  del conductor.

Primero convertimos los  $\Omega/\text{Km}$  en  $\Omega/\text{m}$ .

$$R = 0.172\Omega / \text{Km} = 172 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$$

$$X_L = 0.081\Omega / \text{Km} = 8.1 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

$$Z_L = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z_L = \sqrt{(0.000172)^2 + (0.000081)^2}$$

$$Z_L = 190.12 \times 10^{-6} \Omega/m$$

Considerando que exista una longitud total de conductor eléctrico de 180 m obtendríamos una impedancia total de la acometida de:

$$Z_L = 190.12 \times 10^{-6} \frac{\Omega}{m} * 180m$$

$$Z_L = 0.034 \Omega$$

#### 4.3.1. Calculo de la impedancia por unidad del Acometida principal

Considerando que  $Z_{BASE} = 0.47524 \Omega$  y  $Z_{ACOMETIDA} = 0.034 \Omega$  podemos aplicar la siguiente fórmula:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{ACOMETIDA}}{Z_{BASE}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0.034 \Omega}{0.47524 \Omega}$$

$$Z_{pu} = \mathbf{0.072}$$

$$Z_{pu} = 7.2 \%$$

#### 4.3.2. Calculo de Inductancia de la Acometida

$$X_L = 2. \pi. f. L$$

Despejando obtenemos:

$$L = \frac{X_L}{2. \pi. f}$$

$$L = \frac{8.1 \times 10^{-5} \Omega \cdot m}{2\pi \times 60 \text{ Hz}}$$

$$L = 2.149 \times 10^{-7} \frac{\text{Henrios}}{m}$$

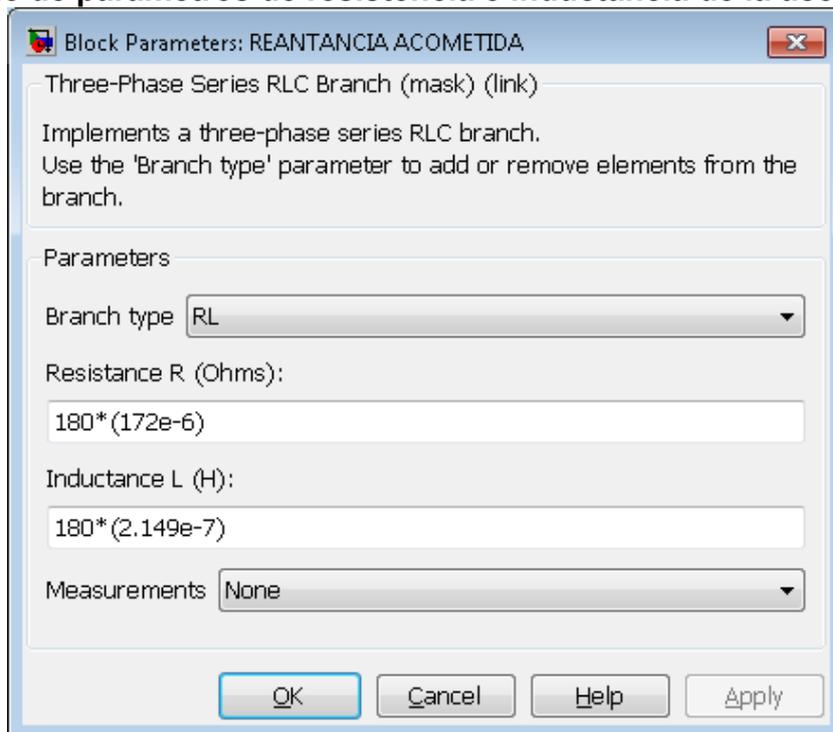
Considerando que exista una longitud total de conductor eléctrico de 180 m obtendríamos una inductancia de la acometida de:

$$L = 2.149 \times 10^{-7} \frac{\text{Henrios}}{m} \times 180 m$$

$$L = 180 \times (2.149 \times 10^{-7} \text{ Henrios})$$

$$L = 3.8682 \times 10^{-5} \text{ Henrios}$$

**Figura: 4.4**  
**Bloque de parámetros de resistencia e inductancia de la acometida**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

#### 4.4. Cálculo de la impedancia total del sistema

Para obtener el valor total de  $Z_{pu}$  del sistema es necesario sumar todas las impedancias que se encuentre en el sistema tomando primero si esta en serio o paralelo en nuestro caso las dos impedancia se encuentran en serie.

$$Z_{SISTEMA\ pu} = Z_{Tpu} + Z_{ACOMETIDA\ pu}$$

$$Z_{SISTEMA\ pu} = 0.04 + 0.072$$

$$Z_{SISTEMA\ pu} = 0.112$$

Multiplicando por 100 obtenemos una impedancia de:

$$Z_{SISTEMA\ pu} = 11.20 \%$$

Con esta impedancia calcularemos la frecuencia de resonancia del sistema

#### 4.5. Cálculo de potencia de cortocircuito

Considerando que el sistema que se está estudiando contiene un transformador trifásico de distribución de 100KVA y con una impedancia del sistema de 11.20% obtenemos como potencia de cortocircuito en KVA:

$$MVA_{CC} = \frac{100MVA_T}{Z\%}$$

$$MVA_{CC} = \frac{100 \times 100\ KVA}{11.20}$$

$$MVA_{CC} = \frac{10000\ KVA}{11.20}$$

$$MVA_{CC} = \mathbf{892.857\ KVA}$$

#### 4.6. Cálculo número de armónico

Para el cálculo de orden de armónico utilizaremos la potencia de cortocircuito y la potencia del banco de corrección de factor de potencia. Para nuestro análisis asumiremos un banco de corrección de 25 KVA.

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_{CAP}}}$$

$$h_r = \sqrt{\frac{892.857 \text{ KVA}}{25 \text{ KVA}}}$$

$$h_r = 5.98$$

El orden armónico está próximo al 7 armónico.

#### 4.7. Cálculo de frecuencia de resonancia

Para el cálculo de resonancia utilizaremos la potencia de cortocircuito, potencia de Banco de Corrección de Factor de Potencia y la frecuencia fundamental del sistema. Para el análisis asumiremos un banco de corrección de 25 KVAR.

$$f_{res} = f_0 \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_{CAP}}}$$

$$f_{res} = 60 \text{ Hz} \times \sqrt{\frac{892.857 \text{ KVA}}{25 \text{ KVAR}}}$$

$$f_{res} = 358.57 \text{ Hz}$$

Al utilizar 25 KVAR obtenemos una frecuencia de resonancia de 358.57 Hz que está próximo a los 300 Hz que es 5 armónico y 420 Hz que es 7 armónico. En

este caso solo existiría el peligro de corrientes elevadas si el sistema cambia su impedancia para que coincida con cualquier de las dos armónicas próximas.

En la tabla 4.3 está el resumen del cálculo de la impedancia de acometida.

**Tabla: 4.3**  
**Resumen de cálculo de Resonancia en paralelo**

DESCRIPCION	FORMULA	RESPUESTA
Calculo de la corriente de transformador	$S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$	$I_L = 264.84 \text{ A}$
Calculo de Impedancia de la Acometidas	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$Z = 190.12 \times 10^{-6} \Omega/m$
Calculo de la impedancia por unidad del Acometida principal:	$Z_{pu} = \frac{Z_{ACOMETIDA}}{Z_{BASE}}$	$Z_{pu} = 0.072$
Calculo de Inductancia de la Acometida	$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$	$L = 2.149 \times 10^{-7} \frac{\text{Henrios}}{m}$
Calculo de la impedancia total del sistema:	$Z_{\text{SISTEMA pu}} = Z_{\text{Tpu}} + Z_{\text{ACOMETIDA pu}}$	$Z_{\text{SISTEMA pu}} = 0.112$
Cálculo de potencia de cortocircuito	$MVA_{CC} = \frac{100 MVA_T}{Z\%}$	$MVA_{CC} = 892.857 \text{ KVA}$
Calculo número de Armónico	$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_{CAP}}}$	$h_r = 5.98$
Calculo de Frecuencia de Resonancia:	$f_{res} = f_0 \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_{CAP}}}$	$f_{res} = 358.57 \text{ Hz}$

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Roberto Ortega / 2012

Los valores de la tabla 4.3 que tenga unidad de longitud tendrán que multiplicarse por la distancia del conductor para determinar su valor total.

