UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:
“MODELADO DEL THD EN LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE INDUCCIÓN RESIDENCIALES.”

AUTOR:
LUIS FERNANDO BEDOYA AYORA

DIRECTOR:
FRANKLIN HERNÁN VÁSQUEZ TENEDA

Quito, Febrero de 2015

DECLARATORIA DE LA AUTORÍA:

Yo Luis Fernando Bedoya Ayora autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 28 de Febrero de 2015

Luis Fernando Bedoya Ayora

CC: 1712677051

AUTOR

CERTIFICA:

El Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda certifica haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la monografía, así como el funcionamiento del “MODELADO DEL THD EN LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE INDUCCIÓN RESIDENCIALES” realizada por el Sr. Luis Fernando Bedoya Ayora, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 28 de Febrero de 2015

Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda
DIRECTOR

DEDICATORIA

Luis Fernando Bedoya Ayora

Al término de esta etapa de mi vida quiero dedicar este trabajo a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión me alentaron a lograr esta hermosa realidad, haciendo este triunfo más suyo que mío ya que este simboliza mi gratitud y cariño eternos. De manera especial dedico este trabajo a mi familia entera y muy particularmente a mi madre, fuente de inspiración y pilar fundamental en mi vida.

AGRADECIMIENTO

Luis Fernando Bedoya Ayora

Quiero agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana por todo lo aprendido en sus aulas, a todos los profesores que supieron compartir sus conocimientos de una manera clara y precisa y al Ing. Franklin Vásquez, mi tutor en este trabajo, ya que sin su ayuda y su interés esta tesis difícilmente habría llegado a concluirse en los plazos y el contenido que hoy posee.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

DECLARATORIA DE LA AUTORÍA: ii
CERTIFICA: iii
DEDICATORIA iv
AGRADECIMIENTO v
ÍNDICE GENERAL vi
ÍNDICE DE FIGURAS viii
ÍNDICE DE TABLAS xi
ÍNDICE DE FÓRMULAS xii
ÍNDICE DE ANEXOS xiv
Resumen xv
Abstract xvi
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO I 3
MARCO TEÓRICO 3
Armónicos 3
1.1.1 Definición 3
1.1.2 Orden de los Armónicos 5
1.1.3 Secuencia de Armónicos 5
1.1.4 Origen de los Armónicos 6
1.1.5 Efectos de los Armónicos 9
1.1.6 Cálculo de Armónicos 10
1.1.7 Series de Fourier 14
Lámparas de inducción 17
1.2.1 Principio de funcionamiento 17
1.2.2. Lámpara de inducción de baja frecuencia 18
1.2.3. Lámpara de inducción de alta frecuencia 19
1.2.4 Características de las lámparas de inducción 20
1.3 MATLAB 22
1.3.1 Introducción 22

1.3.2 Funciones matemáticas de MATLAB 24
1.3.3 Funciones gráficas 25
1.3.4 SIMULINK 27
1.3.5 Ejemplo de resolución de circuito con MATLAB 28
CAPÍTULO II 32
ESTUDIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL 32
2.1 Planteamiento del problema 32
2.2 Problemas en redes eléctricas residenciales asociadas a armónicos 34
2.3 Análisis del mercado de lámparas de inducción en el Ecuador 35
2.4 Normativa 38
CAPÍTULO III 41
TÍTULO: MODELAMIENTO 41
3.1 Análisis del circuito eléctrico de una lámpara de inducción 41
3.2 Cálculo de armónicos que producen las lámparas de inducción 49
3.3 Cálculo de THD 52
CAPÍTULO IV 53
TÍTULO: ANÁLISIS DE RESULTADOS 53
4.1 Simulación en MATLAB 53
4.2 Comportamiento de la curva característica 62
4.3 Análisis de la generación de armónicos a la red de distribución de las lámparas de inducción 62
CONCLUSIONES 66
RECOMENDACIONES 69
REFERENCIAS 71
ANEXOS 75
ANEXO A 76
ANEXO B 78
ANEXO C 80
ANEXO D 82
ANEXO E 84
ANEXO F 86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fundamental de Voltaje y Corriente. 4
Figura 2. Circuito Inductivo..... 4
Figura 3. Circuito Capacitivo..... 4
Figura 4. Orden de Armónicos. 5
Figura 5. Forma de onda de una carga lineal. 7
Figura 6. Forma de onda de una carga no lineal. 7
Figura 7. Efectos de armónicos ideales. 11
Figura 8. Onda sinusoidal de voltaje sin la presencia de armónicos. 12
Figura 9. Onda sinusoidal de voltaje con la presencia del tercer armónico..... 12
Figura 10. Onda sinusoidal de voltaje con la presencia del tercero, quinto, séptimo, noveno, onceavo y treceavo armónicos. 13
Figura 11. Onda sinusoidal de voltaje con la presencia de varios armónicos impares... 13
Figura 12. Esquema de una lámpara de inducción magnética de baja frecuencia..... 18
Figura 13. Fotografía de una Lámpara de inducción magnética..... 19
Figura 14. Esquema de una lámpara de inducción magnética de alta frecuencia..... 20
Figura 15. Print de la pantalla principal de MATLAB. 23
Figura 16. Ejemplos de gráficos en MATLAB..... 24
Figura 17. Ejemplo de gráfica en MATLAB. 27
Figura 18. Circuito RLC serie..... 28
Figura 19. Programación en MATLAB de la corriente del Circuito RLC serie..... 29
Figura 20. Resolución de la corriente del Circuito RLC serie en MATLAB. 29
Figura 21. Resolución gráfica de la corriente del Circuito RLC serie en MATLAB. 30
Figura 22. Diagrama de Bode de la corriente del Circuito RLC serie en MATLAB. 31
Figura 23. Demanda anual por grupo de consumo. 33
Figura 24. Consumo de energía eléctrica residencial en el S.N.I. 33
Figura 25. Lámparas de inducción tipo cobra head. 36
Figura 26. Lámparas de inducción tipo Saturno. 36
Figura 27. Lámparas de inducción para alumbrado público..... 37
Figura 28. Lámparas de inducción para túneles. 37
Figura 29. Lámparas de inducción colgantes..... 37
Figura 30. Lámparas de inducción tipo reflector. 38

Figura 31. Lámparas de inducción para techo. 38
Figura 32. Lámparas de inducción para techo. 41
Figura 33. Modelo lámpara de inducción de inductores externos. 42
Figura 34. Resistencia, inductancia e impedancia del tubo de la lámpara..... 43
Figura 35.Modelo simplificado del balastro y la lámpara de inducción..... 44
Figura 36.Resolución matemática del Modelo simplificado del balastro y la lámpara de inducción..... 44
Figura 37. Impedancia equivalente de la lámpara de inducción con inductor externo... 45
Figura 38. Modelo completo luminaria de inducción..... 46
Figura 39. Circuito equivalente del tanque resonante y lámpara en el dominio de la frecuencia..... 48
Figura 40. Print screen de los armónicos registrados por el analizador FLUKE para la lámpara de inductor interno. 50
Figura 41. Print screen del tiempo de evolución registrado por el analizador FLUKE para la lámpara de inductor interno. 50
Figura 42. Print screen de la distorsión armónica total registrada por el analizador FLUKE para la lámpara de inductor interno. 51
Figura 43. Print screen de los armónicos registrados por el analizador FLUKE para la lámpara de inductor interno. 51
Figura 44. Diagrama de bloques en SIMULINK..... 54
Figura 45. Parámetros modificados en los bloques del simulador SIMULINK..... 55
Figura 46. Onda obtenida a la salida del tanque resonante..... 56
Figura 47. Print screen de la función de transferencia en el editor de MATLAB. 56
Figura 48. Print screen del resultado de la función de transferencia en la ventana de comandos de MATLAB..... 57
Figura 49. Configuración de los parámetros del modelo en SIMULINK. 58
Figura 50. Configuración de los parámetros del modelo en SIMULINK. 59
Figura 51. Onda de salida del tanque resonante en MATLAB..... 59
Figura 52. Programación en MATLAB..... 61
Figura 53. Armónicos generados por la lámpara de inducción con inductores externos. 61
Figura 54. Deformación de la forma de onda causada por los armónicos generados por la lámpara de inducción con inductores externos. 62
Figura 55. Demanda según actividades. 63

Figura 56. Evolución y previsión del consumo de energía eléctrica por sectores 77
Figura 57. Proyección de la demanda anual de energía 79
Figura 58. Demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional por grupo de consumo 81
Figura 59. Demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional por grupo de consumo 83
Figura 60. Gráfica señal armónica 85
Figura 61. Gráfica señal 88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de potencia de receptores usuales. 8
Tabla 2. Efectos de los Armónicos. 10
Tabla 3. Armónicos de las ondas más comunes. 15
Tabla 4. Principales caracteres especiales, comandos y funciones de MATLAB. 24
Tabla 5. Funciones matemáticas comunes de MATLAB. 25
Tabla 6. Funciones trigonométricas comunes de MATLAB. 25
Tabla 7. Funciones gráficas comunes de MATLAB. 26
Tabla 8. Límites de Distorsión Armónica en Corriente para equipos clase D..... 40
Tabla 9. Límites de Distorsión Armónica en Corriente para equipos clase C..... 40
Tabla 10. Límites de distorsión armónica en corriente para un sistema operando entre 20 V y 69000 V..... 40
Tabla 10. Resumen de los valores de los parámetros de la lámpara de inducción con inductores externos. 47
Tabla 11. Armónicos producidos por la lámpara de inducción con inductores externos. 49

ÍNDICE DE FÓRMULAS

(1.1) Fórmula de la distorsión armónica total……..10
(1.2) Factor de distorsión armónica individual de voltaje……11
(1.3) Factor de potencia en función de la distorsión armónica total……11
(1.4) Serie de Fourier completa……14
(1.4.1) Componente en DC de la serie de Fourier……...14
(1.4.2) Coeficiente de Fourier Bn……14
(1.4.3) Coeficiente de Fourier An……...14
(1.5) Serie de Fourier – Representación……...14
(1.5.1) Módulo serie de Fourier……..15
(1.5.2) Ángulo serie de Fourier……..15
(1.6) Serie de Fourier de periodo 2T……15
(1.6.1) Coeficiente de Fourier An de periodo 2T……15
(1.6.2) Coeficiente de Fourier Bn de periodo 2T……16
(1.6.3) Coeficiente de Fourier A0 de periodo 2T……16
(1.7) Voltaje en circuito RLC……..28
(1.8) Derivada del voltaje en circuito RLC……..29
(3.1) Pérdidas en el núcleo……..43
(3.2) Inductancias magnetizantes……43
(3.3) Resistencia equivalente vista desde el primario……43
(3.4) Capacitancia parásita de los dispositivos de conmutación……46
(3.5) Frecuencia angular……..46
(3.6) Inductancia del tanque resonante……46
(3.7) Capacitancia del tanque resonante……..46
(3.8) Coeficiente de Fourier con la función a desarrollar……47
(3.9) Serie de Fourier para la lámpara de inducción……47
(3.10) Coeficiente de la serie de Fourier para la lámpara de inducción……..48
(3.11) Voltaje de circuito equivalente……48
(3.12) Función de transferencia del tanque resonante y la lámpara……48
(3.13) Función de transferencia del tanque resonante y la lámpara……48
(3.14) Distorsión armónica total de la lámpara de inducción con inductor externo……52
(4.1) Frecuencia de muestreo……...57

(4.2) Resolución de la frecuencia……57
(4.3) Periodo de muestreo temporal……57
(4.4) Duración del espacio muestral temporal……58
(4.5) Tiempo de parada de la simulación……58
(4.6) Eje del tiempo……58
(4.7) Factor de distorsión……64
(4.8) Factor de atenuación……..……64

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: EVOLUCIÓN Y PREVISIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR SECTORES…….78

ANEXO B: PROYECCIÓN DE LA DEMANDA ANUAL DE ENERGÍA……..80

ANEXO C: DEMANDA ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA A NIVEL NACIONAL POR GRUPO DE CONSUMO……..82

ANEXO D: DEMANDA ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA A NIVEL NACIONAL POR GRUPO DE CONSUMO……..84

ANEXO E: CÓDIGO EN MATLAB SEÑAL CON ARMÓNICOS …….86

ANEXO F: CÓDIGO EN MATLAB SEÑAL TRANSFORMADA….…….88

Resumen

“Modelado del THD en los Sistemas de Iluminación de Inducción Residenciales.”

Luis Fernando Bedoya Ayora
luis_f7b@hotmail.com
Universidad Politécnica Salesiana

Resumen.- En el presente proyecto de tesis se desarrolla un modelamiento para poder estudiar el comportamiento y los efectos que en la red eléctrica de distribución se pueden presentar por la presencia de armónicos generados por las lámparas de inducción de uso residencial; primero se obtiene el modelo matemático de la lámpara de inducción con inductor externo para luego realizar el modelamiento mediante MATLAB y con esta misma herramienta matemática calcular la tasa de distorsión armónica total que producen estas lámparas y se obtiene la gráfica de los armónicos y la distorsión de la forma de onda; con los datos que proporciona la curva característica de la demanda se logran visualizar los picos en las horas de mayor solicitación.

Índice de Términos – Armónicos, demanda, lámpara de inducción, red eléctrica, tasa de distorsión armónica.

Abstract

“Modeling THD Systems Residential Lighting Induction..”

Luis Fernando Bedoya Ayora
luis_f7b@hotmail.com
Salesian Polytechnic University

Abstract.- In this thesis presents a modeling project is developed to study the behavior and the effects on the electrical distribution network can be presented by the presence of harmonics generated by induction lamps for residential use; the mathematical model of induction lamp with external inductor is first obtained and then make modeling using MATLAB and the same mathematical tool calculate the rate of total harmonic distortion produced by these lamps and the graph of harmonics and distortion is obtained waveform; with the data provided by the characteristic curve of demand peaks are achieved display in the hours of greatest stress.

Index Terms – Harmonics, demand, induction lamp, mains, total harmonic distortion.

INTRODUCCIÓN

El aumento de aparatos y sistemas electrónicos en los últimos años ha presentado un problema en las redes eléctricas de distribución por la presencia de armónicos. Esto se da debido a que estos aparatos electrónicos realizan conversiones de energía eléctrica y conmutaciones que provocan que la señal sinusoidal, característica de la corriente alterna, se vea afectada básicamente en su forma y amplitud.

Esta alteración de la forma de onda en general produce disparos de protecciones, recalentamiento de cables, y otros problemas asociados, que no son más que resultados de la introducción de armónicos a la red eléctrica.

El desarrollo de la tecnología en luminarias ha tenido un avance significativo en los últimos años, logrando mayor y mejor luminancia con menor consumo de energía eléctrica, es decir mayor eficiencia, utilizando técnicas de control electrónico. Una de estas tecnologías utiliza el principio de inducción electromagnética para exitar los electrones contenidos en un tubo el cual en sus paredes tiene polvos fluorescentes y se genera así luz visible. Estas lámparas son las denominadas lámparas de inducción.

El principio de funcionamiento de las lámparas de inducción es similar al de las lámparas fluorescentes con la diferencia de que no poseen electrodos para generar la descarga. La energía es suministrada por un campo magnético producido por bobinas alojadas en anillos de ferrita. Para controlar la descarga para la ionización del gas en el tubo se dispone de un equipo de control electrónico que varía la frecuencia la cual puede ir desde los 250 KHz a varios MHz; mencionado control introduce armónicos en la red debido a los circuitos osciladores que utiliza, a pesar de los filtros que reducen considerablemente su presencia pero no la eliminan en su totalidad.

Para el desarrollo del presente estudio es menester realizar un análisis de las ondas que resultan de esta distorsión o contaminación utilizando como herramienta matemática las series de Fourier las cuales permiten calcular los armónicos inyectados a la red por este tipo de sistemas.

Los cálculos de cada una de las componentes armónicas resultan complejos, por lo que se recurre al uso del software matemático MATLAB, el cual permite tener soluciones

gráficas de una manera rápida y confiable además que permiten simular los modelos matemáticos.

El análisis de ondas más el modelamiento planteado permitirán estimar el nivel de afectación que los armónicos producen sobre las redes de distribución eléctrica que se encargan de suministrar energía eléctrica a los usuarios residenciales.

En el capítulo I se aborda el marco teórico para sentar las bases teóricas del presente trabajo. Los principales causantes de la mala calidad de la energía eléctrica tanto para las instalaciones internas como para las redes de distribución son los armónicos por lo que se analiza su dfinición, orden, secuencia, origen, sus efectos y la manera de calcularlos. Dentro de los causantes de armónicos se tienen las lámparas de inducción por lo que se estudia su principio de funcionamiento, tipos de lámparas de inducción y sus características principales. Para el modelamiento matemático de los armónicos que producen las lámparas de inducción se utilizará el software MATLAB por lo que se hace una introducción al programa, las funciones matemáticas y gráficas principales y el simulador SIMULINK que está incorporado en el software.

El el capítulo II se analiza la situación actual de las redes eléctricas de distribución, el planteamiento del problema, los problemas en las redes eléctricas residenciales debidas a la presencia de armónicos, el análisis de la situación actual del mercado de las lámparas de inducción en el país y la normativa vigente que indica los límites de distorsión armónica que se deben tolerar en las redes eléctricas.

El capítulo III trata sobre el modelamiento, el circuito eléctrico de una lámpara de inducción con inductores externos y su modelo matemático, como se realiza el cálculo de los armónicos que producen este tipo de lámparas y el cálculo de la distorsión armónica total.

En el capítulo IV se presenta el análisis de los resultados obtenidos. Se muestra la simulación en MATLAB, la forma de onda que resulta por la presencia de armónicos, es decir como se afecta la forma de onda sinusoidal original que entrega la red de distribución al usuario y el análisis del consumo de energía de las lámparas de inducción.

Para la parte final se incluyen las conclusiones y recomendaciones, la bibliografía que ha servido de referencia para el desarrollo del presente trabajo y los anexos.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

Este capítulo tratará sobre las bases teóricas que se requieren para desarrollar la investigación. Primero sobre los armónicos, cuál es su definición, sus principales características, como se calculan, cuáles son sus causas y sus efectos, tanto en los circuitos que los alimentan como en los aparatos aledaños y alimentados de la misma red.

Lo segundo que tratará este capítulo es sobre las lámparas de inducción, explicar su principio de funcionamiento, los principales tipos de lámparas que actualmente están disponibles y sus características relevantes.

Para realizar la simulación se utilizará el software MATLAB por lo que en este capítulo también se abordará una introducción básica al programa, el entorno del software, sus comandos básicos, funciones matemáticas básicas, resolución de ecuaciones simples, pasos para realizar gráficos en dos dimensiones y la metodología para realizar simulaciones.

1.1 Armónicos

Los armónicos generan una distorsión o deformación de la onda sinusoidal que es la forma característica de la corriente y el voltaje alternos. Las empresas eléctricas distribuidoras suminstran energía eléctrica de tipo alterno en sus redes de distribución hacia los usuarios finales.

1.1.1 Definición

En la Figura 1 se indica la forma de onda senoidal de la tensión y la corriente en fase y sin contenido de armónicos[1].

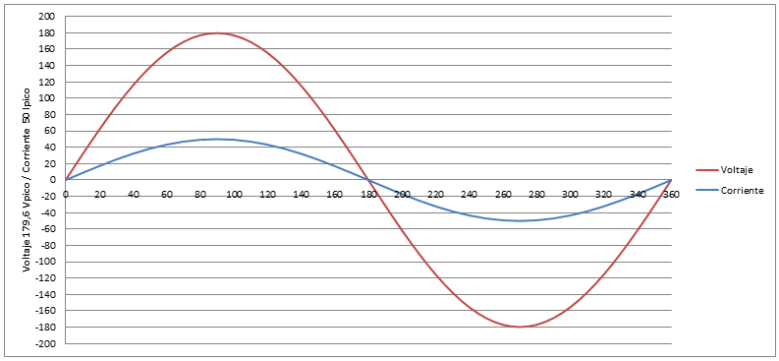


Figura 1. Fundamental de Voltaje y Corriente.

Fuente: Autor

La onda mostrada en la Figura 1 corresponde a un circuito resistivo en el cual tanto el voltaje como la corriente se encuentran en fase, es decir que no existe un ángulo de retraso o adelanto entre estos parámetros eléctricos[2][3].

En los circuitos con capacitores y/o inductores se produce un desfase entre estos dos parámetros eléctricos, adelantándose la corriente respecto al voltaje en circuitos capacitivos y retrasándose en circuitos inductivos[1].

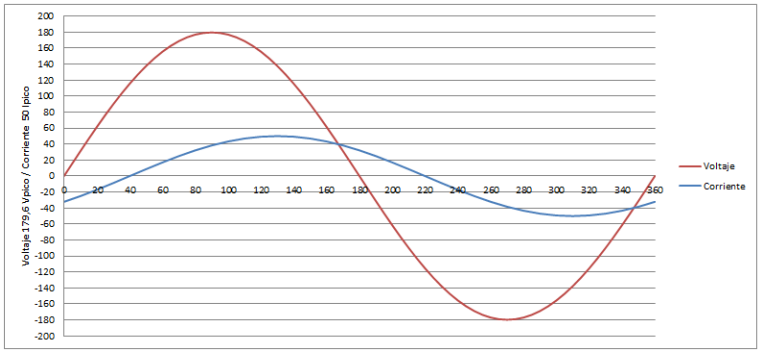


Figura 2. Circuito Inductivo.

Fuente: Autor

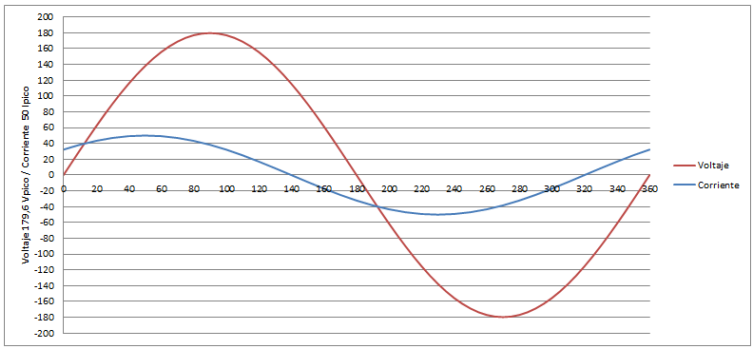


Figura 3. Circuito Capacitivo.

Fuente: Autor

Cuando una onda periódica no tiene la forma senoidal pura se dice que tiene contenido armónico, lo que puede alterar sus valores pico y RMS. La frecuencia de la onda periódica es la frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de esta frecuencia.

Los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos producidos por el uso de cargas con impedancia no lineal, materiales ferromagnéticos y en general al uso de equipos que necesitan realizar conversiones ac/dc y conmutaciones en su operación normal, es decir que trabajan a diferente frecuencia que la de la red[1].

1.1.2 Orden de los Armónicos

El número de orden se determina de acuerdo al número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la frecuencia fundamental. Así por ejemplo el segundo armónico tiene el doble de frecuencia que el de la componente fundamental; el tercer armónico tiene el triple de frecuencia que el de la componente fundamental, así sucesivamente.

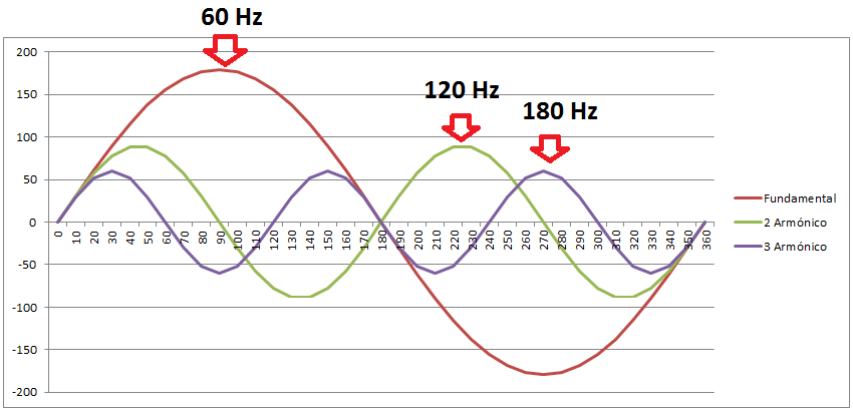


Figura 4. Orden de Armónicos.

Fuente: Autor

Generalmente son los armónicos impares y los de los primeros órdenes, es decir los armónicos tercero, quinto, y noveno, los que más presentes están y los que mayor problema en cuanto a la calidad de la energía representan[1].

1.1.3 Secuencia de Armónicos

Las ondas de corriente y voltaje de sistemas trifásicos balanceados en condiciones normales presentan un desfase entre sí de 120 grados eléctricos y una secuencia

positiva. Al ser los armónicos de cada fase un múltiplo de la frecuencia fundamental, presentan ángulos de desfase diferentes a los de la forma de onda fundamental por lo que pueden presentar diferentes secuencias. Los armónicos de orden 3n+1 son de secuencia positiva, los de 3n-1 son de secuencia negativa y los 3n son de secuencia cero, siempre que el sistema trifásico esté balanceado[1].

Los de secuencia cero, al ser su frecuencia múltiplo de la fundamental, se desplazan por el neutro haciendo que por él circule la misma o más corriente que por las fases. Por esta razón el neutro debe ser al menos del mismo calibre que el de las fases[4]. Sin embargo generalmente en los alimentadores se coloca el neutro con uno o dos calibres menos que el de las fases lo que conlleva a que, en presencia de una cantidad de contaminación armónica por sobre los límites permitidos por normas, el neutro se sobre caliente o se produzcan fallos por el exceso de corriente en el neutro y porque este conductor no tiene una protección como lo tienen las fases con sus interruptores termomagnéticos[5].

