



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ANÁLISIS DE LOS MODELOS CIRCUITALES UTILIZADOS
PARA REPRESENTAR LAS LÁMPARAS UTILIZADAS EN EL
ALUMBRADO DE INTERIORES

Br. Delfin Ochoa, Alberto José

Mérida, Mayo 2018

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ANÁLISIS DE LOS MODELOS CIRCUITALES UTILIZADOS
PARA REPRESENTAR LAS LÁMPARAS UTILIZADAS EN EL
ALUMBRADO DE INTERIORES

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Electricista.

Br. Delfin Ochoa, Alberto José
Tutor: Dra. Marisol Dávila

Mérida, Mayo 2018

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ANÁLISIS DE LOS MODELOS CIRCUITALES UTILIZADOS PARA REPRESENTAR
LAS LÁMPARAS UTILIZADAS EN EL ALUMBRADO DE INTERIORES

Autor: Br. Delfin Ochoa, Alberto José

www.bdigital.ula.ve

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado

Prof. Luz Stella Moreno
(Jurado)

Prof. Nelson Ballester
(Jurado)

Dra. Marisol Dávila
(Tutor Académico)

DEDICATORIA

Dedicado primeramente a Dios.

A mis padres, a mis hermanos.

A mis abuelas Ana y Lía.

A mis tíos y primos.

Este logro es gracias a ustedes.

Mil gracias, los quiero con toda mi vida

www.bdigital.ula.ve

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso por haberme dado la sabiduría, conocimiento y salud para alcanzar este logro.

A mis padres, pilares fundamentales a los cuales les debo no solo la vida, sino también agradecerles su incalculable apoyo y cuyos valores me permitieron tener un crecimiento humano y profesional para así alcanzar las metas.

A mi tía Amparo a quién agradezco infinitamente el haberme abierto las puertas de su casa, por transmitir su apoyo, cariño, así como sus valiosos consejos para siempre seguir delante de la mano de Dios ante cualquier adversidad.

A mis hermanos que son parte fundamental de mi vida y que ante cualquier contingencia cumplen con la unión familiar.

A toda mi familia, abuelos, tíos y primos, quienes se encargaron de estar cerca a pesar de la distancia.

A la escuela de Ingeniería Eléctrica de la ilustre Universidad de los Andes por ayudarme en mi preparación profesional.

A la profesora Marisol, quién agradezco haberme brindado su ayuda ante los diferentes problemas atravesado durante el desarrollo de este trabajo de grado.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica por todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera, por su tiempo, amistad y por los conocimientos que me transmitieron.

Br. Alberto José Delfin Ochoa. Análisis de los modelos circuitales utilizados para representar las lámparas utilizadas en el alumbrado de interiores. Universidad de Los Andes. Tutor: Dra. Marisol Dávila.

RESUMEN

Existe una gran variedad de lámparas utilizadas para el alumbrado de interiores, teniendo entre las más comunes: lámparas compactas fluorescentes, lámparas LED y las lámparas fluorescentes con balastro electrónico. Cada tipo de lámpara tiene asociado un circuito de alimentación y control, en la mayoría de los casos, circuitos con una cierta dificultad para realizar análisis circuitales y armónicos por medio de los métodos comúnmente usados. Así, mediante el uso de artificios matemáticos, como ecuaciones de naturaleza polinómicas desarrolladas por los autores tomados como apoyo para el presente trabajo, permiten configurar un circuito equivalente simple con el fin de extraer información confiable en cuanto al comportamiento del dispositivo, en otras palabras, garantizar un análisis circuital confiable. Como herramientas empleadas para validar los modelos eléctricos, tanto los propuestos como los seleccionados para el análisis en este trabajo de grado, están los programas PSCAD / EMTDC® y el ORCAD CAPTURE®, simuladores con bases sólidas en los que pueden implementarse los modelos circuitales propuestos para cada lámpara y poder comparar con los resultados obtenidos a través de las mediciones. También se emplearon casos de estudio más significativos para apreciar el efecto armónico causado por un número de lámparas conectadas en un mismo punto, detallando cada diferencia respecto al análisis particular para cada carga de alumbrado, para así tener una idea de los posibles niveles armónicos presentes en un sistema de potencia, particularmente una instalación eléctrica, ambos gobernados por estándares los cuales establecen límites en cuanto a la distorsión admisible en la red de suministro eléctrico.

Palabras Claves: Lámparas Fluorescentes Compactas, LED y Fluorescentes, Análisis de Armónicos.

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN	iii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	1

Capítulo	pp.
1 EL PROBLEMA	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Planteamiento del Problema.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 General.....	6
1.4.2 Específicos.....	6
1.5 Metodología.....	7
1.6 Alcance.....	8
1.7 Limitaciones.....	8
2 MARCO TEÓRICO	9
2.1 Calidad de Energía.....	9
2.2 Perturbaciones Eléctricas.....	10
2.2.1 Ruidos e Impulsos en Modo Diferencial.....	11
2.2.2 Variaciones Lentas y Rápidas de Tensión.....	11
2.2.3 Cortes Largos.....	13
2.2.4 Distorsión Armónica.....	13
2.2.5 Variaciones de Frecuencia.....	14
2.3 Análisis de Armónicos.....	15
2.3.1 Naturaleza de los Armónicos.....	15
2.3.2 Análisis de Armónicas.....	16
2.3.3 Transformada de Fourier.....	16
2.3.4 Fuentes de Armónicos.....	17
2.3.5 Mediciones Armónicas.....	17

2.3.6	Índices para la Cuantificación de Armónicos	18
2.4	Normativa IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas de Energía Eléctrica	19
2.4.1	Límites de Armónicos Recomendados	19
2.4.2	Límites de Voltajes Armónicos Recomendados	20
2.4.3	Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas Nominales de 120 V a 69 kV	20
2.5	Medidores Eléctricos y Analizadores de Calidad de Energía	21
2.5.1	El Red Fluke	21
2.5.2	El Osciloscopio	21
2.6	Lámparas Utilizadas en Instalaciones Eléctricas.....	22
2.6.1	Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC)	22
2.6.2	Lámparas LED	24
2.6.3	Lámparas Fluorescentes	25
2.7	Modelos Utilizados para los Diferentes Tipos de Lámparas.....	27
2.7.1	Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC)	27
2.7.2	Lámparas LED	32
2.7.3	Lámparas Fluorescentes con Balastro Electrónico	33
3	MÉTODO PARA OBTENER EL MODELO CIRCUITAL EN LÁMPARAS PARA EL ALUMBRADO DE INTERIORES	35
3.1	Descripción del Método	35
3.1.1	Métodos Basados en un Análisis en el Dominio de la Frecuencia	36
3.2	Procedimiento para la Obtención de los Parámetros Circuitales.....	49
3.2.1	Pruebas para la Determinación de Parámetros Eléctricos en una Lámpara Compacta Fluorescente (LFC)	49
3.2.2	Pruebas para la Determinación de Parámetros Eléctricos en una Lámpara LED	63
3.2.3	Pruebas para la Determinación de Parámetros Eléctricos en una Lámpara fluorescente	77
4	EFFECTOS OCASIONADOS POR LA CONEXIÓN DE VARIAS LÁMPARAS EN EL MISMO PUNTO DE ACOPLAMIENTO COMÚN.....	92
4.1	Efecto Debido a la Conexión de Varias LFC	92
4.2	Efecto Debido a la Conexión de Varias Lámparas LED	99
	CONCLUSIONES	106
	RECOMENDACIONES	107
	REFERENCIAS	108
	ANEXO DIGITAL A	110
	ANEXO DIGITAL B.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	pp.
2.1 (a) Forma de Onda Ideal. (b) Forma de Onda Distorsionada.	10
2.2 (a) Ruido Eléctrico. (b) Impulso Eléctrico	11
2.3 Variación lenta de tensión.	12
2.4 Variación Rápida de Tensión.	12
2.5 Corte largo de tensión.	13
2.6 Distorsión armónica.	14
2.7 Forma de onda con variación de frecuencia.	14
2.8 Partes de una LFC [García, 2018].	23
2.9 Lámpara LED [GU10, 2018].	24
2.10 Tipos de lámparas fluorescentes.	25
2.11 Circuito Equivalente de la Lámpara Compacta Fluorescente (LCF).	28
2.12 Circuito Típico LFC.	29
2.13 Circuito Equivalente de la Lámpara Fluorescente Compacta.	29
2.14 Circuito Propuesto de la LFC.	30
2.15 Circuito Típico de una LFC con Balastro Electrónico Interno.	31
2.16 Modelo Simplificado de una CFL.	31
2.17 Circuito de una Lámpara LED.	32
2.18 Circuito Equivalente de una Lámpara LED.	33
2.19 Circuito Inversor Resonante Clase D.	34
3.1 Circuito Aplicado para Obtener el Voltaje y la Corriente Consumida por la LFC.	50
3.2 Circuito Equivalente LFC: (a) Estudiado. (b) Julio Molina-Y. Yong. (c) Julio Molina.	54
3.3 Circuito Aplicado para las Mediciones Eléctricas.	64
3.4 Modelo Circuito Equivalente: (a) Estudiado. (b) Julio Molina.	68
3.5 Circuito Implementado para Obtener la Corriente Consumida por las LF.	77
3.6 Circuito Inversor Clase D: (a) Autor (b) Kazimierczuk.	82
4.1 Circuito con Carga Lumínica.	93
4.2 Circuito con Carga Lumínica.	100

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	pp.
3.1 Forma de Onda: Tensión AC, Corriente AC y Tensión DC [Molina, 2016].	38
3.2 Forma de Onda: Tensión AC, Corriente AC y Tensión DC. [Molina, 2014].	41
3.3 Curva para la Estimación del Parámetro C [Molina, 2014].	43
3.4 Forma de Onda LFC (a) Corriente Medida. (b) Corriente Simulada.	56
3.5 Forma de Onda LFC (a) Voltaje Medido. (b) Voltaje Simulado.	56
3.6 Forma de Onda Corriente Eficaz de la LFC.	57
3.7 (a) Magnitud Corrientes Armónicas. (b) Magnitud Tensiones Armónicas.	58
3.8 Forma de Onda Capacitor DC: (a) Modelo Estudiado. (b) Julio Molina.	61
3.9 Forma de Onda Lámpara LED (a) Corriente Medida. (b) Corriente Simulada.	69
3.10 Forma de Onda Lámpara LED (a) Voltaje Medido. (b) Voltaje Simulado.	70
3.11 Forma de Onda Corriente Eficaz de la Lámpara LED.	70
3.12 (a) Niveles Armónicos de Corriente. (b) Niveles Armónicos de Tensión.	71
3.13 Forma de Onda Capacitor DC: (a) Modelo Estudiado. (b) Julio Molina.	75
3.14 Forma de Onda Corriente Consumida por <i>RP</i> . (a) Autor. (b) Kazimierczuk.	84
3.15 Magnitud de Corrientes Armónicas (a) Autor. (b) Kazimierczuk.	85
3.16 Magnitud de Tensiones Armónicas. (a) Autor. (b) Kazimierczuk.	86
4.1 Distorsión Armónica de Corriente Causada por la Conexión de 15 LFC.	95
4.2 Distorsión Armónica de Voltaje Causado por la Conexión de 15 LFC.	96
4.3 Distorsión Armónica de Voltaje Causado por la Conexión de 15 Lámparas LED.	101
4.4 Distorsión Armónica de Voltaje Causado por la Conexión de 15 Lámparas LED.	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	pp.
2.1 Límites de Distorsión de Voltaje.....	20
2.2 Límites Distorsión de Corriente para Sistemas Nominales de 120V a 69 kV.....	20
2.3 Categoría de Balastos Electrónicos.....	28
3.1 Parámetros Eléctricos para Obtener el Circuito Equivalente de una LFC.....	51
3.2 Cuadro Comparativo entre los Parámetros Obtenidos en el Estudio y por Molina.....	52
3.3 Potencia consumida por las LFC.....	53
3.4 Parámetros Eléctricos Obtenidos para las LFC.....	55
3.5 Magnitud de Corrientes y Tensiones Armónicas.....	58
3.6 Distorsión Armónica de Corriente.....	59
3.7 Distorsión Armónica de Voltaje.....	60
3.8 Resultados de la THD_v y THD_i en los Diferentes Modelos Estudiados.....	62
3.9 Parámetros para Obtener el Circuito Equivalente de una Lámpara LED.....	65
3.10 Cuadro Comparativo entre los Parámetros Obtenidos en el Estudio y por Molina.....	67
3.11 Potencia Consumida por las Lámparas LED.....	67
3.12 Parámetros Eléctricos Obtenidos para las Lámparas LED.....	69
3.13 Magnitud de Corrientes y Tensiones armónicas.....	72
3.14 Distorsión Armónica de Corriente.....	73
3.15 Distorsión armónica de voltaje.....	73
3.16 Resultados THD_v y THD_i para los Diferentes Modelos Estudiados.....	76
3.17 Tensión y Corriente Consumida por la Luminaria.....	78
3.18 Tensión y Corriente de Funcionamiento.....	79
3.19 Magnitudes de los Elementos del Circuito Inversor Clase D.....	81
3.20 Resultados Obtenidos Utilizando ORCAD CAPTURE®.....	83
3.21 Magnitud de Corrientes y Tensiones Armónicas.....	87
3.22 Magnitud de Corrientes y Tensiones Armónicas.....	87
3.23 Distorsión Armónica de Corriente.....	88
3.24 Distorsión Armónica de Voltaje.....	89
3.25 Resultados THD_v y THD_i para los Diferentes Modelos Estudiados.....	91
4.1 Corriente Eficaz Obtenida para 1 y 15 LFC.....	94
4.2 Magnitud de Corrientes Armónicas.....	94
4.3 Magnitud de Tensiones Armónicas.....	95
4.4 Distorsión Armónica de Corriente.....	97
4.5 Distorsión Armónica de Voltaje.....	97
4.6 Distorsión Armónica Total de Corriente y Tensión.....	98
4.7 Corriente Eficaz Obtenida para 1 y 15 lámparas LED.....	100
4.8 Magnitud de Corrientes Armónicas.....	101

4.9	Magnitud de Tensiones Armónicas.....	101
4.10	Distorsión Armónica de Corriente.....	103
4.11	Distorsión armónica de voltaje.....	103
4.12	Distorsión Armónica Total de Corriente y Tensión.....	105

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCIÓN

Actualmente, con el alza exponencial de la tecnología los sistemas de potencia son expuestos cada vez más a las distorsiones eléctricas ocasionadas por los diferentes tipos de cargas consideradas como cargas no lineales, como pueden ser los motores eléctricos, dispositivos de iluminación (lámparas LED, lámparas compactas fluorescente, lámparas fluorescentes con balastro electrónico), entre otros.

Las corrientes y tensiones armónicas particularizan un tipo de distorsión eléctrica, originada principalmente por la presencia de dispositivos electrónicos, los cuales al encontrarse conectados de forma masiva en un mismo punto de acoplamiento ocasionan problemas a la red eléctrica tales como la operación incorrecta en los equipos de protecciones, sobrecarga en los transformadores de potencia, calentamiento en los conductores eléctricos, entre otros.

Mediante análisis de armónicos dirigidos a los sistemas de baja tensión, apoyado en los estándares internacionales para la limitación de armónicos y a través de estudios sobre el comportamiento de las diferentes cargas lineales, es posible reducir este tipo de distorsiones. Razón por la cual se propone el presente trabajo, el cual se encuentra fundamentado en estudios previos direccionados a cargas no lineales particulares, como son las lámparas implementadas para la iluminación de interiores; materializando y reforzando los análisis mediante una investigación de tipo documental y de tipo práctica.

El presente trabajo se encuentra configurado por 4 capítulos, los cuales se desglosan a continuación:

Capítulo 1: Contiene las generalidades contempladas para el trabajo de grado, tales como los antecedentes, planteamiento del problema, la justificación, objetivos, metodología, alcance y limitaciones

Capítulo 2: En él se resaltan los conceptos más importantes considerados para obtener un buen desarrollo respecto al presente trabajo.

Capítulo 3: Posee la metodología implementada para el desarrollo del trabajo, en donde se refleja el proceso para obtener los parámetros que integran los diferentes modelos equivalentes implementados para el estudio.

Capítulo 4: En este capítulo se aprecia los efectos ocasionados por la conexión de varias lámparas en una misma instalación.

Por último, pero de igual importancia se exponen las conclusiones y recomendaciones generadas a partir del estudio realizado.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA

En el presente capítulo se exponen las generalidades del trabajo, otorgándole de alguna forma el preámbulo para el desarrollo del mismo. Dentro de su composición se tienen los antecedentes, planteamiento del problema, justificación, objetivos (general y específico), metodología, alcances y limitaciones.

1.1 ANTECEDENTES

La calidad en el suministro de la energía eléctrica en los últimos tiempos se ha visto afectada principalmente por el incremento en el uso de cargas eléctricas no lineales, principalmente aquellas asociadas a las lámparas utilizadas en el alumbrado de interiores tanto a nivel residenciales como comercial, dada la gran inyección de armónicos que ellas traen consigo.

Por estas razones numerosos autores han enfocado sus estudios a la caracterización de estas lámparas y han planteado diferentes modelos circuitales para representarlas, así como diversos métodos de análisis.

Entre los trabajos encontrados en la literatura reciente se pueden mencionar algunos como:

Julio Molina y otros en 2014, presentan un aporte alternativo sobre el modelo circuital equivalente de las lámparas fluorescentes compactas (LFC), estudio basado en la hipótesis de la simetría de media onda, para así obtener los parámetros que conforman el modelo, por lo tanto, poder desarrollar un estudio lo más correcto posible que facilite la comprensión y potencie el análisis de los armónicos generados por este tipo de dispositivos [Molina, 2014].

Otro de los trabajos que vale la pena resaltar son las pruebas realizadas por Jing Yong y colaboradores, cuyos estudios realizados reflejan lo que ocasionan en la red de suministro eléctrico, un grupo de lámparas fluorescentes alojadas en un sitio en común.