## 4.8. Cálculo de límites de distorsión

### 4.8.1. Corriente de cortocircuito:

Para calcular la corriente de cortocircuito debemos sumar las impedancias de nuestro sistema para obtener valores reales.

$$Z \text{ (Impedancia de la acometida)} = 0.034 \Omega$$

$$Z_T \text{ (Impedancia del transformador)} = 0.0190096 \Omega$$

$$I_{cc\ 3\phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3} \times (Z_T + Z)}$$

$$I_{cc\ 3\phi} = \frac{218V}{\sqrt{3} \times (0.0190096 \Omega + 0.034 \Omega)}$$

$$I_{cc\ 3\phi} = 2374.331417 A$$

$$I_{cc\ 3\phi} = 2.4 KA$$

### 4.8.2. Promedio de corrientes de fundamentales

$$I_L = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$$

$$I_L = \frac{11.30 A + 10.10 A + 8.20 A}{3}$$

$$I_L = 9.87 A$$

### 4.8.3. Relación I<sub>cc</sub> / I<sub>L</sub> es igual

$$\frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{2374.331417 A}{9.87 A}$$

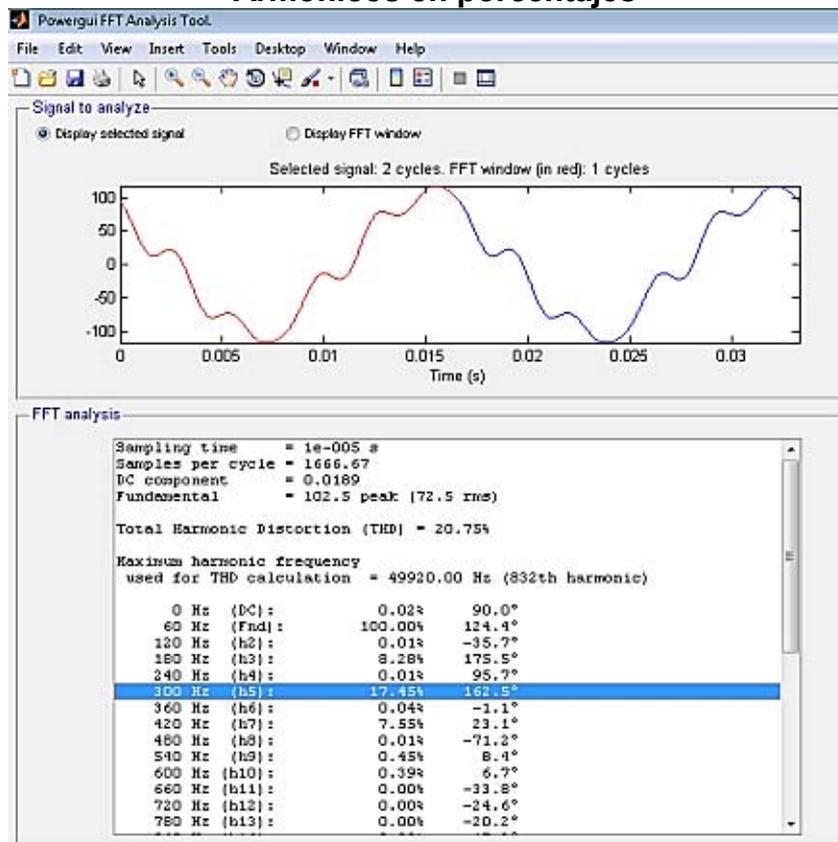
$$\frac{I_{cc}}{I_L} = 240.56$$

El valor de relación  $I_{cc} / I_L$  es de 240.56 que se encuentra dentro del rango 100 -1000 bajo la norma IEEE 519-1992 la cual nos la siguiente información:

- TDD: 15%
- $h < 11$ : 12%
- $11 \leq h < 17$ : 5.5%
- $17 \leq h < 23$ : 5%
- $23 \leq h < 35$ : 2%
- $h \geq 35$ : 1%

Mediante Simulink podemos obtener la información de cada THDi por cada armónico de nuestro sistema

**Figura: 4.5**  
**Armónicos en porcentajes**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

De la figura 4.5 obtenemos la siguiente información:

- Tercer armónico 8.26%
- Quinto armónico 17.45%
- Séptimo armónico 7.55%

Podemos observar que el quinto armónico tiene un 17.45% y se encuentra fuera de lo establecido por la norma IEEE 519-1992, la cual, establece que los armónicos menores al onceava armónica no debe superar el 12% esto quiere decir que es indispensable la aplicación de filtros en la fuente generadora de armónicos para que filtre el quinto y como precaución el tercero y séptimo que presentan valores próximos al valor máximo permitido por la norma.

El noveno y onceava armónica presentan valor muy bajos que no superan el 1% por lo cual podemos establecer que los valores generados por estas armónicas son absorbidas por el sistema.

#### 4.9. Cálculo de Factor de calidad Q

El factor Q o factor de calidad se calcula tomando como referencia la frecuencia de resonancia calculada en este capítulo y las frecuencias que estén próximas y que puedan amplificar el efecto de resonancia.

##### Datos:

$f_0$  (frecuencia de resonancia o central): 358.57 Hz

$f_1$  (frecuencia de corte): 300 Hz

$f_2$  (frecuencia de corte): 420 Hz

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} (61.1)$$

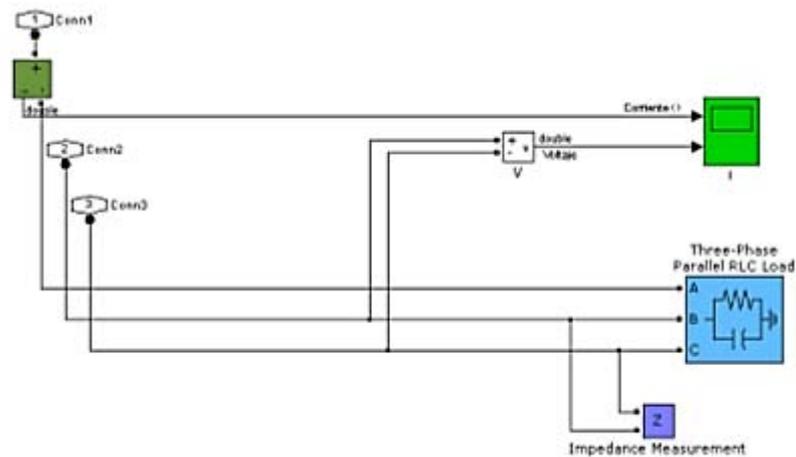
$$Q = \frac{358.57 \text{ Hz}}{420 \text{ Hz} - 300 \text{ Hz}}$$

$$Q = 3$$

#### 4.10. Análisis de la simulación

El figura 4.6 podemos observar nuestro banco de compensación sin filtros.

**Figura: 4.6**  
**Banco de condensadores en Simulink**

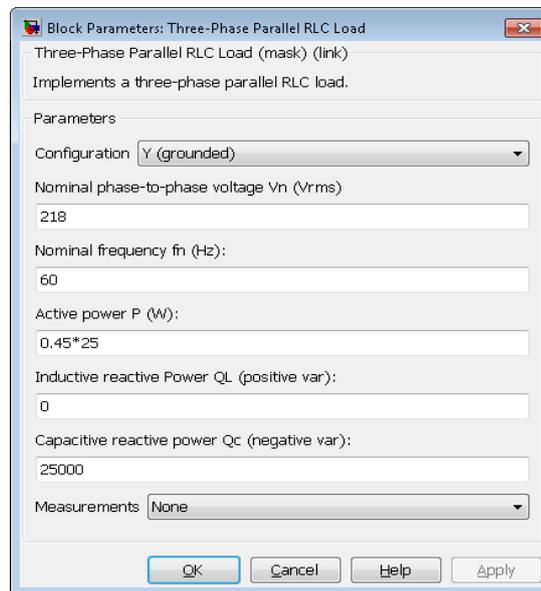


**Fuente:** Investigación de campo

**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 4.7 se encuentra el bloque de parámetros (three - Phase / Parallel RCL Load) en la cual se ingresa los datos de valores de VAR, voltaje y frecuencia necesarios para realizar la compensación reactiva en la Simulación. Considerando que en nuestro sistema la potencia reactiva para la compensación es muy baja para nuestro análisis se tomara un valor 25 KVAR para ver los efecto de resonancia en paralelo.