1.1.4 Origen de los Armónicos

En la práctica se producen corrientes no senoidales cuando la corriente que pasa por la carga no tiene una relación lineal con la tensión aplicada. En un circuito simple que contenga sólo elementos lineales - resistencias, inductancias y capacitancias - la corriente que fluye es proporcional a la tensión aplicada, a una frecuencia determinada, de tal modo que si se aplica una tensión senoidal, se produce una corriente senoidal, como se ilustra en la figura 5. La línea de carga es la relación entre la tensión aplicada y la corriente que circula por la carga, tal como se muestra en la figura 5 correspondiente a una carga lineal [5]. Téngase en cuenta que si está presente un elemento reactivo, se producirá un desplazamiento de fase entre las formas de onda de la tensión y de la corriente; el factor de potencia se reduce, pero el circuito sigue siendo lineal.

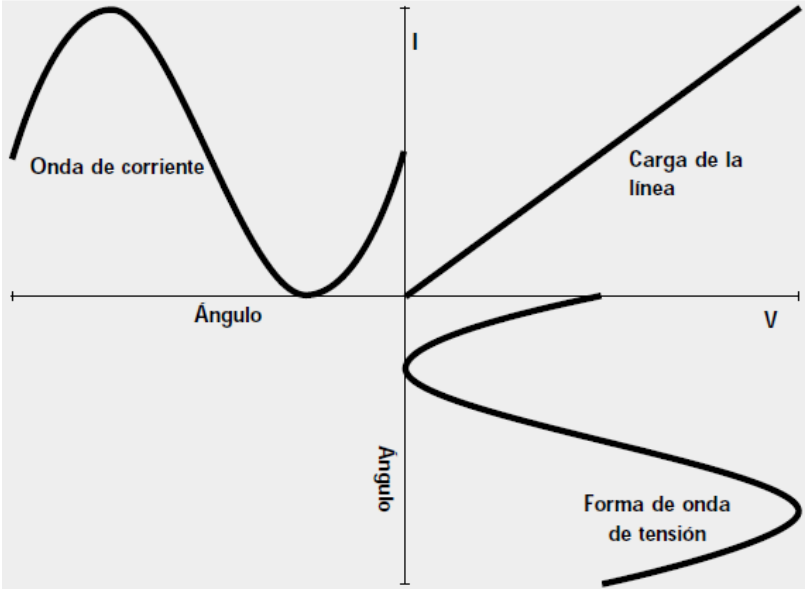


Figura 5. Forma de onda de una carga lineal.

Fuente: Guía de Calidad de la Energía Eléctrica – Armónicos: Causas y Efectos, Chapman D, Pág. 4

La figura 6 muestra la situación en la que la carga es un rectificador de onda completa y un condensador, como ocurre en la etapa de entrada de una fuente de alimentación típica de funcionamiento conmutado. En este caso, la corriente sólo aparece cuando la tensión de alimentación supera la que está almacenada en el condensador de filtro, es decir, cuando está cerca del valor de pico de la onda senoidal de voltaje, como muestra la forma de la línea de carga[5].

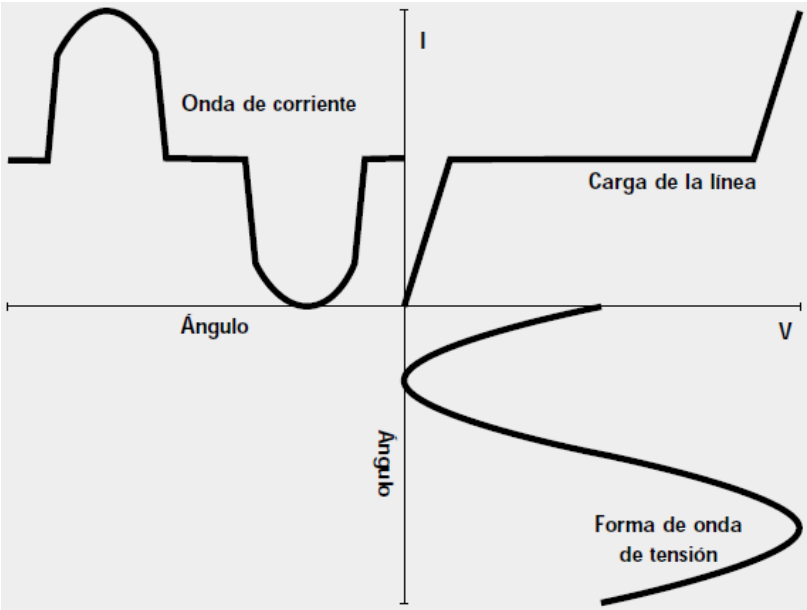


Figura 6. Forma de onda de una carga no lineal.

Fuente: Guía de Calidad de la Energía Eléctrica – Armónicos: Causas y Efectos, Chapman D, Pág. 5

Los armónicos pueden generarse debido a:

- Cargas no lineales como ocurre en transformadores, motores, lámparas fluorescentes, lámparas de inducción, equipos electrónicos, hornos de arco, computadores, UPS.
- Elementos con impedancia dependiente de la frecuencia como los rectificadores, filtros eléctricos y electrónicos, variadores de velocidad, convertidores.

Por ejemplo en sistemas de iluminación con lámparas ahorradoras (cargas no lineales y que en su diseño presentan balastro electrónico que opera entre 20 KHz y 60 KHz)[6], provocan que su impedancia no sea constante debido a que no está en función de la tensión, sino de su frecuencia, lo que origina distorsión armónica en la onda de corriente, entre 5% y 30 %; los espectros de estas ondas muestran un alto contenido de la 3ra, 9na, 15va, y 31va armónica [7].

El factor de potencia de algunos aparatos y equipos eléctricos se resume en la siguiente tabla.

Tabla 1. Factores de potencia de receptores usuales.

Factor de potencia de los receptores más usuales		
Aparato	**Carga**	**Cos θ**
Motor Asíncrono ordinario	0%	0,17
	25%	0,55
	50%	0,73
	75%	0,8
	100%	0,85
Lámparas de incandescencia		1
Lámparas de fluorescencia		0,5
Lámparas de descarga		0,4 a 0,6
Hornos de resistencia		1
Hornos de inducción		0,85
Hornos de calefacción dieléctrica		0,85
Máquinas de soldar por resistencia		0,8 a 0,9
Centros estáticos monofásicos de soldadura de arco		0,5
Grupos rotativos de soldadura al arco		0,7 a 0,9
Transformadores-rectificadores de soldadura al arco		0,7 a 0,9
Hornos de arco		0,8

Fuente: SCHNEIDER ELECTRIC, "COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA Y FILTRADO DE ARMÓNICOS," p. 10. [6]

1.1.5 Efectos de los Armónicos

Los armónicos contaminan la red con sus formas de onda las cuales se suman o restan entre sí resultando en otros tipos de onda con distintos valores rms y deformando la señal original [3]. A mayor cantidad de armónicos circulando en los alimentadores, mayor distorsión y consecuentemente:

- Sobrecalentamiento del neutro
- Mayores pérdidas por efecto piel
- Daños y destrucción de equipos electrónicos
- Interferencia en telecomunicaciones
- Fallos en los sistemas de protección
- Vibración en máquinas
- Mediciones erróneas de equipos de medida
- Afectación a la calidad de energía
- Riesgo de daño a equipos de la misma instalación o instalaciones aledañas

En los transformadores se incrementan las pérdidas en el cobre y el hierro, se forza el aislamiento y se puede entrar en resonancia entre las bobinas y la capacitancia de la línea, generando un potencial riesgo.

En motores también se incrementan las pérdidas en el cobre y hierro, aumentan las pérdidas I^2R, disminuye la eficiencia y el torque y se presentan pérdidas en el núcleo.

A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable disminuye el área efectiva por donde esta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor [3].

En la tabla 2 se resumen los principales problemas causados por los armónicos en las instalaciones eléctricas.

Tabla 2. Efectos de los Armónicos.

EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS	CAUSA	CONSECUENCIA
Sobre los conductores	* Las intensidades armónicas provocan el aumento de la IRMS.	* Disparos intempestivos de las protecciones.
	* El efecto pelicular (efecto "skin") reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia	* Sobrecalentamiento de los conductores.
Sobre el conductor neutro	* Cuando existe una carga trifásica + neutro equilibrada que genera armónicos impares múltiplos de 3	* Cierre de los armónicos homopolares sobre el neutro que provoca calentamientos y sobreintensidades.
Sobre los transformadores	* Aumento de la IMRS	* Aumento de los calentamientos por efecto Joule en los devanados.
	* Las pérdidas por Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia	* Aumento de las pérdidas en el hierro.
Sobre los motores	* Análogas a las de los transformadores y generación de un campo adicional al principal	* Análogos a las de los transformadores más pérdidas de rendimiento.
Sobre los condensadores	* Disminución de la impedancia del condensador con el aumento de la frecuencia	* Envejecimiento prematuro, amplificación de los armónicos existentes.

Fuente: SCHNEIDER ELECTRIC, "COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA Y FILTRADO DE ARMÓNICOS," p. 10. [6]

Existen normas internacionales que limitan el porcentaje distorsión armónica total e individual permisibles en redes eléctricas de baja tensión con el fin de garantizar la calidad de energía que debe tener el usuario final[8].

1.1.6 Cálculo de Armónicos

El porcentaje de armónicos y la distorsión armónica total cuantifican la disturbancia armónica que puede existir en una red de suministro eléctrico. La tasa de armónicos expresa la magnitud de cada armónico con respecto a la fundamental. La distorsión total armónica (THD) cuantifica el efecto térmico de todos los armónicos y su fórmula para el cálculo está definida por las siguientes ecuaciones [9].

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} Vi^2}}{Vn} \text{x}100 \qquad (1.1)$$

$$Vi' = \left(\frac{Vi}{Vn}\right) x100 \qquad (1.2)$$

Donde:

Vi´= Factor de distorsión armónica individual de voltaje

THD = Factor de distorsión total por armónicos, expresado en porcentaje

Vi = Valor eficaz (rms) del voltaje armónico ¨i¨ (para i=2…40) expresado en voltios

Vn = Voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios

En caso del factor de potencia deberá llevar en consideración la distorsión de la forma de onda de la corriente, la cual se calcula con:

$$Fp = \frac{Seno\ \emptyset}{\sqrt{1 + THD^2}} \qquad (1.3)$$

Donde:

THD = Distorsión armónica total

$\emptyset =$ Desfase entre voltaje y corriente

Tanto el CONELEC como normas internacionales recomiendan no considerar los índices superiores al armónico No. 40 debido a su poca influencia en la tasa de distorsión armónica total. Por esta razón en la ecuación (1.1) la sumatoria está definida desde un valor de n = 2 hasta 40.

Los armónicos se comportan como fuentes de intensidad en paralelo y a diferentes frecuencias donde la suma de todas las intensidades es la corriente que alimenta la carga. La frecuencia fundamental es la única que produce potencia activa [3].

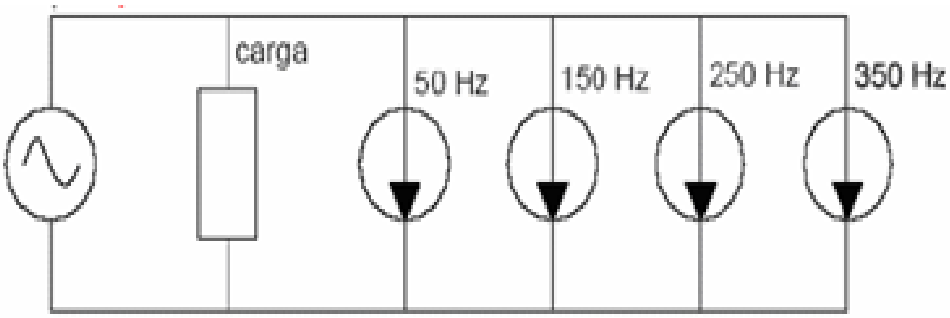


Figura 7. Efectos de armónicos ideales.

Fuente: H. Estigarribia, “ARMÓNICOS EN LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN,” pp. 7 [3]

Para entender de mejor manera el efecto que producen los armónicos en la forma de onda se presenta el siguiente ejemplo. En la Figura 8 se muestra el gráfico de una señal sinusoidal de voltaje sin la presencia de armónicos.

ORDEN ARMÓNICO	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ORDEN ARMÓNICO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ORDEN ARMÓNICO	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

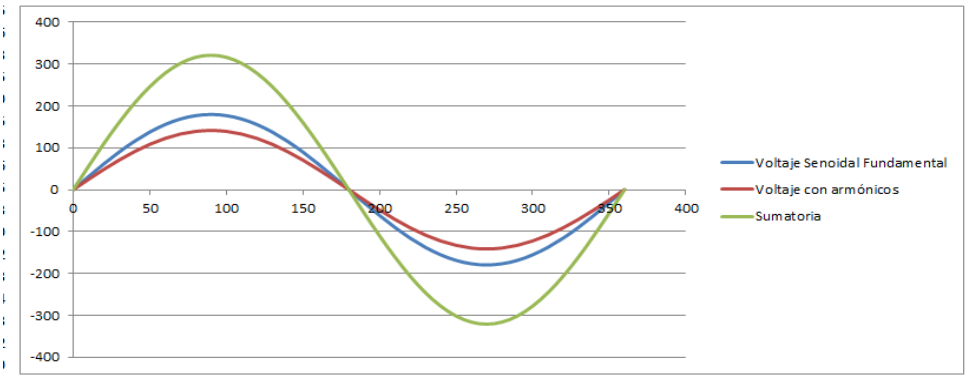


Figura 8. Onda sinusoidal de voltaje sin la presencia de armónicos.

Fuente: Autor

Se asume un valor en el tercer armónico y se puede observar cómo se distorsiona la onda y la sumatoria con respecto a la fundamental, tal como se muestra en la figura 9. Para el ejemplo el valor del voltaje es 127V por lo que el voltaje pico es $127*(2)^{1/2}$. Se toma un valor de 50V para el tercer armónico.

ORDEN ARMÓNICO	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VOLTAJE	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ORDEN ARMÓNICO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ORDEN ARMÓNICO	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

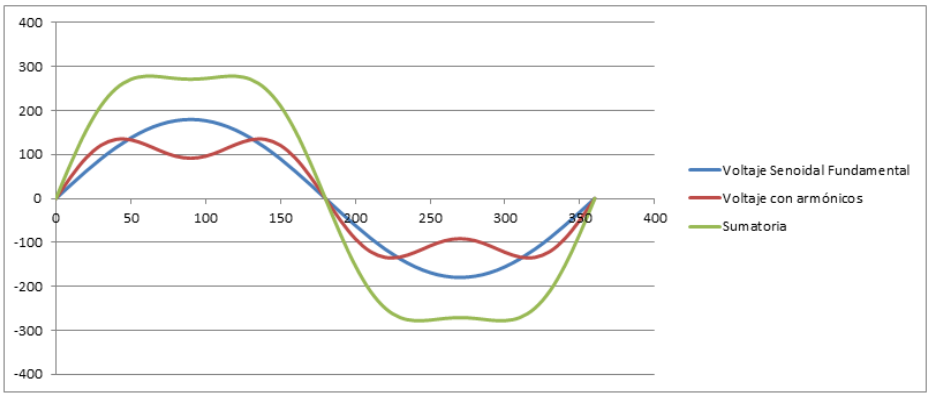


Figura 9. Onda sinusoidal de voltaje con la presencia del tercer armónico.

Fuente: Autor

Si se aumenta la cantidad de armónicos se comprueba cómo se distorsiona la onda con respecto a la fundamental, que es la señal original puramente sinusoidal.

ORDEN ARMÓNICO	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VOLTAJE	0	70	0	25	0	15	0	7	0	2	0	0.5	0
ORDEN ARMÓNICO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ORDEN ARMÓNICO	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

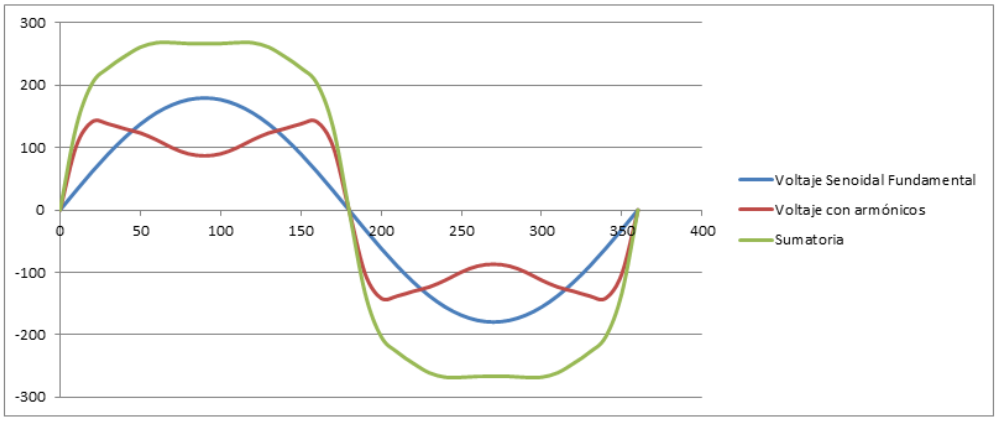


Figura 10. Onda sinusoidal de voltaje con la presencia del tercero, quinto, séptimo, noveno, onceavo y treceavo armónicos.
Fuente: Autor

Por último, aumentando considerablemente la cantidad de armónicos se visualiza la significativa distorsión de la onda con respecto a la fundamental.

ORDEN ARMÓNICO	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VOLTAJE	0	80	0	35	0	25	0	10	0	9	0	8	0
ORDEN ARMÓNICO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
VOLTAJE	5	0	3	0	2	0	2	0	1.5	0	1.3	0	1.1
ORDEN ARMÓNICO	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
VOLTAJE	0	0.7	0	0.5	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0

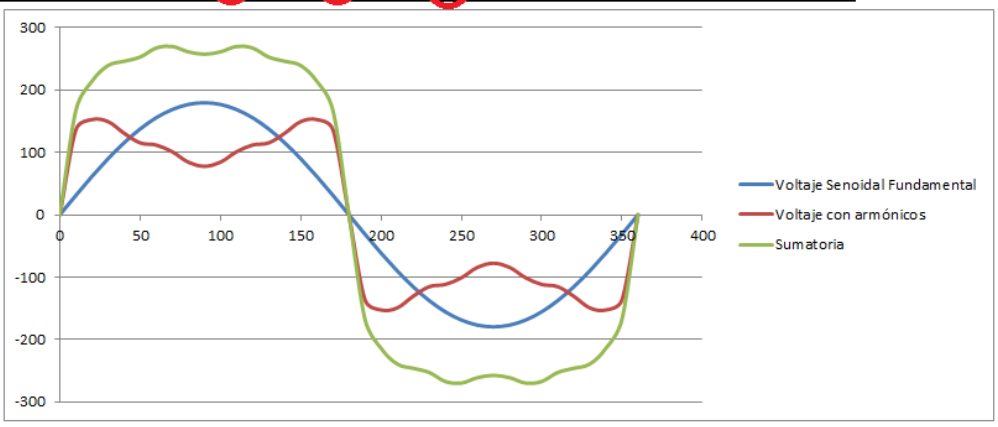


Figura 11. Onda sinusoidal de voltaje con la presencia de varios armónicos impares.
Fuente: Autor

1.1.7 Series de Fourier

El teorema de Fourier establece que toda función periódica de período 2T se puede descomponer en una suma de sinusoides armónicas de amplitud y fase adecuadas, cuya fundamental posea el período 2T[9]. Toda onda periódica no sinusoidal es la suma de ondas sinusoidales siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- La integral a lo largo de un período de la función debe ser finita
- La función debe poseer un número finito de discontinuidades en un período
- La función debe poseer un número finito de máximos y mínimos en un período

Cualquier función F(x) con un período 2T tiene su representación en una serie de Fourier mediante la siguiente expresión:

$$Y = F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(nx) + B_n \sin(nx)] \tag{1.4}$$

Donde:

$$Ao = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx \tag{1.4.1}$$

$$Bn = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \sin(nx)\, dx \tag{1.4.2}$$

$$An = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \cos(nx)\, dx \tag{1.4.3}$$

La serie de Fourier puede también ser expresada de la siguiente manera:

$$B_n \sin(nx) + A_n \cos(nx) = R_n \sin(nx + \varphi_n) \tag{1.5}$$

$$R_n = \sqrt{[A_n^2 + B_n^2]} \tag{1.5.1}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \tag{1.5.2}$$

Con el uso de estas ecuaciones se pueden encontrar los armónicos de las ondas más comunes[5]. La descomposición armónica de algunas de estas ondas se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 3. Armónicos de las ondas más comunes.

CLASE DE ONDA	DESCOMPOSICIÓNA RMÓNICA
Onda seno	$Y = a \sin\theta$
Rectificación de media onda	$Y = \frac{a}{\pi} + 0.5 \sin\theta - \frac{2}{1.3}\cos 2\theta - \frac{2}{3.5\pi}\cos 4\theta \ldots$
Rectificación de onda completa	$Y = \frac{2a}{\pi} + \frac{2}{1.3}\cos 2\theta - \frac{2}{3.5\pi}\cos 4\theta - \frac{2}{5.7}\cos 6\theta \ldots$
Rectificación de M fases	$Y = \frac{am}{\pi}\sin\frac{\pi\theta}{m} + \frac{2}{m^2-1}\cos m\theta - \frac{2}{4m^2-1}\cos 2\theta + \frac{2}{9m^2-1}\cos 3m\theta \ldots$
Onda triangular	$Y = \frac{8a}{\pi^2}[\sin\theta - \frac{1}{9}\sin 3\theta + \frac{1}{25}\sin 5\theta + \frac{1}{49}\sin 7\theta \ldots$
Onda rectangular	$Y = \frac{4a}{\pi}[\sin\theta - \frac{1}{3}\sin 3\theta + \frac{1}{5}\sin 5\theta + \frac{1}{7}\sin 7\theta \ldots$
Onda de tres niveles	$Y = \frac{3.4641a}{\pi}[\cos\theta - \frac{1}{5}\cos 5\theta + \frac{1}{7}\cos 7\theta + \frac{1}{11}\sin 11\theta \ldots$

Fuente: D. Chapman, “ARMÓNICOS CAUSAS Y EFECTOS.” P.12 [5]

Si f es una función o señal periódica y su período es 2T, la serie de Fourier puede expresarse como se indica:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left[a_n \cos\left(\frac{n\pi}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi}{T}t\right)\right] \tag{1.6}$$

Donde los coeficientes de Fourier toman los valores:

$$a_n = \frac{1}{T}\int_{-T}^{T} f(t)\cos\left(\frac{n\pi}{T}t\right)dt \tag{1.6.1}$$

$$b_n = \frac{1}{T}\int_{-T}^{T} f(t)\sin\left(\frac{n\pi}{T}t\right)dt \tag{1.6.2}$$

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{-T}^{T} f(t)dt \tag{1.6.3}$$

Lo básico en el análisis de un problema por medio de la serie de Fourier consiste en realizar los siguientes pasos:

a) Encontrar los coeficientes de Fourier

b) Decidir cuantos y cuales términos de la serie deben tomarse en cuenta para un problema particular

El proceso de formar la señal X(t) como la suma de una serie de senoides complejas se denomina síntesis. Se puede sintetizar una señal a partir de sus componentes, las senoides complejas individuales [10].

Para encontrar los coeficientes de Fourier debe determinarse que tipo de simetría tiene la función y luego se aplican las ecuaciones correspondientes. Según el análisis de simetría de la función se puede concluir:

a) Si la función no tiene simetría conocida la serie de Fourier podría contener todos los términos armónicos, incluyendo los de n par e impar.

b) Si la función es par la serie de Fourier contendrá solo términos en coseno más el valor medio, que puede ser igual o distinto de cero.

c) Si la función es impar la serie de Fourier contendrá solo términos en seno.

d) Si la función tiene simetría de media onda contendrá solo armónicas impares.

e) Si la función es par y además tiene simetría de media onda, la serie de Fourier contendrá solo términos en coseno para n impar.

f) Si la función es impar y además tiene simetría de media onda, la serie de Fourier contendrá solo términos en seno para n impar

Cuando un circuito lineal y bilateral se excita con varias fuentes de voltaje de diferente frecuencia, es posible efectuar su análisis empleando el principio de superposición. Bajo tales condiciones, el análisis de redes eléctricas mediante la serie de Fourier, consiste en la aplicación de conocimientos básicos sobre el análisis de circuitos eléctricos.

En el análisis debe tomarse en cuenta que los valores de las impedancias (o admitancias), que son los elementos que determinan la respuesta de una red, estarán en función de la frecuencia de la armónica de turno [9].

1.2 Lámparas de inducción

El funcionamiento de las lámparas de inducción es similar al de las lámparas fluorescentes con la diferencia que utilizan bobinas para inducir un campo magnético y excitar los gases en el interior del tubo que chocan con la amalgama de mercurio para generar luz ultravioleta que se convierte en luz visible al pasar por la capa de polvos fluorescentes alojados en la pared interior del tubo [2][11]. Este tipo de lámparas funciona a distinta frecuencia de la red llegando a ser desde algunos centenares de miles de kHz hasta unos cuantos MHz. Esta frecuencia es suministrada por un generador de alta frecuencia.

1.2.1 Principio de funcionamiento

El concepto de funcionamiento de las lámparas de inducción no es nuevo ya que se basa en la descarga en un gas, igual que en las lámparas fluorescentes o de descarga de vapor de mercurio, pero en este caso el gas se excita mediante la inducción de un campo electromagnético. Una característica fundamental de este tipo de lámparas es que carecen de electrodos para inducir corriente en el interior del tubo debido a que esta tarea la realiza justamente el campo magnético generado por las bobinas [12].