Dichos dispositivos se comportan como fuentes generadoras de armónicos los cuales son inyectados al sistema ocasionando perturbaciones en los niveles de tensión suministrados. Debido a estos efectos, es difícil plantear a gran escala un modelo de armónicos adecuado.

Sin embargo se han desarrollado estudios mediante el uso de puentes convertidores basados en modelos en Hz.

Estas perturbaciones se asocian a dispositivos electrónicos internos de las LFC, como lo es el balastro electrónico. Para evitar observar estos efectos la frecuencia de trabajo se normalizó a 50 o 60 Hz [Slezingr, 2012].

Julio Molina presenta un modelo circuital de las lámparas LED que permite observar el efecto que estas lámparas ocasionan a la red de distribución. Este modelo contiene un filtro para interferencias electromagnéticas para evitar el ruido en los conmutadores electrónicos [Molina, 2016].

Por otra parte, Sohel Uddin presenta un estudio sobre la inyección de los armónicos al sistema en donde muestra unos límites que han sido normalizados para tratar de reducir de forma significativa las perturbaciones ocasionadas por este tipo de problemas.

Según la evaluación estándar propuesta en IEC 61000-3-2, se estable un límite de consumo de corriente ≤ 16 A por fase. También Sohel muestra un criterio en donde el 3er y 5to armónico no debe exceder 86 y 61 % respectivamente de la corriente fundamental [Uddin, 2012].

En cuanto a las lámparas fluorescentes con balastro electrónico Marian K. Kazimierzuk, propone un modelo conformado por un circuito inversor resonante clase D el cual permite controlar dos tubos fluorescentes, que contiene un MOSFETs de bajo voltaje con baja resistencia interna el cual aumenta la eficiencia y reducen las pérdidas por conducción [Kazimierzuk, 1993].

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cada vez más aumenta el uso de dispositivos de iluminación para interiores y exteriores como son las lámparas compactas fluorescentes, lámparas LED, entre otros; trayendo resultados positivos principalmente para las empresas fabricantes quienes ven incrementados sus ingresos, además de garantizar a los clientes la satisfacción ofreciendo productos de alto rendimiento y eficiencia. Sin embargo, el uso de estos tipos de lámparas tienen ciertos aspectos negativos, dado que estos dispositivos al estar compuestos por elementos electrónicos en su mayoría traen consigo perturbaciones que afectan a la red de suministro eléctrico, generando así deformaciones en las ondas de tipo eléctrica transmitidas.

Dada la importancia que estos elementos tienen en el funcionamiento de una red eléctrica, es necesario poder realizar un análisis detallado de su comportamiento y para ello se pueden utilizar los modelos circuitales que se han planteado en diferentes literaturas para caracterizar dichas lámparas, partiendo del conocimiento de los parámetros eléctricos asociadas a ellas, los cuales se pueden obtener a partir de mediciones y simulaciones. Por esta razón, en este trabajo se plantea realizar un estudio comparativo de los modelos planteados por otros autores y determinar el comportamiento de los diferentes tipos de lámparas y así establecer un correcto análisis sobre las perturbaciones que pueden ocasionar en el sistema.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En una instalación eléctrica la carga de alumbrado representa un alto porcentaje de consumo, actualmente las lámparas fluorescentes compactas (LFC), las lámparas basadas en diodos emisores de luz (LED) y las lámparas fluorescentes con balastos electrónicos se están utilizando cada día con más frecuencia con el fin de reducir el consumo de electricidad. Estas lámparas representan una carga no lineal para el sistema que conlleva la aparición de mucha distorsión armónica a la red, lo que representa un problema de calidad de energía. Con el fin de analizar el comportamiento de estas lámparas en una instalación, se han desarrollado numerosos trabajos

sobre el modelado y caracterización de las mismas, para poder comparar su comportamiento respecto a las lámparas incandescentes.

En este trabajo se pretende realizar el análisis comparativo de los diferentes modelos circuitales propuestos para representar las LFC, las LED y las fluorescentes con balastro electrónico, para ello se simularán dichos modelos utilizando el programa comercial PSCAD / EMTDC® en su versión libre disponible en la red. Para la obtención de los parámetros presentes en los circuitos, se parte de mediciones de voltaje y corriente tomadas en las terminales de los dispositivos. Posteriormente a través de ecuaciones polinómicas se calcula la magnitud de cada parámetro.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General

Analizar los modelos circuitales utilizados para representar las lámparas utilizadas en el alumbrado de interiores.

1.4.2 Específicos.

- Estudiar el funcionamiento de las diferentes lámparas utilizadas para alumbrado de interiores.
- Estudiar las diferentes herramientas matemáticas utilizadas para el modelado las diferentes lámparas utilizadas para alumbrado de interiores.
- Estudiar el uso del programa PSCAD/EMTDC® como herramienta necesaria para el modelado de los dispositivos en estudio.
- Analizar el comportamiento de las lámparas fluorescentes compactas (LFC) y las lámparas basadas en diodos emisores de luz (LED), mediante su modelado utilizando el programa PSCAD/EMTDC®.
- Validar los resultados obtenidos en el modelado con los encontrados por otros autores.

1.5 METODOLOGÍA.

El trabajo a desarrollar es de tipo combinado en el que se hace una revisión documental y una ejecución práctica en donde se realiza una serie de mediciones, así como también el uso de una interfaz gráfica.

En cuanto a la revisión documental se realizó:

- Un estudio con el fin de comprender el funcionamiento de las diferentes lámparas utilizadas para alumbrado de interiores.
- Una revisión de las diferentes herramientas matemáticas utilizadas para el modelado de las diferentes lámparas utilizadas para alumbrado de interiores.
- El estudio y comprensión del uso del programa PSCAD/EMTDC®, como herramienta necesaria para el modelado de los dispositivos en estudio.

Por otro lado, lo referido a la parte práctica se ejecutó lo siguiente:

- Obtención de parámetros eléctricos (voltaje y corriente) mediante equipos de medición para los diferentes tipos (lámpara LED, lámpara compacta fluorescente y lámpara fluorescente con balastro electrónico).
- Uso del programa PSCAD/EMTDC® para modelar las lámparas fluorescentes compactas (CFL), las lámparas basadas en diodos emisores de luz (LED) y las lámparas fluorescentes con balastro electrónico.

Aquí se estudian los distintos modelos matemáticos y las herramientas disponibles para llegar a un modelado exitoso de las LFC y las LED, partiendo de modelos desarrollados y comprobados por otros autores.

Como etapa final del estudio, es necesario validar los resultados obtenidos en este trabajo, comparando con resultados obtenidos por otros autores.

1.6 ALCANCE

Este trabajo se limitará al estudio del comportamiento de las lámparas fluorescentes compactas (LFC), lámparas fluorescentes con balastro electrónico y las lámparas basadas en diodos emisores de luz (LED), mediante el análisis de los modelos circuitales y usando el software de simulación PSCAD/EMTODC®.

1.7 LIMITACIONES

Las pruebas realizadas para el estudio de los diferentes modelos circuitales equivalentes de cada dispositivo fueron desarrolladas sólo para un tipo de lámpara por cada tipo de luminaria debido a los altos costos de las mismas, razón por la cual, no se pudo realizar pruebas para diferentes potencias, tipo de fabricante, entre otras, por nombrar algunos ejemplos.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Ante cualquier estudio que se desee realizar acerca de un tema en específico, es de importancia realizar una buena investigación sobre de los diferentes conceptos que estén involucrados con dicho tema, de esta manera se puede obtener una buena información sobre los diversos contenidos que están relacionados o que gobiernen dicho trabajo.

Además de tener como apoyo adicional, los diversos puntos de vista obtenidos mediante estudios planteados por otros investigadores, para de esa manera contar con un análisis más sólido.

2.1 CALIDAD DE ENERGÍA

Para introducir un concepto sobre la calidad de energía, son postulados dos puntos de vista diferentes, el primero, representado por la compañía de suministro eléctrico la cual apoya su definición en la carga de penalidades para altas demandas, distorsiones en la forma de onda y pésimos factores de potencia. El segundo punto de vista lo presenta el usuario, estableciendo que el porcentaje de error en la amplitud y frecuencia establecida no afecte sus instalaciones, para recibir con ello, la mejor cobertura posible de sus exigencias en cuanto a calidad y cantidad.

Sin embargo, un concepto general sobre la calidad de energía se puede describir como una normalización del suministro eléctrico el cual debe ser garantizado por la empresa eléctrica a través de niveles fijados por normas en términos de tensión o voltaje constante, forma de onda sinusoidal y frecuencia constante.

2.2 PERTURBACIONES ELÉCTRICAS

Un sistema eléctrico se encuentra formado por tres etapas principales como son: la generación, transmisión y distribución del suministro eléctrico. Estas fases pueden verse afectadas debido una serie de fallas como pueden ser, principalmente, descargas atmosféricas, maniobras, fallas en líneas o en subestaciones.

También es de considerar al aumento en las conexiones de cargas no lineales en la red eléctrica, es decir, el uso de dispositivos electrónicos para controles industriales, la electrónica de potencia o la búsqueda de eficiencia en luminarias por ejemplo, traen consigo una serie de perturbaciones como pueden ser de voltaje, corriente o frecuencia, alterando la calidad en la forma de onda transmitida como se muestra en la figura 2.1, o en otros términos, afectando la calidad del servicio eléctrico [Sánchez, 2006].

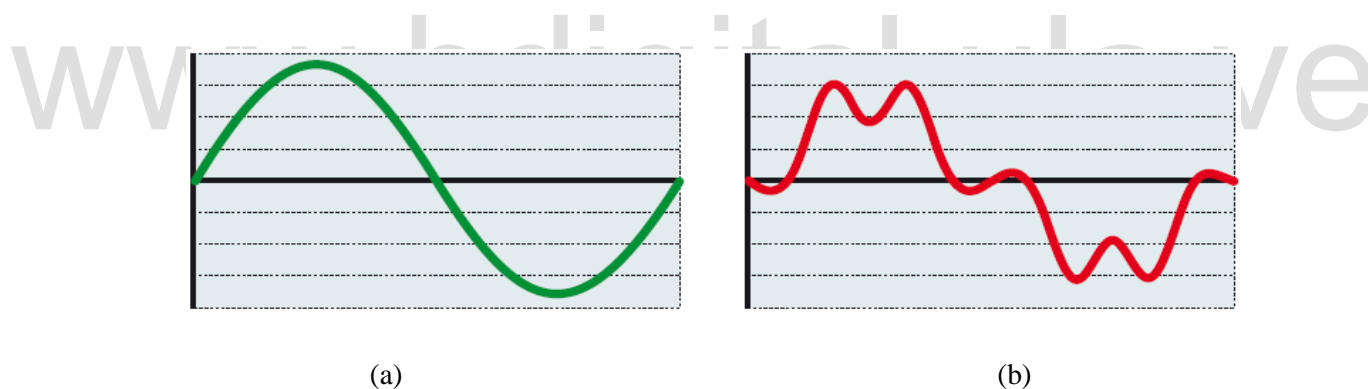


Figura 2.1. (a) Forma de Onda Ideal. (b) Forma de Onda Distorsionada.

Son diversos los tipos de perturbaciones que afectan el sistema eléctrico, una de ellas son las perturbaciones aleatorias también llamadas pasajeras las cuales se originan en los elementos de la red eléctrica o en la propia instalación del usuario. Otra categoría son las perturbaciones estacionarias o permanentes, estas presentan su origen en las instalaciones del usuario.

Sin embargo, las perturbaciones comúnmente encontradas en la red de suministro eléctrico son las siguientes:

2.2.1 Ruidos e Impulsos en Modo Diferencial

Afectan directamente a los conductores de alimentación, ya sea en sistemas monofásicos o trifásicos, en donde se pueden presentar tensiones entre las decenas o cientos de voltios, llamados ruidos o impulsos como se muestra en la figura 2.2.

El origen de los llamados ruidos es básicamente debido a un funcionamiento deficiente en máquinas eléctricas conectadas a un punto cercano a la carga. Por otro lado, los problemas ocasionados por impulsos se direccionan a la conexión y desconexión de bancos de condensadores, incluso por descargas atmosféricas las cuales no son predecibles [Sánchez, 2006].

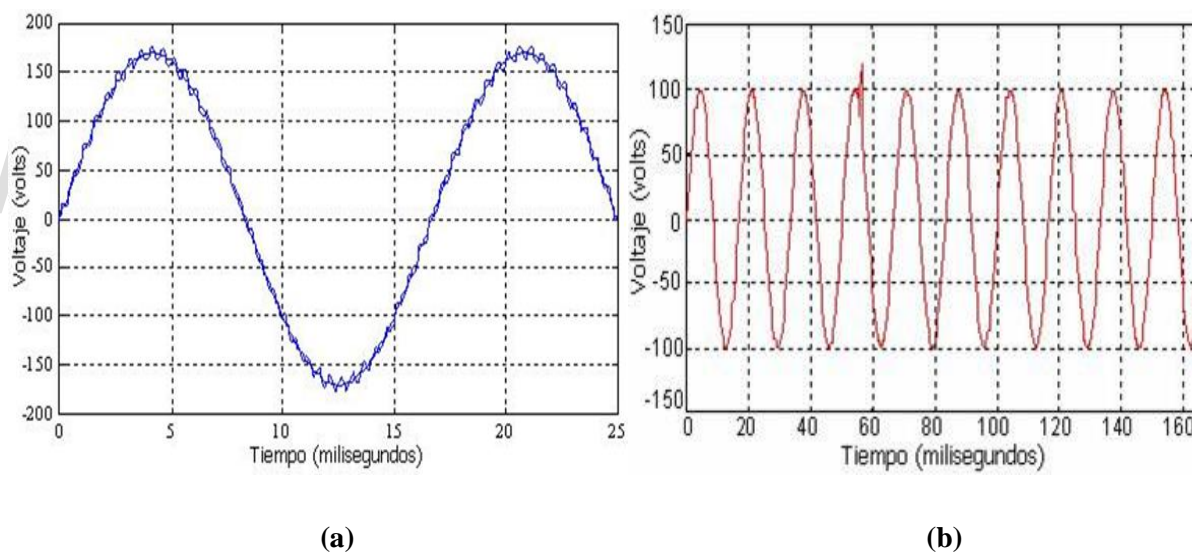


Figura 2.2. (a) Ruido Eléctrico. (b) Impulso Eléctrico

2.2.2 Variaciones Lentas y Rápidas de Tensión

Las variaciones se presentan cuando en la red eléctrica ocurren alteraciones de las cargas que se conectan al sistema con alta impedancia de corto circuito y la misma rompe los límites establecidos por el fabricante de los equipos, ocasionando fallos en su operación. A esta

perturbacion se le conoce como variación lenta de tensión, debido a que por lo general duran un tiempo mayor a 10 segundos como se refleja en la figura 2.3.

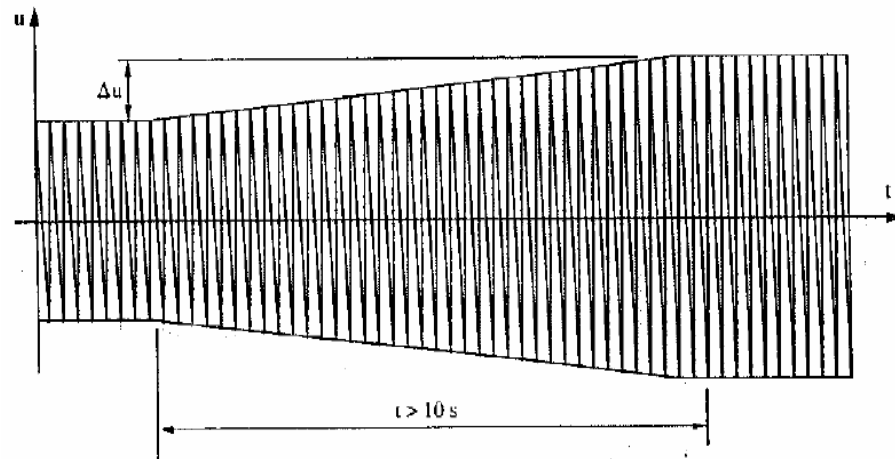


Figura 2.3. Variación lenta de tensión.

Ahora, cuando la perturbación ocurre en un instante corto de tiempo, se considera una variación de tensión rápida, alrededor de los 10 segundos o un tiempo menor, cuyo ejemplo se encuentra ilustrado en la figura 2.4. Estas son ocasionadas por maniobras en las líneas eléctricas, es decir, por la conexión o desconexión de grandes cargas [Sánchez, 2006]

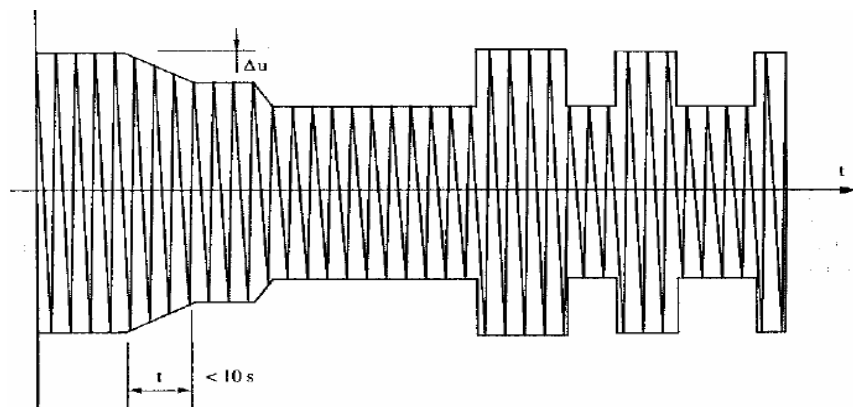


Figura 2.4. Variación Rápida de Tensión.