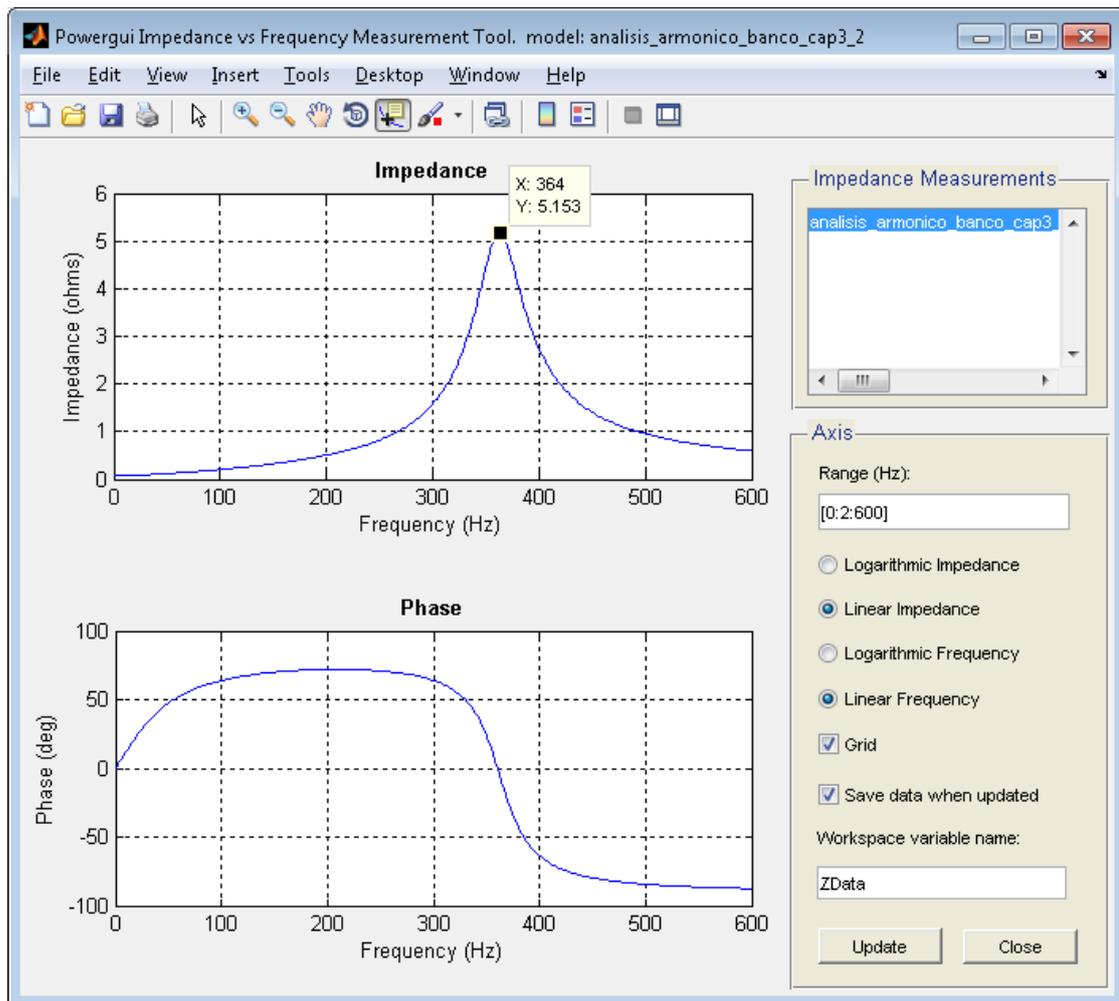
**Figura: 4.7**  
**Bloque de parámetros (three - Fase / Parallel RCL Load)**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 4.8 obtenemos la curva de resonancia que actúa a una frecuencia de 364 Hz de la cual existe un margen de error con respecto a lo calculado de 1.5% ya muestra de frecuencia de resonancia calculada es de 358.57 Hz pero a pesar de la diferencia de valor el margen de error aceptable para nuestro estudio.

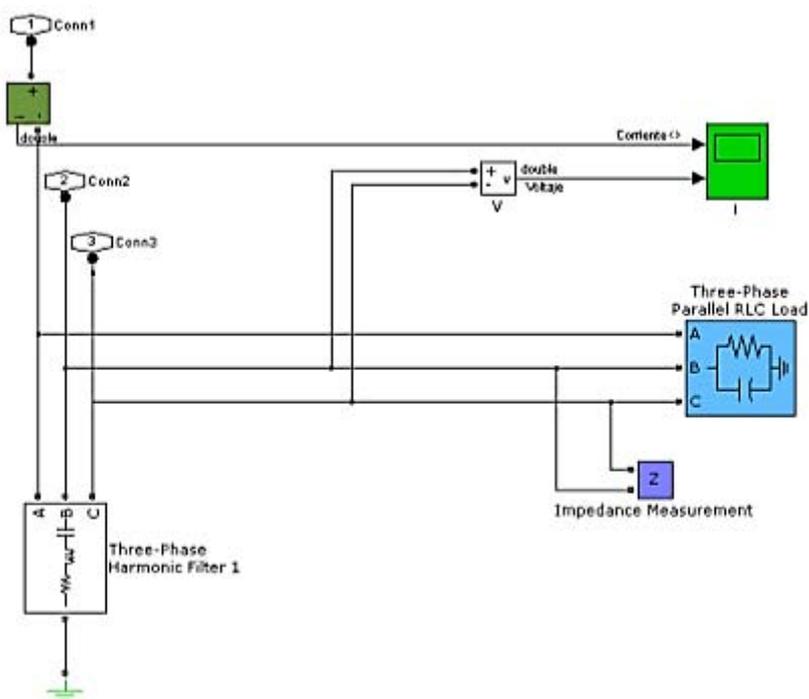
**Figura: 4.8**  
**Bloque Powergui Impedance vs Frequency Measurement Tool**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 4.9 tenemos banco de condensadores con un filtro en paralelo para reducir o mitigar los armónicos y el efecto de resonancia que contiene nuestro sistema tiene.

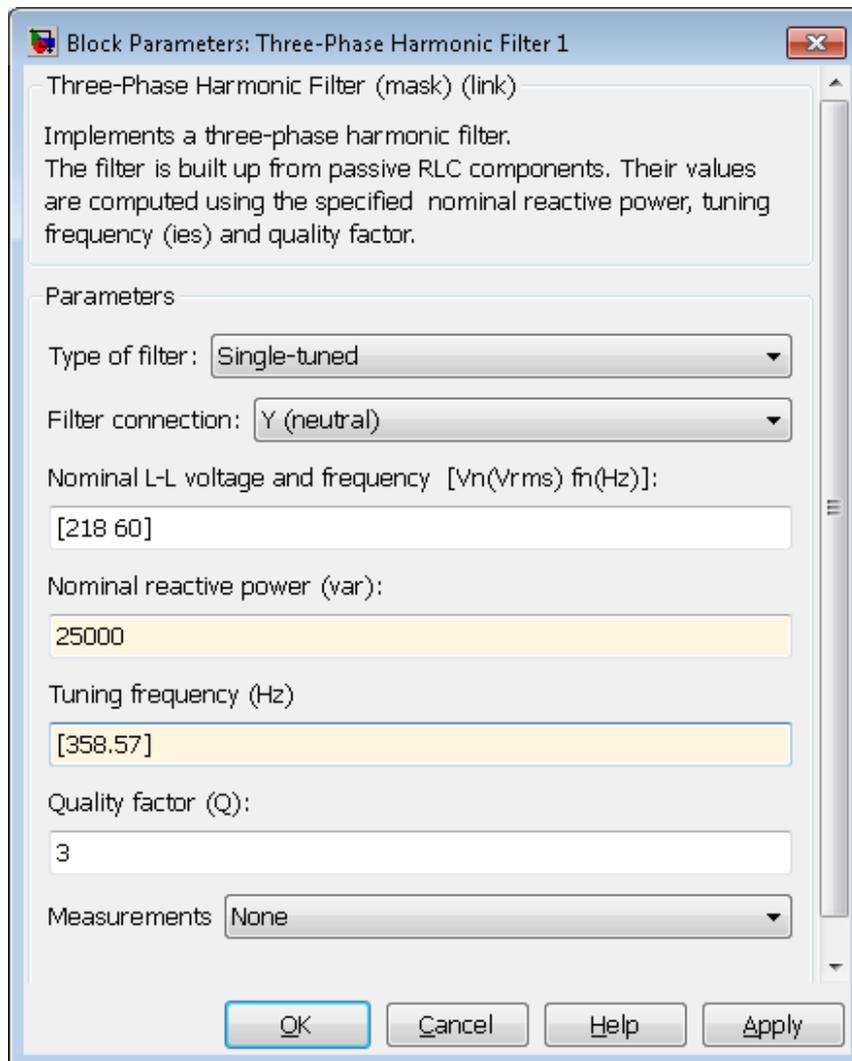
**Figura: 4.9**  
**Banco de condensadores con filtro en paralelo (Simulink)**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 4.10 está el bloque de parámetros del filtro en este se ingresa la frecuencia calculada 358.57 Hz, VAR y voltaje de esta forma sintonizamos el filtro.