Aunque existen un sinnúmero de lámparas de inducción operando a distintas frecuencias, se las puede clasificar en las de baja frecuencia (también conocidas como de inducción externa las cuales trabajan a una frecuencia cercana a los 250 KHz) y las de alta frecuencia (también llamadas de inducción interna las cuales operan a una frecuencia de alrededor de 2,5 MHz) [2]. Las lámparas de inductor externo tienen electroimanes de ferrita a los lados (bobinas) mientras que las lámparas de inductor interno poseen la bobina en su interior.

La lámpara de inducción requiere de un generador de alta frecuencia para su correcta operación. Su función es generar una señal de tensión de alta frecuencia con el fin de crear un campo magnético a través de las bobinas y también eliminar el efecto estroboscópico, el cual es uno de los principales problemas que se presentan con el uso de balastros electromagnéticos que funcionan a la frecuencia de la red. Esta energía, proveniente del generador, al conectarla con una de las bobinas, crea un campo electromagnético muy fuerte que se desplaza a través del vidrio y excita los átomos de mercurio en el interior. El desplazamiento de los átomos de mercurio emite luz UV (luz ultravioleta) y al igual que en los tubos fluorescentes la luz UV se convierte en luz visible gracias al recubrimiento de fósforo en las paredes del tubo [13].

1.2.2. Lámpara de inducción de baja frecuencia

Un balastro electrónico envía la energía hacia la bobina que está envuelta al rededor del núcleo de ferrita, creando así una poderosa magneto. Esta bobina produce un campo magnético muy fuerte en el interior del tubo e induce una corriente en el gas (generalmente argón u otro gas noble contenido en el tubo) de forma que este se ioniza, es decir, los átomos pierden electrones que a su vez circulan libremente en su interior, colisionando con otros átomos.

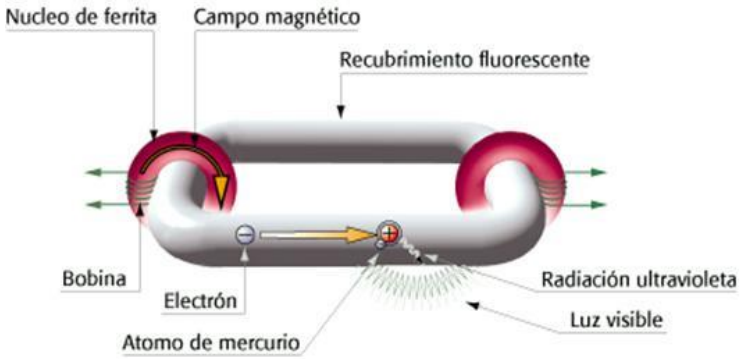


Figura 12. Esquema de una lámpara de inducción magnética de baja frecuencia.

Fuente: Axoled, “LA LÁMPARA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA Y LA VISIÓN HUMANA.” P. 15 [13]

El electrón que ha recibido la energía pasa a ocupar otro orbital de mayor energía pero como este estado es muy inestable vuelve rápidamente a la situación inicial. Al hacerlo este electrón libera la energía extra en forma de radiación electromagnética, principalmente ultravioleta. Estos átomos son de mercurio y son proporcionados por

una amalgama de mercurio alojada en el interior. La radiación ultravioleta se convierte en luz visible al pasar por la capa de fósforo que tiene el tubo en sus paredes interiores. El sistema puede ser considerado como una especie de transformador, donde el inductor es la bobina primaria mientras que los átomos de mercurio dentro del tubo forman una única espira de la bobina secundaria, por lo tanto la energía eléctrica es acoplada a través de la pared de vidrio de la lámpara para excitar los átomos de mercurio. Su frecuencia de trabajo es de alrededor de 250 KHz [14].

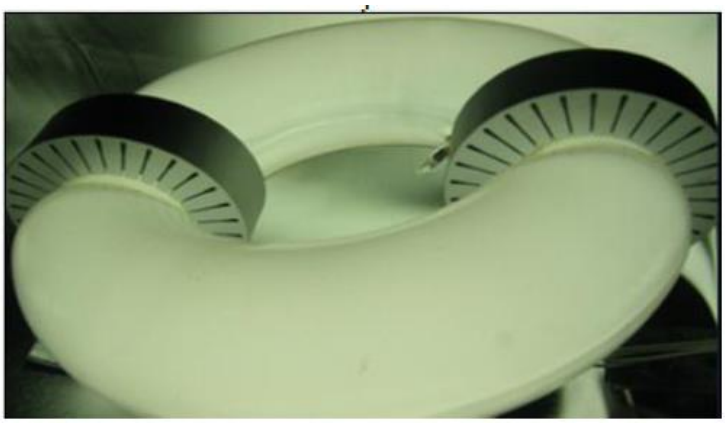


Figura 13. Fotografía de una Lámpara de inducción magnética.
Fuente: http://www.alternativaenergetica.com.mx/luminariasolar/induccion-magnetica-alumbrado-publico-solar.html

1.2.3. Lámpara de inducción de alta frecuencia

El principio de funcionamiento es similar al de la lámpara de inducción de baja frecuencia con la diferencia que lleva el inductor en el interior del bulbo. Este bulbo, que tiene forma de foco incandescente pero de un tamaño mucho mayor, tiene un tubo con una cavidad central el cual es cubierto con fósforo interiormente y luego se llena con gas inerte y se coloca una amalgama de mercurio. La bobina de inducción es enrollada en un mango de ferrita el cual se inserta en la cavidad central del tubo. El inductor se excita por medio de energía a alta frecuencia producida por un balastro electrónico externo o también conocido como generador de alta frecuencia, causando que un campo magnético excite los átomos de mercurio, los cuales emiten luz UV que se convierte en luz visible por medio de la capa de fósforo alojada en las paredes del bulbo [15].

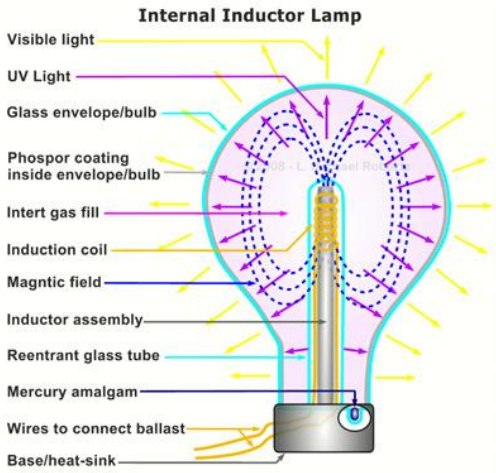


Figura 14. Esquema de una lámpara de inducción magnética de alta frecuencia.

Fuente: W. L. Store, "LÁMPARAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA."p.2 [15]

Su frecuencia de trabajo es de alrededor de 2.6 MHz.

1.2.4 Características de las lámparas de inducción

Entre las principales características que presentan las lámparas de inducción tanto de baja como de alta frecuencia son:

- Al no tener electrodos presentan menos fallas que otras lámparas con tecnologías convencionales [15]. Esto se tiene ya que:

- No les afecta la vibración. Aunque exista vibración las lámparas no sufren desperfectos porque no tienen electrodos que puedan romperse y dejarlas inutilizables.
- Mayor tiempo de vida útil (de 60000 a 100000 horas). No tienen el problema del desgaste de los electrodos lo cual es una de las principales causas para que lámparas que si usan ese tipo de tecnología disminuyan significativamente su tiempo de vida útil.

- Mínimo mantenimiento. El principal mantenimiento que requieren es la limpieza de la cubierta para retirar el polvo que podría alojarse dependiendo del sitio de la instalación de las luminarias.

- Baja temperatura de funcionamiento (hasta 110°C) con lo que se disminuye el consumo por climatización en las diferentes áreas donde se instalen (por ejemplo en invernaderos donde se cultivan flores se puede lograr que la lámpara esté más cerca del

producto sin quemarlo y logrando así acelerar su crecimiento) y además se disminuyen las pérdidas por efecto del calor generado por la propia lámpara [16]. Un alto porcentaje de energía es convertido en luz visible mientras que un pequeño porcentaje se pierde en forma de calor.

- Es dimerizable con lo que se logra tener un control de iluminación permitiendo su uso en varias áreas.

- No presentan efecto estroboscópico debido a la alta frecuencia con la que trabajan para mantener la descarga y por lo tanto la emisión de luz visible.

- Son de fácil reciclaje ya que al tener mercurio sólido no contaminan en la misma proporción que las lámparas que tienen mercurio líquido. Esta contaminación ocurre cuando se rompen ya que estas sustancias tóxicas se liberan al ambiente y afectan al medio ambiente principalmente cuando se filtran a la tierra.

- Alto factor de potencia, lo que permite tener un mejor rendimiento de las lámparas y mejora la calidad de energía de la instalación en general.

- Una vez que se energizan el tiempo de encendido es bastante corto y si por alguna razón el suministro de energía eléctrica es interrumpido lo máximo que se puede percibir es un ligero parpadeo para luego reencenderse inmediatamente sin necesidad de enfriarse. En el momento del encendido tiene más del 80% de su luminancia total y alcanza el 100% en poco tiempo.

- Al tener un generador de alta frecuencia se generan armónicos los cuales son diezmados por los filtros que contiene y se debe verificar que estén dentro de los límites permitidos con el fin de proteger toda la instalación y evitar las pérdidas y efectos sobre la red de distribución.

- Buen mantenimiento de la luminancia es decir mínima depreciación de lúmenes: menor al 20% una vez que ha transcurrido el 40% de la vida media.

- Temperatura del color de 2700 a 6500 °K y el CRI (índice de crecimiento del color) mayor a 85 con una eficacia promedio de 85 lm/W. Esto permite tener una luz más brillante y más natural.

- Bajo consumo energético en el balastro (alrededor del 2%) [17]. En otras tecnologías se tiene un consumo del balastro cercano al 20% de la potencia de la lámpara.

- Emisión de ondas electromagnéticas que puede afectar la señal de comunicaciones, circuitos de televisión, problemas de salud a las personas que están expuestas, por lo que deben ser controladas para que no exceda los límites permitidos.

- El tamaño de las lámparas es mayor a otras del tipo fluorescente o tipo led de la misma potencia. Esto se debe a la necesidad de este tipo de lámparas de contener las bobinas que permiten su funcionamiento.

- El costo de este tipo de luminarias es mayor que las de tipo fluorescente de la misma potencia e incluso mayor que algunas de tipo led debido a la masificación del uso de esta tecnología en el país.

1.3 MATLAB

1.3.1 Introducción

Es un software que contiene importantes funciones matemáticas convirtiéndolo así en una herramienta potente para el cálculo ya que permite realizar complejos cálculos que si se tuvieran que hacer de forma manual tomarían demasiado tiempo y correría el potencial riesgo de cometer errores significativos. Puede leer o generar datos numéricos y almacenar o exhibir resultados gráficos del análisis de estos datos.

Además contiene herramientas gráficas que permiten visualizar los resultados de una manera bastante sencilla y muy confiable.

En la pantalla principal se tienen las siguientes ventanas:

- Command Window: es la ventana de comandos. En esta ventana se escribe la programación.
- Workspace: es la ventana del área de trabajo. Informa sobre las variables definidas en la ventana de comandos
- Command History: historia de comandos. Se registran los comandos escritos en la ventana de comandos.

- Current Folder: directorio o carpeta actual. Lista todos los archivos en una carpeta llamada directorio actual. Allí es donde por defecto se guarda la información.

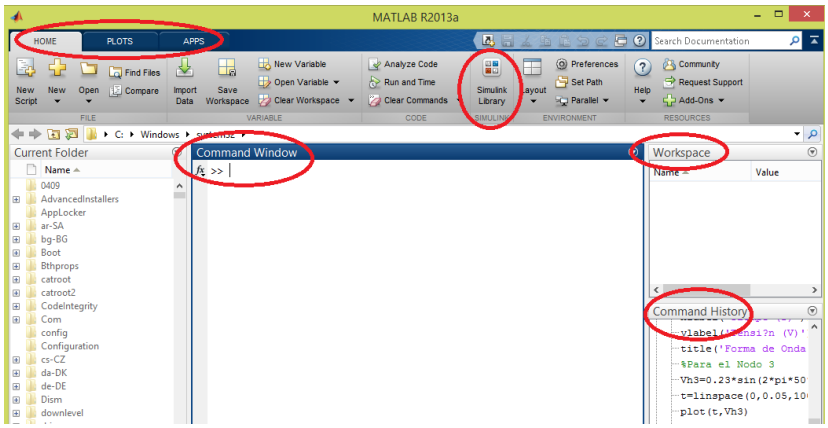
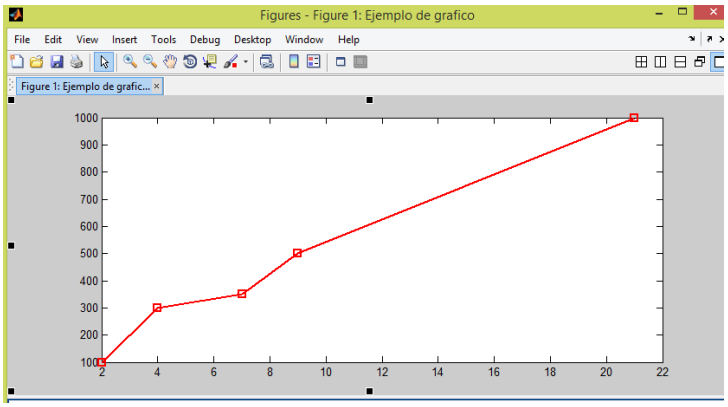


Figura 15. Print de la pantalla principal de MATLAB.

Fuente: Autor

Existen otras ventanas como documentos, gráficas y edición. Después del ingreso de cada comando se debe colocar punto y coma para indicarle al programa que la orden está lista pero que todavía no ejecute el comando o la acción que se ha indicado. Después de terminar toda la programación en la ventana de comandos se pulsa enter y el programa realiza las operaciones. Una ventana gráfica aparece automáticamente después de usar el comando PLOT siempre que no existan errores en la programación.



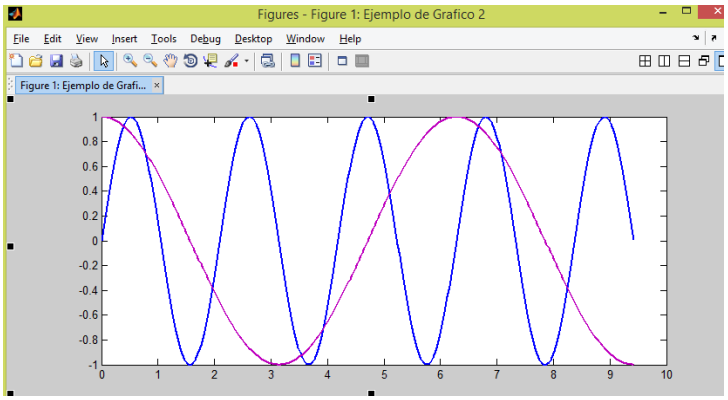


Figura 16. Ejemplos de gráficos en MATLAB.

Fuente: Autor

Los caracteres básicos que se requieren para la programación en MATLAB se describen en la tabla 4.

Tabla 4. Principales caracteres especiales, comandos y funciones de MATLAB.

Carácter, Comando o Función	Descripción
[ ]	Forma matrices
( )	Se usa en enunciados para agrupar operaciones
,	Separa subíndices o elementos de matriz
;	Separa filas en una definición de matriz
%	Indica un comentario en un archivo-m
clc	Limpia la ventana de comandos
clear	Limpia el área de trabajo
help	Solicita la utilidad de ayuda
linspace	Función vector linealmente espaciado
pi	Aproximación numérica al valor de π
-, +, *, /	Resta, Suma, Multiplicación, División
.*	Multiplicación de arreglo
./	División de arreglo
.^	Exponenciación de arreglo

Fuente: Moore Holly, MATLAB PARA INGENIEROS, Primera edición, Pearson Educación, México, 2007, p.49

1.3.2 Funciones matemáticas de MATLAB

El lenguaje de programación es similar a C, C++ y Fortran, por lo que muchas de las funciones se escriben igual que en estos lenguajes de programación. Una de las ventajas de MATLAB es que los argumentos de la función pueden ser escalares o matrices [18].

Entre las funciones matemáticas más comunes que se pueden encontrar en el software MATLAB se puede citar las indicadas en la siguiente tabla.

Tabla 5. Funciones matemáticas comunes de MATLAB.

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
abs(x)	Encuentra el valor absoluto de x
sqrt(x)	Encuentra la raíz cuadrada de x
nthroot(x,n)	Encuentra la n-ésima raíz real de x. No regesa resultados complejos
sign(x)	Regresa un valor de -1 si x<0, 0 si x=0 y +1 si x>0
rem(x/y)	Calcula el residuo de x/y
exp(x)	Calcula el valor de e^x; e es la base de los logaritmos naturales
log(x)	Calcula ln(x), el logaritmo natural de x (a la base e)
log10(x)	Calcula log10(x), el logaritmo común de x (a la base 10)

Fuente: Moore Holly, MATLAB PARA INGENIEROS, Primera edición, Pearson Educación, México, 2007, p.60

MATLAB cuenta con un conjunto muy importante de funciones trigonométricas. La mayoría de estas funciones suponen que los ángulos se expresan en radianes. Para realizar la conversión de radianes a grados o viceversa se debe tener en cuenta que π radianes = 180 grados. Se debe tener especial cuidado en la sintaxis que cada uno de los comandos y funciones posee. Para acceder a la ayuda predeterminada que está instalada en el programa se debe presionar la tecla F1.

Tabla 6. Funciones trigonométricas comunes de MATLAB.

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
sin(x)	Encuentra el seno de x; x en radianes
cos(x)	Encuentra el coseno de x; x en radianes
tan(x)	Encuentra la tangente de x; x en radianes
asin(x)	Encuentra el seno inverso de x; -1<x<1
sinh(x)	Encuentra el seno hiperbólico de x; x en radianes
asinh(x)	Encuentra el seno hiperbólico inverso de x
sind(x)	Encuentra el seno de x cuando x está en grados
asind(x)	Encuentra el seno inverso de x cuando x está en grados

Fuente: Moore Holly, MATLAB PARA INGENIEROS, Primera edición, Pearson Educación, México, 2007, p.66

El software MATLAB tiene varias funciones matemáticas que pueden simplificar los cálculos y a la vez contiene un porcentaje de error muy bajo lo que lo convierte en una poderosa herramienta matemática.

1.3.3 Funciones gráficas

Un conjunto de pares ordenados se usa para identificar puntos sobre una gráfica bidimensional. Una vez definidos los valores de x e y se puede utilizar un solo comando

para realizar la gráfica. Con MATLAB se pueden graficar una o múltiples curvas. Se dispone de cinco funciones básicas para crear gráficos en dos dimensiones [18].

- plot() crea un grafico a partir de vectores y/o columnas de matrices con escalas lineales sobre ambos ejes.
- plotyy() dibuja dos funciones con dos escalas diferentes para las ordenadas, una a la derecha y otra a la izquierda de la figura.
- loglog() idem con escala logarítmica en ambos ejes.
- semilogx() idem con escala lineal en el eje de ordenadas y logarítmica en el eje de abscisas.
- semilogy() idem con escala lineal en el eje de abscisas y logarítmica en el eje de ordenadas.

Existen además otras funciones orientadas a añadir títulos al gráfico, a cada uno de los ejes, a dibujar una cuadrícula auxiliar, a introducir texto, algunas de las cuales se resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Funciones gráficas comunes de MATLAB.

COMANDO	DESCRIPCIÓN
plot	Crea una gráfica x-y
title	Agrega un título a la gráfica
xlabel	Agrega una etiqueta al eje x
ylabel	Agrega una etiqueta al eje y
grid	Agrega una retícula gráfica
pause	Detiene la ejecución del programa, permitiendo al usuario ver la gráfica
figure	Determina cual figura se usará para la gráfica actual
hold	Congela la gráfica actual de modo que se puede recubrir una gráfica adicional

Fuente: Moore Holly, MATLAB PARA INGENIEROS, Primera edición, Pearson Educación, México, 2007, p.136

Se puede graficar distintos tipos de curvas en dos o tres dimensiones lo que permite visualizar de mejor manera la solución encontrada [19]. A manera de ejemplo se ilustra el siguiente gráfico realizado en base a ecuaciones matemáticas introducidas y resueltas en MATLAB.

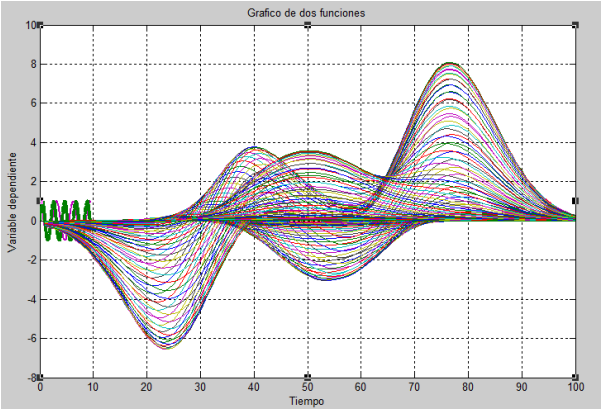


Figura 17. Ejemplo de gráfica en MATLAB.

Fuente: Autor

1.3.4 SIMULINK

Es una herramienta de MATLAB a la cual se accede una vez que se ejecuta el programa. Se pueden desarrollar los modelos de una forma gráfica a manera de bloques los cuales pueden ser editados y unidos para formar las funciones que se requieran modelar.

Una variedad de bloques de funciones y plantillas están agrupados en diferentes librerías. Cuando se inicia una nueva simulación, para copiar bloques del bloque de librerías es más simple si se selecciona primero la plantilla deseada en el bloque de librería respectivo y luego se arrastra al archivo de SIMULINK. Muchas de las plantillas tienen parámetros internos para los cuales se debe especificar su valor antes de utilizarlos en la simulación [18].

Para ajustar los parámetros, se selecciona la plantilla, al hacerlo aparecerá un cuadro en el cual se deben insertar los parámetros. Puede ingresarse la información de los parámetros como constantes o como variables definidas. Las variables definidas pueden se inicializadas en el workspace de MATLAB escribiéndolas directamente, por medio de un archivo de datos ejecutando un mfile, que ha sido escrito con anterioridad para realizar una serie de tareas como ajustar las condiciones apropiadas del sistema.

Después de construir el modelo de SIMULINK de un sistema y antes de ejecutar la simulación se debe seleccionar un método de integración y determinar las condiciones de ejecución. En el módulo solver, en la opción Solver options, están disponibles los

diferentes solucionadores de ODEs. Entre los tipos de resolución se mencionan los siguientes [19]:

- Ode45. Este método está basado en Dormand-Prince, el cual es un método explícito de un paso de Runge-Kutta.
- Ode23. Este método está basado en Bogacki-Shampine, el cual también es un método explícito de un paso de Runge-Kutta pero más eficiente que ode45 cuando las tolerancias son amplias.
- Ode113. Este es un método multipaso de orden variable de Adams-Bashforth-Moulton. Es recomendado cuando la evaluación de la función toma demasiado tiempo y las tolerancias son estrechas.
- Ode23s. Este método es de un paso basado en la fórmula de Rosenbrock de segundo orden. Tiene una propiedad de estabilidad de tipo A.

1.3.5 Ejemplo de resolución de circuito con MATLAB

Si se tiene un circuito con una resistencia, una inductancia y un capacitor en serie lo que se realiza primero es la obtención de las ecuaciones matemáticas.

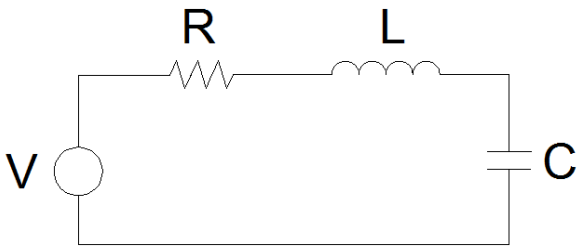


Figura 18. Circuito RLC serie.

Fuente: Autor

La ecuación queda definida de la siguiente manera:

$$V_s(t) = \frac{1}{C}\int_{to}^{t} i(x)dx + V_c(to) + L\frac{di}{dt} \tag{1.7}$$

Al derivar la ecuación se tiene:

$$\frac{Vd_s}{dt} = L\frac{d^2i}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{i}{c} \tag{1.8}$$

Con esta ecuación de segundo orden y asumiendo valores de L=1H, R=3Ω y C=0.5F, para el ejemplo, se utiliza la función dsolve de MATLAB para obtener la gráfica y la solución de la ecuación.

```
I=dsolve('D2x+3*Dx+2*x=0','x(0)=0','Dx(0)=1','t')
I =-exp(-2*t)+exp(-t)
i=-exp(-2*t)+exp(-t);
t=linspace(0,10,300);
plot(t,i), title('Respuesta de circuito RLC serie')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
%Graficas de la respuesta en frecuencia y diagrama de Bode
A=([1,3,2]);
freqs(A,1)
bode(A,1)
```

Figura 19. Programación en MATLAB de la corriente del Circuito RLC serie.