2.2.3 Cortes Largos

Las fallas como la desconexión de líneas de alimentación, daños en subestaciones o en centros de generación ocasionan este tipo de perturbaciones, lo que la diferencia de las variaciones de tensiones, y este es considerado como la reducción de la tensión nominal hasta un 50%, aproximadamente un ciclo de duración. Estas generan la paralización de los equipos o a las instalaciones a las que alimenta.

En la figura 2.5 se puede apreciar cómo se reduce la tensión hasta un valor incluso menor al 50% [Sánchez, 2006].

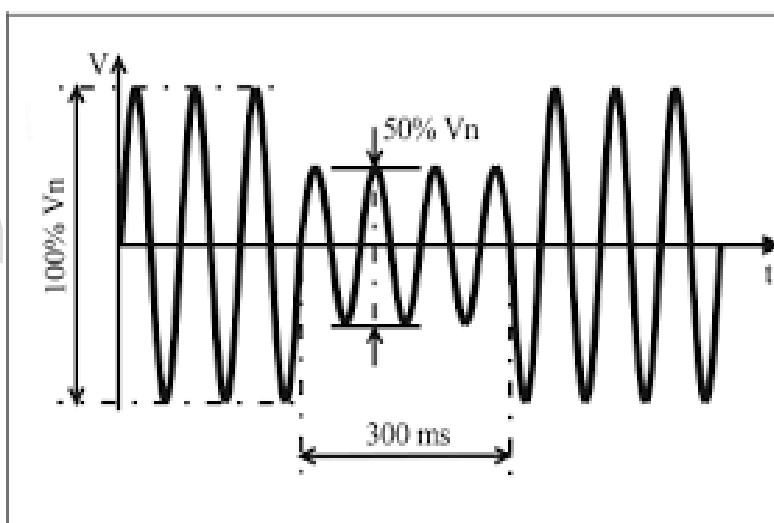


Figura 2.5. Corte largo de tensión.

2.2.4 Distorsión Armónica

Este tipo de perturbación se debe principalmente a la conexión de cargas no lineales al sistema, estas cargas tienden a deformar la forma de onda fundamental, distorsión ilustrada en la figura 2.6. También pueden influir las máquinas con núcleo magnético saturado [Sánchez, 2006].

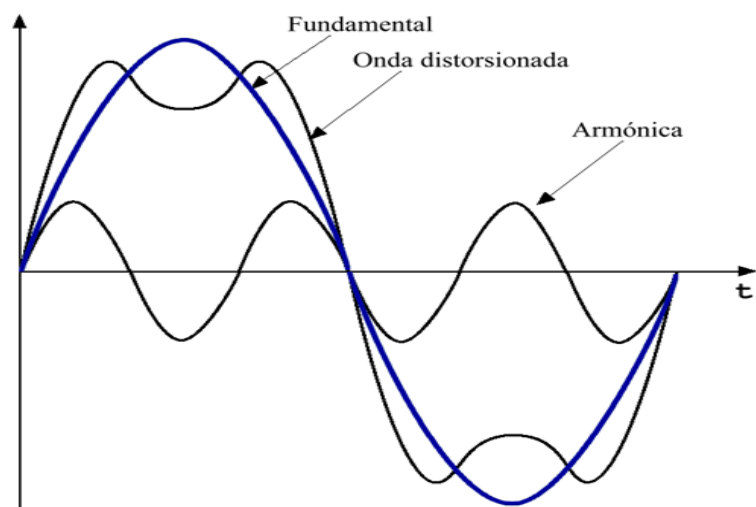


Figura 2.6. Distorsión armónica.

2.2.5 Variaciones de Frecuencia

Son variaciones no tan comunes, pero cuando ocurren se refleja en la alteración de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico tal y como se muestra en la figura 2.7. Esta perturbación se produce debido a la conexión entre generadores y pérdida de sincronismo del mismo [Sánchez, 2006].

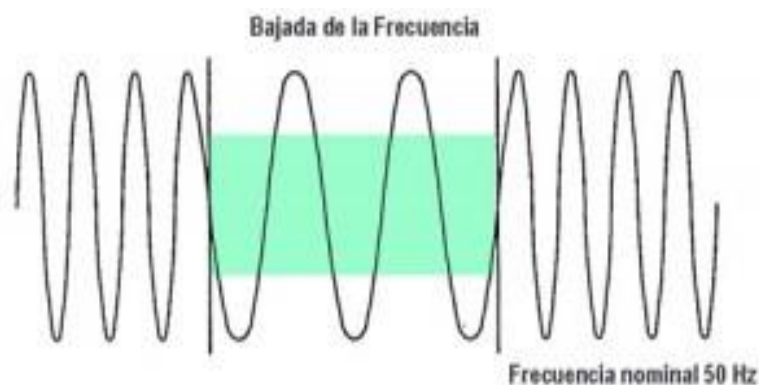


Figura 2.7. Forma de onda con variación de frecuencia.

2.3 ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Los centros de generación eléctrica, constituidos principalmente por máquinas eléctricas (generadores síncronos) son el corazón del sistema, debido a su diseño dan como resultado en la salida de sus terminales un nivel de tensión, idealmente en cualquier punto en donde se desee realizar una medición se debe obtener una forma de onda periódica de tipo sinusoidal, generada a una frecuencia fundamental establecida (50 o 60Hz) que nutre toda la red interconectada. Ciertos factores, como puede ser la conexión al sistema de cargas no lineales, la forma de onda sinusoidal inicial es objeto de distorsión, es decir, puede encontrarse afectada por los armónicos que son inyectados al sistema por este tipo de cargas, también conocidas como fuentes armónicas.

Las lámparas fluorescentes, lámparas compactas y lámparas LED, representan una fuente generadora de armónicos cuando se presentan en grandes bloques, teniendo como resultado alteraciones en las tensiones y corrientes de la red, presentando influencia directa a los diferentes dispositivos que se encuentran sometidos a esa red eléctrica.

2.3.1 Naturaleza de los Armónicos

Al igual que en la música, en donde un armónico representa una frecuencia de vibración que es múltiplo de la frecuencia base de sonido, se puede establecer una relación directa empleando la misma base para definir del mismo, un armónico en el sistema eléctrico, es decir, ajustados a los términos técnicos, un armónico representa una tensión o corrientes sinusoidales que se presentan en el sistema a una frecuencia de múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema [Rosales,1995].

Los armónicos tienen como referencia los siguientes parámetros que lo caracterizan:

- Amplitud: Representa una pequeña cantidad porcentual de amplitud de corriente o tensión respecto a la fundamental.
- Fase: Valor del ángulo entre la fundamental y el armónico.

- Orden: Es el valor que posee la frecuencia armónica respecto a la fundamental.

2.3.2 Análisis de Armónicas

Para materializar los estudios matemáticos acerca del principio de los armónicos se emplea la Serie de Fourier, la cual permite relacionar dos funciones, una en el dominio del tiempo y la otra en el dominio de la frecuencia [Rosales,1995]. La representación mediante el uso de la Serie de Fourier de una función periódica se encuentra representada por

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n \cos(2\pi n t)}{T} + \frac{b_n \cos(2\pi n t)}{T} \right) \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) muestra la forma de una función periódica en el dominio de la frecuencia, donde:

- a_0 representa el valor promedio de la función $x(t)$.
- a_n y b_n se definen como los coeficientes de la serie, es decir, son los componentes rectangulares de la n armónica.

2.3.3 Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier permite representar las señales de tipo no sinusoidales en una suma de sinusoides, de esta manera facilitar el análisis y así poder representar las funciones en el dominio de la frecuencia. La Transformada de Fourier matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{iwt} dt = \langle e^{iwt}, f(t) \rangle \quad (2.2)$$

2.3.4 Fuentes de Armónicos

Se considera como fuente de armónicos todas aquellas cargas no lineales que presenten una respuesta no sinusoidal, teniendo como resultados distorsión en la forma de onda suministrada por la red eléctrica. Cuando ocurren variaciones en la tensión, incluso pequeñas variaciones, genera una reacción significativa en la corriente causando así una distorsión.

Algunas de las fuentes de armónicos más comunes presentes en los sistemas de potencia son [Phipps, 1994]:

- Transformadores saturados.
- Corrientes de energización de transformadores.
- Conexiones al neutro de transformadores.
- Fuerzas magnetomotrices en máquinas rotatorias de corriente alterna.
- Hornos de arco eléctrico.
- Lámparas fluorescentes.
- Fuentes reguladas por conmutación.
- Cargadores de baterías.
- Compensadores estáticos de Var's.
- Variadores de frecuencias para motores.
- Convertidores de estado sólido.

2.3.5 Mediciones Armónicas

Siempre presenta un reto la predicción de problemas armónicos en las instalaciones eléctricas debido a las variaciones en el flujo y a las respuestas del sistema que pueden variar de un sistema a otro. Debido a eso, es fundamental realizar mediciones lo más sólidas posibles para así identificar plenamente las distorsiones armónicas y sus fuentes. Estas mediciones presentan una

gran ayuda para los operadores, permitiéndole establecer una idea del comportamiento de la red y fundamentar posibles soluciones. El análisis de armónicos en el sistema permite lo siguiente:

- Predecir el comportamiento del sistema.
- Hacer seguimiento de fuentes armónicas.
- Calidad de la potencia suministrada al consumidor.
- Impacto de la distorsión armónica de voltaje y corriente.
- Estimar el estado de los modelos armónicos.

2.3.6 Índices para la Cuantificación de Armónicos

Ante la presencia de cualquier fenómeno en el sistema eléctrico de potencia, en este caso los armónicos, es indispensable contar con índices que permitan tabular y cuantificar éste tipo de fenómeno, es decir, se puede obtener el nivel de contaminación armónica de las ondas. Una vez obtenido los diferentes índices se procede a realizar un análisis para así ser comparados con los límites de distorsión establecidos por las normas. Los índices utilizados son los siguientes [Suárez, 2005]:

Distorsión Armónica Total (THD). Es un parámetro útil para solventar problemas en sistemas de distribución y sistemas de transmisión debido a que engloba la contribución de todas las armónicas. Siendo de utilidad para así cuantificar de formar porcentual el grado de contaminación tanto para el voltaje, como para las corrientes armónicas.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} 100\% \quad (2.3)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} 100\% \quad (2.4)$$

Las ecuaciones (2.1) y (2.2) establecen la relación entre el valor RMS total de las componentes armónicas con el valor RMS de la componente fundamental. En donde:

k: Número de armónica.

I_1 : Valor RMS de la onda fundamental de corriente.

V_1 : Valor RMS de la onda fundamental de voltaje.

I_k : Valor RMS del armónico k.

V_k : Valor RMS del armónico k.

Distorsión Total de la Demanda. Es el índice que permite relacionar la corriente de carga de la demandada máxima (I_L) con la corriente armónica.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_L} 100\% \quad (2.5)$$

2.4 NORMATIVA IEEE PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los límites recomendados en ésta normativa se establecen con el fin de reducir los efectos negativos que sufren los usuarios y el sistema eléctrico, manteniendo el nivel de armónicos lo más reducido posible.

2.4.1 Límites de Armónicos Recomendados

Es necesario limitar la inyección de armónicos al sistema para así disminuir la distorsión de voltaje y así mantenerla por debajo de los niveles propuestos. Cabe destacar que los límites pautados en esta normativa sólo se pueden aplicar en el punto de acoplamiento común (PCC) y no en equipos individuales o dentro de las instalaciones de un usuario [IEEE Std 519, 2014] .

2.4.2 Límites de Voltajes Armónicos Recomendados

“Todos los valores deben estar en porcentaje del voltaje de frecuencia de potencia nominal en el punto de acoplamiento común. En la tabla 2.1 se aplica a armónicos de tensión cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental” [IEEE Std 519, 2014] .

Tabla 2.1. Límites de Distorsión de Voltaje.

Voltaje (V) en el Punto de Acoplamiento Común	Armónico Individual (%)	Distorsión Total de Armónicos (THD) (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

2.4.3 Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas Nominales de 120 V a 69 kV

Los datos tabulados en la tabla 2.2 se encuentran en un porcentaje de la corriente de demanda I_L establecido en el punto de acoplamiento común, aplicado a las corrientes armónicas cuya frecuencias son múltiplos de la fundamental [IEEE Std 519, 2014] .

Tabla 2.2. Límites Distorsión de Corriente para Sistemas Nominales de 120V a 69 kV.

I_{SC}/I_L	Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de I_L					TDD
	Orden Armónico Individual					
	$3 < h \leq 11$	$11 < h \leq 17$	$17 < h \leq 23$	$23 < h \leq 35$	$35 < h \leq 50$	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	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	2.5	1.4	20.0

Donde:

I_{SC} = Máxima corriente de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.

I_L = Máxima corriente de demanda en el punto de acoplamiento común bajo condiciones normales de operación.

2.5 MEDIDORES ELÉCTRICOS Y ANALIZADORES DE CALIDAD DE ENERGÍA

Es indispensable ante los diferentes eventos o perturbaciones que eventualmente puedan ocurrir en las instalaciones eléctricas residenciales, industriales, incluso en la compañía eléctrica; poder contar con equipos de medición que permitan realizar análisis de calidad eléctrica, ya que a gran escala, no contar con calidad de energía, ocasiona una serie de problemas al usuario, como pueden ser: las pérdidas en la producción industrial, daño de equipos y productos, costo del suministro eléctrico.

2.5.1 El Red Fluke

Es un analizador de calidad eléctrica el cual permite realizar análisis de tendencias, ejecutando una serie de mediciones en parámetros como son la frecuencia, demanda, demanda máxima, valor eficaz de tensión y corriente, factor de potencia y la distorsión armónica. Permitiendo así identificar posibles problemas que resten calidad al suministro eléctrico.

2.5.2 El Osciloscopio

Son numerosos los equipos de mediciones eléctricas empleados para el estudio de calidad de energía eléctrica, uno de ellos es el osciloscopio, se encuentra disponible en dos presentaciones, analógico o digital. Este dispositivo permite apreciar gráficamente mediante el uso de una

pantalla, el comportamiento de una señal eléctrica en función del tiempo, así como realizar mediciones de diferentes magnitudes.

2.6 LÁMPARAS UTILIZADAS EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS

2.6.1 Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC)

El diseño de éste tipo de dispositivos fue realizado con la finalidad de sustituir las lámparas incandescentes para así disminuir el consumo, sin embargo, presenta un funcionamiento similar a los fluorescentes convencionales. Las lámparas fluorescentes compactas tienen la particularidad de poseer una circuitería electrónica que proporciona altas frecuencia para su funcionamiento, así como también mediante la manipulación de los gases inertes que la conforman, se pueden obtener una amplia gamma de colores de luz.

Este tipo de dispositivo a diferencia de las lámparas incandescentes presentan una vida útil mas larga, adicionalmente consume menos energía eléctrica para producir la misma cantidad de luz, es decir, presenta un aumento respecto al rendimiento luminoso máximo el cual puede ir desde los 40-50 lm/W hasta alcanzar los 80 lm/W.

Sin embargo, el rendimiento promedio presente en el mercado es de 58 lm/W, superado ampliamente por otro dispositivo de iluminación tales como las lámparas de tipo LED.

Partes que conforman una lámpara compacta fluorescente. Las partes características mas importantes ya mencionadas de este dispositivo de iluminación se ilustran en la figura 2.8, y estas son:

- Casquillo con rosca.
- Base para el balastro.
- Filamentos.
- Tubo fluorescente.
- Rectificador de corriente.

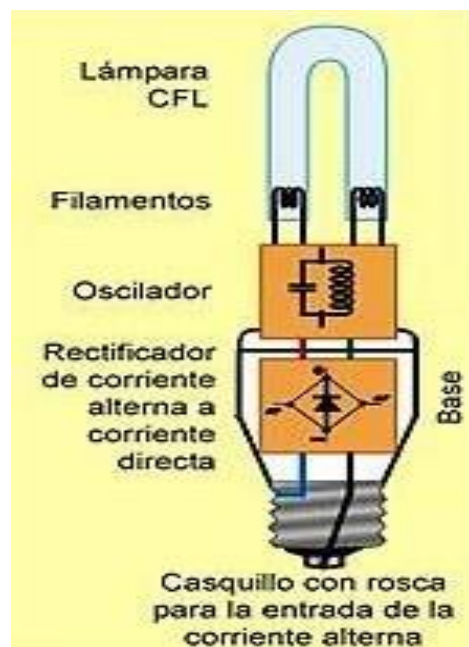


Figura 2.8. Partes de una LFC [García, 2018].

Funcionamiento de las lámparas fluorescentes compactas. Al acoplar el dispositivo a la red eléctrica, por él fluye una corriente a través de sus terminales, ésta es rectificada por un arreglo de diodos, es decir, se realiza la conversión de CA a CC para energizar a los diferentes elementos electrónicos que la conforman, entre ellos un oscilador mayormente conformado por transistores, una inductancia y un capacitor. Estos se encargan de generar altas frecuencias alrededor de los 20 kHz para de esta forma disminuir el parpadeo (*flicker*) que es provocado por el arco eléctrico que se genera internamente. De esta forma anular el efecto estroboscópico como el que se puede apreciar en los fluorescentes convencionales con balastos electromagnéticos.

Una vez energizados los filamentos que interactúan con el tubo fluorescente se produce un calentamiento en ellos, permitiendo de esta manera ionizar el gas inerte ubicado dentro del tubo, dando como resultado un plasma entre ambos filamentos por donde circulan los electrones. Luego del proceso de ionización del gas, el balastro realiza su contribución mediante la producción de una chispa entre los filamentos, creando así un arco eléctrico entre ellos, convirtiendo los filamentos en electrodos para mantener el arco eléctrico mientras la lámpara permanece encendida. La retroalimentación de este sistema ocurre debido al arco eléctrico

formado por los electrodos, es decir, la ionización se mantiene gracias a eso. El flujo de luz emitido se debe al choque entre los iones desprendidos del gas inerte y los átomos del vapor de mercurio presentes en el tubo, emitiendo fotones de luz ultravioleta debido a la excitación de los átomos de mercurio que luego chocan contra las paredes de la lámpara recubierta con una capa fluorescente, excitando en este caso a los átomos de flúor cuyo resultado es la emisión de fotones de luz blanca visible.