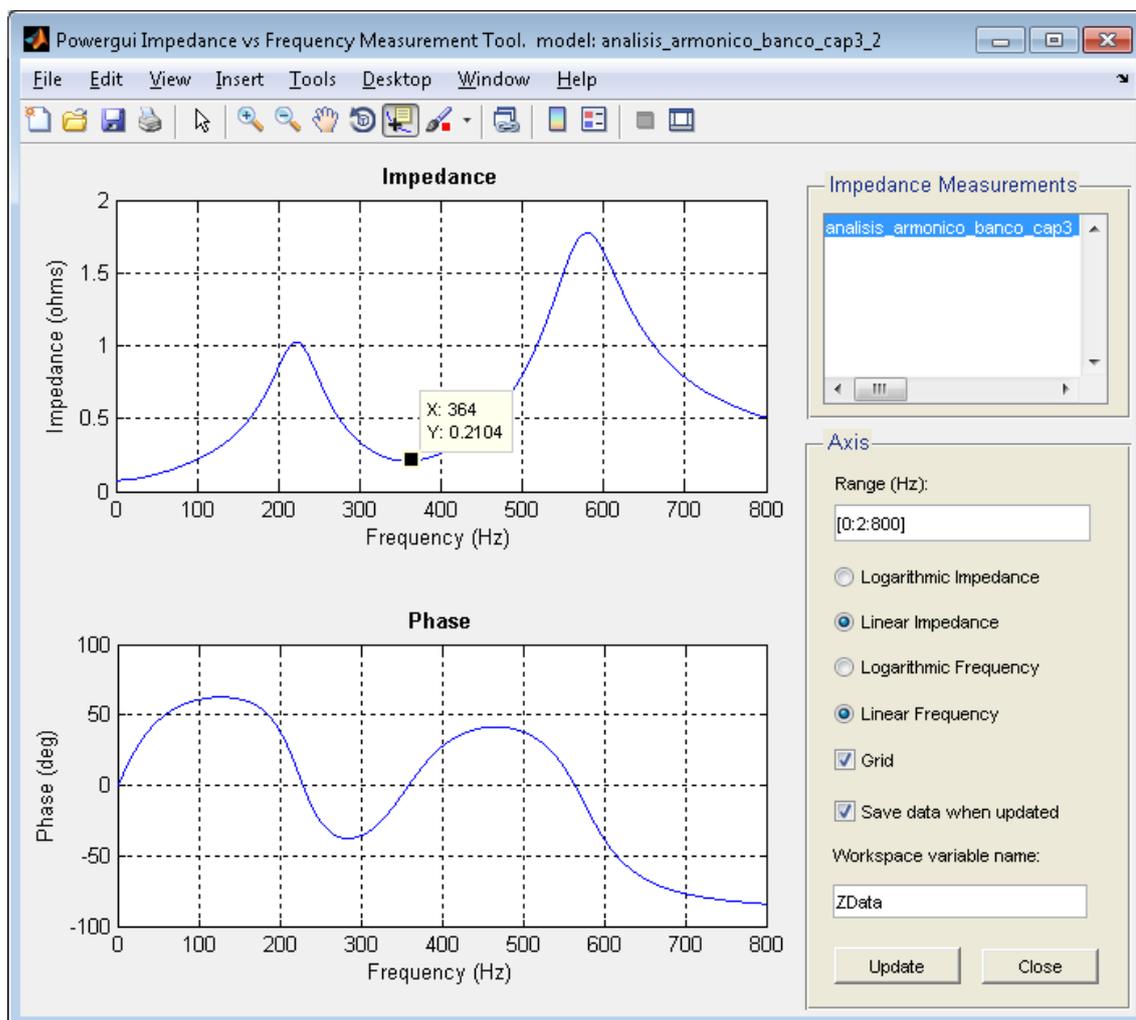
**Figura: 4.10**  
**Bloque de parámetros Three - Phase Harminic Filter 1**



**Fuente:** Investigación de campo  
**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

En la figura 4.11 se observa que la curva de resonancia es atenuada ya que se ingresó un filtro en paralelo con respecto a la compensación reactiva del sistema pero también se generan otras curvas de resonancia de menor valor para evitar esto se puede ingresar otros filtros o cambiar el valor del factor de calidad Q para ampliar o reducir el ancho de banda.

**Figura: 4.11**  
**Curva de resonancia atenuada por el filtro en paralelo**



**Fuente:** Investigación de campo

**Elaborado por:** Roberto Ortega / 2012

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

1. La presencia de bancos de capacitores en una instalación no genera armónicos. Por otro lado, al mismo tiempo los capacitores son los elementos más sensibles a los armónicos porque presenta una baja impedancia a frecuencias elevadas y absorbe las intensidades armónicas más fácilmente que otras cargas reduciendo considerablemente su vida útil.
2. Podemos observar que en el sistema cuando calculamos el factor de potencia sin armónicos coincide matemáticamente con coseno  $\phi$  pero en un sistema con armónicos el valor difiere y se genera un factor de distorsión por los armónicos que hace reducir FP.
3. La presencia de armónicos en el sistema generó una potencia de distorsión elevada con respecto a la potencia aparente, elevando su valor, esto conlleva a consumir más energía para realizar el mismo trabajo.
4. El factor de calidad  $Q$  es 3 y la frecuencia de corte que filtra el 5 hasta el séptimo armónico y sintonizado a la frecuencia de resonancia calculada de esta forma protegemos de posibles resonancias con esta ancho de banda.
5. Demos considerar que el efecto de resonancia se puede producir en cualquier momento porqué la carga capacitiva ingresa de acuerdo a la carga que se consume para mantener un factor de potencia estable. Pero también consideremos que si no existe el armónico a la frecuencia de resonancia no

existirá el peligro de corrientes o voltajes elevados que puedan destruir los capacitores o las protecciones.

6. La metodología de cálculo aplicado para la obtención del FP, THD<sub>i</sub>, D y resonancia en paralelo para un sistema eléctrico con armónicos nos permitirá analizar los datos que el analizador de energía y Matlab nos proporciona.

7. La distorsión armónica en la red de corriente alterna puede ocasionar inconvenientes tales como:

- Exceso de corriente en capacitores y bancos de capacitores, con el consiguiente acortamiento de su vida útil. Actuación indebida de fusibles.
- Disparo intempestivo de interruptores y otros equipos de protección. Actuación indebida de fusibles.
- Aumento de las pérdidas, y mal aprovechamiento de la instalación. Sobrecalentamiento de motores y transformadores, y componentes de circuito en general.
- Mal funcionamiento de computadoras y otros equipos electrónicos de control y/o cargas sensibles.
- Interferencia con circuitos de iluminación y telefónicos.
- Resonancia con otros componentes del sistema.
- Errores en equipos de medición, especialmente los de estado sólido.
- Error en exceso en los medidores de energía.
- Disminución del factor de potencia.
- Fallas en la aislación.

## 5.2. Recomendaciones

1. Los datos de la distorsión armónica en la norma IEEE -519 establece valores en porcentaje para cada armónico el punto de acometida no en carga no lineal. Se debe considerar que los valores de distorsión son más elevados que en la carga no lineal por, lo cual, se debe realizar una correcta elección de información.

2. Los armónicos afectan el funcionamiento de los regulador de pasos por que la señal (onda) de voltaje y de corriente que tomando del sistema eléctrico para su funcionamiento pueden estar distorsionas y se debe considerar en el momento de la instalación y puesta en marcha.

3. No se debe instalar cargas no lineales cerca de los banco de capacitores esto generaría una distorsión de voltaje o corriente en mayor porcentaje.