Fuente: Autor

El resultado aparece en la ventana Command Window a manera de matrices como se indica en la siguiente figura:

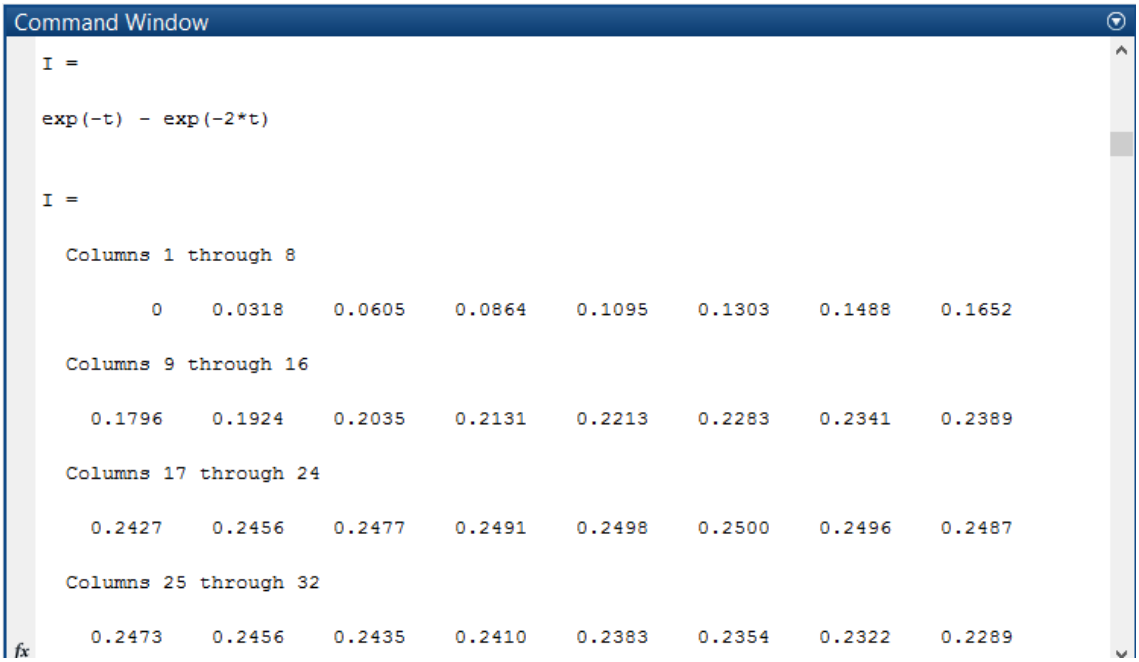


Figura 20. Resolución de la corriente del Circuito RLC serie en MATLAB.

Fuente: Autor

La respuesta gráfica es:

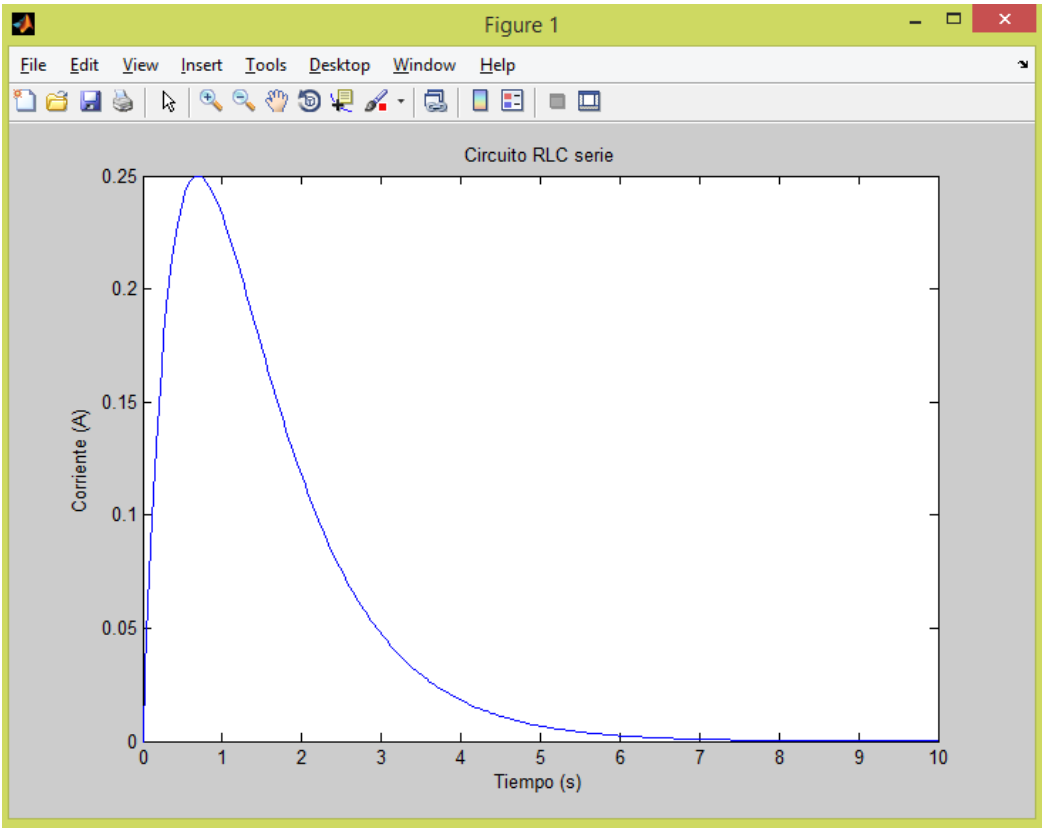


Figura 21. Resolución gráfica de la corriente del Circuito RLC serie en MATLAB.

Fuente: Autor

Se puede obtener la ecuación característica substituyendo s2 en lugar de la segunda derivada y s en lugar de la primera derivada, es decir: s2 + 3s + 2 = 0.

Esta ecuación se puede emplear para encontrar la respuesta en frecuencia del circuito, o lo que es lo mismo el diagrama de Bode de dicha ecuación.

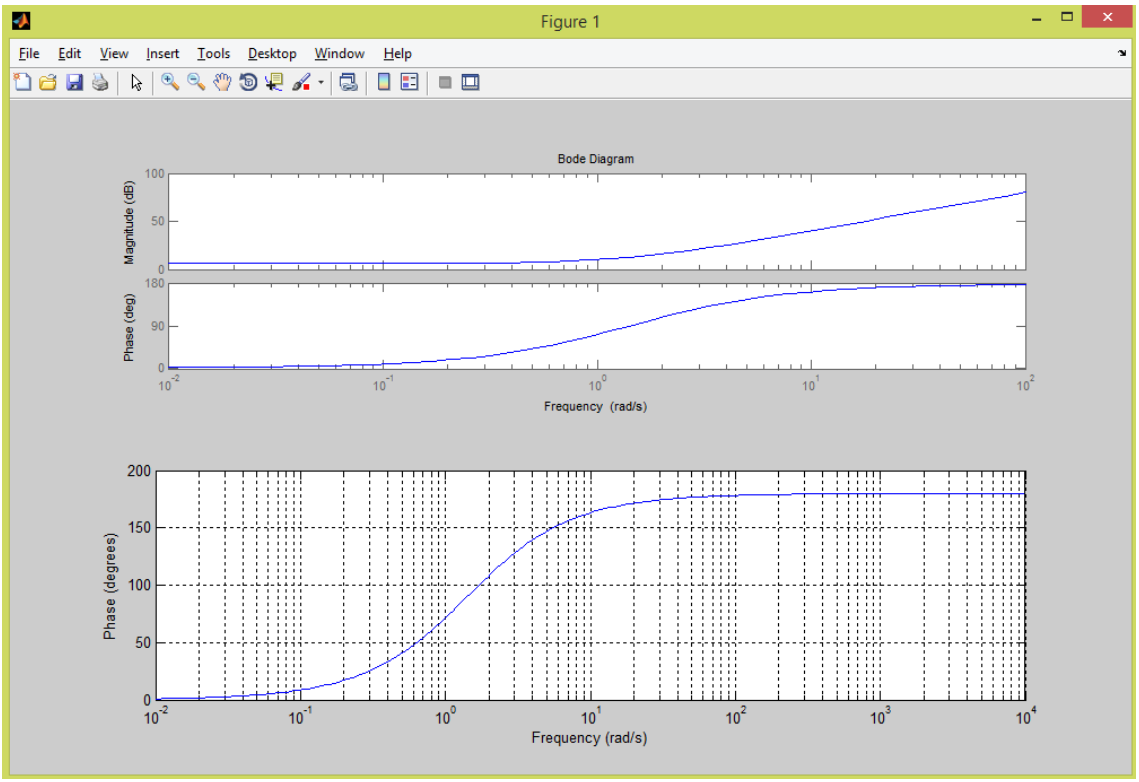


Figura 22. Diagrama de Bode de la corriente del Circuito RLC serie en MATLAB.

Fuente: Autor

CAPÍTULO II

ESTUDIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Este capítulo tratará sobre el planteamiento del problema con respecto a la calidad de energía que se tiene actualmente en las redes de distribución eléctrica, el análisis de la demanda de energía eléctrica por grupo de usuarios, los problemas que se presentan en las redes debido a la presencia de armónicos, los tipos de lámparas de inducción disponibles en el mercado nacional de acuerdo a su aplicación y la normativa vigente que indica los límites de distorsión armónica total y por cada armónico que se permiten en las redes eléctricas.

2.1 Planteamiento del problema

Hoy en día se cuenta con un sin número de aparatos domésticos que contienen en su interior circuitería electrónica con osciladores, inductancias, capacitores, transistores, generadores de alta frecuencia y demás elementos los cuales, debido a su naturaleza eléctrica, inyectan armónicos a la red de distribución y a la instalación interior de los usuarios.

El gobierno nacional impulsa proyectos de eficiencia energética como el cambio de focos incandescentes por lámparas más eficientes que permitan tener un menor consumo de energía eléctrica y mejores niveles de iluminación. Estas lámparas poseen circuitos electrónicos y se deben tener en cuenta los efectos que se pueden producir en las redes eléctricas al masificar su uso.

Es entonces necesario realizar un análisis que permita proyectar el grado de afectación que pueda provocar el uso de sistemas de inducción para iluminación en las redes eléctricas de distribución para evitar que el porcentaje de disorsión armónica total que se pueda generar, no sobrepase el límite establecido por normas nacionales e internacionales vigentes.

La energía eléctrica demandada por el sector residencial tiene un alto porcentaje de la demanda total de energía eléctrica en el Ecuador. Según datos del CONELEC la demanda anual por grupo de consumo para el año 2009 la demanda residencial tiene el

porcentaje más alto de toda la demanda con un 35% seguida por la demanda industrial, la comercial, otro tipo de demandas y por último el alumbrado público. En la figura 23 se indican estos porcentajes.

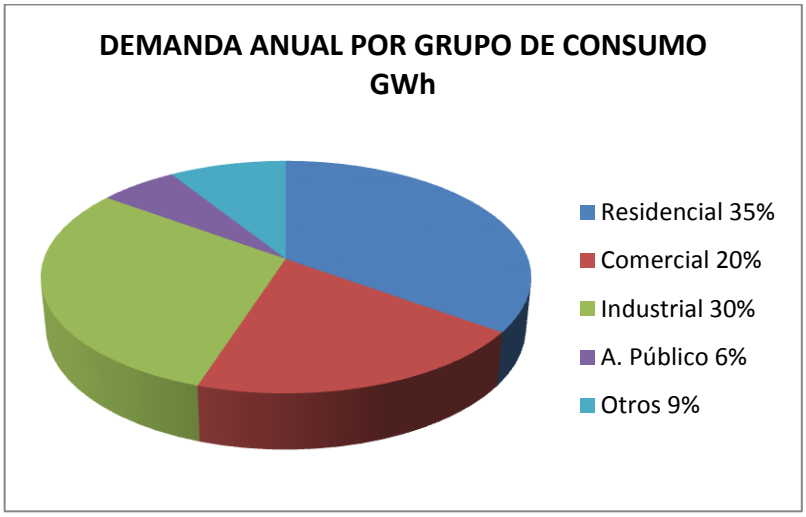


Figura 23. Demanda anual por grupo de consumo.

Fuente: http://www.conelec.gob.ec (2009). Elaborado por: Autor

El histórico registrado desde 1998 y la proyección del consumo de energía eléctrica residencial hasta 2020 en el Sistema Nacional Interconectado se muestra en la figura 24 en donde se puede ver el crecimiento sostenido del consumo de energía eléctrica residencial en el país.

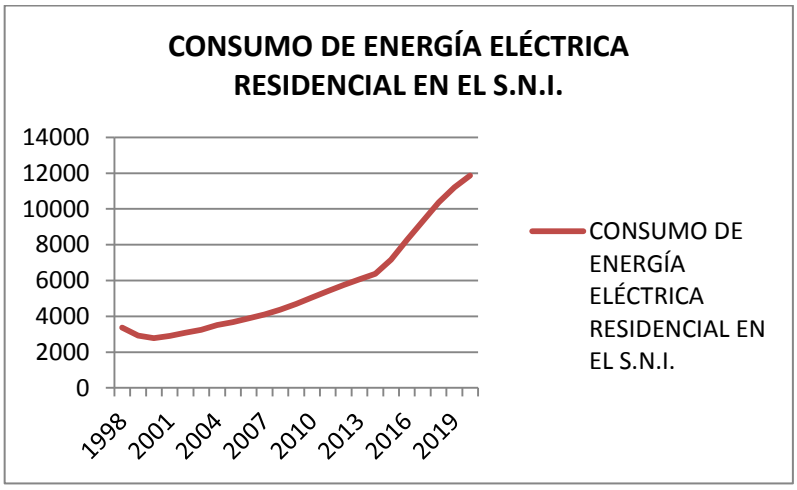


Figura 24. Consumo de energía eléctrica residencial en el S.N.I.

Fuente: http://www.conelec.gob.ec (2009). Elaborado por: Autor

De los datos registrados y proyectados en las gráficas anteriores (Figura 23, Figura 24) se puede verificar la gran importancia que la demanda de energía eléctrica a nivel residencial representa en el país y su proyección para los próximos años.

Cabe indicar que un factor influyente en este incremento es el uso de cocinas de inducción debido al cambio de matriz energética implementado por el gobierno nacional.

2.2 Problemas en redes eléctricas residenciales asociadas a armónicos

La presencia de armónicos en las redes afecta principalmente a los conductores provocando calentamiento, mayores pérdidas por el efecto piel y disparo intempestivo de protecciones. Además afecta a los transformadores de distribución aumentando el calentamiento en sus devanados y las pérdidas en el hierro [20].

La potencia aparente, medida en KVA, está formada por la potencia activa, medida en kw, y la potencia reactiva, medida en kvar. La potencia activa es la potencia que se transforma en trabajo, y la potencia reactiva está asociada tradicionalmente con la energía almacenada en el campo magnético.

La potencia reactiva juega un papel importante en la operación de los sistemas eléctricos de potencia, los cuales por la naturaleza inductiva de muchos equipos eléctricos (motores, transformadores), son consumidores significativos de potencia reactiva. El flujo de potencia reactiva no es medido por el contador de energía y aumenta las pérdidas [21]. Por este motivo las empresas eléctricas recurren a penalizaciones o recargos cuando el cliente tiene en sus instalaciones un bajo factor de potencia.

A parte del aumento de las pérdidas y exigir mayor capacidad de conducción a los alimentadores, la potencia reactiva genera elevadas variaciones de voltaje por lo que una opción viable es la instalación de bancos de capacitores para compensar el factor de potencia y tratar de elevarlo a un valor cercano a la unidad [22].

Sin embargo, cargas no lineales, electrónicas, equipos eléctricos como hornos de inducción, drivers y demás, son generadores de armónicos los cuales incrementan los valores RMS de la corriente, y por lo tanto incrementan los KVA consumidos lo que conlleva a reducir el factor de potencia. Esto indica que los armónicos no

necesariamente aumentan los kvar consumidos por lo que el uso de bancos de capacitores, para estos casos particulares, no es suficiente para corregir el factor de potencia a valores cercanos a la unidad. Las dos componentes ortogonales de la potencia aparente no proporcionan la información necesaria para mejorar la compensación del factor de potencia cuando están presentes armónicos en los sistemas eléctricos.

Con la intensificación del uso de cargas no lineales en sistemas eléctricos residenciales los métodos de compensación reactiva son más complejos y se basan en el modelamiento y análisis de los armónicos [23].

2.3 Análisis del mercado de lámparas de inducción en el Ecuador

Son pocas las empresas que distribuyen luminarias de inducción para el uso residencial, teniendo mayor demanda las de uso industrial y para alumbrado público.

La demanda de lámparas de inducción para uso residencial en el país es muy baja debido a su poca difusión, alto costo y la competencia con las lámparas fluorescentes compactas y las de tecnología led puesto que estas han ingresado con mayor fuerza al mercado nacional, teniendo a disposición gran variedad de marcas y precios.

Aunque el tiempo de vida útil de las lámparas de inducción es de seis a diez veces mayor que las fluorescentes compactas, su precio en la actualidad es casi doce veces mayor lo que las hace poco atractivas para el usuario promedio. Además se deben considerar los impuestos vigentes lo que encarece aún más el precio de este tipo de luminarias.

Un factor que puede influir y hasta puede ser determinante para que el uso de las lámparas de inducción sea masivo es su considerable tamaño, además que la tendencia a nivel nacional es migrar a las lámparas con tecnología led que ofrecen parecidos tiempos de vida útil y un mejor rendimiento lumínico.

Algunas lámparas de inducción que se tienen disponibles en el mercado son:

- Lámpara de inducción tipo cobra head que se utilizan para iluminación de autopistas, carreteras, parqueaderos y alumbrado público en general.

Figura 25. Lámparas de inducción tipo cobra head.

Fuente http://ceimsamty.com/pdf/catalogo.pdf *[Accessed: 10-Dic-2014]*

Están disponibles en potencias de 40, 55, 80 W.

- Lámpara de inducción "saturno" (al igual que la anterior es un modelo de una marca registrada) utilizadas en carreteras, aeropuertos, parqueaderos, puentes y alumbrado público en general.

Figura 26. Lámparas de inducción tipo Saturno.

Fuente http://www.lvd.cc/es/market/fixture_detail *[Accessed: 10-Dic-2014]*

Están disponibles en potencias de 40, 45, 86 W.

- Otras lámparas para iluminación de carreteras, parqueaderos y alumbrado público en general se resumen en la figura 27.

Figura 27. Lámparas de inducción para alumbrado público.

Fuente http://www.lvd.cc/es/market *[Accessed: 10-Dic-2014]*

- Lámparas de inducción para iluminación de túneles.

Figura 28. Lámparas de inducción para túneles.

Fuente http://www.lvd.cc/es/market *[Accessed: 10-Dic-2014]*

- Lámparas de inducción tipo colgantes para interiores

Figura 29. Lámparas de inducción colgantes.

Fuente http://www.lvd.cc/es/market *[Accessed: 10-Dic-2014]*

- Lámparas de inducción tipo reflector

Figura 30. Lámparas de inducción tipo reflector.

Fuente http://www.lvd.cc/es/market *[Accessed: 10-Dic-2014]*

- Lámpara de inducción para techo

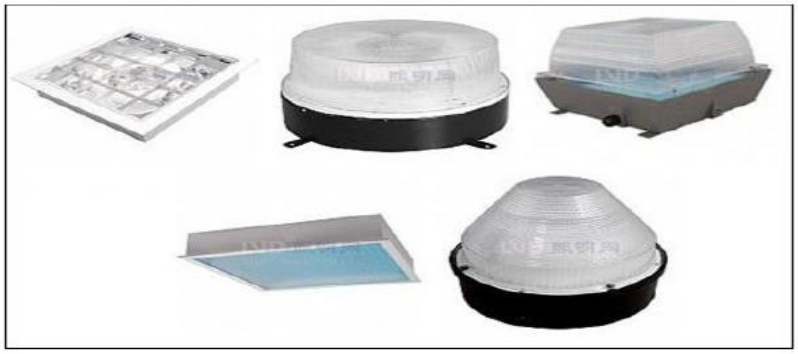


Figura 31. Lámparas de inducción para techo.

Fuente http://www.lvd.cc/es/market *[Accessed: 10-Dic-2014].*

Dado que no se necesita un mantenimiento continuo, esta nueva tecnología ofrece innumerables opciones de utilización en iluminación general, su luz más blanca y natural es ideal para espacios donde la iluminación sea una prioridad para la seguridad del ser humano [11].

2.4 Normativa

Los límites de distorsión armónica están definidos en dos estándares internacionales: IEC61000-3-2 con aplicación en Europa, y el IEEE-519-1992 con aplicación en América. Estos dos estándares fijan los límites de distorsión armónica en corriente y tensión para los usuarios finales y para las compañías distribuidoras. Es importante

tener en cuenta las principales diferencias que existen entre estas dos normativas para definir su aplicación [24]. Estas diferencias son:

1. El estándar IEEE indica que se debe compartir la responsabilidad de emisión de armónicos entre el usuario final y la distribuidora. De manera que si el usuario final cumple con lo establecido en el estándar, pero los límites en el sistema están fuera, la solución del problema debe ser por parte de la distribuidora. En cambio la IEC fija los límites de corriente específicos para las cargas con mayor emisión de armónicos, de tal manera que el cumplimiento de estos límites no altera la distorsión armónica en tensión de todo el sistema.

2. Los límites de distorsión armónica en tensión son constantes para el estándar IEEE, mientras que para el de IEC disminuyen en cuanto aumenta el orden del armónico.

3. El estándar IEEE fija límites de distorsión armónica en corriente para diferentes niveles de tensión y sin distinción alguna entre las cargas, teniendo con esto una pobre correlación entre la distorsión armónica en corriente y en tensión. Por otra parte, el estándar IEC fija los límites de distorsión armónica en corriente para diferentes tipos de carga, asegurándose que el cumplimiento de estos, garantice la operación del sistema dentro de los límites de distorsión armónica en tensión.

4. Los armónicos de orden par se definen con mayor detalle en el estándar IEC, fijando un valor para cada uno de los órdenes pares, mientras que el estándar IEEE establece los límites para estos como el 25% del armónico impar inmediatamente anterior.

5. El estándar IEEE establece que se pueden exceder los límites hasta un 50% para periodos cortos de tiempo. Entre tanto, la IEC utiliza los percentiles (95th y 99th) para periodos de tiempos muy cortos (3 segundos) y cortos (10 segundos), respectivamente.

En las tablas siguientes (Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10) se muestran los límites en distorsión armónica en corriente establecidos por el estándar IEC61000-3-2 para las cargas de iluminación y carga electrónica con corrientes inferiores a 16 A, respectivamente.

Tabla 8. Límites de Distorsión Armónica en Corriente para equipos clase D.

Orden	Máx corriente Armónica por W	Máx corriente armónica
n	mA/W	A
3	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1	0.77
9	0.5	0.4
11	0.35	0.33
13<n<39	3.85/n	0.15+15/n

Fuente: IEC
61000-3-2

Tabla 9. Límites de Distorsión Armónica en Corriente para equipos clase C

Orden	Máx corriente Armónica (% de la fundamental)
n	%
2	2
3	30*cosθ
5	10
7	7
9	5
11<n<39	3

. Fuente: IEC
61000-3-2

Tabla 10. Límites de distorsión armónica en corriente para un sistema operando entre 120 V y 69000 V.

Máxima corriente de distorsión armónica como porcentaje de IL						
Isc/IL	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	h>35	TDD
<24	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	3,5	1,4	20,0
Armónicos pares limitados al 25% del armónico impar						
No se permiten distorsiones que resulten en un offset DC						
Isc=Corriente de corto circuito						
IL=Máxima corriente demandada en la carga (frecuencia fundamental)						

Fuente: Std-IEEE 519 1992

CAPÍTULO III

TÍTULO: MODELAMIENTO

En este capítulo se obtendrá un circuito equivalente, es decir el modelo matemático, con resistencias, inductores o capacitores que representa a la lámpara de inducción con inductor externo. Una vez obtenido este circuito se podrán deducir las fórmulas matemáticas de voltaje y corriente que permitan realizar el modelamiento utilizando el software MATLAB. Así se podrán analizar los armónicos que producen estas lámparas y como pueden afectar a las redes de distribución.

3.1 Análisis del circuito eléctrico de una lámpara de inducción

La lámpara de inducción de inductores externos posee dos bobinas, una a cada lado del tubo que tiene forma rectangular o circular, para generar el campo magnético.

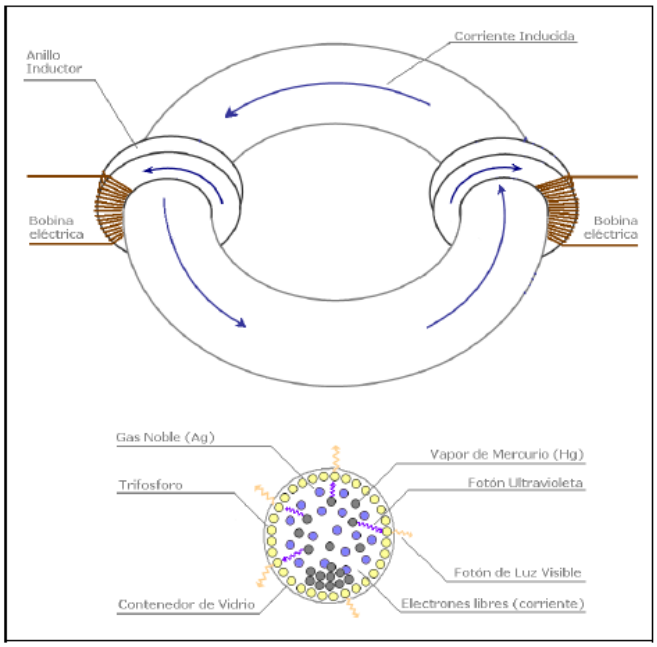


Figura 32. Lámparas de inducción para techo.