2.6.2 Lámparas LED

Como sus siglas en inglés lo indican *Light Emitting Diode* ó Diodo Emisor de Luz (LED), son fuentes de luz de estado sólido, es decir, es un dispositivo semiconductor que al hacer circular una corriente eléctrica por él se polariza, emitiendo una luz monocromática debido al efecto de electroluminiscencia. Al estar compuestos por diferentes capas de material semiconductor, se puede obtener diferentes colores y modelos como el mostrado en la figura 2.9.

www.bdigital.ula.ve



Figura 2.9. Lámpara LED [GU10, 2018].

Características de los LED. Las principales características de estas lámparas son:

- Alta eficiencia luminosa respecto a otras lámparas del mercado.
- Presentan buena reproducción cromática.
- Tiene una vida útil significativa.

- Poseen buena resistencia a vibraciones mecánicas.
- Las radiaciones emitidas por este dispositivo son nulas.
- Debido a su tamaño, permite realizar diversas configuraciones en luminarias.

Funcionamiento de las lámparas LED. Los dispositivos LED trabajan con una corriente continua, es decir, no pueden ser conectados de forma directa a la red de suministro eléctrico, necesita un controlador que pueda suministrarle los niveles de tensión y corriente requeridos por el dispositivo.

El controlador o driver es el encargado de reducir los niveles de corriente sin desperdiciar energía ya que los LED presentan baja impedancia y son sensibles a las altas corrientes. Es indispensable tener presente que cada tipo de LED presenta una corriente típica de funcionamiento establecida por el fabricante para así garantizar un flujo luminoso óptimo y el color deseado.

2.6.3 Lámparas Fluorescentes

También llamadas lámparas de descarga cuyo principio de funcionamiento se basa en una descarga eléctrica entre dos electrodos que se encuentran en el interior de un tubo lleno de gas. Al igual que las lámparas LED, estas no pueden ser conectadas de forma directa a la red ya que se debe regular la corriente que circula por ellas.



Figura 2.10. Tipos de lámparas fluorescentes.

Funcionamiento de las lámparas fluorescentes. Este tipo de fuente luminosa se basa en el principio de fluorescencia, cuando una corriente eléctrica recorre el circuito que lo conforma, en los cátodos que interactúan dentro del tubo de la lámpara se presenta un efecto térmico, emitiendo electrones. Estos electrones se movilizan en el interior del tubo atravesando una atmósfera de argón. El calor que se produce evapora de forma acelerada el mercurio generando así mayor conductividad. Los electrones que se encuentran en movimiento chocan con los átomos de mercurio, esta interacción se transforma en radiación ultravioleta invisible. La radiación ultravioleta al entrar en contacto con el material que recubre los tubos fluorescente, generalmente fósforo, genera radiación visible.

El correcto desempeño de la lámpara fluorescente se debe al dispositivo que controla los niveles de tensión y corriente indispensables para su funcionamiento, ya que estas lámparas presentan una resistencia al paso de corriente el cual disminuye a medida que esta aumenta. El balastro es el encargado de :

- Suministrar a los electrodos una corriente ideal para generar el calor suficiente y así conseguir la emisión de electrones.
- Establecer un nivel de tensión de salida en vacío para generar el arco eléctrico en el interior del tubo.
- Regular la corriente en el dispositivo para obtener un correcto funcionamiento.

Efecto biológico de las lámparas fluorescentes. Muchas de estas lámparas presentan un nivel significativo de radiación ultravioleta causado por el vapor de mercurio, esto puede originar a futuro efectos secundarios en la piel debido a los largos intervalos de tiempo a la cual ésta es expuesta, es decir, este tipo de luz emitida puede reducir la secreción de melatonina debido al retraso del ritmo circadiano, todo esto se asocia a posibles riesgos de cáncer.

Estos efectos deben ser considerados a futuro por los fabricantes de este tipo de dispositivos con el fin de ser reducidos al máximo.

2.7 MODELOS UTILIZADOS PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE LÁMPARAS

Con el paso del tiempo los avances tecnológicos han experimentado un crecimiento exponencial que se ajusta cada vez más a las necesidades cotidianas del ser humano y contribuyen a la simplificación de trabajos.

La implementación de las nuevas tecnologías involucra el desarrollo y avances en la electrónica de potencia aplicados a los diferentes dispositivos como equipos de medición, de protección, de iluminación, entre otros que tienen como función principal el mejoramiento de la eficiencia energética y reducir significativamente la demanda en la red de suministro eléctrico.

Por esta razón diferentes autores han realizado estudios para comprender el comportamiento de sus componentes ante la tensión que las alimenta y de esa manera poder realizar un correcto análisis y a partir de ellos se han propuesto diversos modelos que permiten representar de manera aproximada los diferentes dispositivos de alumbrado.

A continuación se muestran los modelos utilizados para representar los diferentes tipos de lámparas utilizadas en el alumbrado de interiores.

2.7.1 Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC)

Sabiendo que las lámparas fluorescentes compactas se encuentran formadas por balastos electrónicos, estos se pueden clasificar en cuatro categorías principales de acuerdo al espectro de armónicos que ellos generan.

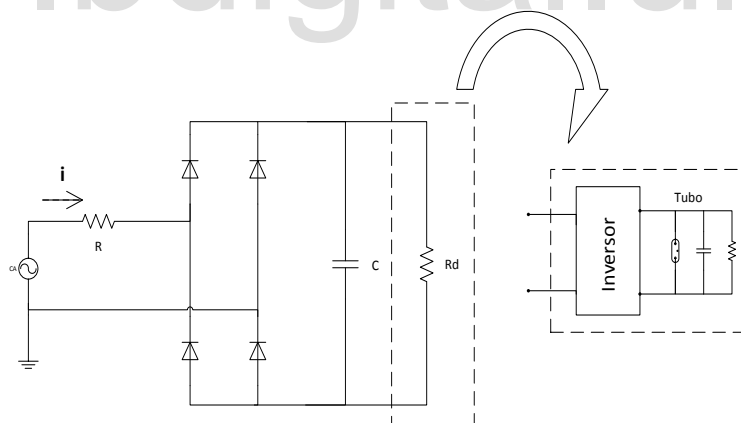
La tabla 2.3, muestra una serie de balastos comerciales los cuales deben cumplir con las regulaciones establecidas por las normas, lo que representan un problema para el fabricante debido a que ellas requieren un factor de potencia mínimo [ANSI C82.77-2002]. Cabe destacar que las lámparas con espectro armónicos entre las categorías Pobres (*Poor*) y Promedio (*Average*) abarcan la mayoría de las lámparas presentes en el mercado.

Tabla 2.3. Categoría de Balastos Electrónicos.

Balastos Electrónicos	Espectro de Armónicos
Circuito Simple de Lámparas Compactas Fluorescentes	Pobre
Circuito Pasivo de Filtrado	Promedio
Circuito de Llenado de Valle	Bueno
Circuito Activo de Filtrado	Excelente

En la figura 2.9 se presenta el modelo circuital correspondiente a la gama de lámparas comerciales del tipo pobre y promedio propuesto por [Molina, 2014]:

www.bdigital.ula.ve

**Figura 2.11. Circuito Equivalente de la Lámpara Compacta Fluorescente (LCF).**

En la figura 2.12, se muestra el modelo circuital completo de una lámpara fluorescente compacta planteado por [Yong, 2010], el cual será reducido a un circuito equivalente que permita sustentar de una manera más rápida y sencilla, el estudio de los armónicos en ese circuito. Para desarrollar el modelo equivalente se realiza un análisis en el dominio de la

frecuencia y se plantea una matriz de impedancia que, en conjunto con la transformada de Fourier permiten incluir los voltajes y corrientes correspondientes a cada grado de armónicos.

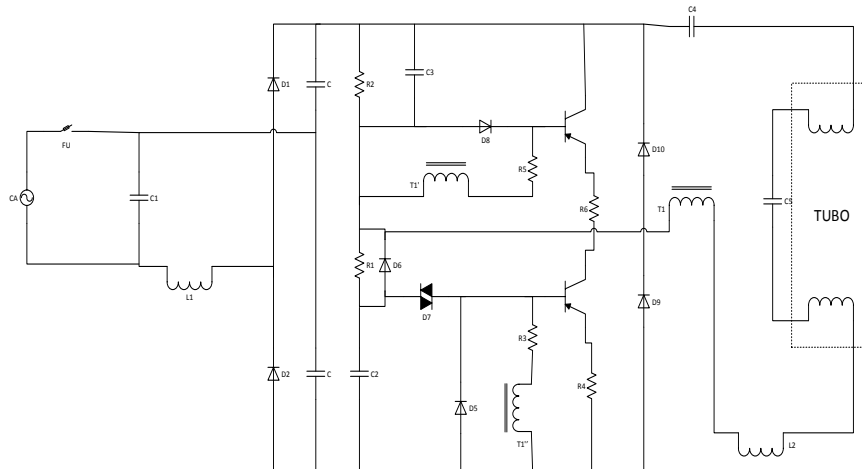


Figura 2.12. Circuito Típico LFC.

De acuerdo al comportamiento de algunos elementos anteriormente mostrados y su comportamiento para la alta frecuencia, se realiza la simplificación del modelo de la figura 2.12, por un nuevo circuito como el que se muestra en la figura 2.13.

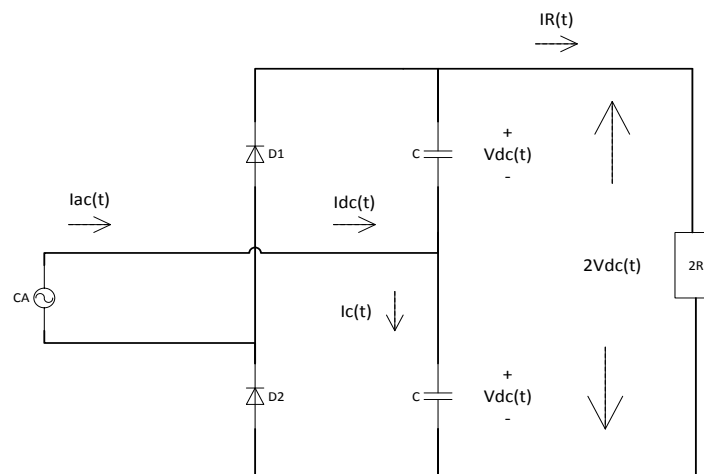


Figura 2.13. Circuito Equivalente de la Lámpara Fluorescente Compacta.

En la figura 2.13 se observa que el conjunto formado por el tubo fluorescente y el inversor fueron reemplazados por una resistencia de valor $2R$. Por otro lado la figura 2.14 muestra el circuito simplificado donde la resistencia $2R$ es sustituida por una sola resistencia de magnitud R , esto se debe a que el voltaje máximo $V_c(t)$ cargado en el último período de conexión es aproximadamente igual a la magnitud del voltaje $V_{ac}(t)$, por lo tanto es posible realizar este cambio de parámetro. También se observa la resistencia R en paralelo con sólo un capacitor DC.

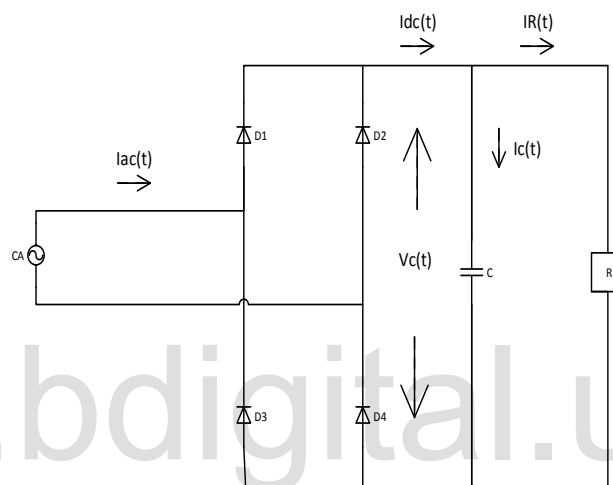


Figura 2.14. Circuito Propuesto de la LFC.

Un nuevo modelo equivalente es propuesto por J. Slezingr, y colaboradores, de esta forma como se mencionó previamente, este modelo permite incluir el efecto de los dispositivos electrónicos internos de las LFC como lo es el balastro electrónico [Slezingr, 2012].

El diseño de los balastros electrónicos es de suma importancia ya que se debe garantizar y optimizar la confiabilidad en el equipo con el fin de obtener un buen y mejor desempeño.

Todo lo anteriormente reseñado genera como resultado un conjunto de elementos los cuales conforman el balastro electrónico propuesto por J. Slezingr y representado de la siguiente forma tal y como se muestra en la figura 2.15.

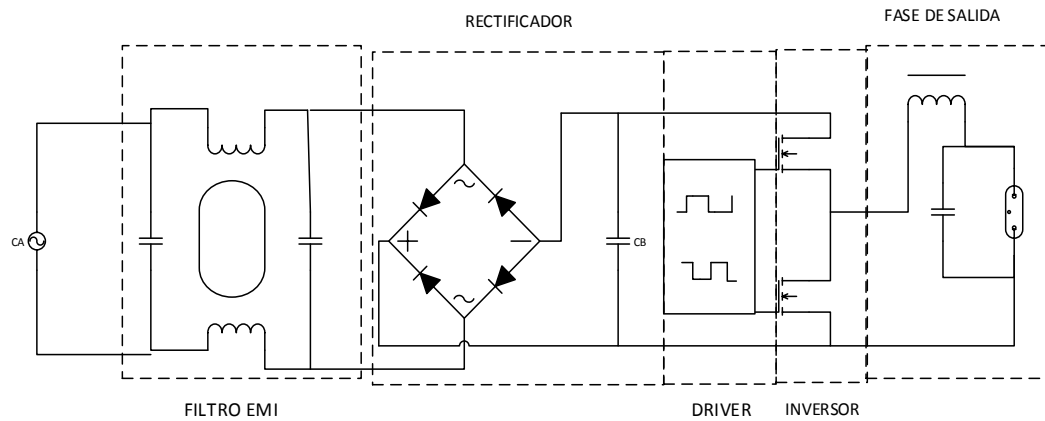


Figura 2.15. Circuito Típico de una LFC con Balastro Electrónico Interno.

El esquema mostrado en la figura 2.15 abarca lámparas hasta los 25W de potencia, diseñado para tensiones entre los 220 VAC y los 240 VAC, pero que puede ser usado de igual forma para estudios con tensiones de 120 VAC.

Sin embargo, dicho modelo que resulta un poco pesado para los estudios que se realizarán, será modelado a través de tres partes: suministro de tensión, convertidor y modelado de la lámpara tal como se muestra en la figura 2.16.

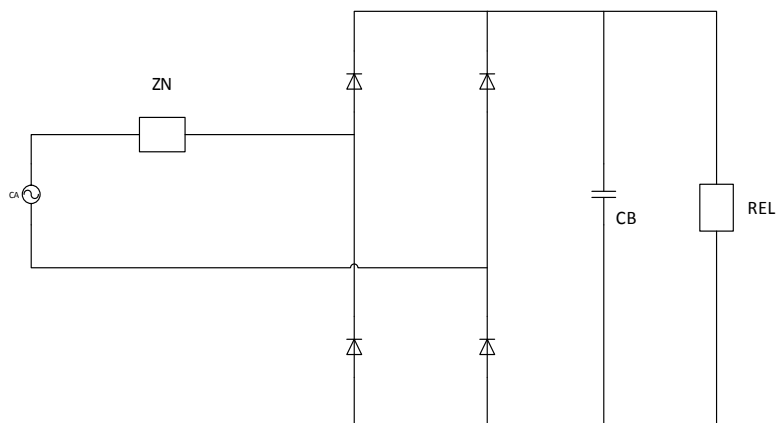


Figura 2.16. Modelo Simplificado de una CFL.

2.7.2 Lámparas LED

Otro de los dispositivos empleados para la iluminación son las lámparas LED. Este tipo de dispositivo es muy popular debido al bajo consumo de potencia y a los diferentes arreglos que pueden ser usados con motivos decorativos.

Al igual que con las lámparas fluorescentes compactas Julio Molina presenta un modelo circuital para comprender con un poco más de precisión el efecto que genera en la red de distribución ya que también en grandes cantidades agrupadas en un mismo lugar se comporta como un gran generador de armónicos.

Este modelo contiene un filtro para interferencias electromagnéticas para evitar el ruido en los conmutadores electrónicos. De acuerdo a [Uddin, 2013] [Uddin, 2012] las lámparas LED también se dividen en tres categorías de espectro de armónicos: pobre, promedio y excelente. El modelo circuital se muestra en las figuras 2.17 y 2.18 [Molina, 2016].

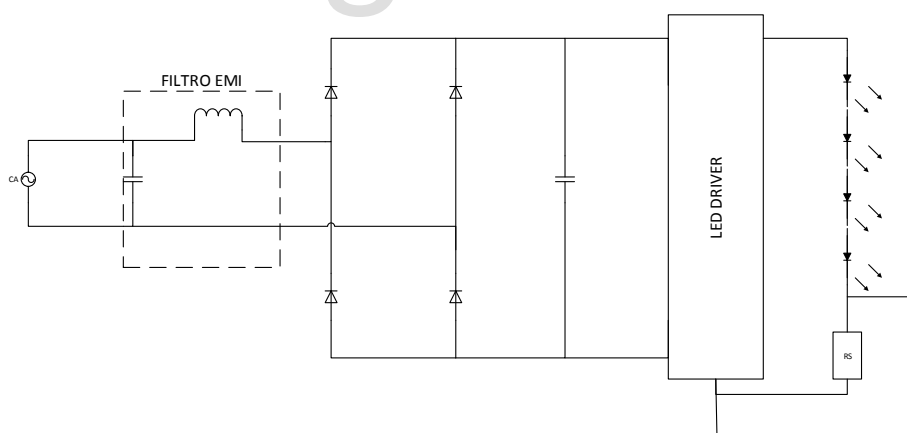


Figura 2.17. Circuito de una Lámpara LED.