4. Cuando se toma los datos de un sistema eléctrico se debe considerar todos los parámetros del analizador de energía que registre de esta forma es mas fácil interpretar los efectos que se están produciendo por los armónicos.

5. Al reducir reducción los armónicos en las industrias se obtienen los beneficios tales como:

- Elevación del factor de potencia
- Reducción de consumo de energía reactiva de las redes de CNEL.
- Reducción de pérdidas producidas por efecto Joule ( $I^2R$ ).
- Prolongar la vida de equipo electrónico
- Reducción de sobrecalentamientos en el cableado
- Reducción de pérdidas en transformadores
- Incremento en la eficiencia y prolongación de la vida de motores

6. Los banco de condensadores pueden producir transientes por la conmutación de los condensadores que no es lo mismo distorsión armónica por lo cual es necesario diferencia cada falla eléctricos que produzca.

## BIBLIOGRAFIA

1. Alicia Arce Rubio, Guilherme Vianna Raffo, 2009, Manual de Simulink para la asignatura de teoría de sistemas
2. Análisis y propuesta de solución al problema de alta distorsión armónica caso industrial. Facultad Politécnica Universidad Nacional de Asunción.
3. Armónicos en las Redes Eléctricas Capitulo 2. Universidad Politécnica Salesiana
4. Br Pedro R., Rodríguez. (Noviembre del 2007). Estudio del Impacto sobre Las Instalaciones Eléctricas del uso Intensivo de Lámparas Fluorescentes Con Balasto Electrónico. Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería Eléctrica.
5. Chilet L., Cesar. (28 Febrero 2010). 4.0 Armónicos.
6. Cristian Ramiro Paredes León, Jonathan Paúl Jiménez Gonzales, 2011, Diseño e implementación de filtros en áreas estratégicas para la atenuación de armónicos en las tic" s y laboratorios de la espe-l
7. Cuaderno Técnico Schneider n° 158 / p. 18
8. Enrique Gómez Morales, octubre 2009, Compensación de potencia reactiva

9. Lombarte Vidal, Daniel.(Noviembre del 2003).Estudio y eliminación de armónicos en el sistema de ayuda visuales a navegación aérea en el Aeropuerto de Valencia. Universidad Rovira I Virgili.
- 10.Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia
- 11.Téllez Ramírez, Ing. Eugenio. Distorsión Armónica. Automatización, Productividad y Calidad S.A. De C.V.
- 12.W. Mack Grady. (Noviembre de 1993). Harmonics and how they Relate to Power Factor: The University of Texas at Austin Austin, Texas
- 13.<http://www.bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4078/1/CD-3831.pdf>
- 14.<http://www.datuopinion.com/factor-q>
- 15.<http://www.donsion.org/calidad/cc9/C9-10.pdf>
16. [http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/3/CAPITULO%  
20II.pdf](http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/3/CAPITULO%20II.pdf)
17. <http://www.monografias.com/trabajos43/red-electrica-maracaibo/red-electrica-maracaibo4.shtml> -Evaluación y Diagnóstico de la red de Distribución Eléctrica de la Gerencia Canal de Maracaibo (página 4)
18. <http://www.personal.us.es/aarce/ManualSimulink.pdf>
19. <http://www.promelsa.com.pe/pdf/02314027.pdf> CAPITULO 5

20. <http://www.revistamarina.cl/revistas/2001/5/Acevedo.pdf>
21. <http://www.revistamarina.cl/revistas/2001/5/Acevedo.pdf>
22. <http://www.rtapuntes.blogspot.com/>
23. <http://www.senales.galeon.com/aficiones1349723.html>
24. <http://www.slideshare.net/fnuno/factor-de-potencia-en-presencia-de-armnicos>
25. <http://www.soitsha.org/.../Codigo-Elctrico-Nacional%20200-20> Vene-  
zuela(FONDORANORMA, 2004,6)
26. [http://www.unicrom.com/tut\\_filtros.asp](http://www.unicrom.com/tut_filtros.asp)
27. <http://www.vemac.com.mx/productos/filtro-de-armonicas/>

# ANEXOS

**Anexo 1**  
**Tabla de Impedancia por unidad de transformadores monofásicos y trifásicos**

<b>IMPEDANCIAS APROXIMADAS DE TRANSFORMADORES CON SECUNDARIOS HASTA 600V. PARA 60 Hz</b>						
<b>TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS TIPO DISTRIBUCIÓN</b>						
	<b>PRIMARIO 2.400 a 8.320V</b>			<b>PRIMARIO 12000 a 13800V</b>		
<b>Kva</b>	<b>R%</b>	<b>X%</b>	<b>Z%</b>	<b>R%</b>	<b>X%</b>	<b>Z%</b>
<b>3 a 5</b>	1,7	1,5	2,3	2,2	1,7	2,8
<b>10 a 25</b>	1,5	1,7	2,3	1,6	1,6	2,3
<b>37,5 a 50</b>	1,3	2,2	2,6	1,3	2,0	2,4
<b>75 a 100</b>	1,2	2,3	2,6	1,2	3,5	3,7
<b>167</b>	1,1	3,8	4,0	1,0	3,6	3,7
<b>250 a 500</b>	1,0	4,7	4,8	1,0	5,1	5,2
<b>TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO DISTRIBUCIÓN</b>						
<b>Kva</b>	<b>R%</b>	<b>X%</b>	<b>Z%</b>	<b>R%</b>	<b>X%</b>	<b>Z%</b>
<b>9</b>	2	1,32	2,4	—	—	—
<b>15</b>	1,9	1,56	2,5	2,4	1,44	2,8
<b>30</b>	1,6	1,79	2,4	2,1	2,28	3,1
<b>75</b>	1,5	2,83	3,2	1,6	2,89	3,3
<b>150</b>	1,2	4,02	4,2	1,4	4,07	4,3
<b>300</b>	1,2	4,65	4,8	1,3	4,82	5
<b>500</b>	1,2	4,65	4,8	1,1	4,88	5
<b>TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CENTRO DE CARGA PRIMARIO HASTA 15 Kv.</b>						
<b>KVA</b>		<b>R%</b>		<b>X%</b>		<b>Z%</b>
<b>112,5</b>		1,50		2,60		8,0
<b>150</b>		1,50		2,60		3,0
<b>225</b>		1,30		4,82		5,0
<b>300</b>		1,30		4,82		5,0
<b>450</b>		1,30		4,82		5,0
<b>500</b>		1,20		4,85		5,0
<b>600</b>		1,20		5,37		5,5
<b>750</b>		1,15		5,38		5,5
<b>1000</b>		1,05		5,40		5,5
<b>1500</b>		0,90		5,43		5,5
<b>2000</b>		0,80		5,44		5,5

**Anexo 2:**  
**Tabla de capacidad máxima de corriente de conductores Superflex**

<b>CAPACIDAD MÁXIMA DE CORRIENTE (A) SUPERFLEX COLORS</b>					
<b>CODIGO PHELPS DODGE</b>	<b>CALIBRE AWG-KCMIL</b>	<b>AIRE LIBRE (TEMP 30 °C)</b>		<b>DUCTO ENTERRADO (TEMP 20 °C)</b>	
		<b>SEPARADO</b> 	<b>TRIPLEXADO</b> 	<b>SEPARADO</b> 	<b>TRIPLEXADO</b> 
EX01	14	38	30	39	33
EX02	12	50	40	51	43
EX03	10	66	52	65	54
EX04	8	86	70	84	69
EX05	6	114	91	107	88
EX06	4	154	123	138	114
EX07	3	181	145	157	131
EX08	2	206	165	176	148
EX09	1	238	190	201	166
EX10	1/0	271	218	222	186
EX11	2/0	319	257	254	216
EX12	3/0	374	305	292	247
EX13	4/0	439	354	332	280
EX14	250	489	396	364	308
EX15	300	546	443	398	339
EX16	350	606	493	435	371
EX17	400	666	540	472	402
EX18	450	722	584	504	431
EX19	500	772	627	534	456
EX20	750	988	792	654	554
EX21	1.000	1.185	940	762	640