Fuente: http://www.lvd.cc/pro_list.html *[Accessed: 10-Jan-2015]*

Por esta disposición puede ser modelada considerando que el tubo fluorescente es un devanado secundario de una sola vuelta, conteniendo una resistencia y una inductancia

conectadas a las dos bobinas obteniendo así dos transformadores. Cada transformador tiene un núcleo toroidal que acopla los dos devanados primarios al tubo de vidrio en cada extremo de la lámpara. Los dos son conectados al balastro en paralelo mientras que la trayectoria de la descarga es conectada en serie en cada uno de los secundarios de los tranformadores. Las pérdidas en los dos núcleos acoplados se modelan con la resistencia Rc en el primario de cada devanado del transformador. Esta resistencia no es constante y varía con el voltaje aplicado, frecuencia de operación y temperatura del núcleo [17]. Cada transformador tiene asociada su inductancia magnetizante la cual se modela como una inductancia paralela Lm en los primarios.

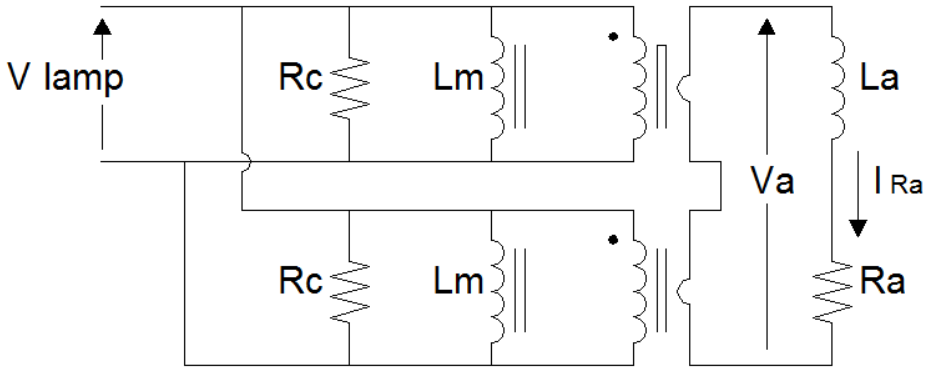


Figura 33. Modelo lámpara de inducción de inductores externos.

Fuente: Guerrero I, Balastro electrónico para lámpara fluorescente basado en un amplificador clase E, T D, p 22.

Donde:

Rc = resistencia de un núcleo

Ra = resistencia del tubo del arco

La = inductancia del tubo del arco

Lm = inductancia magnetizante de un núcleo

El tubo presenta una resistencia Ra=2.67Ω en condiciones nominales y una inductancia media La=220nH. Cuando se llegan a los 250 KHz se tiene en el tubo XL=0.35 Ω y Z=2.69<-7.5°. [13]

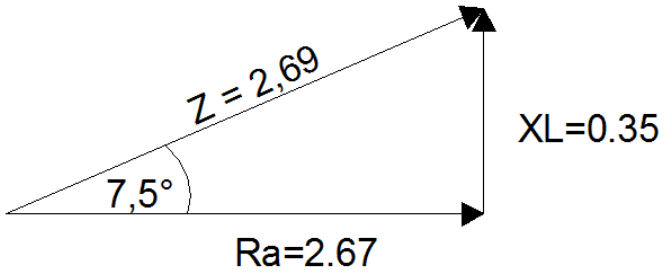


Figura 34. Resistencia, inductancia e impedancia del tubo de la lámpara.

Fuente: Autor

Como los dos transformadores son iguales y están en paralelo, las pérdidas en el núcleo y las inductancias magnetizantes pueden ser combinadas en un solo componente Rec y Lem, respectivamente. Si para el análisis no se considera el valor de La (por ser un valor muy bajo y por lo tanto despreciable) y se usa una relación de vueltas 18:1, la Ra puede transformarse al primario como una resistencia equivalente Rea=216 Ω, tomando en consideración las siguientes fórmulas:

$$Rec = \frac{Rc}{2} \tag{3.1}$$

$$Lem = \frac{Lm}{2} \tag{3.2}$$

$$Rea = \frac{Ra}{4} x\, N^2 \tag{3.3}$$

Para el modelo típico de salida de un balastro se tiene una onda cuadrada que es proporcionada por un inversor de medio puente y luego la señal se filtra por Lr y Cr para obtener una señal sinusoidal.

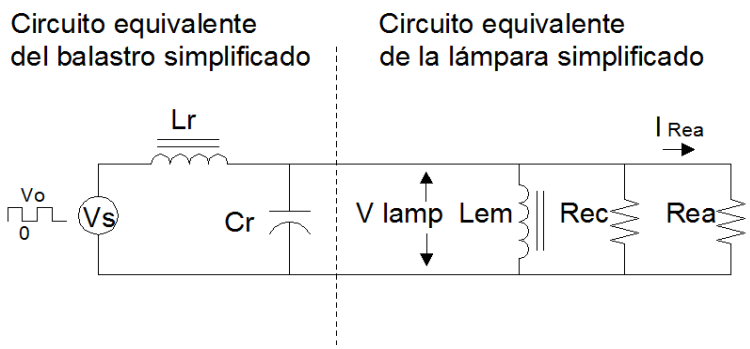


Figura 35.Modelo simplificado del balastro y la lámpara de inducción.

Fuente: Guerrero I, Balastro electrónico para lámpara fluorescente basado en un amplificador clase E, T D, p 22.

Donde:

Rec = resistencia de dos núcleos en paralelos

Rea = resistencia de descarga reflejado al primario

Lr = inductancia para filtrar la señal proveniente del generador de onda cuadrada

Lem = inductancia magnetizante de dos núcleos paralelos

Cr = capacitancia para filtrar la señal proveniente del generador de onda cuadrada

Cuando la lámpara opera Rec es alrededor de 50 veces Rea. La reactancia inductiva de magnetización XLem es tres veces Rea [17]. Reemplazando estos valores en el modelo de la lámpara de inducción procede a resolver el circuito.

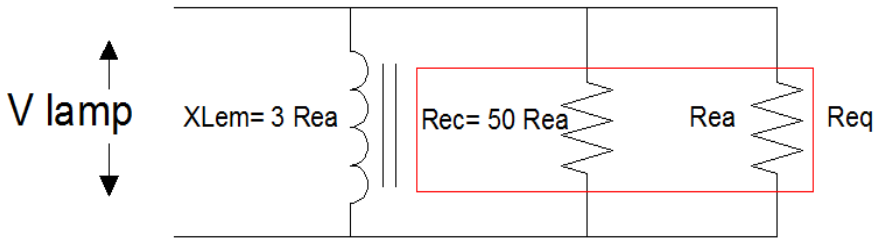


Figura 36.Resolución matemática del Modelo simplificado del balastro y la lámpara de inducción.

Fuente: Autor

Datos:

Rea = 216 Ω

Como:

$$Req = Rec\ II\ Rea$$

$$Req = 211{,}76\ \Omega$$

Queda definido el valor de la resistencia equivalente en el circuito tal como se muestra en la figura 36.

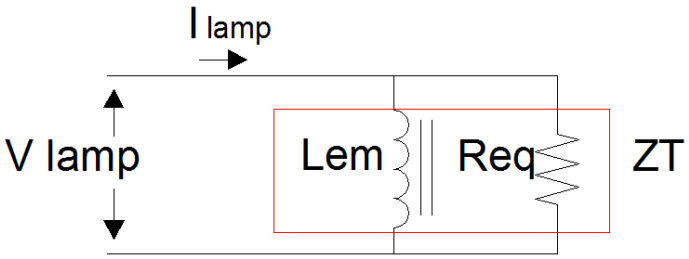


Figura 37. Impedancia equivalente de la lámpara de inducción con inductor externo.

Fuente: Autor

De esta manera la impedancia equivalente de la lámpara de inducción con inductores externos queda definida por el valor:

$$ZT = \frac{648j\ x\ 211{,}76}{648j + 211{,}76}$$

$$ZT = \ 201{,}28 < 18{,}1° = 191{,}32 + 62{,}33j\ \ \Omega$$

Se tiene entonces un ángulo de retraso de 18,1 grados que se presenta entre el voltaje y la corriente debido a la característica inductiva de la lámpara.

La onda cuadrada con la frecuencia de operación que se requiere para el óptimo funcionamiento de la lámpara es proporcionada por un inversor de medio puente cuya señal debe ser filtrada para obtener una onda sinusoidal. Se requiere por lo tanto insertar un filtro tipo tanque resonante considerando también las corrientes parásitas que se generan en los dispositivos de conmutación y que distorsionan la onda, aunque gracias a los elementos electrónicos más eficientes estos filtros entregan una forma de onda bastante sinusoidal a la carga . De esta manera el modelo queda definido como se muestra en la figura 38.

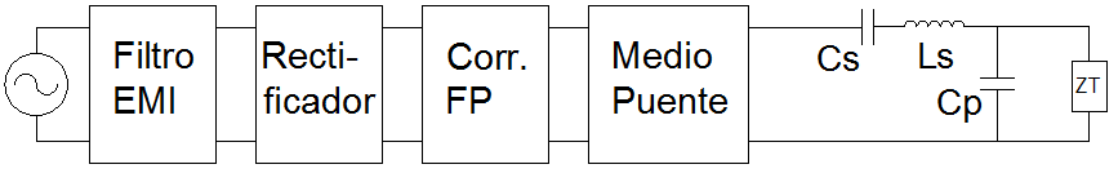


Figura 38. Modelo completo luminaria de inducción.

Fuente: Autor

Los valores de los componentes del filtro resonante se determinan a partir de las ecuaciones (3.4), (3.5), (3.6) y (3.7) donde se asume un valor del condensador Cs con la consideración de que su valor debe ser de 10 a 20 veces mayor que el valor de CP. se asumePara realizar el cálculo de los valores de estas capacitancias e inductancia se resuelven las siguientes ecuaciones:

$$Cs = Cp * 16 \tag{3.4}$$

$$Ws = 2\pi f_s \tag{3.5}$$

$$Cp = \frac{1}{Ws * R_{Lp}} * \sqrt{\frac{P_{Lp} R_{Lp}}{Vin^2}[1 + tan\theta^2] - 1} + \frac{1}{Ws^2 L_{Lp}} \tag{3.6}$$

$$Ls = \frac{tan\theta R_{Lp} + Ws {R_{Lp}}^2 Cp}{Ws(1 + Cp^2 {R_{Lp}}^2 Ws^2)} + \frac{1}{CsWs^2} \tag{3.7}$$

Donde:

P_{Lp}, R_{Lp}, L_{Lp} = Potencia, resistencia e inductancia de la lámpara, respectivamente

Vin = Voltaje a la salida del inversor

El ángulo teta es el ángulo de desfase presente en la carga que en este caso es la lámpara

de inducción. El ángulo calculado tiene un valor de 18,1 grados.

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 10.

Tabla 10. Resumen de los valores de los parámetros de la lámpara de inducción con inductores externos.

Parámetro	Valor
Voltaje entrada	120 V
Frecuencia de conmutación	250 KHz
Frecuencia de modulación	25 KHz
Potencia lámpara	150 W
Resistencia lámpara	191.32 ohm
Inductancia lámpara	62.33 mH
Ls	175 uH
Cs	47 nF
Cp	2.8 nF

Fuente: Autor

Al aplicar la serie de fourier para la resolución de este circuito equivalente se toma en consideración que la corriente es una función sinusoidal y según la paridad de funciones la función seno es impar, lo que implica que An = 0. Lo que se tiene que calcular es Bn aplicando la fórmula:

$$Bn = \frac{2}{T}\int_0^T v(t)\ sen(n\ wt)dwt \tag{3.8}$$

Entonces la ecuación para el cálculo del coeficiente de la serie de Fourier para la lámpara quedaría así:

$$Bn = \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} 180 * sen\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{\pi}{10}\right) * sen\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \tag{3.9}$$

Resolviendo la ecuación se llega a determinar el valor de Bn:

$$Bn = \frac{2xi}{\pi n}\cos(n\alpha)\, x(1-(-1)^n) \tag{3.10}$$

Para realizar la simulación en MATLAB es necesario trabajar en el dominio de la frecuencia. Esto se logra encontrando la función de transferencia.

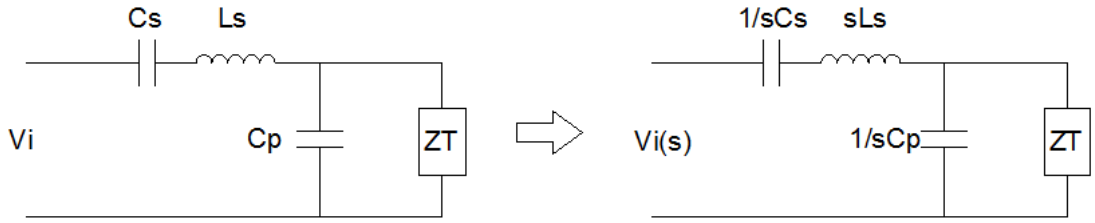


Figura 39. Circuito equivalente del tanque resonante y lámpara en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

El circuito equivalente se obtiene definiendo el voltaje en el circuito en función del tiempo. De esta manera el voltaje queda definido según la ecuación (3.11)

$$V_i = \frac{1}{Cs}\int It\, dt + Ls\frac{dI(t)}{dt} + V_{Cp} \tag{3.11}$$

Transformando al dominio de Laplace, la función de transferencia del tanque resonante y la lámpara queda definida por la siguiente expresión:

$$G_{(s)} = \frac{I_{L(s)}}{Vi_{(s)}} = \frac{s^2CsCpR+sCs}{s^3LsCsCpR+s^2LsCs+sR(Cp+Cs)+1} \tag{3.12}$$

$$Gs_{(jw)} = \frac{(jw)^2+a(jw)Cs}{(jw)^3+a(jw)^2+b(jw)+c}\, x\, \frac{1}{Ls} \tag{3.13}$$

Donde:

$$a = \frac{1}{Rcp} \;\; ; \;\; b = \left(\frac{1}{CsLs} + \frac{1}{CpLs}\right) \;\; ; \;\; c = \frac{1}{RCpCsLs}$$

Los valores numéricos de la resistencia, capacitancias e inductancia se resumen en la tabla 10.

3.2 Cálculo de armónicos que producen las lámparas de inducción

Al desarrollar las ecuaciones y los coeficientes de la serie de Fourier el resultado demuestra que las lámparas de inducción con inductor externo producen armónicos significativos de tercer, séptimo y noveno orden.

Tabla 11. Armónicos producidos por la lámpara de inducción con inductores externos.

Armónico	Coeficiente
3	6.43
5	2.14
7	5.43
9	4.00
11	2.71
13	1.86
15	0.29
17	2.43
19	0.71
21	1.43
23	1.29
25	2.29
27	1.86
29	0.57
31	1.00
33	2.14
35	1.14
37	0.86
39	0.57

Fuente: Autor

Con un analizador marca FLUKE se realizaron mediciones en el laboratorio de una lámpara de inducción de 26 W con inductor interno con el fin de obtener valores prácticos que permitan considerar una carga con el mismo principio de funcionamiento aunque con las diferencias descritas con anterioridad. Los resultados arrojados por el analizador se resumen se indican en las siguientes figuras.

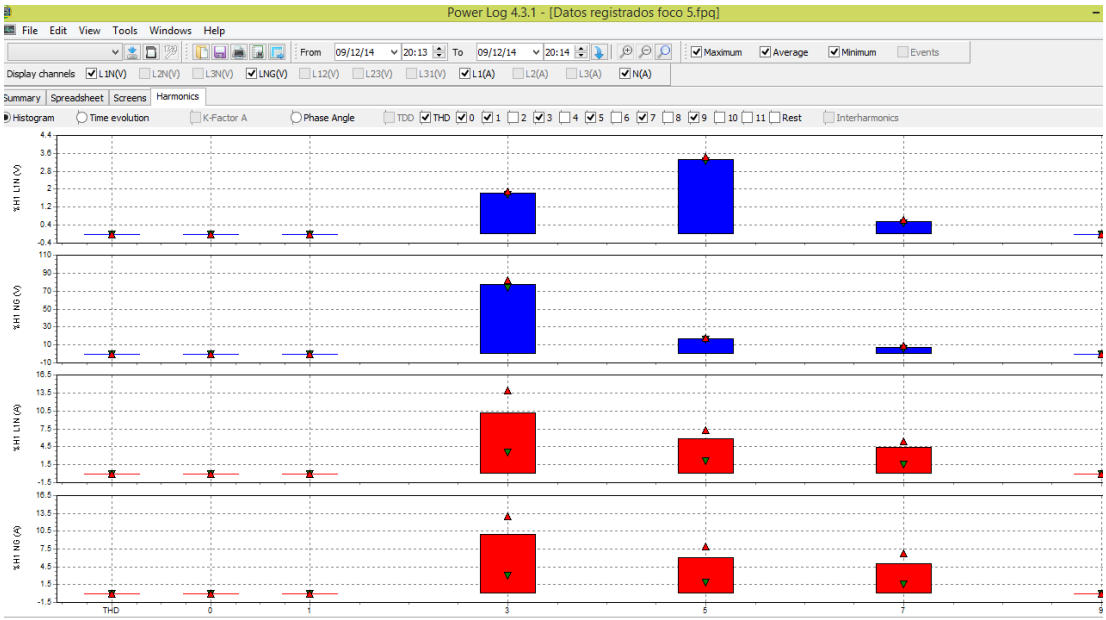


Figura 40. Print screen de los armónicos registrados por el analizador FLUKE para la lámpara de inductor interno.

Fuente: Analizador FLUKE. Elaborado por: Autor

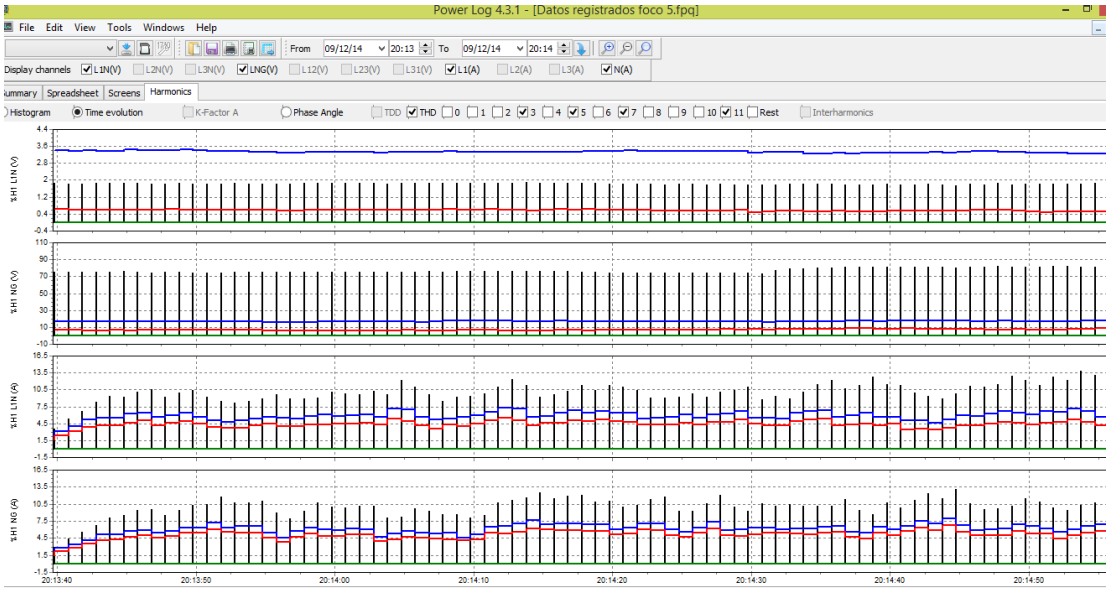


Figura 41. Print screen del tiempo de evolución registrado por el analizador FLUKE para la lámpara de inductor interno.

Fuente: Analizador FLUKE. Elaborado por: Autor

Power Log 4.3.1 - [Datos registrados fo

File Edit View Tools Windows Help

From 09/12/14 19:46 To 09/12/14 19:51

Summary | Spreadsheet | Voltage and Current | Statistics | Dips and Swells | Frequency / Unbalance | Power | Energy | Flicker | Mains Signaling | Power Harmon

Filter | Duration | L1N(V) / L1(A) | L2N(V) / L2(A) | L3N(V) / L3(A) | LNG(V) / N(A) | Total | Min | Av

Date	Function	Duration	LNG(V) / N(A) Avg	Total Avg
09/12/14 19:46:26 35msec	Dip	0m. 44s. 158ms.		
09/12/14 19:46:26 477msec	Interruption	0m.43s.699ms.		
09/12/14 19:48:29 116msec	Interruption	0m.17s.58ms.		
09/12/14 19:51:05 389msec	Voltage		0.62 V	
09/12/14 19:51:05 389msec	Current		1 A	
09/12/14 19:51:05 389msec	THD V		0.02%	
09/12/14 19:51:05 389msec	THD A		4.96%	
09/12/14 19:51:05 389msec	Plt			
09/12/14 19:51:05 389msec	Half Cycle Voltage		0.62 V	
09/12/14 19:51:05 389msec	Half Cycle Current		1 A	
09/12/14 19:51:05 389msec	Mains Signaling 1V3s		0 V	
09/12/14 19:51:05 389msec	Mains Signaling 2V3s		0 V	
09/12/14 19:51:05 389msec	Frequency			60.017 Hz
09/12/14 19:51:05 389msec	Peak Voltage		1.5 V	
09/12/14 19:51:05 389msec	Peak Current		2 A	
09/12/14 19:51:05 389msec	Active Power			26.667 W
09/12/14 19:51:05 389msec	Apparent Power			26.667 VA
09/12/14 19:51:05 389msec	Reactive Power			0 var
09/12/14 19:51:05 389msec	Power Factor			0.25
09/12/14 19:51:05 389msec	Active Energy			

Figura 42. Print screen de la distorsión armónica total registrada por el analizador FLUKE para la lámpara de inductor interno.

Fuente: Analizador FLUKE. Elaborado por: Autor

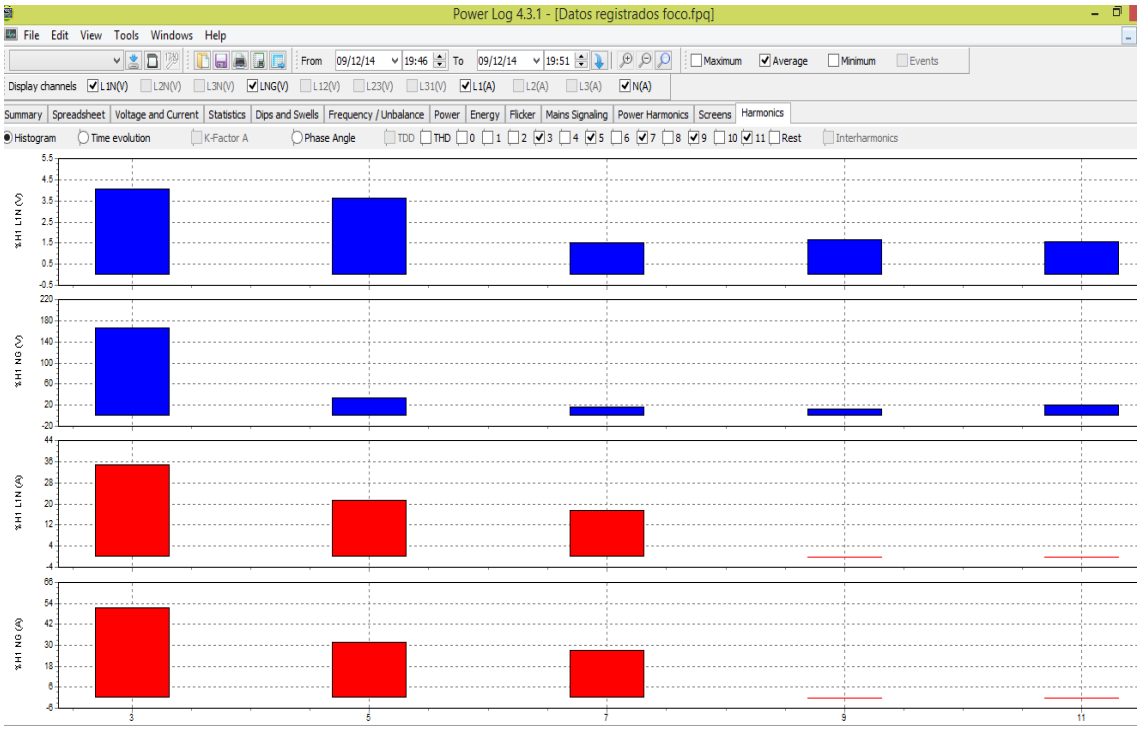


Figura 43. Print screen de los armónicos registrados por el analizador FLUKE para la lámpara de inductor interno.

Fuente: Analizador FLUKE. Elaborado por: Autor

En base a los resultados obtenidos con el analizador se comprueba que este tipo de lámpara de inducción de inductor interno de 26W de potencia y cuya frecuencia de operación es de alrededor de 2,5 MHz, presenta armónicos representativos de orden tercero, quinto, séptimo, noveno y onceavo.

Según las mediciones la distorsión armónica total es cercana al 5%.

3.3 Cálculo de THD

Para el cálculo de la distorsión armónica total para la lámpara de inducción con inductor externo se sigue la fórmula que indica que se debe obtener la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de las corrientes o voltajes (dependiendo de lo que se desea obtener) y dividir para la fundamental. Al resultado se debe multiplicar por cien para obtener la respuesta en porcentaje.