La configuración ilustrada en la figura 2.17 muestra el circuito de una lámpara LED el cual contiene un filtro para la interferencia electromagnética, un puente rectificador, un capacitor DC y el driver con su respectivo arreglo de LED.

Este circuito posteriormente es reducido a uno equivalente como se muestra en la figura 2.18 con el fin de facilitar el análisis.

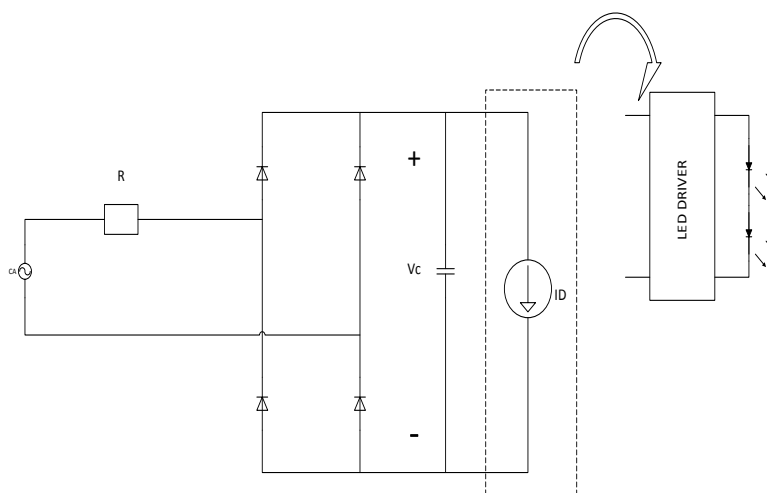


Figura 2.18. Circuito Equivalente de una Lámpara LED.

2.7.3 Lámparas Fluorescentes con Balastro Electrónico

Como muestra Marian K. Kazimierczuk en su aporte, las lámparas fluorescentes son llamadas también lámparas de descarga, las cuales poseen un elemento o dispositivo de control llamado balastro. Este dispositivo se encuentra conformado por un circuito inversor resonante clase D cuyo diseño se realiza con el fin de controlar dos lámparas fluorescentes representados por una resistencia R_p tal y como se muestra en la figura 2.19.

Esta configuración circuital contiene un par de elementos resaltantes como son los dos transistores MOSFETs de bajo voltaje con baja resistencia interna permitiendo aumentar la eficiencia del dispositivo y adicionalmente reducen considerablemente las pérdidas ocasionadas por la conducción.

Posteriormente se reduce el circuito a uno equivalente para facilitar su estudio.
[Kazimierczuk, 1993]

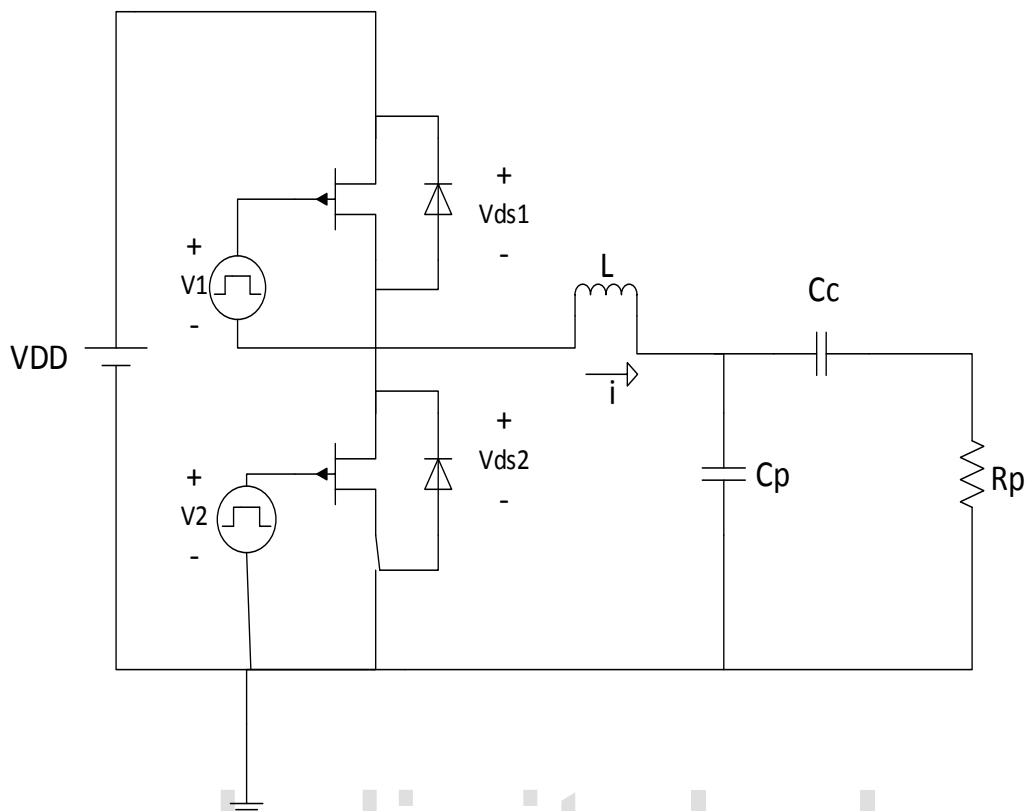


Figura 2.19. Circuito Inversor Resonante Clase D.

Los balastos cumplen un par de funciones importantes, la primera es la de proveer la tensión de encendido y de operación de la lámpara, la segunda función es de limitar la corriente debido a que la relación $V_L - I_L$ presenta una pendiente negativa, dando como resultado una resistencia dinámica negativa, es decir, cuando la lámpara se encuentra apagada se comporta como un circuito abierto y requiere de una tensión muy alta para activar la lámpara, por otro lado cuando la lámpara se encuentra encendida se ioniza el gas convirtiéndose en plasma, por lo tanto aumentaría la corriente y disminuiría un poco el voltaje. Este tipo de dispositivos trae consigo una serie de ventajas y desventajas. Las ventajas en comparación a las lámparas incandescentes se reflejan en, por ejemplo, la eficiencia en iluminación, es decir, las incandescentes presentan 17-23 (lm/W) mientras que las lámparas fluorescentes presentan 70-80 (lm/W). La duración de su vida útil es significativa, la incandescente presenta una duración en promedio de 700h contra 2000h de la fluorescente. Lo que representaría una desventaja para estos dispositivos sería el balastro ya que se comporta como una carga inductiva y esto disminuye el factor de potencia.

CAPÍTULO 3

MÉTODO PARA OBTENER EL MODELO CIRCUITAL EN LÁMPARAS PARA EL ALUMBRADO DE INTERIORES

La elaboración y estructuración del presente capítulo se fundamentó en realizar estudios acerca de los diferentes modelos circuitales en lámparas para alumbrado de interiores como son las fluorescentes compactas (LFC), LEDs y fluorescentes con balastro electrónico; obtenidos mediante una revisión documental que permite realizar una comprensión sobre los métodos matemáticos empleados para la construcción del modelo aplicado para cada dispositivo.

Posteriormente se realizaron una serie de mediciones eléctricas de voltaje y corriente en los terminales de los dispositivos ya nombrados anteriormente con el fin de obtener los diferentes parámetros que conforman su respectivo modelo y mediante el uso de un interfaz gráfico como es el PSCAD/EMTODC® implementado como herramienta para realizar una comparación entre los parámetros planteados por los autores utilizados como referencia y los obtenidos en este trabajo.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Los dispositivos de iluminación descritos a lo largo de éste trabajo constituyen una de las cargas no lineales presentes en las redes eléctricas, este tipo de cargas ocasionan perturbaciones en la forma de onda de tensión suministrada por el sistema. Debido a esas distorsiones es necesario

tener una idea sobre el comportamiento de los elementos que conforman estos dispositivos de iluminación. La configuración interna en los circuitos de cada dispositivo puede variar, con la calidad de los componentes utilizados en las lámparas, el fabricante o el diseño del dispositivo.

Mediante un adecuado estudio, los elementos que componen los diferentes dispositivos pueden ser estimados y posteriormente representados en un modelo circuital, el cual puede ser representado utilizando un software especializado y a partir de él obtener elementos de análisis que simulen su comportamiento. En este caso el estudio planteado tiene como punto de partida la de realizar una serie de mediciones eléctricas (voltaje y corriente), que son la base fundamental para el análisis, y a partir de ellas poder determinar mediante un método matemático los parámetros que conforman los circuitos.

Para el desarrollo de este trabajo se consideraron tres dispositivos como son las lámparas compactas fluorescentes, lámparas LEDs y las lámparas fluorescentes con balastro electrónico.

A cada dispositivo se puede aplicar un método diferente para la estimación de sus parámetros internos. Estos métodos considerados son los siguientes; análisis en el dominio de la frecuencia, análisis en el dominio del tiempo.

3.1.1 Métodos Basados en un Análisis en el Dominio de la Frecuencia

El método de análisis en el dominio de la frecuencia se caracteriza por emplear artificios matemáticos como la transformada de Fourier a ecuaciones características de tensión y corriente en el dominio del tiempo.

De esta forma en los trabajos seleccionados como referencia para desarrollar el presente, se consideraron los estudios basados en el análisis en el dominio del tiempo, permitiendo así considerar y enlazar el análisis con métodos referentes a polinomios de forma sencilla.

Modelo Armónico para Lámparas Compactas Fluorescentes. El estudio realizado por J. Yong y colaboradores se basa en un modelo típico de lámpara compacta fluorescente como se muestra

en la figura 2.12, en la cual debido al comportamiento simple de algunos elementos que lo conforman, permite simplificar el modelo y establecer otro equivalente tal y como se observa en la figura 2.14. Así, dar inicio con el análisis requerido, mediante el planteamiento de una expresión donde involucre la corriente y tensión que interactúan con el dispositivo como lo señala la ecuación (3.1) [Yong, 2010].

$$i_{ac}(t) = C \frac{d v_{ac}(t)}{dt} + \frac{v_{ac}(t) + v_c(t)}{2R} \quad (3.1)$$

La expresión (3.1) representa la sumatoria de corrientes dentro del circuito equivalente de la figura 2.13, como resultado, configuran la ecuación en el dominio del tiempo de la corriente $i_{ac}(t)$, formando también parte de la expresión el voltaje $v_{ac}(t)$ y los componentes que integran el circuito equivalente (figura.2.13), necesarios para expresar $i_{ac}(t)$. Ahora, como el capacitor C es muy grande y el rectificador trabaja cerca del valor máximo en la forma de onda de voltaje, la magnitud de tensión del capacitor $v_c(t)$ es la obtenida en la carga anterior del capacitor, siendo de esta manera similar al voltaje $v_{ac}(t)$, logrando de este modo simplificar aún más el circuito y obteniendo como resultado la siguiente expresión:

$$i_{ac}(t) = C \frac{d v_{ac}(t)}{dt} + \frac{v_{ac}(t)}{R} \quad (3.2)$$

Una vez obtenida la ecuación en el dominio del tiempo, involucrando los parámetros eléctricos de entrada del dispositivo, junto a sus respectivos componentes, se procede a obtener el modelo armónico del dispositivo por medio de la transformada de Fourier, para así gestionar las ecuaciones que permitan estimar cada elemento integrante del circuito [Yong, 2010].

Modelado de Lámparas LED para el Estudio de Armónicos. Las lámparas LED forman parte de la nueva generación de dispositivos de iluminación tanto para interiores como para exteriores.

Sin embargo, por incluir en su topología elementos electrónicos, se incluyen en el grupo de generadores de armónicos. Por esta razón, Julio Molina presenta un nuevo aporte en cuanto al desarrollo de un modelo que permita realizar estudios de armónicos [Molina, 2016].

Este modelo, luego de ser analizado y comparado con otros, se considera lo suficientemente confiable y sencillo al momento de ser aplicado como referencia para el estudio de este tipo de dispositivo, permitiendo nutrir y gestionar con información confiable el presente trabajo.

El modelo equivalente está constituido por una resistencia R equivalente, la cual representa al filtro para interferencias electromagnética (EMI) cuyo valor generalmente es pequeño, un puente rectificador, un capacitor electrolítico que alimenta una fuente de corriente DC independiente, esta fuente representa el comportamiento tanto del arreglo de LED, como al controlador del LED. Ver (Figura 2.18).

Al ser un modelo basado en un estudio en el dominio de la frecuencia, mediante el uso de la matriz de impedancia se expresa el comportamiento de la lámpara, sin embargo, para expresar el modelo matricial es de importancia iniciar el análisis a la forma de onda de la corriente y tensión que alimenta el dispositivo; basta en considerar media forma de onda debido a la simetría de la misma como se muestra en la gráfica 3.1.

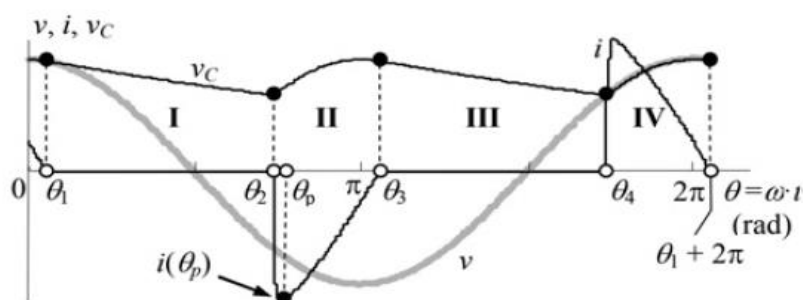


Gráfico 3.1. Forma de Onda: Tensión AC, Corriente AC y Tensión DC [Molina, 2016].

Una vez realizado el estudio a la media forma de onda, se pueden plasmar los análisis en una serie de ecuaciones, entre ellas las expresiones matemáticas (3.3) y (3.4), estas representan las

características de la forma de onda de la corriente continua y alterna, ecuaciones que posteriormente serán utilizadas para fundamentar la elaboración del estudio armónico. Estudio que puede ser visto con más detalle en [Molina, 2016].

$$(I): \begin{cases} i^{(I)}(\theta) = 0 \\ \frac{1}{X_c} \frac{dv_c^{(I)}(\theta)}{d\theta} = -I_D \end{cases} \quad (3.3)$$

$$(II): \begin{cases} R \cdot i^{(II)}(\theta) - v_c^{(II)}(\theta) = v(\theta) \\ \frac{1}{X_c} \frac{dv_c^{(II)}(\theta)}{d\theta} + i^{(II)}(\theta) = -I_D \end{cases} \quad (3.4)$$

Procedimiento para Estimar los Parámetros del Circuito Equivalente de la Lámpara LED. Este procedimiento tiene como punto de partida la realización de una serie de mediciones eléctricas, para determinar la corriente $i_m(t)$ y el voltaje $v_m(t)$ aplicado al dispositivo, de esta forma contar con dos magnitudes importantes y necesarias en cuanto al cálculo de los parámetros internos del circuito equivalente. El primer parámetro que interviene en el desarrollo método es la corriente I_D , este representa el conjunto formado por el controlador LED y el arreglo de LEDs, posteriormente reducida a una fuente de corriente continua independiente. Al ser un valor rectificado, se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$I_D \approx I_C \approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |i_m(\theta)| \cdot d\theta \quad (3.5)$$

El segundo parámetro considerado para este modelo es el capacitor C (Capacitor DC), en donde a partir de la corriente i_m medida puede ubicarse en su forma de onda el ángulo de conmutación θ_{2m} el cual representa el punto en donde ocurre el inicio del pulso de corriente AC. Una vez ya obtenido θ_2 por medio de la relación $X_{CN} = X_C/(V/I_D)$, denominada como relación

de impedancia capacitiva normalizada obtener la impedancia capacitiva X_C . La intervención del ángulo de conmutación se observa a través de una curva que representa los diferentes promedio encontrados en la órbita de la impedancia capacitiva normalizada, establecida por un rango porcentual [$(X_{CN}(\%) = (1 \dots 25))$]. Dicha curva se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$X_{CN} = x_{C3} \cdot \theta_2^3 + x_{C2} \cdot \theta_2^2 + x_{C1} \theta_2 + x_{C0}$$

$$x_{C3} = -0.1324 \text{ rad}^{-3}, x_{C2} = 1.4199 \text{ rad}^{-2}$$

$$x_{C1} = -5.0156 \text{ rad}^{-1}, x_{C0} = 5.8482 \text{ p. u.} \quad (3.6)$$

En cuanto a la estimación del último parámetro correspondiente al presente modelo se tiene a la resistencia R (Resistencia AC). Para estimar esta resistencia es necesario obtener la pendiente ascendente m_{im} de la corriente medida normalizada i_{mN} mediante las ecuaciones (3.7) y (3.8).

$$i_{mN}(\theta) = \frac{i_m(\theta)}{I_D} \quad (3.7)$$

$$m_{im} = \frac{|i_{mN}(\theta_{Pm})|}{\theta_{Pm} - \theta_{2m}} \quad (3.8)$$

El siguiente paso una vez obtenida la pendiente de la corriente medida normalizada es el de calcular la resistencia normalizada R_N mediante la ecuación (3.9), para luego obtener el último parámetro del modelo armónico para lámparas LED, el cual es la resistencia AC, utilizando la relación $R_N = R/(V/I_D)$.

$$R_N = r_1 \cdot m_i^{-r_2}, \quad r_i = r_{i1} \cdot e^{r_{i2} \cdot X_{CN}} + r_{i3} \cdot e^{r_{i4} \cdot X_{CN}} \quad (i = 1,2)$$

$$r_{11} = 0.3784 \text{ pu}, \quad r_{12} = -54.112 \text{ pu}, \quad r_{13} = 0.6731 \text{ pu}, \quad r_{14} = 1.0973 \text{ pu}$$

$$r_{21} = 0.2439 \text{ pu}, \quad r_{22} = -35.27 \text{ pu}, \quad r_{23} = 1.2462 \text{ pu}, \quad r_{24} = 0.0515 \text{ pu} \quad (3.9)$$

Modelo del Balastro Electrónico para Lámparas Fluorescentes Compactas. Los dispositivos para iluminación de interiores como las lámparas fluorescentes compactas son diseñados por la mayoría de fabricantes bajo los mismos estándares con el fin de cumplir tanto con los límites de armónicos como con el de garantizar la eficiencia del dispositivo. Julio Molina presenta un modelo de balastro electrónico para LFC alternativo, partiendo de una referencia sólida como la de [Yong, 2010] y [Slezingr, 2012]. El modelo planteado por [Molina, 2014] presentó una candidatura versátil, bastante sólida y sencilla, siendo argumentos suficientes para ser el modelo abanderado o elegido en el presente trabajo.