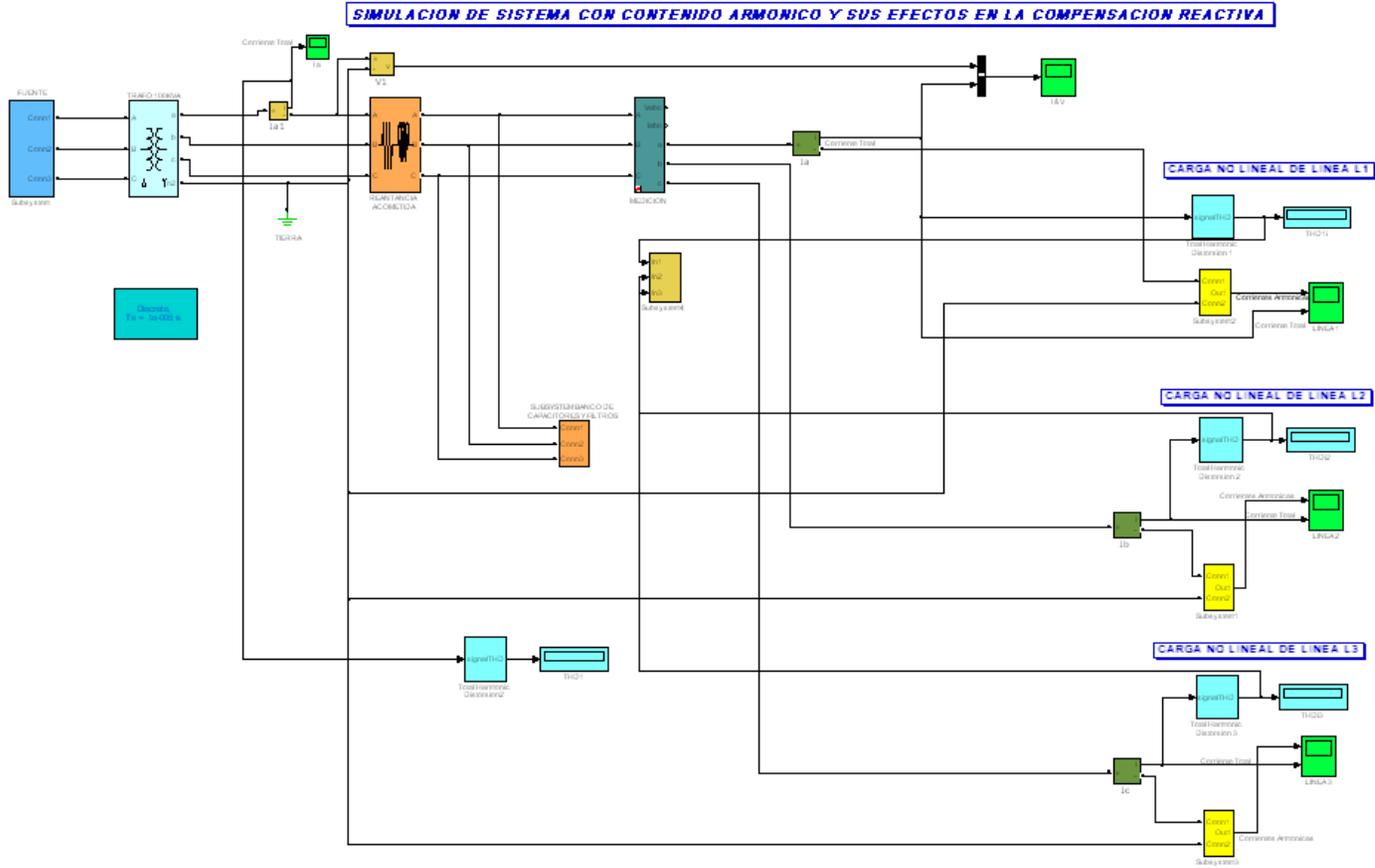
**Anexo 3:**  
**Tabla de características eléctricas de cable Superflex 1KV**

Características Eléctricas de Cables SUPERFLEX 1kV						
 <i>One Company</i> <small>a General Cable company</small>						
Código PDIC-Chile	Descripción	Resistencia DC 20 °C ohm/km	Resistencia AC 90 °C ohm/km	Reactancia Inductiva [Ω/km]		
				$X_L = 2\pi fL$ ohm/km		
						
EX01	SUPERFLEX 14 AWG 1KV	8.59	10.96	0.147	0.191	0.133
EX02	SUPERFLEX 12 AWG 1KV	5.41	6.90	0.138	0.182	0.124
EX03	SUPERFLEX 10 AWG 1KV	3.41	4.35	0.129	0.173	0.115
EX04	SUPERFLEX 8 AWG 1KV	2.14	2.73	0.122	0.165	0.107
EX05	SUPERFLEX 6 AWG 1KV	1.37	1.75	0.114	0.158	0.100
EX06	SUPERFLEX 4 AWG 1KV	0.862	1.099	0.110	0.154	0.096
EX07	SUPERFLEX 3 AWG 1KV	0.685	0.874	0.107	0.150	0.092
EX08	SUPERFLEX 2 AWG 1KV	0.544	0.694	0.104	0.147	0.089
EX09	SUPERFLEX 1 AWG 1KV	0.429	0.547	0.102	0.146	0.088
EX10	SUPERFLEX 1/0 AWG 1KV	0.344	0.439	0.100	0.143	0.085
EX11	SUPERFLEX 2/0 AWG 1KV	0.273	0.349	0.098	0.141	0.083
EX12	SUPERFLEX 3/0 AWG 1KV	0.217	0.277	0.096	0.140	0.082
EX13	SUPERFLEX 4/0 AWG 1KV	0.172	0.220	0.095	0.139	0.081
EX14	SUPERFLEX 250 MCM 1KV	0.146	0.187	0.094	0.137	0.079
EX15	SUPERFLEX 300 MCM 1KV	0.122	0.157	0.094	0.138	0.080
EX16	SUPERFLEX 350 MCM 1KV	0.105	0.135	0.094	0.138	0.079
EX17	SUPERFLEX 400 MCM 1KV	0.0918	0.1184	0.094	0.137	0.079
EX19	SUPERFLEX 500 MCM 1KV	0.0735	0.0954	0.092	0.136	0.078
EX20	SUPERFLEX 750 MCM 1KV	0.0495	0.0656	0.091	0.135	0.077
EX21	SUPERFLEX 1000 MCM 1KV	0.0371	0.0505	0.089	0.133	0.075

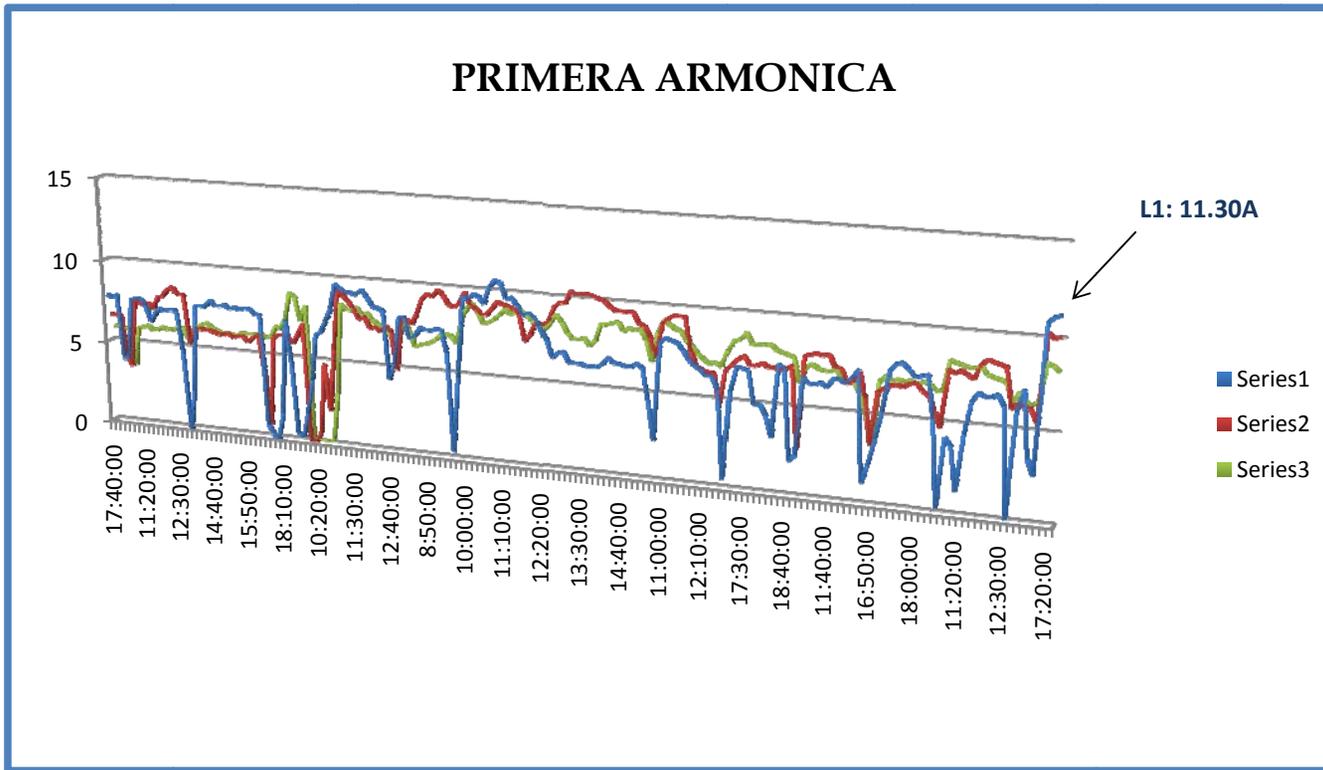
  

	Conductores en disposición plana en contacto
	Conductores en disposición plana separados 2 Ø entre centros
	Conductor múltiple