En la tabla 11 se muestran los coeficientes para cada uno de los armónicos por lo que al aplicar la fórmula de la tasa de distorsión armónica total se obtiene el resultado en porcentaje.

$$THD = 9{,}47\% \tag{3.14}$$

Este valor indica que para la lámpara de inducción con inductor externo de 150W de potencia, que es la lámpara de estudio del presente trabajo, la tasa de distorsión armónica total es menor al 10%

CAPÍTULO IV

TÍTULO: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realizará la simulación en el software MATLAB mediante el cual será posible visualizar las formas de onda a la salida y los armónicos que producen las luminarias de inducción con inductor externo. Además se indicará como afecta esta contaminación a la calidad de energía de las redes eléctricas de distribución.

4.1 Simulación en MATLAB

Para realizar el modelado en MATLAB se recurre a programar en el editor con lenguaje de programación propio del MATLAB así como también en el SIMULINK con diagramas de bloques. En el SIMULINK es posible visualizar la onda que se obtiene a la salida del inversor y que luego será filtrada para conseguir una onda lo más sinusoidal posible con el fin de evitar alterar significativamente la forma de onda original que se recibe de la red [25].

En el diagrama en SIMULINK se ingresa el bloque de generador de señales para simular la entrada, la cual será una onda cuadrada ya que es obtenida a través del inversor medio puente. Sin embargo esta señal no es perfecta debido a las corrientes parásitas de los elementos de conmutación, las pérdidas, los tiempos de conmutación, remanencia en los elementos. A continuación se coloca el bloque de función de transferencia que representa el filtrado y también presenta pequeñas distorsiones de la onda por la naturaleza de sus elementos. El numerador y denominador serán ingresados por programación en el editor de MATLAB.

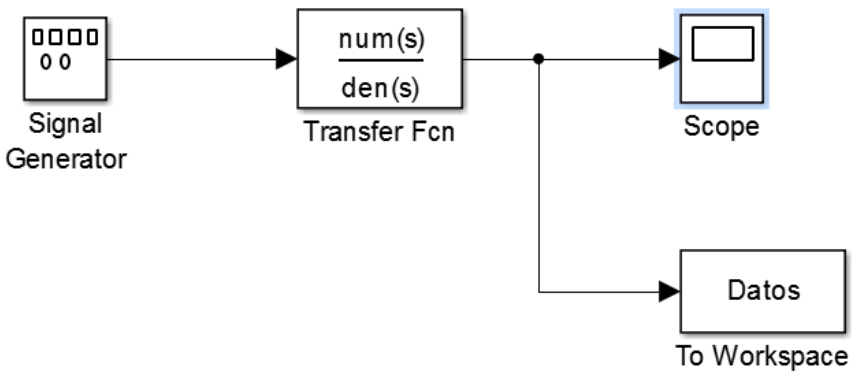
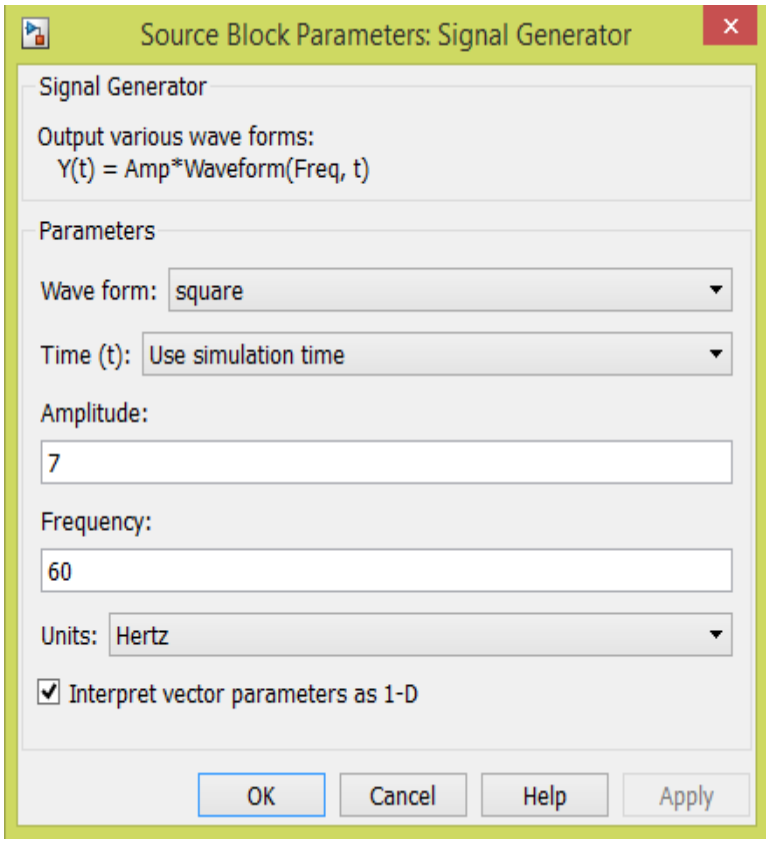
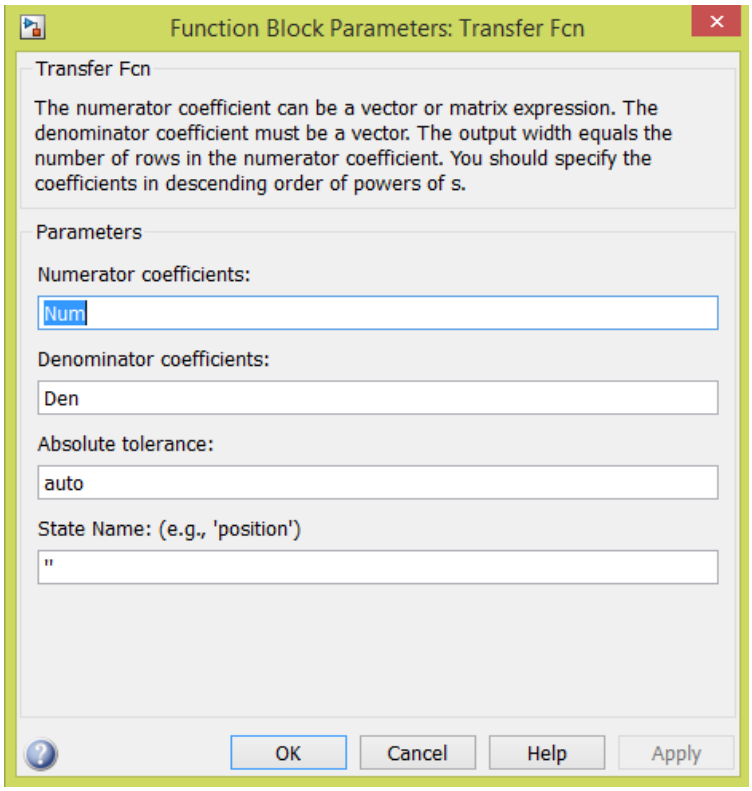


Figura 44. Diagrama de bloques en SIMULINK.

Fuente: Autor

Los parámetros que se deben modificar en los bloques del SIMULINK se visualizan en la figura 45.





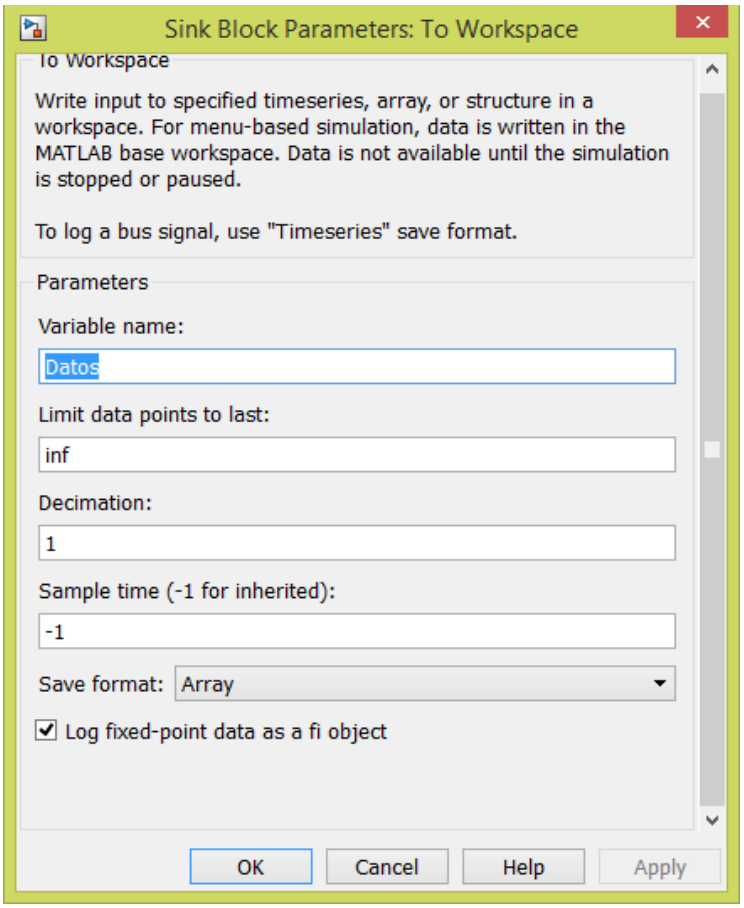


Figura 45. Parámetros modificados en los bloques del simulador SIMULINK.

Fuente: Autor

Para poder visualizar la onda generada se coloca el bloque “SCOPE”. La curva generada es una onda casi cuadrada; en el cambio de polaridad de la onda se tiene un tiempo de retardo y un “pico”, debido a la conmutación, por lo que la onda se torna ligeramente trapezoidal y con una pequeña distorsión, tal como se indica en la figura 46.

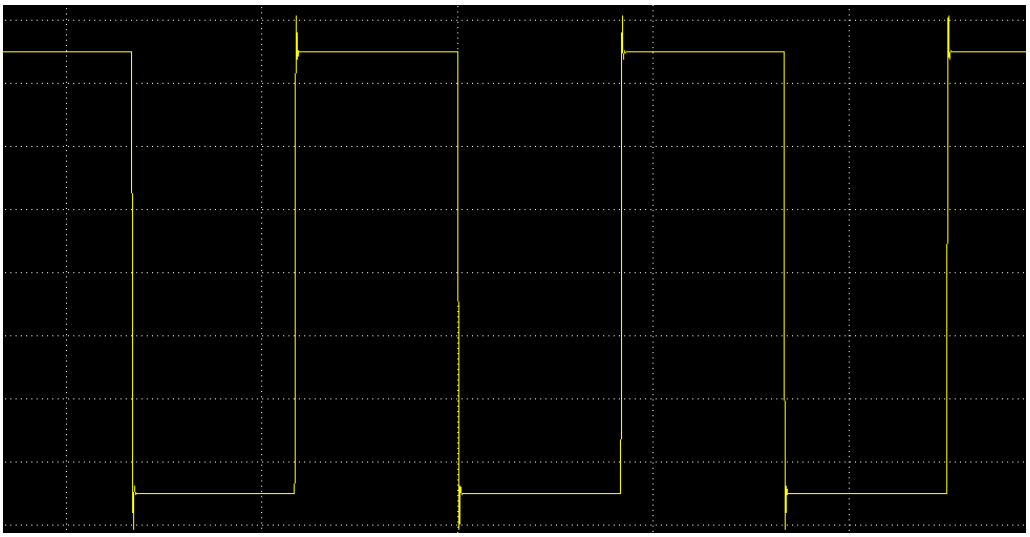


Figura 46. Onda obtenida a la salida del tanque resonante.

Fuente: Autor

Para configurar el bloque de la función de transferencia se debe ingresar al editor de MATLAB y trabajar con la función:

[Numerador, Denominador] = butter (orden, periodo, frecuencia,’low’,’s’)

Donde:

- Butter: palabra reservada para declarar que va a haber un filtro butterworth en este caso pasa-bajas.
- Low: declara al filtro como pasa BAJAS.
- s: variable factorial de la ecuación.

Con esta función se generan los polinomios correspondientes a la función de transferencia del filtro

```
[Num,Den]=butter(3,2*pi*250000,'low','s');
tf(Num,Den)
```

Figura 47. Print screen de la función de transferencia en el editor de MATLAB.

Fuente: Autor

```
Command Window
ans =

                    3.876e18
  ------------------------------------------
  s^3 + 3.142e06 s^2 + 4.935e12 s + 3.876e18

Continuous-time transfer function.
```

Figura 48. Print screen del resultado de la función de transferencia en la ventana de comandos de MATLAB.

Fuente: Autor

Para realizar un análisis en frecuencia de señales analógicas generadas en SIMULINK, mediante FFT, éstas deben ser enviadas al entorno de MATLAB realizando las instrucciones indicadas a continuación para que puedan ser procesadas.

- Se requieren dos datos previos para preparar el cálculo de la DFT. El primer dato es la frecuencia máxima contenida en el mensaje.

- El segundo dato previo es el número de muestras de la señal. Este debe ser potencia de 2. Por lo general se prefiere trabajar con 16384, 32768 o 65536 muestras.

- Calcular los parámetros espectrales

$$f_{ss} \geq 2f_{max} \tag{4.1}$$

$$df = \frac{f_{ss}}{N} \tag{4.2}$$

- Calcular parámetros temporales

$$\tau_{ss} = \frac{1}{f_{ss}} \tag{4.3}$$

$$T = N\tau_{ss} \tag{4.4}$$

$$\text{stopTime} = T\left(1 - \frac{1}{N}\right) \tag{4.5}$$

- En el dominio del tiempo, se calcula el dominio y la imagen de la señal.

$$t = 0{:}\,\tau_{ss}{:}\,T\left(1 - \frac{1}{N}\right) \tag{4.6}$$

Se deben configurar los parámetros de simulación del SIMULINK en la pestaña de simulación, en configurar parámetros del modelo tal como se indica en la figura 49 y figura 50.

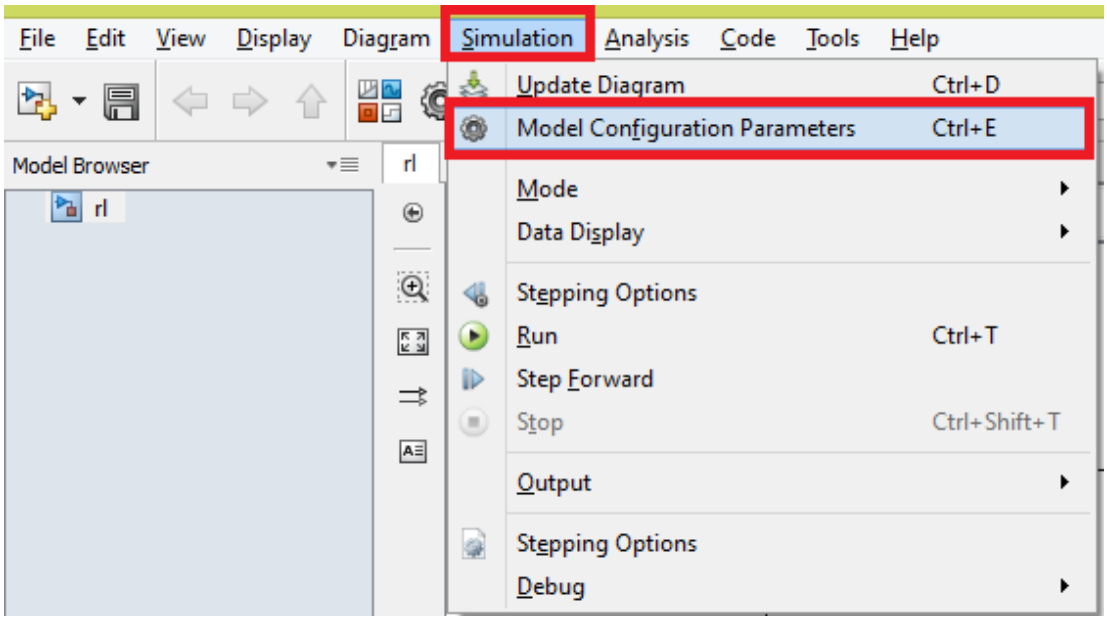


Figura 49. Configuración de los parámetros del modelo en SIMULINK.

Fuente: Autor

En el tiempo de inicio se coloca cero mientras que el tiempo de parada está definido por (4.5). En las opciones de solución se coloca tipo “FIXED-STEP” y el solver definido es ODE4 (paso de Runge-Kutta).

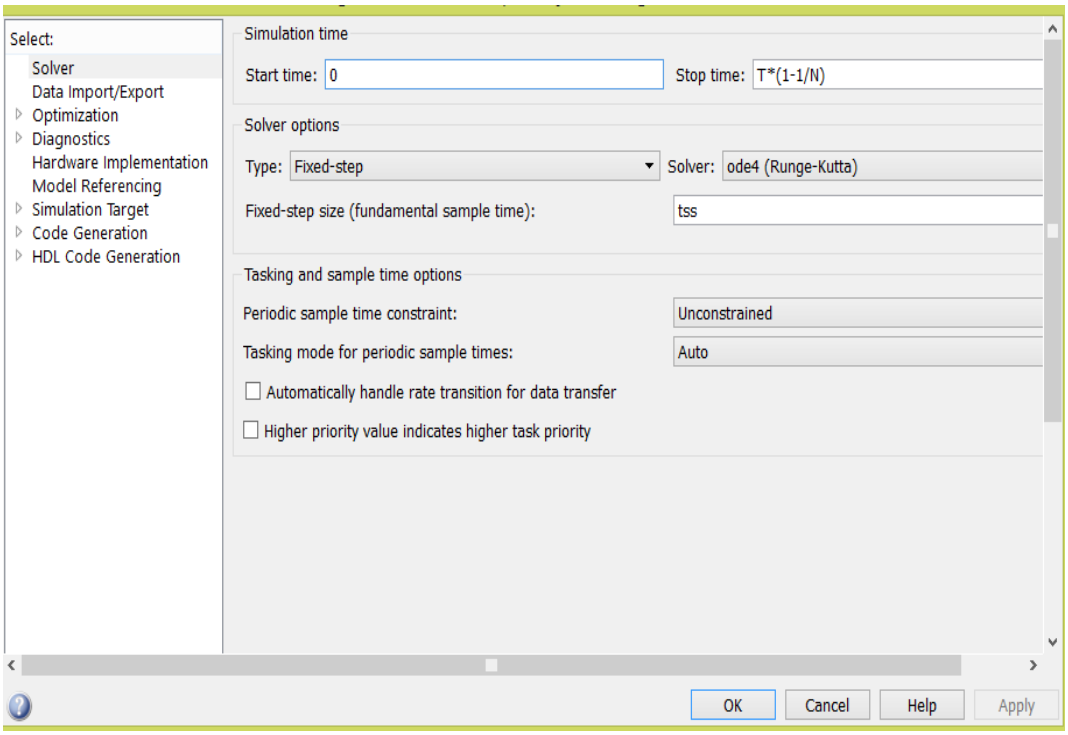


Figura 50. Configuración de los parámetros del modelo en SIMULINK.

Fuente: Autor

Al correr el programa en MATLAB se obtiene la onda casi cuadrada igual a la observada en el SCOPE, en gráficos anteriores.

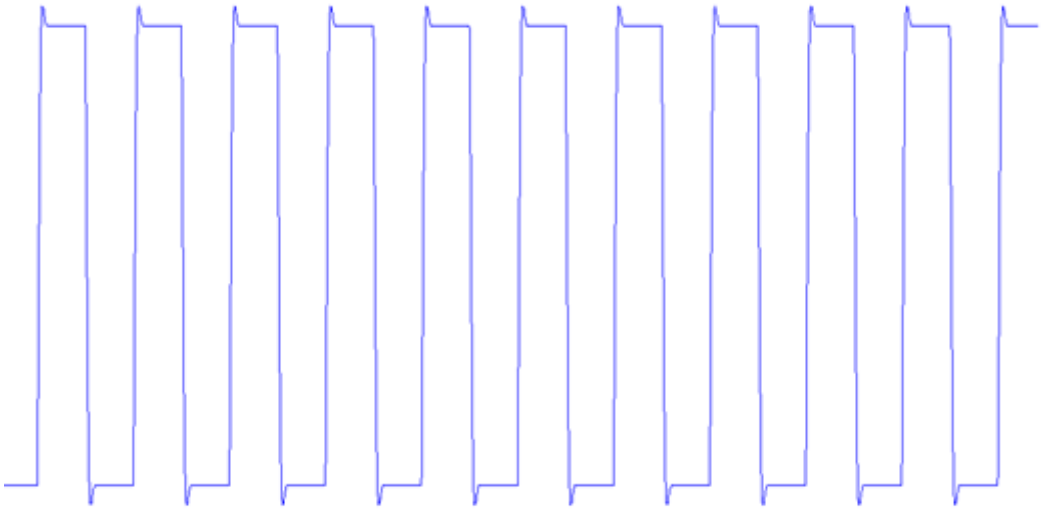


Figura 51. Onda de salida del tanque resonante en MATLAB.

Fuente: Autor

La programación en MATLAB para obtener las gráficas mostradas en las figuras anteriores se aprecia en la figura 52.

```
clc;
clear;
close all
[Num,Den]=butter(3,2*pi*250000,'low','s');
tf(Num,Den)
[Num,Den]=butter(3,2*pi*250000,'low','s');
fmax=250000;
N=16384;
fss=10*fmax;
df=fss/N;
tss=1/fss;
T=N*tss;
stopTime=T*(1-1/N);
t=0:tss:T*(1-1/N);
% printsys(Num,Den)
% pzmap(Num,Den)
% [p,z]=pzmap(Num,Den)
% pzmap(p,z)
length('Datos');
m=[0
-0.012336408
-0.048180155
10
10
];
% figure(1);
% plot(t,m)
% title('oscilograma')
figure(3)
plot(m)
f=(-0.5*fss:df:0.5*fss*(1-1/N))';
z=abs(fftshift(fft(m)/N));
figure(1)
plot(t,m)
axis([0 0.003 -6 6])
title('oscilograma')
figure(2)
stem(f,2*z)
axis([55 160 0 20])
title('espectro')


%% Autor:- Luis Bedoya

fejemplo = 250000;          %Frecuencia de operaci?n
tejemplo = 1/fejemplo;    %Per?odo
L = 10000;                  %Largo de la se?al
t = (0:L-1)*tejemplo;      %Vector tiempo
F = 60;                    %Frecuencia de la se?al

%% Se?al con los arm?nicos
xsig = 180*sin(2*pi*60*t-pi/10)+(11.57)*sin(2*pi*180*t-
pi/10)+(3.86)*sin(2*pi*300*t-pi/10)+(9.77)*sin(2*pi*420*t-
pi/10)+(7.2)*sin(2*pi*540*t-pi/10)+(4.89)*sin(2*pi*660*t-
pi/10)+(3.34)*sin(2*pi*780*t-pi/10)+(0.51)*sin(2*pi*900*t-
pi/10)+(4.37)*sin(2*pi*1020*t-pi/10)+(1.29)*sin(2*pi*1140*t-
pi/10)+(2.57)*sin(2*pi*1260*t-pi/10)+(2.31)*sin(2*pi*1380*t-
```

```
pi/10)+(4.11)*sin(2*pi*1500*t-pi/10)+(3.34)*sin(2*pi*1620*t-
pi/10)+(1.03)*sin(2*pi*1740*t-pi/10)+(1.8)*sin(2*pi*1860*t-
pi/10)+(3.86)*sin(2*pi*1980*t-pi/10)+(2.06)*sin(2*pi*2100*t-
pi/10)+(1.54)*sin(2*pi*2220*t-pi/10)+(1.03)*sin(2*pi*2340*t-pi/10);
subplot(2,1,1)
plot(t,xsig);
grid on;
axis([0 0.04 -200 +200])
xlabel('\itTiempo en segundos \rightarrow');
ylabel('\itAmplitud de la onda \rightarrow');
title('\itFrecuencia = 250000Hz');
pause(2);

subplot(2,1,2)
NFFT = 2^nextpow2(L);
Xsig = fft(xsig,NFFT)/L;
f1 = fejemplo/2*(linspace(0,1,NFFT/2+1));
semilogy(f1,2*abs(Xsig(1:NFFT/2+1)),'r');
grid on;
axis([-50 5000 -200 200])
title('\itAmplitud del espectro de la se?al');
xlabel('\itFrecuencia(Hz) \rightarrow');
ylabel('|Se?al(f)| \rightarrow');
pause(2);
```

Figura 52. Programación en MATLAB.
Fuente: Autor

Se utiliza el comando “bar” para obtener el gráfico en forma de barras de manera que se pueda apreciar con mayor claridad la amplitud de los armónicos generados por este tipo de lámparas.

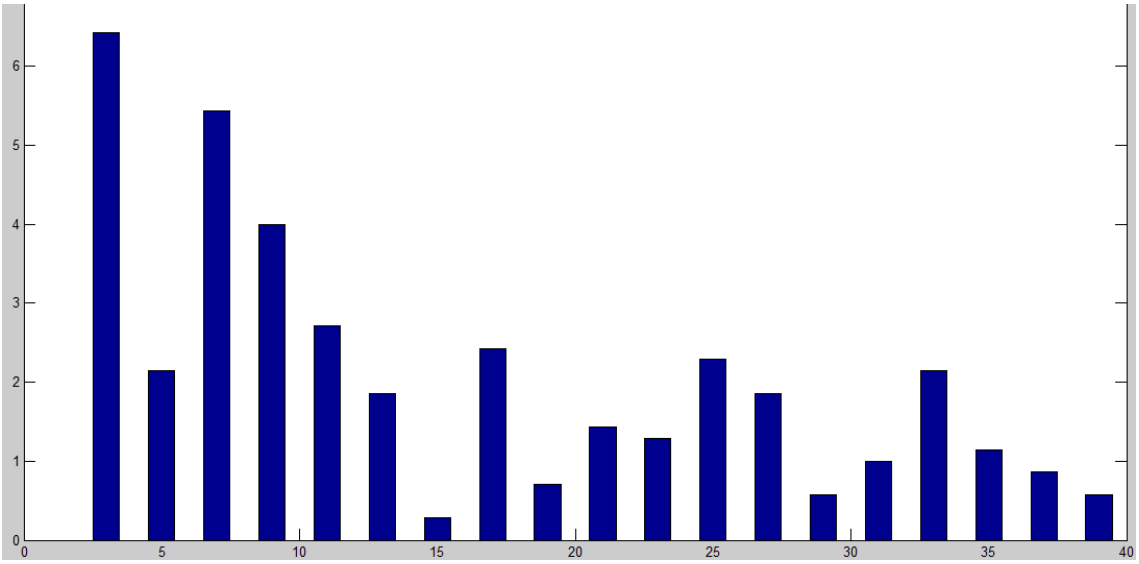


Figura 53. Armónicos generados por la lámpara de inducción con inductores externos.