La gestación de este modelo tiene como punto de partida el análisis a la forma de onda que caracteriza el comportamiento del dispositivo de iluminación (LFC), ya que, por ser un modelo basado en un análisis en el dominio de la frecuencia es de gran importancia comprender y analizar la información suministrada por la forma de onda de tensión y corriente consumida por el dispositivo cuya señal se ilustra en el gráfico 3.2. Este tipo de información es importante para el correcto desarrollo matemático del modelo circuital planteado por Molina y así obtener resultados apropiados.

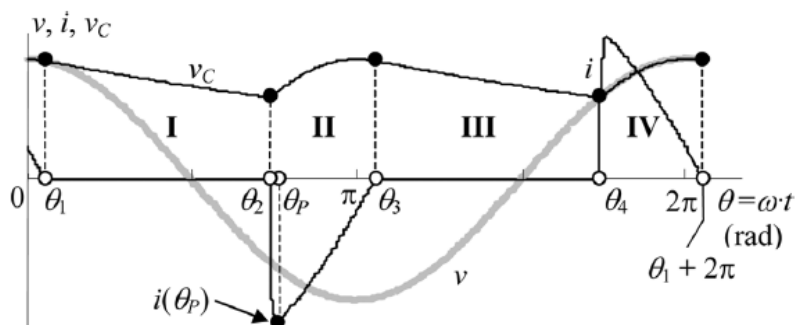


Gráfico 3.2. Forma de Onda: Tensión AC, Corriente AC y Tensión DC. [Molina, 2014].

Como se observa en la gráfica 3.2, la forma de onda se divide en cuatro segmentos (segmento I, II, III y IV), puntualizando cada fragmento por ángulos de conmutación (θ_1 al θ_4). Por consiguiente, para describir el comportamiento del dispositivo basta considerar el segmento I-II debido a la simetría de la onda. Así, de esta forma se enuncia a continuación las ecuaciones (3.9) y (3.10) que respaldan de forma matemática la onda de corriente, tensión AC y voltaje DC.

$$(I): \begin{cases} i^{(I)}(\theta) = 0 \\ \frac{1}{X_c} \frac{dv_c^{(I)}(\theta)}{d\theta} + \frac{v_c^{(I)}(\theta)}{R_D} = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

$$(II): \begin{cases} R \cdot i^{(II)}(\theta) - v_c^{(II)}(\theta) = v(\theta) \\ \frac{1}{X_c} \frac{dv_c^{(II)}(\theta)}{d\theta} + \frac{v_c^{(II)}(\theta)}{R_D} = -i^{(II)}(\theta) \end{cases} \quad (3.11)$$

Estimación de Parámetros. Al ser un modelo alternativo de balastro electrónico para las LFC, la estimación de los parámetros que componen el presente modelo inicia mediante la ejecución de mediciones eléctricas por medio de un osciloscopio para así obtener los valores de corriente $i_m(t)$ y voltaje $v_m(t)$ necesarios para el desarrollo de la metodología de este modelo, ambos obtenidos a partir de la corriente $i_{ac}(t)$ y el voltaje $v_{ac}(t)$ que intervienen en la lámpara.

El primer parámetro en el orden es la resistencia R_D , la cual representa un módulo compuesto por un inversor, un capacitor de arranque y el tubo fluorescente. Ésta, por pertenecer a la rama del circuito rectificado (DC) y al ser una resistencia equivalente se puede emplear la siguiente ecuación:

$$R_D = \frac{P}{I_{dc}^2} \quad (3.12)$$

En donde I_{dc} y P se pueden obtener de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_m(t) \cdot i_m(t) \cdot d\theta \quad (3.13)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |i_m(t)| d\theta \quad (3.14)$$

El segundo parámetro incluido en el circuito equivalente es el capacitor DC, cuya función es la de corregir la señal rectificada por el puente de diodos.

A partir del ángulo de conmutación θ_2 , ángulo que representa el punto de inicio del pulso de corriente AC, obtenido por medio de la medición de la corriente $i_m(\theta)$ y en conjunto con la relación $X_{CN} = X_C/R_D$ (gráfica 3.3) tener como resultado la determinación del valor capacitivo C.

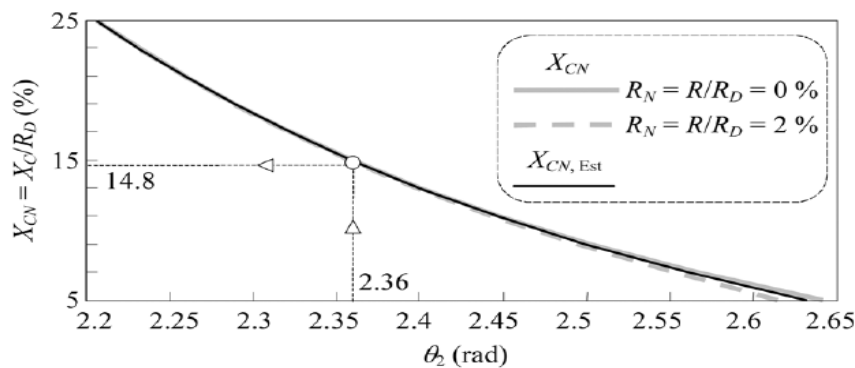


Gráfico 3.3. Curva para la Estimación del Parámetro C [Molina, 2014].

La relación X_{CN} expresa los rangos normalizados de impedancia capacitiva establecidos por la constante de tiempo de carga τ_C ($X_{CN} = X_C/R_D = 1/\omega \cdot C \cdot R_D = 1/\omega \cdot \tau_C$) y por la pérdida de potencia por debajo del 10% de las LFC. Estos rangos se presentan en porcentajes $X_{CN}(\%) = (5 \dots 25)$; permitiendo así calcular las emisiones de armónicos [Slezingr, 2012]. Para el cálculo de X_{CN} se emplea la ecuación (3.14), donde se aprecia el comportamiento de la curva característica (Gráfica 3.3) debido a los valores promedios de X_{CN} .

$$X_{CN} = x_{C1} \cdot \theta_2^2 + x_{C2} \cdot \theta_2 + x_{C3}$$

$$x_{C1} = 0.8990 \text{ rad}^{-2}, x_{C2} = -4.7769 \text{ rad}^{-1}, x_{C3} = 6.4138 \text{ p.u.} \quad (3.15)$$

Como último componente integrante del modelo se tiene la resistencia R , calculada por medio de la pendiente ascendente m_{im} , estimada a través de mediciones en la corriente AC de entrada al dispositivo y materializadas en las siguientes ecuaciones:

$$i_{mN}(\theta) = \frac{i_m(\theta)}{I_{Ref}} \quad (3.16)$$

$$m_{im} = \frac{|i_{mN}(\theta_{Pm})|}{\theta_{Pm} - \theta_{2m}} \quad (3.17)$$

$$I_{Ref} = \frac{V}{R_D} \quad (3.18)$$

Donde:

- $i_{mN}(\theta)$ es la corriente AC normalizada.
- $i_m(\theta)$ representa la amplitud de corriente consumida por el dispositivo.
- I_{Ref} caracteriza la relación entre la tensión eficaz del dispositivo y la resistencia de carga R_D .
- θ_{Pm} es el ángulo que expresa el punto en donde ocurre el pico de corriente medido $i_m(\theta_{Pm})$.

Una vez calculada la pendiente m_{im} , por medio de la relación $R_N = R/R_D$ se tiene acceso a la estimación de R , sin embargo, es necesario utilizar de forma previa la ecuación (3.18), fórmula

empírica para el cálculo de la resistencia normalizada R_N , esta ecuación al igual que para la impedancia capacitiva normalizada se basa en promedios [fuente].

$$R_N = \frac{r_1}{m_i^2} + \frac{r_2}{m_i} + r_3$$

$$r_1 = 2.1094 \text{ rad}^{-2}, r_2 = 0.2767 \text{ rad}^{-1}, r_3 = -5.487 \cdot 10^{-4} \text{ p.u.} \quad (3.19)$$

Modelo Simplificado para Lámparas Fluorescentes Compactas: La propuesta realizada por J. Slezingr y colaboradores en cuanto al planteamiento de un modelo simplificado para las lámparas compactas fluorescentes presenta un gran aporte para el modelo planteado por Julio Molina, utilizado en este trabajo. Ahora, lo que caracteriza este modelo es la consideración de incluir generadores de tensión fundamental e interarmónico, así como la consideración de parámetros como la amplitud, fase y la frecuencia fundamental e interarmónica.

Por lo tanto, el desarrollo del modelo inicia con una evaluación sobre la constante de tiempo de carga τ_C , evaluación que se ejecuta mediante $\tau_C = R_{EL} \cdot C_B$. De esta forma, este parámetro resulta importante ya que permite analizar la interacción entre la resistencia R_{EL} de carga y el capacitor C_B mostrados en la figura 2.16. La continuidad de la metodología puede ser consultada en [Slezingr, 2012].

Balastro Electrónico para Lámparas Fluorescentes. La sustitución de los balastos con acoplamiento electromagnético o convencional por los balastos electrónicos presenta una serie de ventajas, por ejemplo, permite reducir considerablemente las pérdidas por el efecto Joule producido en la bobina del balastro convencional las cuales restan eficiencia a nivel energético.

El balastro electrónico al ser un equipo de menor tamaño debido a sus componentes electrónico reduce las dimensiones del dispositivo haciéndolo menos pesado. Sin embargo, ambos balastos son considerados fuentes generadoras de armónicos. Siendo así la razón por la

cual se ha seleccionado este modelo para poder estudiar y ser comparado con los demás dispositivos de iluminación.

Observando la figura 2.19 para el inversor de potencia clase D, se realiza un análisis en el dominio de la frecuencia, el cual contiene una carga conectada en paralelo a un capacitor resonante, mediante el uso de la componente fundamental se desarrollan una serie de ecuaciones que permite el diseño del inversor clase D de una manera sencilla. Cuyo principio de operación se encuentra detallado en la referencia [Kazimierczuk, 1993].

Análisis del Amplificador Clase D. Antes de obtener los parámetros del amplificador clase D, es necesario contemplar una serie de suposiciones para el análisis como pueden ser [Kazimierczuk, 1993]:

- Los interruptores representados por los transistores MOSFET se comportan como una resistencia cuando están en operación, por el contrario, se comportan como un circuito abierto.
- Son despreciables las pérdidas en los MOSFET.
- Al ser suficientemente grande el factor de carga Q_L del circuito resonante garantiza que las corrientes sean de forma sinusoidal a través de la inductancia L , la capacitancia C_p y la resistencia R_p .
- La ondulación de voltaje en el capacitor de bloqueo C_c es despreciable debido a que su capacitancia es elevada.
- Se desprecia la capacitancia en la salida de los MOSFET.

Una vez establecidas las suposiciones, se puede dar inicio al estudio para obtener los parámetros del circuito amplificador clase D, empezando por el circuito resonante.

- Frecuencia natural no amortiguada o de esquina

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC_p}} \quad (3.20)$$

- Frecuencia de resonancia

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC_s}} \quad (3.21)$$

- Impedancia característica

$$Z_o = \omega_o L = \frac{1}{\omega_o C_p} = \sqrt{\frac{L}{C_p}} \quad (3.22)$$

- Factor de calidad cargado en la frecuencia de esquina

$$Q_L = \omega_o C_p R_p = \frac{R_p}{\omega_o L} = \frac{R_p}{Z_o} \quad (3.23)$$

Para un factor $Q_L \geq 1/2$ la frecuencia natural amortiguada es la siguiente:

$$\omega_d = \omega_o \sqrt{1 - 1/(4Q_L^2)} \quad (3.24)$$

Para que en un circuito se pueda obtener eficiencia y confiabilidad es necesario considerar la frecuencia de resonancia, la cual representa el límite entre las cargas capacitivas e inductivas. Esta frecuencia de resonancia puede definirse como el desplazamiento de fase ψ hacia cero, originando así la ecuación (3.24), permitiendo relacionar la frecuencia de esquina f_o con la frecuencia de resonancia f_r [Kazimierzuk, 1993].

$$\frac{f_r}{f_o} = \sqrt{1 - \frac{1}{Q_L^2}}, \text{ para } Q_L \geq 1 \quad (3.25)$$

Es necesario tener presente un par de consideraciones en cuanto al factor de calidad respecto a la frecuencia de resonancia, tales son:

- Cuando $Q_L \leq 1$, el circuito representa una carga inductiva en donde $f_r = 0$.
- Si $Q_L > 1$ la relación f_r/f_o aumenta debido a Q_L . Al esto ocurrir, surgen dos nuevas consideraciones [Kazimierczuk, 1993].

El circuito resonante se encuentra alimentado por una tensión cuya forma de onda es cuadrado y de magnitud V_{DD} :

$$v: \begin{cases} V_{DD}, & \text{para } 0 < \omega t \leq \pi \\ 0, & \text{para } \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (3.26)$$

Cuya componente fundamental es:

$$v_{i1} = V_m \sin \omega t \quad (3.27)$$

A través de un análisis de Fourier se puede representar la amplitud v_{i1} , de esta forma se tiene:

$$V_m = \frac{2}{\pi} V_{DD} = 0.6366 V_{DD} \quad (3.28)$$

3.2 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS CIRCUITALES

El proceso descrito a continuación fue el empleado para la obtención de los parámetros circuitales de cada dispositivo de iluminación empleados para el desarrollo de este trabajo, específicamente una lámpara compacta fluorescente (LFC), una lámpara LED y una lámpara fluorescente con balastro electrónico, teniendo como punto de partida la realización de una serie de mediciones eléctricas en un laboratorio con el fin de aprovechar la información contenida en la forma de onda de tensión y corriente consumida por cada uno de los dispositivos de iluminación.

3.2.1 Pruebas para la Determinación de Parámetros Eléctricos en una Lámpara Compacta Fluorescente (LFC)

Los parámetros eléctricos como el voltaje aplicado al dispositivo y la corriente consumida por el mismo son necesarios para poder estimar los elementos que conforman el modelo circuital de [Molina, 2014]. Las mediciones fueron realizadas en un laboratorio implementando un circuito simple como el que se muestra en la figura 3.1. Así, mediante el uso de los siguientes instrumentos se pudieron obtener los parámetros eléctricos:

- Osciloscopio digital.
- Sonda atenuada (10X)
- Lámpara compacta fluorescente de 11 W junto a su respectivo conector.
- Juego de conectores.
- Bornera.
- Multímetro.
- Resistencia de 120 Ω .
- Fuente variable AC/DC.
- Transformador de voltaje 1:1 para aislar al osciloscopio de la red.

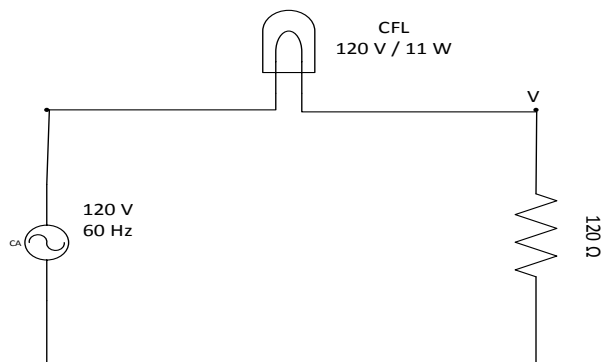


Figura 3.1. Circuito Aplicado para Obtener el Voltaje y la Corriente Consumida por la LFC.

El circuito implementado de la figura 3.1 se encuentra constituido por una fuente variable AC/DC, esta alimenta el circuito a una tensión de 120 VAC, la fuente se encuentra conectada una resistencia de 120 Ω en serie con una lámpara compacta fluorescente de potencia igual a 11 W. Mediante el uso de un osciloscopio digital se procede a realizar las correspondiente mediciones, pero antes es necesario aislar el instrumento utilizando un transformador de voltaje con relación 1:1, esto con el fin de evitar daños al equipo (a través de un cortocircuito).

Una vez aislado el instrumento, se conecta la sonda atenuada en el punto V, así de esta forma medir el voltaje medio presente en la resistencia, ya que por medio de la resistencia puesta en serie a la lámpara se puede obtener el valor de la corriente media consumida por el dispositivo utilizando la ley de ohm, siendo así la corriente que pasa por la resistencia igual a la que pasa por la lámpara.

Otros parámetros considerados necesarios para completar las mediciones son los ángulos θ_2 y θ_p , ángulos de conmutación y pico de corriente respectivamente. Estos se obtienen visualizando la forma de onda de la corriente consumida por el dispositivo en el osciloscopio.

La resistencia agregada adicionalmente permite observar la forma de onda de corriente por ser un elemento lineal. Utilizando el cursor vertical del osciloscopio se puede estimar dichos ángulos tal y como se muestra en la gráfica 3.2. Los resultados obtenidos en las mediciones se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros Eléctricos para Obtener el Circuito Equivalente de una LFC.

NODO	$I_m(\text{mA})$	$V_m(\text{V})$	$I_{rms}(\text{mA})$	$t_p(\text{ms})$	$t_2(\text{ms})$
V	52.28	6.17	58.03	6.44	6.207

Una vez definidos los resultados, los cuales se muestran en la tabla 3.1, el siguiente paso es calcular cada parámetro del circuito equivalente de la lámpara compacta fluorescente.