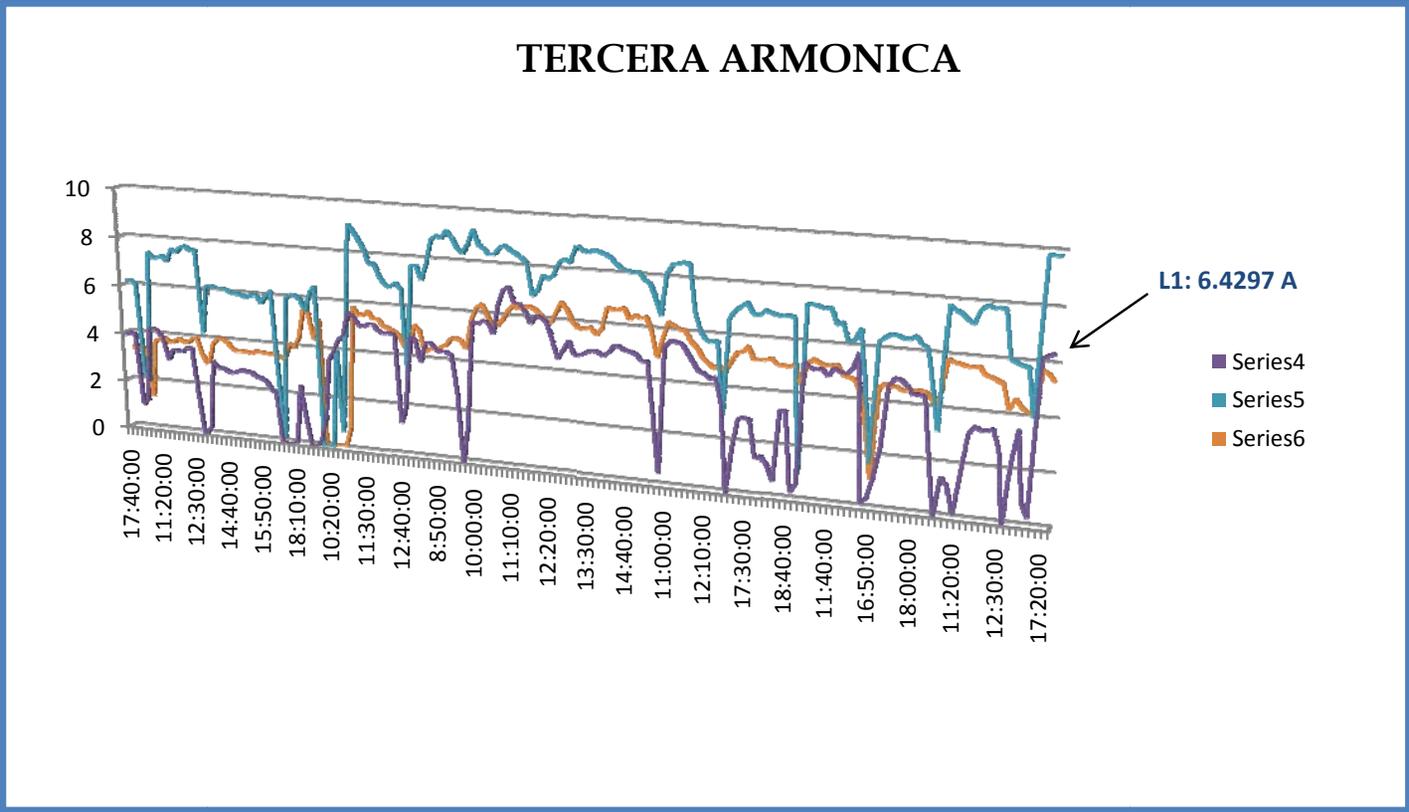
### Anexo 4: Diagrama del sistema de contenido armónico y compensación reactiva en Simulink



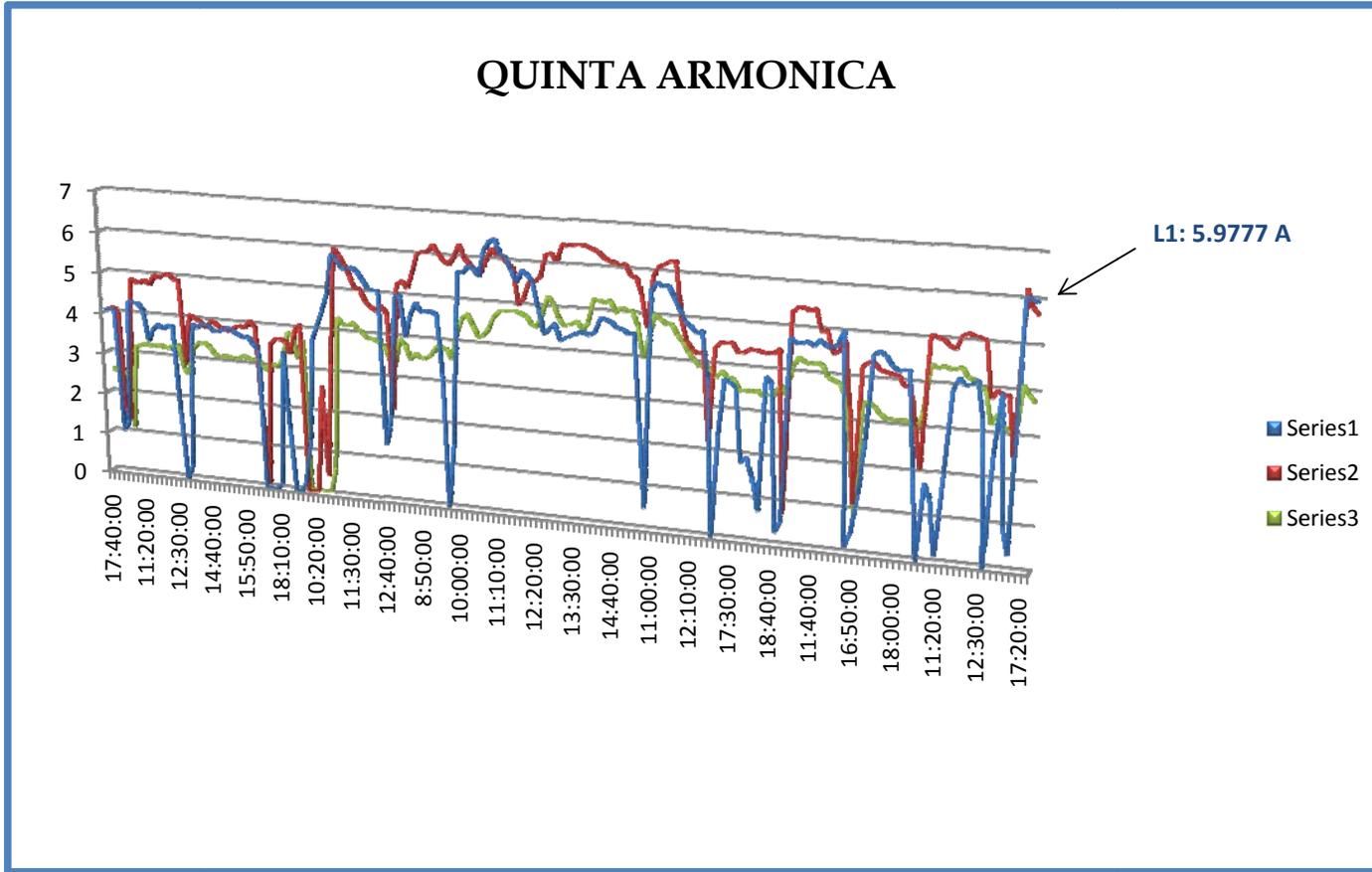
Anexo 5:  
Grafica de las corrientes fundamentales o primer armónica