Fuente: Autor

Se observa que los principales armónicos que producen este tipo de lámparas son los de tercer, séptimo y noveno orden. Los otros armónicos son menos acentuados aunque contribuyen al incremento de la distorsión armónica total.

4.2 Comportamiento de la curva característica

Con el cálculo de los armónicos se puede determinar la distorsión que se produce en la forma de onda. De acuerdo a la cantidad y tamaño de los armónicos que se generen en la instalación la onda sufrirá una mayor o menor afectación en su forma.

En la figura 54 se observa el grado de afectación que producen los armónicos que las lámparas de inducción con inductores externos causan en la forma de onda.

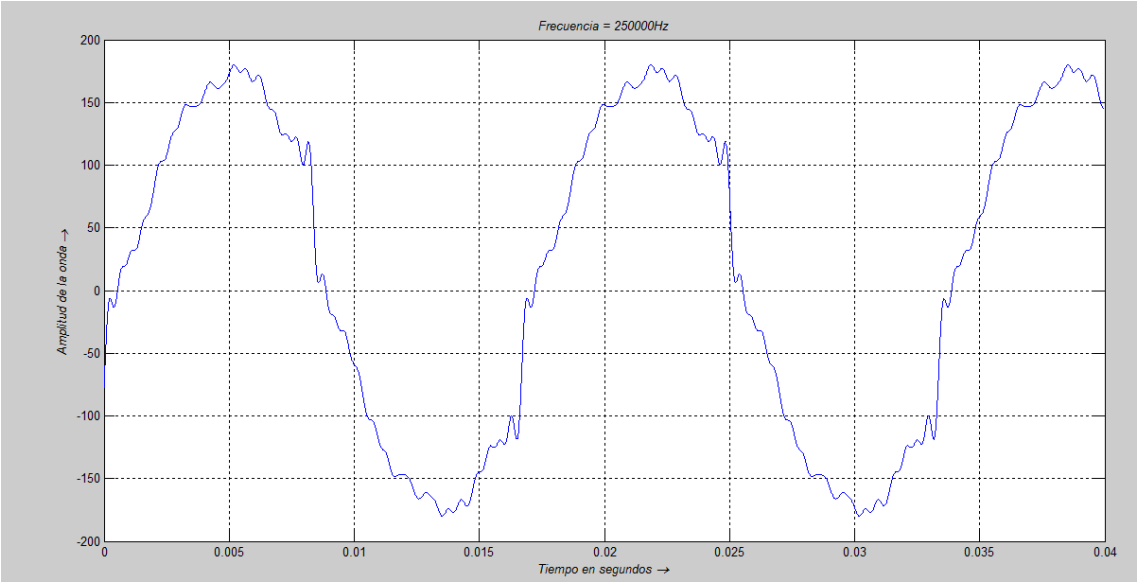


Figura 54. Deformación de la forma de onda causada por los armónicos generados por la lámpara de inducción con inductores externos.

Fuente: Autor

La forma de onda no es una sinusoidal pura debido a la contaminación armónica que genera la lámpara de inducción con inductores externos hacia la red de distribución eléctrica.

4.3 Análisis de la generación de armónicos a la red de distribución de las lámparas de inducción

Según los resultados obtenidos se verifica que las lámparas de inducción si distorsionan la forma de onda que reciben de la red de distribución de energía, a pesar de los filtros

que contienen en su interior para evitar la contaminación armónica.

Según la normativa vigente la tasa de distorsión armónica total no debe exceder del 5%. Sin embargo los resultados obtenidos muestran que los valores de distorsión armónica que presentan las lámparas de inducción son de alrededor del 10% lo que significa que superan el límite antes mencionado.

Para analizar los efectos que los armónicos pueden producir en las redes de distribución se debe tener en cuenta la demanda de energía eléctrica por concepto de iluminación lo cual se puede apreciar en la figura 55.

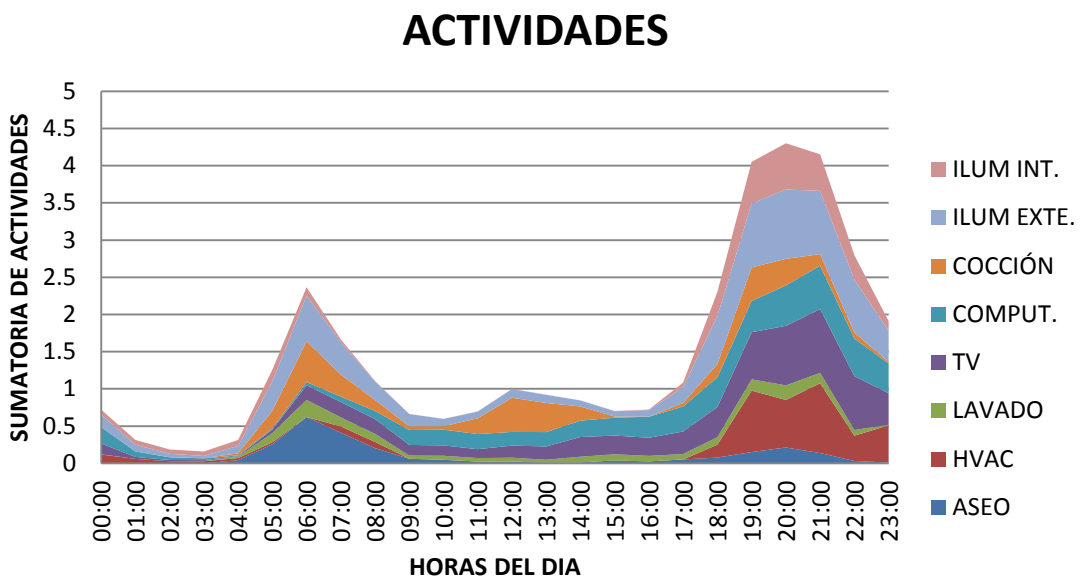


Figura 55. Demanda según actividades.

Fuente: Tesis MODELAMIENTO PARA EL ALMACENAMIENTO Y APORTE DE ENERGÍA A LA RED EN HORAS PICO DE DEMANDA MEDIANTE UN PROTOTIPO, Jacho P, Anexo.

Según la figura 55 se observa que la mayor demanda en sistemas de iluminación residenciales en el país, se da entre las 19 y 21 horas considerando el pico máximo de demanda a las 20 horas. Teniendo en cuenta, para el análisis objeto del presente estudio, que se presentaría un uso masivo de las lámparas de inducción magnética en este rango, el elemento que alimenta tal carga (transformador) puede llegar a contener en algún momento un índice de distorsión armónica que sobrepase los límites establecidos por las normas.

Sin embargo se deben tomar en cuenta los factores de diversidad y atenuación.

Las dispersiones en el ángulo de fase de los armónicos de cargas individuales provocan una disminución de las corrientes armónicas de la red. Este efecto, conocido como diversidad, se debe principalmente a diferencias en los parámetros del sistema de distribución y a los de la propia carga. El factor de diversidad de corriente (FD_k) se define para cualquier armónico k y un conjunto de n cargas conectadas en paralelo, como la magnitud del fasor de la corriente de red, dividido por la suma de magnitudes de las corrientes individuales para el mismo orden de armónico.

$$FD_k = \left| \frac{\sum_{i=1}^{n} I_{k(i)}}{\sum_{i=1}^{n} \left| I_{k(i)} \right|} \right| \tag{4.7}$$

Este factor varía entre 0 y 1. Un bajo valor de este índice implicará una cancelación importante para el armónico bajo análisis [26].

La atenuación es provocada por la propia impedancia del sistema de potencia y por la corriente distorsión de tensión, que tiende a reducir las corrientes armónicas en la red producidas por cargas no lineales. El factor de atenuación FA_k para el armónico k, está definido como la magnitud de la corriente total del armónico k cuando n cargas idénticas están conectadas en paralelo, dividida por n veces la magnitud de la corriente de una única carga [26].

$$FA_k = \frac{I_{k(n)}}{nI_{k(i)}} \tag{4.8}$$

Donde:

$I_{k(n)}$ es la corriente para el armónico k con n cargas conectadas en paralelo

$I_{k(i)}$ es la corriente para el armónico k con una sola carga conectada

Cuando varias cargas son alimentadas por un mismo transformador, el contenido de armónicos resultante es el fasor suma de las corrientes armónicas individuales, con la posibilidad de que los niveles de distorsión armónica se reduzcan por la diversidad del ángulo de fase en el espectro de armónicos. Según [27] la distorsión de corriente

disminuye con el aumento de la cantidad de unidades de cargas idénticas en paralelo, en respuesta los cambios de onda de tensión y esto se debe a que, si bien las corrientes armónicas aumentan con n, no lo hacen tan rápidamente como la corriente de onda fundamental.

El circuito resonante formado por el comportamiento mayoritariamente inductivo de las luminarias y por la capacidad instalada en el sistema de alumbrado ocasiona una amplificación de armónicos, pero su potencia unitaria es baja por lo que el problema se presenta cuando se masifica su uso. Sin embargo, la combinación de electrodomésticos de distintas características puede producir notables efectos de mitigación de armónicos.

Por lo indicado se resume que con el aumento en la cantidad de cargas de tipo inductivo para iluminación no aumenta el THD proporcionalmente debido a que los armónicos positivos y negativos se suman por lo que algunos se anulan o se restan considerablemente.

CONCLUSIONES

- Las armónicas tienden a fluir desde las lámparas de inducción hacia las redes de energía debido a que estas tienen un valor menor de impedancia con respecto a la de las lámparas.
- La tasa de distorsión armónica total que emiten las lámparas de inducción con inductor externo es menor al 10%.
- Los armónicos más representativos que generan las lámparas de inducción son de orden tercero, séptimo y noveno.
- El ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje en la lámpara de inducción con inductores externos es de 18.1 grados en atraso por la característica de esta lámpara de tener bobinas para generar un campo magnético.
- Las lámparas de inducción con inductores externos trabajan a alta frecuencia, desde 250 KHz hasta 2,5 MHz o más dependiendo del modelo, para generar un campo magnético que permita el flujo de electrones en el interior del tubo. Gracias a la alta frecuencia se evita el efecto estroboscópico.
- Es conveniente que los sistemas de iluminación trabajen en alta frecuencia para evitar el efecto estroboscópico, reducir el tamaño de los elementos como balastro, mayor duración de la lámpara ya que no se desgasta por cambio de temperatura.
- Para obtener el modelo matemático de la lámpara de inducción con inductor externo se considera que el secundario del transformador lo forma el tubo con el gas interior y tiene una sola vuelta mientras que el primario está formado por las bobinas que están alrededor.
- La presencia de armónicos puede incidir negativamente en la calidad de la energía y elevar el consumo de energía eléctrica por lo que es necesario que se respeten los niveles máximos indicados en normas internacionales e indicadas por el CONELEC.
- Para detectar los posibles problemas de armónicos que pueden existir en las redes e instalaciones es necesario utilizar equipos de medida de verdadero valor eficaz, ya que los equipos de valor promedio sólo proporcionan medidas correctas en el caso de que las ondas sean perfectamente sinusoidales. En el caso

en que la onda sea distorsionada, las medidas pueden estar hasta un 40 % por debajo del verdadero valor eficaz.

- La distorsión de corriente disminuye con el aumento de la cantidad de unidades, en respuesta a los cambios de la forma de onda de tensión. Esto no constituye una inconsistencia puesto que las corrientes armónicas si bien aumentan con n, no lo hace tan rápidamente como la corriente de la onda fundamental [51].
- Si se tienen cargas idénticas (tecnología y potencia) conectadas en paralelo, la interacción entre las ondas de tensión y corriente provoca una disminución en la distorsión de la corriente.
- Con los efectos de cancelación de armónicos, atenuación y diversidad, se disminuye la distorsión a valores cercanos o más bajos que la distorsión más baja de las cargas tomadas individualmente.
- En el primer método, se concluye que despreciar los efectos de diversidad y atenuación, puede conducir a un sobrestimación de los índices de distorsión tanto en corriente como en tensión [52]. Estudios del impacto de LFC en un sistema de distribución sin considerar los efectos citados, llegan a la conclusión que porcentajes relativamente bajos de penetración de este tipo de cargas pueden ser suficientes para provocar una distorsión de tensión superior al 5% [53].
- La presencia de corrientes armónicas en los conductores, afecta la ampacidad (capacidad de transportar la corriente) del conductor, debido a las pérdidas adicionales I2R. La determinación de pérdidas óhmicas es compleja, por el hecho de que la resistencia de los cables depende de la frecuencia. Específicamente, la resistencia aumenta con la frecuencia debido al efecto superficial o efecto piel y al efecto de proximidad entre los conductores.
- A medida que aumenta la carga disminuye la distorsión total armónica de corriente pero aumenta la distorsión total armónica de tensión. El incremento del THDv es debido a que el barraje no es infinito y la disminución del THDi es debido al cambio en la forma de onda de la tensión. Este fenómeno es conocido como: efecto diversidad y atenuación.
- La baja calidad en el suministro de la energía eléctrica puede ser determinante en el mal funcionamiento de equipos y dispositivos de control o medición, el exceso de calentamiento en las máquinas y cables alimentadores, principalmente del neutro, fallas del equipo eléctrico o disminución drástica de la eficiencia,

disparo de protecciones. La mala calidad de la energía afectan tanto al usuario final como a la empresa distribuidora de energía eléctrica.

- Un alto contenido de armónicas, especialmente la tercera, junto con sus múltiplos impares en un sistema trifásico se suman directamente en el neutro y producen una corriente alta (en cargas desequilibradas puede llegar ser el doble de la corriente de fase) en dicho conductor.
- Cuando varias cargas son alimentadas por un mismo transformador, el contenido de armónicos resultante es el fasor suma de las corrientes armónicas individuales, con la posibilidad de que los niveles de distorsión armónica se reduzcan por la diversidad del ángulo de fase en el espectro de armónicos.
- Las cargas no lineales originan corrientes armónicas que se propagan en las redes de transmisión y distribución eléctrica, afectando los índices de calidad del suministro.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de lámparas de inducción ya que presentan algunas ventajas como:
    - mayor vida útil (60000 a 100000 horas)
    - no tienen desgaste ni pérdidas en electrodos
    - resistentes a la vibración
    - necesitan un mínimo mantenimiento
    - alto índice de reproducción cromática (CRI)
- Las lámparas de inducción son apropiadas para lugares en los que se presente vibración como en túneles, minas y demás, debido a que no poseen electrodos los cuales son la principal causa de fallo por desgaste o rotura.
- Colocar luminarias del mismo tipo ya que por los factores de atenuación y diversidad se puede obtener una baja tasa de distorsión armónica total.
- El conductor neutro de las acometidas debe ser al menos del mismo calibre de la fase para evitar que se sobre cargue por la contaminación armónica de la instalación. Dependiendo de las cargas puede tener incluso un calibre superior al de las fases.
- Las lámparas de inducción son ideales para túneles cerrados donde el cambio de iluminación natural a iluminación artificial no afecte la visibilidad de los conductores y en general en lugares donde el mantenimiento es complicado y se tiene presencia de vibraciones.
- En las áreas de alto riesgo (refinerías, minas, gasolineras, envasadoras de gas, laboratorios) es muy importante el uso de lámparas de inducción ya que al no tener electrodos no se produce chispa al encendido, evitando accidentes que se podrían producir. Además las lámparas de inducción tienen un color de luz blanco azul lo que permite distinguir bien los colores tan importantes en sitios subterráneos donde en muchas ocasiones se utilizan botellas de gas con códigos en trabajos de soldadura para reconocer señales con código de color, para conectar cables eléctricos, o para clasificar minerales por su color.
- La lámpara de inducción produce poco deslumbramiento por lo que afecta en menor medida al ojo humano y al producir una menor radiación UV (comparado con otras lámparas) disminuye enfermedades asociadas con la piel. Además la

lámpara de inducción produce menos dióxido de carbono (CO2) que las lámparas tradicionales ya que posee un menor porcentaje mercurio además este se encuentra en forma de amalgama (en las lámparas tradicionales el mercurio se encuentra de forma líquida) reduciendo el impacto negativo sobre el medio ambiente, prestaciones que incentivan su uso.

- Realizar trabajos posteriores combinando circuitos con lámparas de inducción y lámparas fluorescentes compactas y analizar la distorsión armónica y los factores de dispersión y de atenuación que pueden producir en sistemas de iluminación residenciales y como afectan a la red de distribución.

REFERENCIAS

[1] J. Arcila, “ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS,” pp. 1–26.

[2] G. Ayala and J. Salazar, “LÁMPARAS DE INDUCCIÓN,” 2012.

[3] H. Estigarribia, “ARMÓNICOS EN LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN,” pp. 1–26.

[4] S. C. C. Ieee, S.-I. Standards, and C. Committee, “CALIDAD DE ENERGÍA,” 1999.

[5] D. Chapman, “ARMÓNICOS CAUSAS Y EFECTOS.”

[6] SCHNEIDER ELECTRIC, “COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA Y FILTRADO DE ARMÓNICOS,” p. 24.

[7] I. A. Carranza, I. G. Correa, I. S. Masoller, and I. E. Touya, “INFLUENCIA DEL TERCER ARMÓNICO EN CORRIENTE EN EL DIMENSIONADO DEL CONDUCTOR DE NEUTRO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN,” pp. 1–8, 2009.

[8] P. Araya, “VENTAJAS MEDIO AMBIENTALES DEL USO DE LUMINARIAS EFICIENTES DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA,” 2011.

[9] C. Orellana, “ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MATLAB ®,” 2011.

[10] G. Jiménez, “ARMÓNICOS: CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES EN CARGAS AISLADAS.”

[11] Kenjitsu, “ILUMINACIÓN CON TECNOLOGÍA DE INDUCCIÓN DE ALTA FRECUENCIA.”

[12] Beaula, “INDUCCIÓN MAGNÉTICA.”

[13] Axoled, “LA LÁMPARA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA Y LA VISIÓN HUMANA.”

[14] Http://www.alternativaenergetica.com.mx/, “ENERGÍA SOLAR.” .

[15] W. L. Store, “LÁMPARAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.”

[16] INDALUX, “LÁMPARAS - LUMINOTECNIA,” pp. 87–114, 2002.

[17] I. Guerrero, “BALASTRO ELECTRÓNICO PARA LÁMPARA FLUORESCENTE BASADO EN UN AMPLIFICADOR CLASE E OPERANDO A UNA FRECUENCIA MAYOR A 1 MHZ,” 2002.

[18] H. Moore, *MATLAB PARA INGENIEROS*. .

[19] F. Olivares, “EL MATLAB, UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA,” 2012.

[20] X. Serrano and J. Rojas, “IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN MASIVA DE LA COCINA DE INDUCCIÓN EN EL SISTEMA ELÉCTRICO ECUATORIANO.”

[21] M. S. F. Brugnoni, “ESTUDIO DE IMPACTOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN Y MEDIO AMBIENTE DEBIDOS AL USO INTENSIVO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS.”

[22] ABB, “REDUCIENDO ARMÓNICOS GENERADOS POR VARIADORES DE VELOCIDAD.”

[23] CYDESA, “CONVIVIENDO CON LOS ARMÓNICOS,” no. 3, pp. 1–14.

[24] F. Hernández and H. Tolentino, “IMPACTO DE LAS ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA,” 2011.

[25] G. Constante, “FLUJO DE POTENCIA DE ARMÓNICOS UTILIZANDO MATLAB.”

[26] A. López and H. Ramírez, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALGUNAS TEORÍAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA PARA LA DETECCIÓN DE DISTORSIONES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA,” 2007.

[27] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, and D. A. C. Agüero, “ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA Y LOS EFECTOS DE ATENUACIÓN Y DIVERSIDAD EN ÁREAS RESIDENCIALES,” vol. 3, no. 5, pp. 429–435, 2005.

[28] N. Avendaño, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BALASTRO ELECTRÓNICO ALIMENTADO CON CD PARA ENCENDER UNA LÁMPARA FLUORESCENTE DE 21 WATTS,” 2005.

[29] M. Juárez, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BALASTRO ELECTRÓNICO DE ONDAS CUADRADAS PARA LÁMPARAS FLUORESCENTES,” 2011.

[30] E. Olmedo, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BALASTRO ELECTRÓNICO ALIMENTADO CON CD PARA ENCENDER UNA LÁMPARA DE HID DE 50W CON IGNITOR INTERNO,” 2006.

[31] P. Electronics, “ANALYSIS AND DESIGN OF A SINGLE-STAGE HIGH-POWER-FACTOR DIMMABLE ELECTRONIC BALLAST FOR ELECTRODE LESS FLUORESCENT LAMP.”

[32] S. Mingsong, H. Songling, and Z. Wei, “MODELING AND ANALYSIS OF ELECTRODELESS LAMP SYSTEM,” 2013.

[33] SAGE, “LIGHTING RESEARCH AND TECHNOLOGY,” 2014.

[34] OSRAM, “PRODUCT FAMILY DATASHEET OSRAM ENDURA ELECTRODELESS FLUORESCENT LAMPS PRODUCT FAMILY DATASHEET,” pp. 1–5.

[35] J. Tamayo and J. Vuelvas, “DISEÑO, IMPLENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN MODULADOR AM.”

[36] E. Moposita, “EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS.”

[37] Y. Ang, D. Stone, C. Bingham, and M. Foster, “RAPID ANALYSIS AND DESIGN METHODOLOGIES OF HIGH-FREQUENCY LCLC RESONANT INVERTER AS ELECTRODELESS FLUORESCENT LAMP BALLAST,” no. 0, pp. 139–144, 2007.

[38] M. A. Ormaza, “MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN BALASTRO ELECTRÓNICO.”

[39] K. Cho, W. Oh, J. Yeon, D. Kim, and H. Kim, “ELECTRONIC BALLAST OF THE ELECTRODELESS LAMP FOR THE GROUP LIGHTING SYSTEM.”

[40] C. De Matlab, “PRÁCTICAS MATLAB.”

[41] C. Ríos, “MODELADO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS EN PRESENCIA DE ARMÓNICOS,” 2003.

[42] M. D. E. Sistemas and L. Library, “MODELADO DE SISTEMAS,” pp. 1–15.

[43] E. Pincolini, “de ENERGÍA XXIII ".”

[44] P. C. Acuña, “IMPACTO DEL ALUMBRADO PÚBLICO CON LEDS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN,” 2011.

[45] G. Ayala, “MONOGRAFÍA LÁMPARAS DE INDUCCIÓN,” 2012.

[46] J. Muñoz, “REVISTA ENERGÉTICA INTERCONEXIONES,” 2013.

[47] MIPRO, “REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 101 ARTEFACTOS ELECTRODOMÉSTICOS PARA COCCIÓN POR INDUCCIÓN.”

[48] M. S. F. Brugnoni and N. A. Lemozy, “EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA EN INSTALACIONES CON COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA.”

[49] F. Vasco, *EFECTOS DEL EMPLEO DE FOCOS AHORRADORES*. .

[50] A. Gutierrez, “ANÁLISIS DE MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS CON FILTROS ACTIVOS,” 2007.

[51] K. D. Mcbee and M. G. Simões, “Evaluating the Long-term Impact of a Continuously Increasing Harmonic Load Demand on Feeder Level Voltage Distortion.”

[52] W. Grady and A. Mansoor, “Estimating the net harmonic currents produced by selected distributed single-phase loads: computers, televisions, and incandescent light dimmers,” 2002.

[53] D. Pileggi and GulachenskiE, “The effect of modern compact fluorescent lights on voltage distortion.”