Cálculo de los parámetros del circuito equivalente de una LFC. El circuito equivalente se encuentra compuesto por una serie de elementos como son: un puente de diodos, un capacitor electrolítico DC, una resistencia de carga R_D la cual representa el tubo fluorescente junto a un inversor, y una resistencia R representando el circuito equivalente del filtro de interferencia electromagnética. De los elementos mencionados, se tomarán en cuenta para estimar su valor las dos resistencias (R_D y R) y la capacitancia C . El puente de diodo se puede omitir en cuanto a los cálculos debido a su función única la cual es de rectificar la señal alterna.

La resistencia de carga R_D como ya se ha descrito, representa el equivalente del conjunto formado por el inversor y el tubo fluorescente. Utilizando las especificaciones eléctricas del dispositivo tales como la potencia P consumida por la lámpara (11 W) y la tensión de trabajo V_{rms} (120 V), en conjunto con la corriente media I_{DC} a través del dispositivo la cual se encuentra reflejada en la tabla 3.1, y de la mano con la ecuación (3.12) permiten obtener este primer integrante del circuito equivalente.

En cuanto a la resistencia R y la capacitancia DC es necesario contar con la participación del ángulo de conmutación θ_2 y el ángulo pico de corriente θ_p , ambos estimados mediante la visualización de la forma de onda del flujo de corriente consumida por el dispositivo y posteriormente tabulados en la tabla 3.1. La capacitancia DC es calculada con el uso de la ecuación (3.15), en donde interviene el ángulo de conmutación θ_2 para así obtener la impedancia capacitiva normalizada X_{CN} , teniendo en cuenta el valor obtenido, es decir, verificar si se

encuentra en el rango promedio admisible de impedancia normalizada, rango englobado entre el 5 y el 25%. Posteriormente, a través de la relación $X_{CN} = X_C/R_D$ se puede estimar la impedancia capacitiva del circuito.

Para completar los parámetros integrantes del circuito equivalente del dispositivo se tiene la resistencia R, esta puede estimarse a través de una serie de ecuaciones, el primer conjunto de ecuaciones utilizadas inicia con la ecuación (3.16), esta permite establecer la corriente relacionada con la pendiente ascendente de corriente $i_{mN}(\theta)$ la cual será empleada en la ecuación (3.17) y en conjunto con la ecuación (3.18) forman la estructura necesaria para determinar la pendiente ascendente de corriente m_{im} . Una vez calculada la pendiente ascendente de corriente y a través de la ecuación (3.19) estimar la resistencia normalizada R_N . Posteriormente por medio de la relación $R_N = R/R_D$ generar el integrante faltante del circuito equivalente de una LFC, es decir, la resistencia R. La resistencia normalizada también se encuentra gobernada por un rango de promedios ya establecidos, este varía entre el 0 y el 2%.

Los resultados obtenidos para definir cada elemento integrante del circuito equivalente del presente trabajo, en conjunto con los resultados obtenidos por [Molina, 2014] y de igual manera los obtenidos por [Yong, 2010], fueron recopilados y tabulados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Cuadro Comparativo entre los Parámetros Obtenidos en el Estudio y por Molina.

Métodos	$R_D(\Omega)$	C (μF)	R(Ω)
J. Molina	5978	3.62	49.6
J. Molina-J. Yong*	5856	4.7	0
Autor	4024.59	4.16	42.66

*Resultados obtenidos por Molina utilizando el modelo propuesto por Yong.

Implementación del Interfaz Gráfico PSCAD/EMTODC® Como Método Comparativo. Se considera este interfaz gráfico una herramienta completa e importante para el profesional del

área eléctrica, esta permite realizar simulaciones con mayor propiedad en el área de potencia, sin embargo este simulador también cuenta con un gran número de recursos para las diferentes áreas de la ingeniería eléctrica, aunque en su mayoría pertenecen a los elementos característicos de un sistema de potencia. Por medio del interfaz los resultados obtenidos en este trabajo serán comparados con en el modelo equivalente presentado por Molina, el cual fue tomado como referencia para así comprobar la confiabilidad de su propuesta respecto al modelo de Yong.

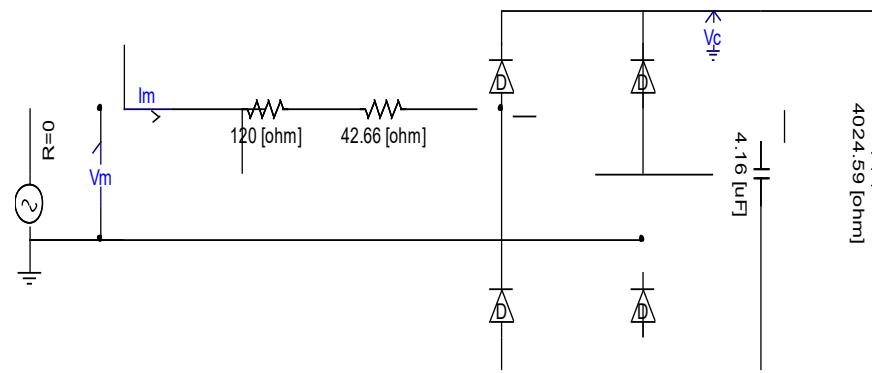
Sin embargo, el aporte de Y. Yong es la base del modelo seleccionado, de esta forma se realiza una tercera comparación implementada por Molina en su trabajo [Molina, 2014] pero tomando como referencia el trabajo realizado por Yong. Cada análisis fue realizado con un dispositivo de iluminación específico, cuyas características de consumo se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Potencia consumida por las LFC.

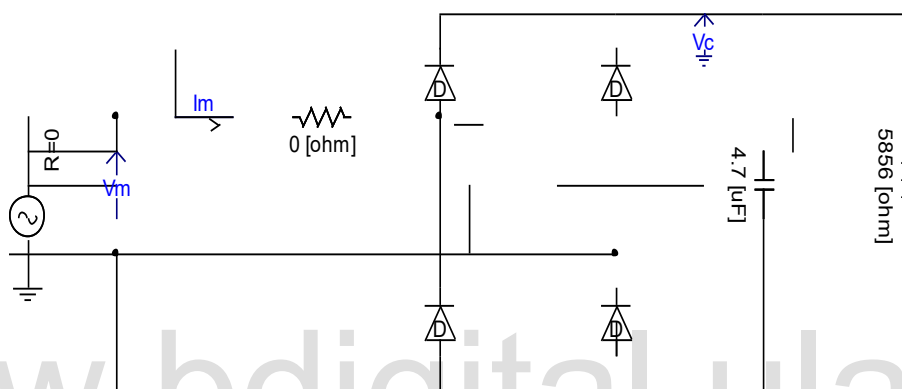
Métodos	Potencia LFC (W)
J. Molina	14
J. Molina-J. Yong	14
Estudio	11

Los circuitos construidos en el interfaz PSCAD/EMTODC® para el análisis armónico se muestran en la figura 3.2, la cual incluye el modelo estudiado y los dos modelos adicionales con los cuales serán realizadas las comparaciones.

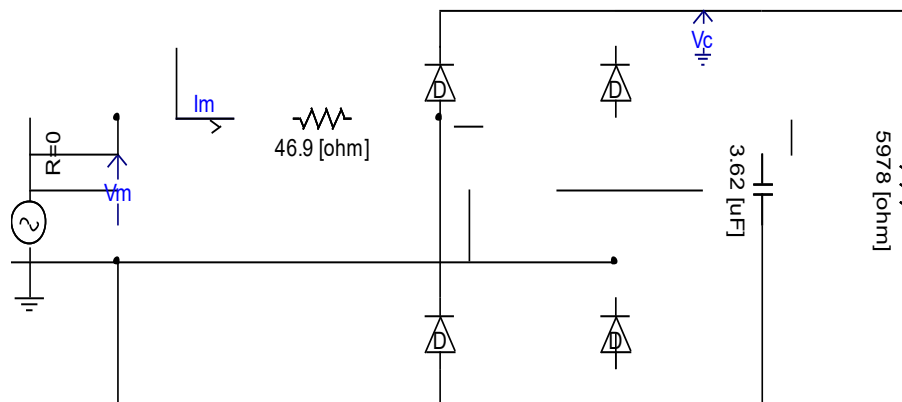
Cada circuito será sometido a los parámetros eléctricos de acuerdo a las condiciones especificadas por los diferentes autores a pesar de contar con la misma configuración circuital base, al final convergen a un análisis similar, es decir, a cada modelo mediante el uso de la herramienta PSCAD/EMTODC® se le suministrará la tensión de alimentación empleada por cada autor para su estudio.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2. Circuito Equivalente LFC: (a) Estudiado. (b) Julio Molina-Y. Yong. (c) Julio Molina.

En la figura 3.2 (a) se observa una resistencia adicional en el circuito equivalente, esta fue necesaria implementarla para así poder observar la forma de onda de la corriente a través de ella mediante el uso del osciloscopio. Esta resistencia no representó una influencia considerable en el desempeño del circuito para la estimación de los elementos.

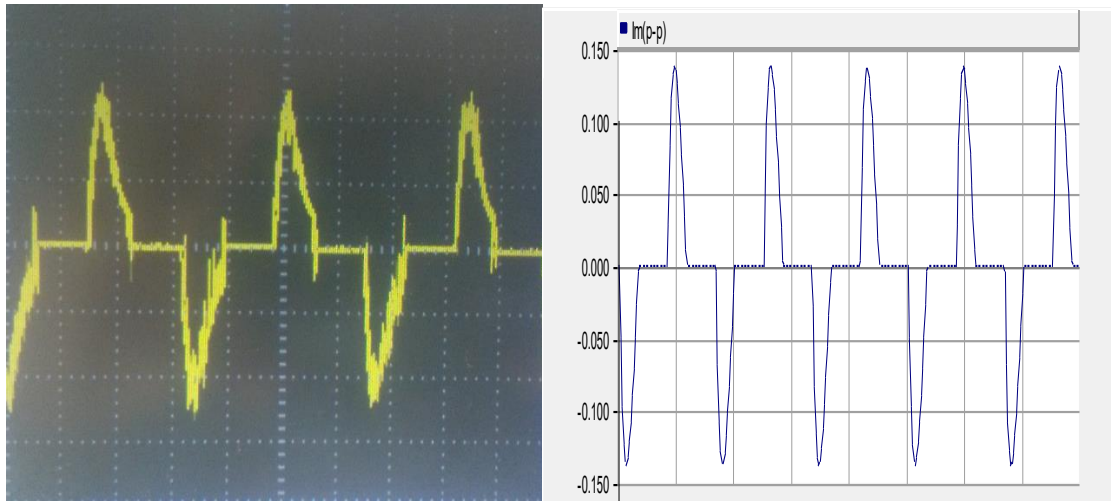
Una vez ejecutada la simulación en el interfaz gráfico PSCAD/EMTODC®, en la tabla 3.4 se presentan los parámetros eléctricos más importantes considerados para ser comparados con los parámetros eléctricos medidos.

Tabla 3.4. Parámetros Eléctricos Obtenidos para las LFC.

Métodos	Irms (mA)	Vc pico (V)	Vrms(V)
J. Molina	99.4	318.98	230
J. Molina-Y. Yong	96.4	312.43	230
Autor	61.03	158.76	120

Los resultados presentados en la Tabla 3.4 muestran la confiabilidad entre el método planteado por Molina y el planteado por Yong. Sin embargo estos no pueden ser comparados de forma directa con el utilizado para este trabajo ya que no se cuenta con las magnitudes obtenidas por Molina a través de mediciones eléctricas, adicionalmente los dispositivos fueron sometidos a una tensión mayor a la aplicada en este trabajo.

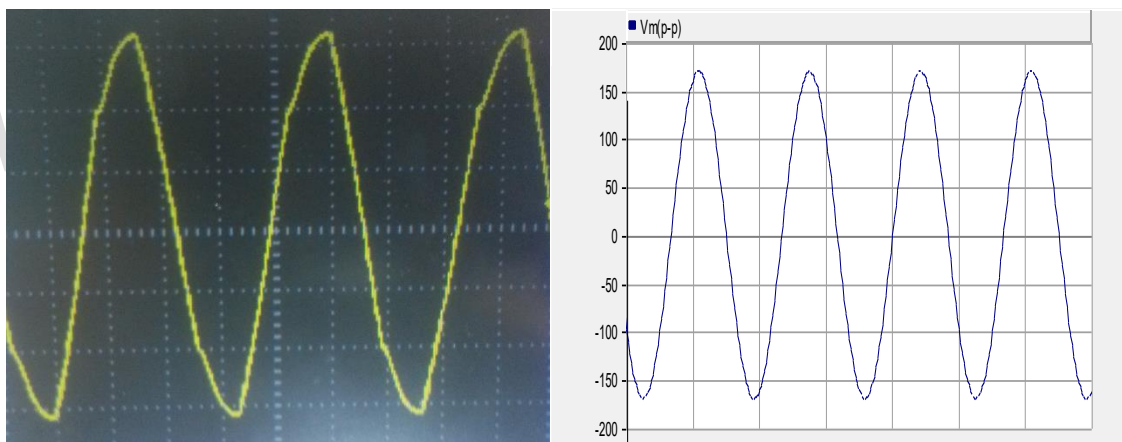
No obstante, mediante el análisis de los gráficos obtenidos en la simulación se pueden realizar las comparaciones con respecto a los parámetros obtenidos en las mediciones, estas formas de onda de corriente y tensión se muestran en las gráficas 3.4 y 3.5 respectivamente. Este contraste permite comprobar la fiabilidad que tiene el modelo implementado para estimar los parámetros internos del dispositivo de iluminación y así obtener un correcto estudio



(a)

(b)

Gráfico 3.4. Forma de Onda LFC (a) Corriente Medida. (b) Corriente Simulada.



(a)

(b)

Gráfico 3.5. Forma de Onda LFC (a) Voltaje Medido. (b) Voltaje Simulado.

Por otro lado, como se observa en el gráfico 3.6, se puede apreciar el valor de la corriente eficaz consumida por el circuito equivalente simulado, magnitud necesaria para comprobar la versatilidad del modelo circuital equivalente escogido para el presente análisis. Se debe tener en cuenta que al ser una simulación, en su gran mayoría se obtienen resultados aproximados a la realidad.

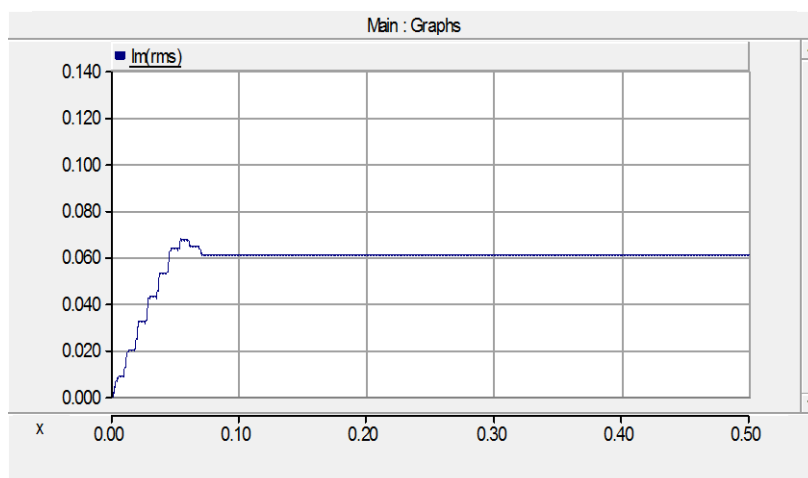


Gráfico 3.6. Forma de Onda Corriente Eficaz de la LFC.

La corriente eficaz medida por el osciloscopio fue de 58.03mA, la corriente eficaz obtenida en la simulación es de 61.03mA. Dando como resultado una diferencia de 3mA entre ambas. Lo que nos indica que el modelo implementado para el estudio de LFC es bastante aceptable, donde a pesar de ser una estimación de parámetros origina datos confiables y cercanos a la realidad.

En cuanto a los ajuste de las mediciones pueden ser atribuidas a la fiabilidad de la red eléctrica para el momento de las mediciones y al no contar con equipos de filtrado es posible obtener medidas un poco alteradas debido a las diferentes perturbaciones del sistema eléctrico.

Considerando que el dispositivo de iluminación empleado para objeto de estudio representa una carga no lineal para el sistema eléctrico, la cual es una lámpara fluorescente compacta (LFC), es importante incluir al estudio, un análisis sobre los armónicos generados por este tipo de dispositivo, es decir, observar de forma aproximada el porcentaje de distorsión armónica generado para así de esta forma poder verificar si estos se encuentra dentro de los límites establecidos por el estándar IEEE [IEEE Std 519, 2014].

Utilizando el interfaz gráfico PSCAD/EMTODC® es posible estimar las corrientes y tensiones armónicas producidas por el dispositivo de iluminación cuyos niveles se representan en forma de barra tal y como se muestran en el gráfico 3.7.