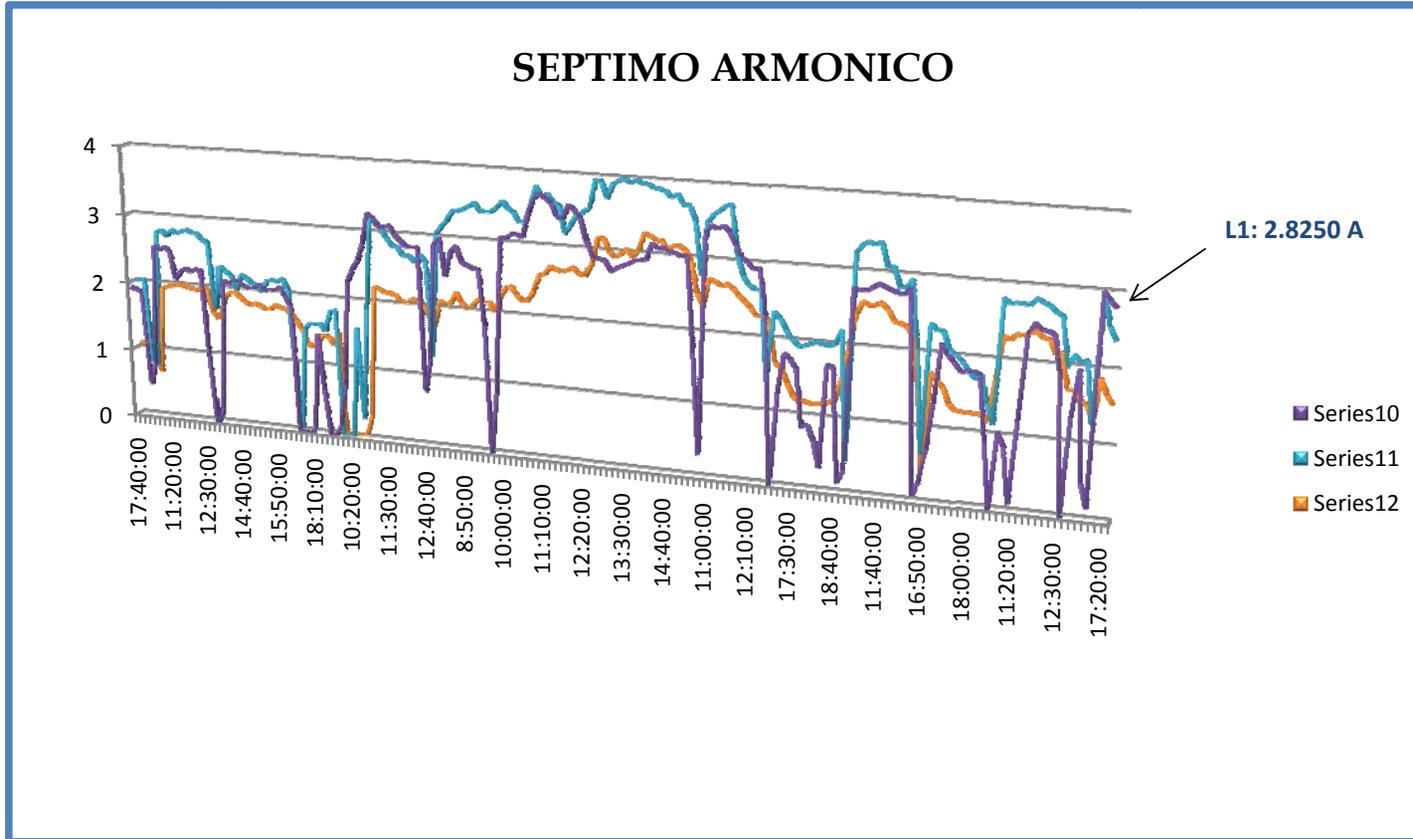
Anexo 6:  
Grafica de las corrientes de tercera armónica



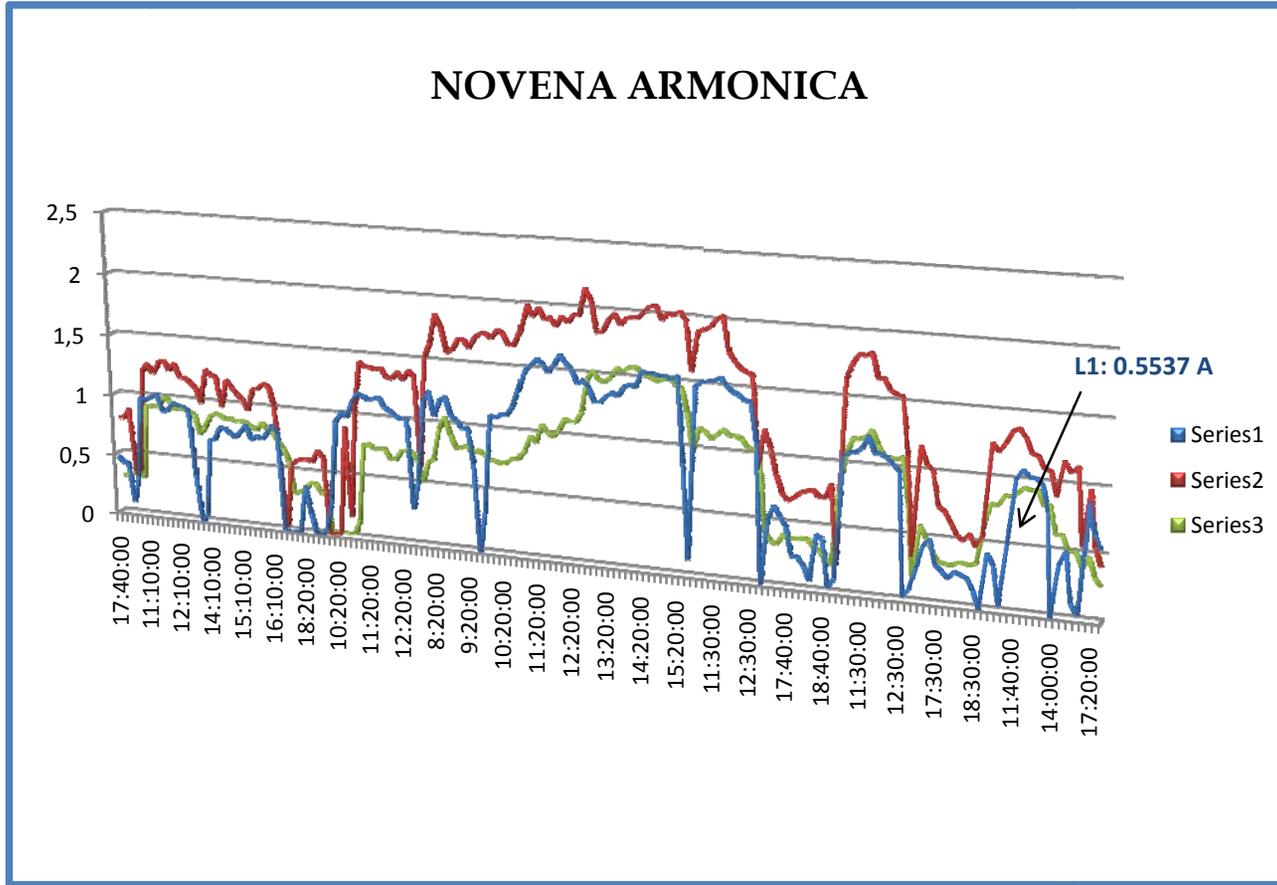
Anexo 7:  
Grafica de las corrientes de quinta armónica



Anexo 8:  
Grafica de las corrientes de séptima armónica



Anexo 9:  
Grafica de las corrientes de novena armónica



Anexo 10:  
Grafica de las corrientes de onceava armónica