ANEXOS

ANEXO A

EVOLUCIÓN Y PREVISIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR SECTORES

EVOLUCIÓN Y PREVISIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR SECTORES

SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO (SNI)

ESCENARIO DE CRECIMIENTO MEDIO

	AÑO	RESIDENCIAL		COMERCIAL		INDUSTRIAL		ALUMB. PÚBLICO Y OTROS		TOTAL
		GWh	% deTOTAL	GWh	% deTOTAL	GWh	% deTOTAL	GWh	% deTOTAL	GWh
HISTÓRICO	1998	3 377	41.5	1 362	16.7	2 068	25.4	1 334	16.4	8 141
	1999	2 922	38.2	1 244	16.3	2 067	27.0	1 417	18.5	7 650
	2000	2 774	35.4	1 344	17.2	2 192	28.0	1 525	19.5	7 835
	2001	2 897	35.6	1 412	17.4	2 399	29.5	1 421	17.5	8 129
	2002	3 093	36.1	1 566	18.3	2 423	28.3	1 476	17.2	8 559
	2003	3 248	36.2	1 659	18.5	2 562	28.5	1 511	16.8	8 980
	2004	3 516	36.7	1 807	18.9	2 743	28.7	1 506	15.7	9 572
	2005	3 677	36.1	1 947	19.1	2 958	29.1	1 593	15.7	10 174
	2006	3 885	35.3	2 116	19.2	3 296	30.0	1 698	15.4	10 996
	2007	4 103	34.9	2 231	19.0	3 617	30.8	1 793	15.3	11 744
	2008	4 372	34.9	2 429	19.4	3 880	31.0	1 834	14.7	12 516
PRONÓSTICO	2009	4 690	35.0	2 649	19.8	4 148	31.0	1 906	14.2	13 393
	2010	5 048	34.1	2 891	19.5	4 845	32.7	2 024	13.7	14 808
	2011	5 401	32.7	3 148	19.1	5 838	35.4	2 114	12.8	16 502
	2012	5 742	32.6	3 412	19.4	6 264	35.6	2 196	12.5	17 614
	2013	6 065	32.5	3 672	19.7	6 667	35.7	2 272	12.2	18 676
	2014	6 381	32.4	3 921	19.9	7 039	35.8	2 345	11.9	19 686
	2015	7 166	33.6	4 160	19.5	7 593	35.6	2 417	11.3	21 335
	2016	8 268	35.8	4 402	19.0	7 954	34.4	2 489	10.8	23 113
	2017	9 317	37.5	4 648	18.7	8 333	33.5	2 564	10.3	24 862
	2018	10 355	38.9	4 897	18.4	8 712	32.7	2 640	9.9	26 604
	2019	11 213	39.8	5 151	18.3	9 120	32.3	2 717	9.6	28 201
	2020	11 860	40.0	5 411	18.3	9 564	32.3	2 795	9.4	29 629
CREC. 98-08		2.6%	-1.7%	6.0%	1.5%	6.5%	2.0%	3.2%	-1.1%	4.4%
CREC. 08-20		8.7%	1.1%	6.9%	-0.5%	7.8%	0.3%	3.6%	-3.6%	7.4%

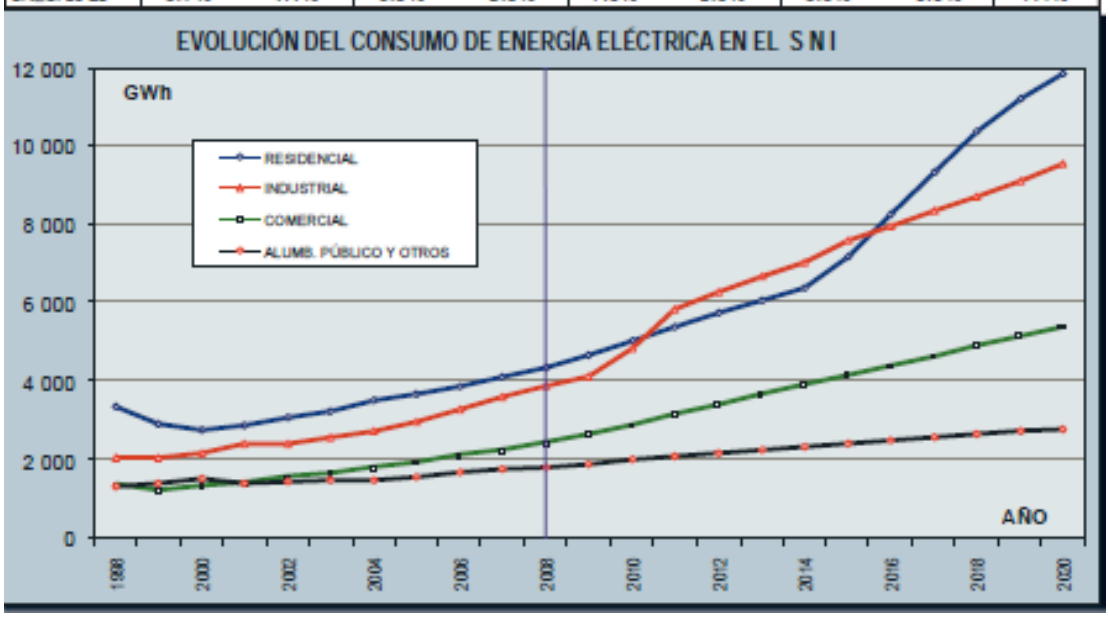


Figura 56. Evolución y previsión del consumo de energía eléctrica por sectores

Fuente: CONELEC

ANEXO B

PROYECCIÓN DE LA DEMANDA ANUAL DE ENERGÍA

PROYECCIÓN DE LA DEMANDA ANUAL DE ENERGÍA (GWh) ÁREAS DE CONCESIÓN DE EMPRESAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN (INCLUYE A CARGAS ESPECIALES, REEMPLAZO DE COCCIÓN Y CALEFÓN A GAS POR ELECTRICIDAD) AL NIVEL DE BARRAS DE SUBESTACIÓN DE ENTREGA.- CRECIMIENTO MEDIO												
DISTRIBUIDORA	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
AMBATO	444	461	759	797	836	869	907	955	1,003	1,051	1,093	1,131
AZOGUES	88	91	94	97	101	104	110	118	126	134	141	146
CENTRO SUR	744	772	809	847	886	927	991	1,073	1,152	1,232	1,304	1,367
CNEL-BOLIVAR	60	61	64	66	68	70	74	80	85	90	95	98
CNEL-EL ORO	618	646	681	717	755	794	852	925	998	1,070	1,137	1,197
CNEL-ESMERALDAS	410	427	448	470	492	516	552	598	643	689	730	766
CNEL-GUAYAS-LOS RÍOS	1,291	1,365	1,455	1,549	1,645	1,746	1,889	2,063	2,237	2,412	2,576	2,727
CNEL-LOS RÍOS	300	314	331	348	367	386	415	451	487	522	555	585
CNEL-MANABÍ	1,269	1,370	1,480	1,593	1,710	1,830	1,987	2,174	2,358	2,545	2,722	2,888
CNEL-MILAGRO	539	566	600	635	672	710	766	836	905	975	1,040	1,100
CNEL-STA. ELENA	393	409	429	450	472	494	529	573	617	660	700	735
CNEL-STO. DOMINGO	398	419	445	471	499	527	568	618	668	718	764	807
CNEL-SUCUMBÍOS (1)	168	338	352	367	383	400	659	686	713	741	768	794
COTOPAXI	410	540	556	572	588	605	632	667	701	735	765	792
ELÉCTRICA DE GUAYAQUIL	4,566	4,755	5,388	5,632	5,883	6,140	6,538	7,040	7,531	8,017	8,457	8,843
NORTE	440	459	482	505	528	552	590	638	685	732	774	811
QUITO	3,567	3,945	4,123	4,303	4,488	4,677	4,974	5,354	5,725	6,093	6,425	6,716
RIOBAMBA	259	266	276	286	297	307	325	349	372	394	414	430
SUR	239	248	261	273	286	298	318	344	368	393	414	433
ENERGÍA EN BARRAS DE S/E DE ENTREGA DEL S. N. I.	16 205	17 453	19 032	19 980	20 956	21 952	23 677	25 542	27 376	29 203	30 873	32 363
GALÁPAGOS	30	31	32	33	34	36	38	41	43	46	48	50
TOTAL ENERGIA NO INCORPORADOS	30	31	32	33	34	36	38	41	43	46	48	50
ENERGÍA EN BARRAS DE SUBESTACIÓN DE ENTREGA.- TOTAL NACIONAL	16 235	17 484	19 064	20 014	20 990	21 988	23 715	25 583	27 419	29 249	30 921	32 413

(1) CNEL-SUCUMBÍOS INCORPORADA AL SNI

Figura 57. Proyección de la demanda anual de energía

Fuente: CONELEC

ANEXO C

DEMANDA ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA A NIVEL NACIONAL POR GRUPO DE CONSUMO

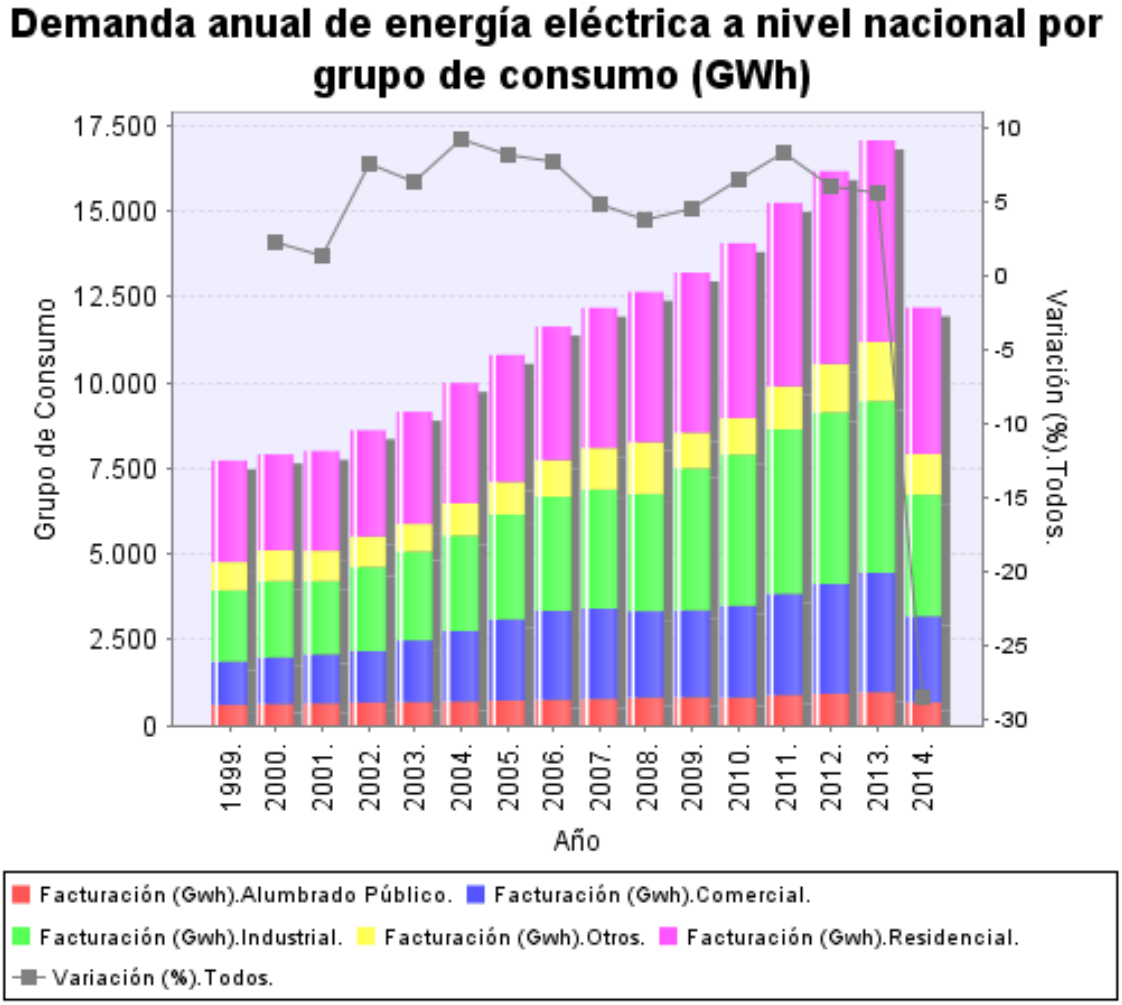


Figura 58. Demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional por grupo de consumo

Fuente: CONELEC

ANEXO D

DEMANDA ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA A NIVEL NACIONAL POR GRUPO DE CONSUMO

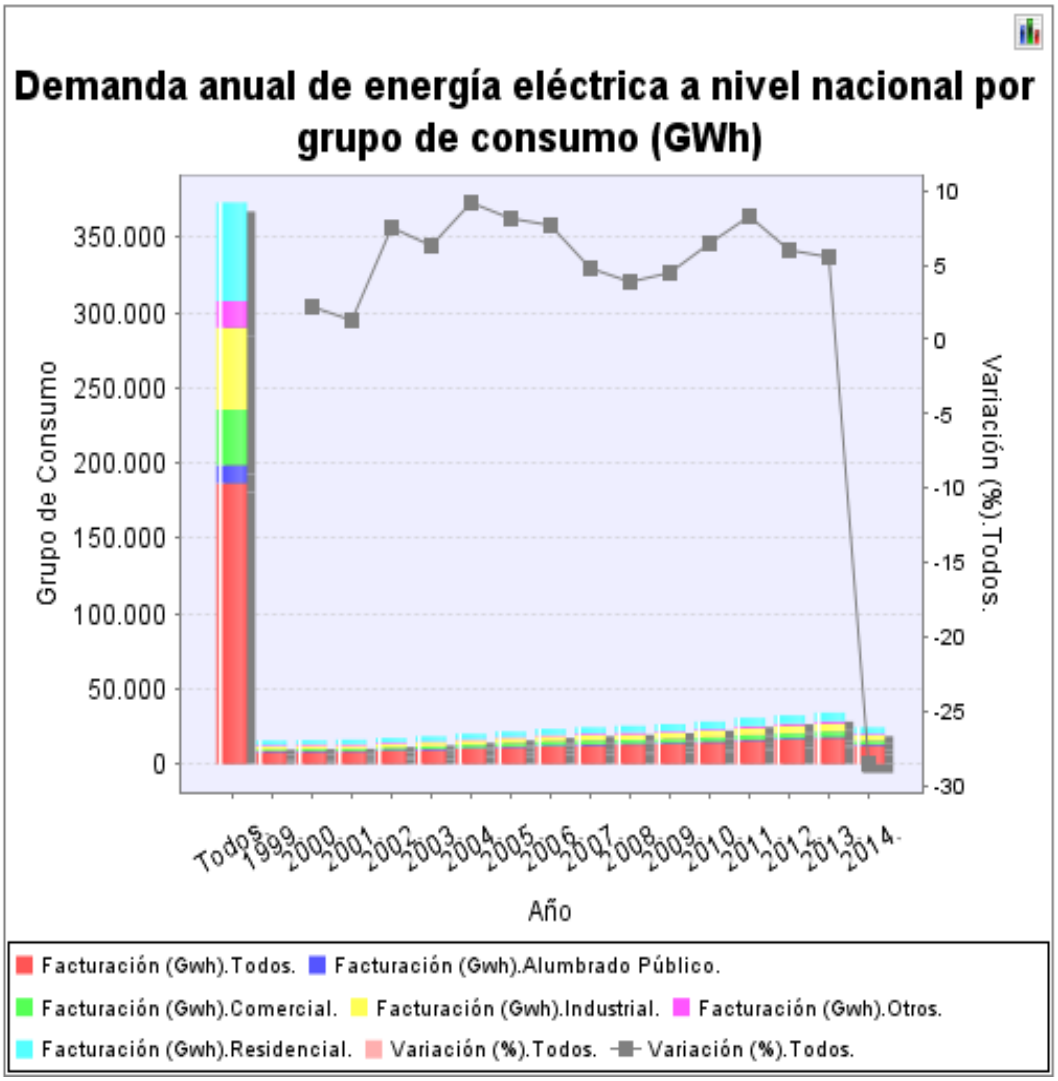


Figura 59. Demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional por grupo de consumo

Fuente: CONELEC

ANEXO E

CÓDIGO EN MATLAB SEÑAL CON ARMÓNICOS

```
clc
n=9

x=-pi:0.01:pi;
f=-1*(x<0)+1*(x>0);
s=zeros(size(x));
for k=1:n
    s=s+((1-(-1)^k)/k)*sin(k*x);
end
s=2/pi*s;
plot(x,s,'r',x,f,'b'),grid;
title('graficando ejemplo')
```

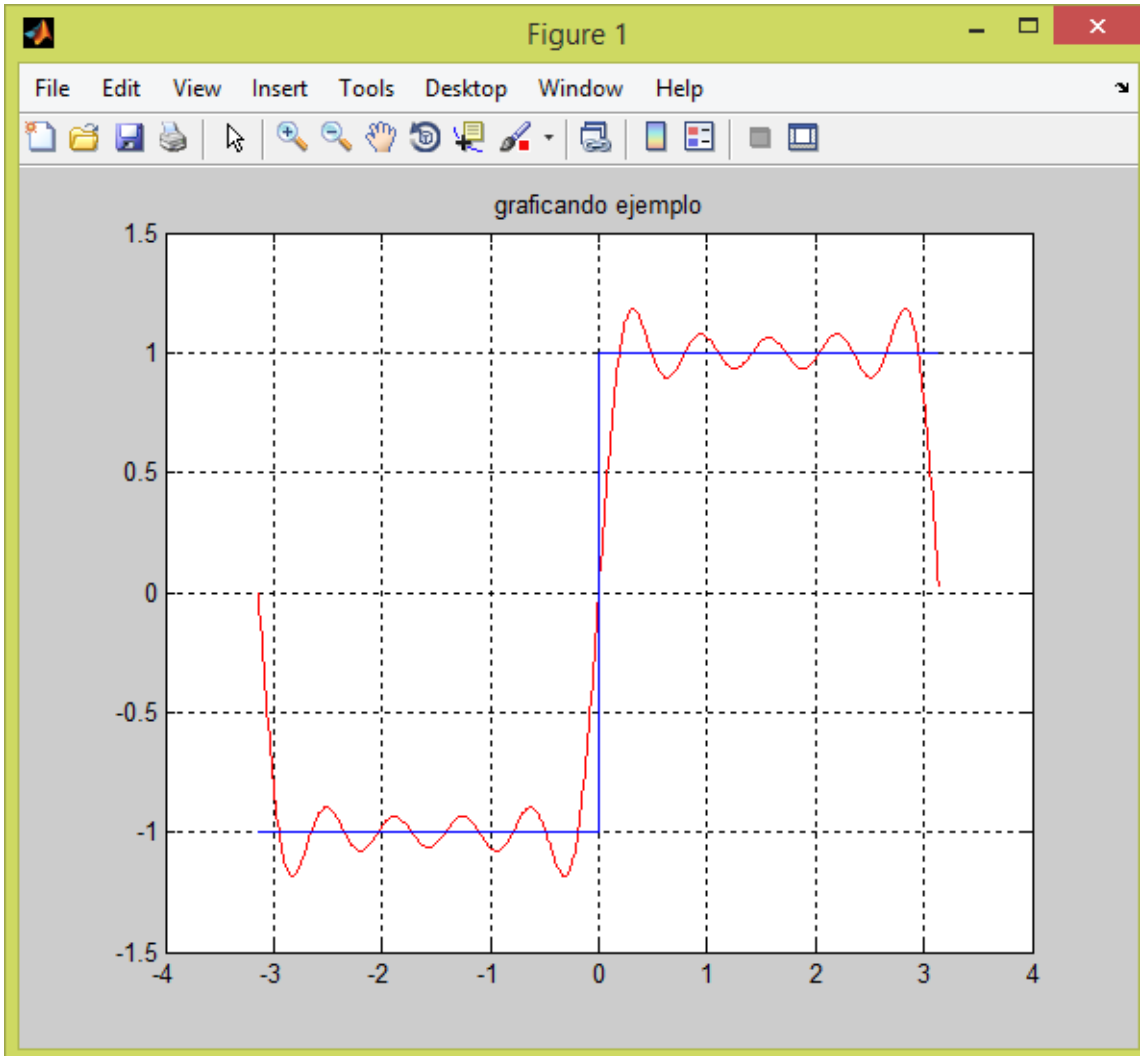


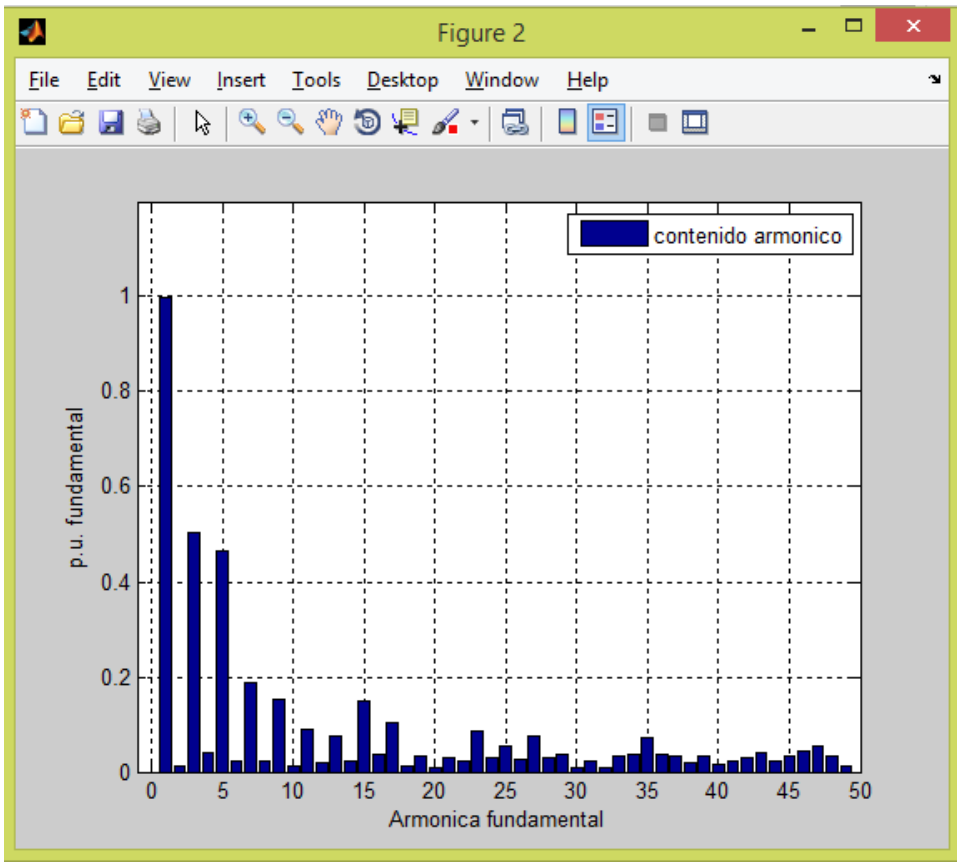
Figura 60. Gráfica señal armónica

Fuente: Autor

ANEXO F

CÓDIGO EN MATLAB SEÑAL TRANSFORMADA

```
clc;
clear
close all
v=input('tension efectiva ');
f=input('frecuencia de fuente ');
Duty=input('porcentaje de subida ');
fp=input('multiplo portadora ');
fp=fp*f;
T=1/f;
t=0:T/100:T;
vf=sqrt(2)*v*sin(2*pi*f*t);
PWM=(square(2*pi*fp*t,Duty)+1)/2;
onda=PWM.*vf;
figure(1)
plot(t,vf,t,onda,'r');grid
Np=length(onda);
a=fft(onda)*2/Np; a(1)=a(1)/2;
figure(2)
bar((0:49),abs(a(1:50))./abs(a(2)));grid
axis([-1 50 0 1.2]);
xlabel('Armonica fundamental')
ylabel('p.u. fundamental')
legend('contenido armonico')
np=floor(Np/2);
Vrms=sqrt((sum((abs(a(2:np))/sqrt(2)).^2))+abs(a(1))^2);
THDv=sqrt(Vrms.^2-(abs(a(2))/sqrt(2))^2)/(abs(a(2))/sqrt(2));
```



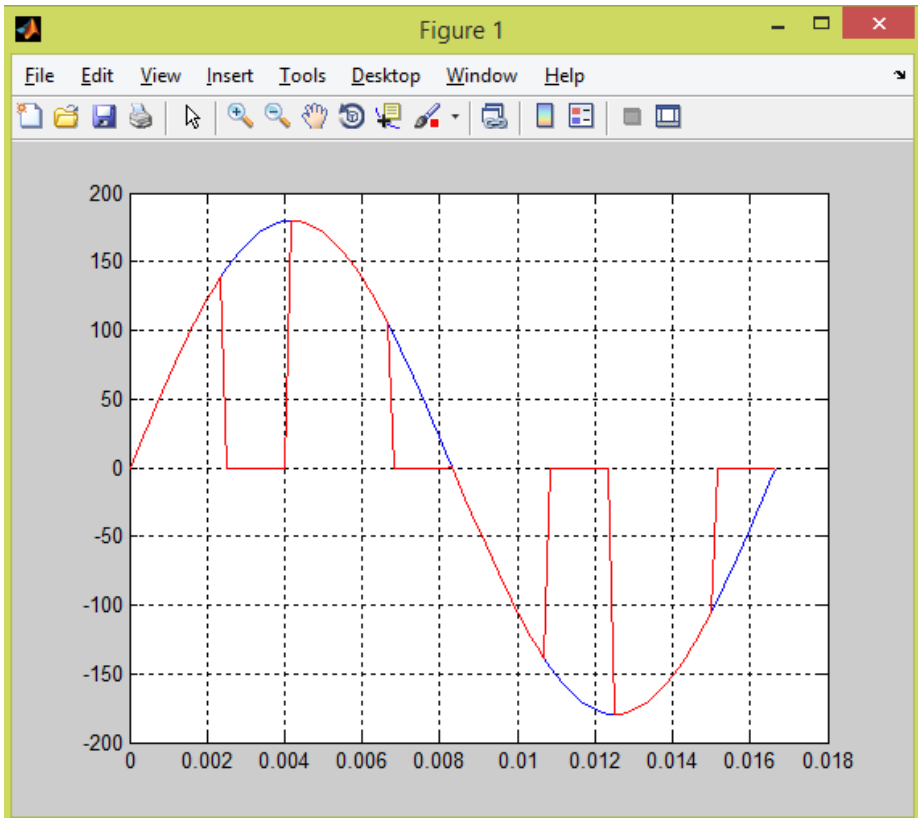


Figura 61. Gráfica señal

Fuente: Autor