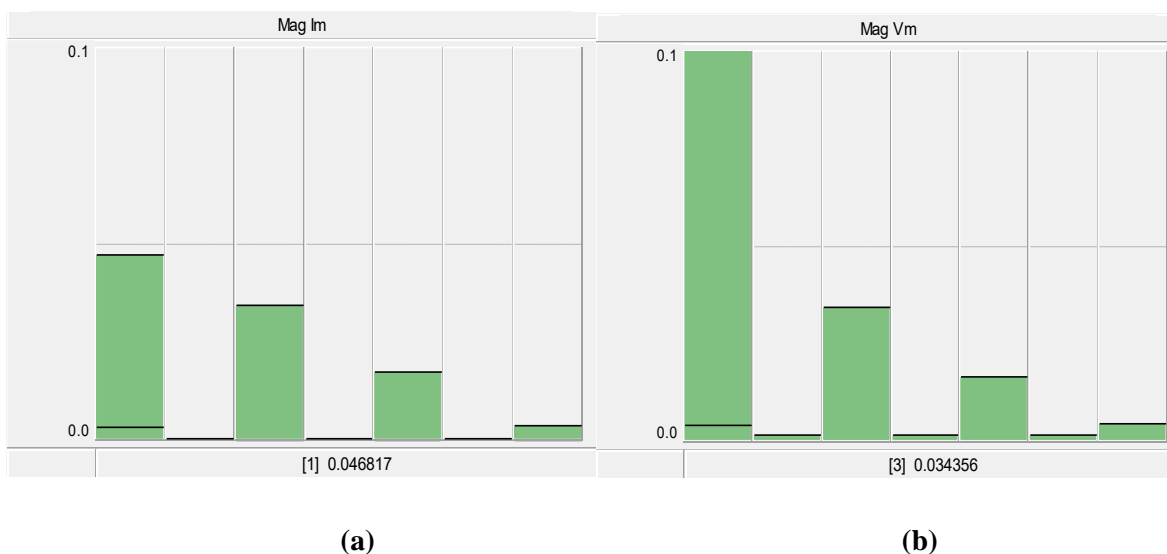


Gráfico 3.7. (a) Magnitud Corrientes Armónicas. (b) Magnitud Tensiones Armónicas.

Las gráficas presentadas en la gráfica 3.7 representan las corrientes y tensiones armónicas aproximadas generadas por el modelo equivalente de la lámpara, ambas generadas por el simulador, considerando la amplitud del estudio hasta el 7mo armónico. De esta forma inclinar el análisis hasta las componentes armónicas con más peso en los sistemas de potencia, en este caso, sistemas residenciales.

Para realizar una correcta interpretación de los gráficos presentados en la gráfica 3.6, es necesario presentar cada valor de corriente y tensión armónica por separado, por lo tanto los resultados serán presentados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Magnitud de Corrientes y Tensiones Armónicas.

Parámetros	Grado Armónicos						
	1	2	3	4	5	6	7
Ia(mA)	46.82	0.0131	34.32	0.00938	16.66	0.00718	3.46
Va(V)	119.95	0.00114	0.0343	0.00065	0.01619	0.00055	0.00391

Es necesario contar con una forma de cuantificar las distorsiones generadas por las corrientes y tensiones armónicas, para ello se emplean los índices de armónicos a través de las ecuaciones (2.3) y (2.4), estas ecuaciones permiten expresar los parámetros eléctricos en forma porcentual y manipular de una forma más sencilla las distorsiones.

Las distorsiones armónicas de corrientes y tensiones armónicas se presentan de forma individual (HD) así como también en forma global o total, también llamada Distorsión Total Armónica (THD). Esto se realizó con la finalidad de fundamentar una mejor comparación y un mejor análisis respecto a los otros métodos seleccionados así como también contrastar los porcentajes obtenidos con la normativa IEEE.

Por consiguiente las distorsiones armónicas de corriente y de tensión se presenten de forma individual en la Tabla 3.6 y en la tabla 3.7 respectivamente.

Tabla 3.6. Distorsión Armónica de Corriente.

Distorsión Armónica de Corriente	J. Molina (%)	J. Molina-Y. Yong (%)	Autor (%)
HD_{I_1}	100	100	100
HD_{I_2}	0.095	0.548	0.027
HD_{I_3}	83.69	87.76	73.29
HD_{I_4}	0.088	0.572	0.020
HD_{I_5}	57.014	66.26	35.58
HD_{I_6}	0.089	0.621	0.015
HD_{I_7}	27.39	38.68	7.39

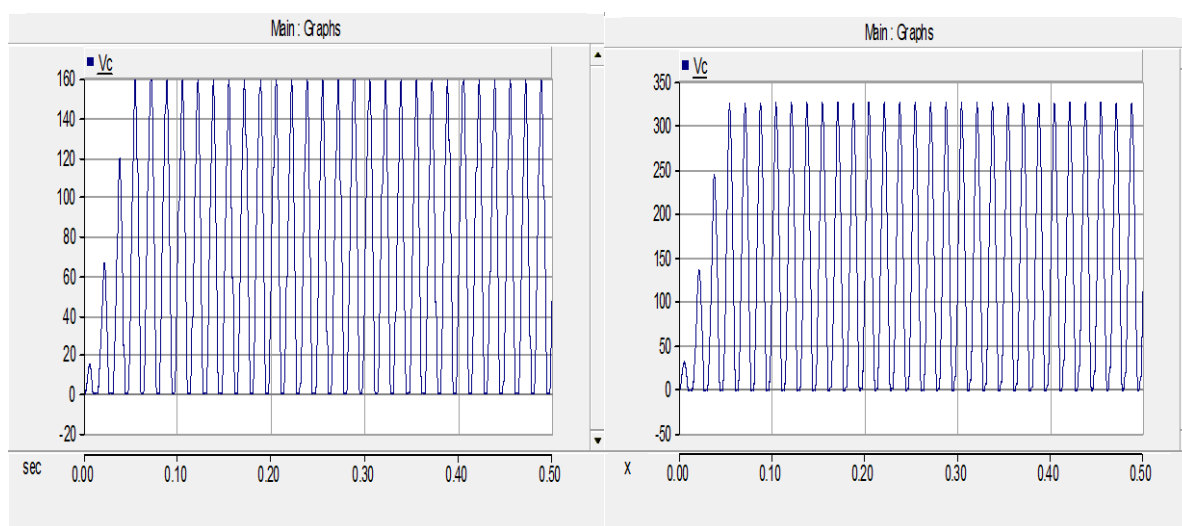
Tabla 3.7. Distorsión Armónica de Voltaje.

Distorsión Armónica de Voltaje	J. Molina (%)	J. Molina-Y. Yong (%)	Autor (%)
HD_{V_1}	100	100	100
HD_{V_2}	0.00097	0.001006	0.00097
HD_{V_3}	0.00068	0.00064	0.00064
HD_{V_4}	0.00053	0.00056	0.00059
HD_{V_5}	0.00045	0.00038	0.00041
HD_{V_6}	0.00048	0.00049	0.00042
HD_{V_7}	0.00016	0.00013	0.00035

Las tablas 3.6 y 3.7 suministran suficiente información para fundamentar el análisis sobre el dispositivo de iluminación utilizado para este trabajo, en donde se logra apreciar el alto porcentaje respecto a las corrientes armónicas ocasionada por la lámpara, particularmente el 3er y 5to armónico aplicado a la red de suministro eléctrico. En cuanto al porcentaje de tensiones armónicas la intervención de estos sobre la fundamental resulta menor, sin embargo debe ser considerado para el estudio al igual que las corrientes armónicas cuando se manejan grandes cargas no lineales conectadas a un punto en común ya que se deben respetar los límites establecidos por el estándar IEEE [IEEE Std 519, 2014]. El análisis armónico será enfocado principalmente a las tensiones armónicas, razón dirigida al no obtener parámetros tales como la corriente de cortocircuito I_{SC} y la corriente de demanda I_L las cuales configuran la relación I_{SC}/I_L necesaria para considerar los límites armónicos de corrientes; ya que el análisis tiene como objetivo principal al de estudiar una carga en particular y no a una carga sustancial, por

ejemplo, una carga conformada por un conjunto residencial. Sin embargo se realizará su correspondiente estudio al porcentaje de distorsión ocasionado por las corrientes armónicas.

Las distorsiones de corrientes armónicas individuales más resaltantes en los tres modelos comparados en la tabla 3.6 son el 3er y 5to armónico. Los modelos realizados por Molina presentan unas distorsiones armónicas bastante cercanas, estos modelos fueron obtenidos bajo escenarios similares, es decir, mismo dispositivo de iluminación (14 W) y análisis similares. La diferencia de resultados obtenidos entre los dos modelos sustentados por Molina y el realizado para el presente estudio se debe principalmente a la red con la cual fueron realizadas las pruebas. Molina empleó un suministro de tensión a 230 VAC a 50 Hz, mientras el empleado para este estudio fue de 120 VAC a 60 Hz. Por lo tanto la diferencia de tensiones suministradas al dispositivo altera considerablemente la configuración equivalente del circuito, pero a su vez afecta directamente el comportamiento de los componentes integrantes del circuito, como por ejemplo la carga y descarga del capacitor. Para comprender mejor la comparación de las tensiones suministradas a los dispositivos, se presentan a continuación en la gráfica 3.8, la forma de onda que representa el comportamiento del capacitor DC.



(a)

(b)

Gráfico 3.8. Forma de Onda Capacitor DC: (a) Modelo Estudiado. (b) Julio Molina.

El tiempo de carga y descarga del capacitor DC se encuentra relacionado con la tensión suministrada al dispositivo, pero no de forma directa, tal y como lo resalta [Slezingr, 2012] en su aporte, la constante de tiempo τ debido a su estructura matemática la cual es $\tau_C = R_D \cdot C$, permite relacionar en el circuito equivalente estudiado a la resistencia de carga R_D con la capacitancia C . Ya que estos parámetros son directamente proporcionales, cualquier alteración reflejada en uno de los dos elementos ocasiona cambios significativos en la estructura del circuito equivalente, de manera puntual, sobre la constante de tiempo, teniendo como resultado el aumento o disminución de las corrientes armónicas.

Por otro lado, para verificar los límites de distorsión de acuerdo al estándar IEEE, es necesario obtener la distorsión total de corriente (THD_i) y tensiones armónicas (THD_v) entre modelos. Resultados obtenidos a través del interfaz gráfico PSCAD/EMTODC® y presentados en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resultados de la THD_v y THD_i en los Diferentes Modelos Estudiados.

Parámetro	J. Molina	J. Molina-Y. Yong	Autor
$THD_i(\%)$	104.91	116.606	81.81
$THD_v(\%)$	0.03003	0.00147	0.0015

La norma IEEE, específicamente el estándar [IEEE Std 519, 2014], establece los límites de distorsiones armónicas representados en la tabla 2.1. Comparando los resultados obtenidos en la tabla 3.8 respecto a los límites de distorsión de voltaje presentado por el estándar IEEE en la tabla 2.1, se observa que los porcentajes de distorsión característicos de cada modelo equivalente, tanto de forma individual como el total de ellos, es considerablemente inferior al establecido por la norma. Las pautas presentadas por el estándar son válidas para sistemas con cargas conectadas significativas y no para análisis unitarios, es decir, análisis de una carga en particular.

Es por ello lo referido anteriormente en enfocar los análisis armónicos a la distorsión ocasionada por las tensiones armónicas debido al estudio particular de una carga. Así, como es de esperarse, la distorsión total de armónicos (para corriente y tensiones armónicas) presenta resultados muy similares en los modelos estudiados por Molina, sin embargo se logra apreciar una diferencia considerable respecto al modelo empleado para este trabajo. Esto puede atribuirse no sólo a la configuración pautada por la constante de tiempo, sino también al diseño del dispositivo. Es decir, el objetivo principal del fabricante es garantizar la eficiencia del equipo gobernada por normativas, pero, en algunos casos muchos fabricantes sacrifican la calidad del equipo con la inclusión de elementos electrónicos de baja gamma empleados para el ensamblaje del producto, para así aumentar la producción.

3.2.2 Pruebas para la Determinación de los Parámetros eléctricos en una Lámpara LED

La ruta ejecutada para la estimación de los parámetros del circuito equivalente de una lámpara LED propuesto por [Molina, 2016] es similar a la empleada para obtener los parámetros del circuito equivalente de una LFC. Es decir, fue necesario la realización de unas mediciones eléctricas originadas en el laboratorio y ejecutada con los siguientes instrumentos:

- Osciloscopio digital.
- Sonda atenuada (10X)
- Lámpara LED 1 W junto a su respectivo conector.
- Juego de conectores.
- Bornera.
- Multímetro.
- Resistencia de 120 Ω .
- Fuente variable AC/DC.
- Transformador de voltaje 1:1 para aislar al osciloscopio de la red.

La configuración del circuito empleado para la obtención de los parámetros eléctricos es la mostrada en la figura 3.3.

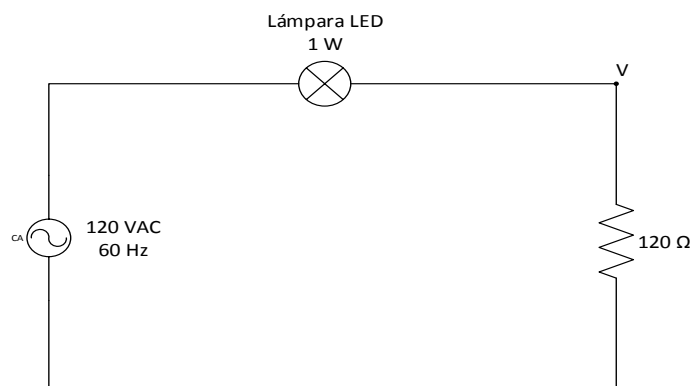


Figura 3.3. Circuito Aplicado para las Mediciones Eléctricas.

La potencia consumida por la lámpara LED empleada para el estudio es de 1 W, esta forma parte del circuito mostrado en la figura 3.3 con el fin de extraer los parámetros eléctricos fundamentales para la estimación de los elementos del circuito equivalente ilustrado en la figura 2.18.

A este dispositivo de iluminación se le agrega una resistencia en serie de 120Ω la cual cumple la función de facilitar la obtención de los datos necesarios para el estudio, de esta manera se completa el circuito el cual será energizado por una fuente variable AC/DC a una tensión de 120 VAC.

Una vez construido el circuito, se procede a realizar las mediciones mediante la sonda atenuada del osciloscopio, la cual fue colocada en el nodo V o de forma paralela a la resistencia de 120Ω , este por ser un elemento lineal permite hacer uso de la Ley de Ohm para obtener un parámetro importante para dar inicio a la gestación del modelo equivalente, nos referimos a la corriente media consumida por el dispositivo LED en el modelo propuesto por [Molina, 2016].

Es importante tener en cuenta la protección del instrumento de medición, es decir, el osciloscopio; equipo al cual debe ser aislado con un transformador de relación 1:1 con la finalidad de reducir el escenario de un posible daño al equipo.

Una vez obtenida la corriente media consumida por el dispositivo, el siguiente paso es extraer de la forma de onda de la corriente el tiempo t_2 donde ocurre la conmutación y el tiempo t_p donde ocurre el pico de corriente, a través de estos tiempos poder calcular los ángulos de conmutación θ_2 y de pico de corriente θ_p .

Estos ángulos resultan esenciales para calcular parte de los elementos circuitales, como por ejemplo la resistencia R y la capacitancia DC. Así, las características eléctricas extraídas del dispositivo mediante las mediciones son recopiladas y presentadas en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Parámetros para Obtener el Circuito Equivalente de una Lámpara LED.

NODO	$I_m(\text{mA})$	$V_m(\text{V})$	$I_{rms}(\text{mA})$	$t_p(\text{ms})$	$t_2(\text{ms})$
V	18.03	2.16	20	8.199	7.95

www.bdigital.ula.ve

El escalón siguiente luego de obtener las características eléctricas para la estimación del circuito equivalente es la de calcular cada elemento que configura dicho circuito.

Cálculo de los Parámetros del Circuito Equivalente de una Lámpara LED. El circuito equivalente mostrado en la Fig. 2.18 se encuentra constituido por tres elementos equivalentes como son la fuente de corriente I_D , la capacitancia DC y la resistencia R la cual representa el circuito de interferencia electromagnética.

El primer elemento a determinar es la fuente de corriente independiente I_D , esta representa un conjunto formado por el arreglo de LED y su respectivo controlador de corriente. A esta fuente se le asignará el mismo valor de la corriente media obtenido y descrito en la tabla 3.10, de acuerdo a lo establecido por el modelo utilizado como referencia [Molina, 2016].

En lo posible se debe ser lo más preciso posible en cuanto a la obtención de este parámetro, de esta forma garantizar resultados lo más precisos posibles.

Otro integrante importante para configurar el circuito equivalente es la capacitancia DC. Para obtener este elemento es necesario el aporte proporcionado por el ángulo de conmutación θ_2 , el cual se puede obtener mediante el tiempo de conmutación t_2 mostrado en la Tabla 3.10; ángulo fundamental para establecer el valor de capacitancia C dentro del rango establecido por la impedancia normalizada X_{CN} , esta puede ser extraída aplicando la ecuación (3.6).

Una vez calculada es necesario comprobar si se encuentra dentro del rango definido para las impedancias normalizadas promedios estudiadas, como se muestra en la gráfica 3.1, rango encuentra entre el 1 y 25%. Luego, a través de la relación $X_{CN} = X_C/(V/I_D)$ estimar la impedancia capacitiva para posteriormente determinar la capacitancia DC.

El último elemento perteneciente al circuito equivalente es la resistencia R, esta representa el conjunto equivalente del circuito de interferencia electromagnética. La obtención de este elemento se deriva del uso de una serie de ecuaciones.

La primera ecuación para dar inicio a la gestación de este parámetro es la (3.7), esta permite obtener la corriente normalizada I_{mN} , pieza importante para dar introducción a la ecuación (3.8) la cual representa la pendiente de corriente m_{im} .

Luego de obtener la pendiente de corriente, a través de la ecuación (3.9) es posible obtener la resistencia normalizada R_N . Al igual que la impedancia capacitiva normalizada se debe tener presente la inclusión de esta resistencia dentro del rango normalizado, rango fijado entre el 0 y el 2%. Así, mediante la relación $R_N = R/(V/I_D)$, obtener el último pero no menos indispensable integrante del circuito equivalente, haciendo referencia a la resistencia R.

Una vez completada la configuración circuital, las magnitudes características de cada elemento son recopiladas y tabuladas para posteriormente ser comparados, así como también realizarle el correspondiente análisis de la mano con su fundamentación y adicionalmente desarrollar la validación del modelo. Por lo tanto en la tabla 3.10 se incluyen los resultados obtenidos por [Molina, 2016], autor del modelo equivalente utilizado como base para el estudio del presente trabajo.

Tabla 3.10. Cuadro Comparativo entre los Parámetros Obtenidos en el Estudio y por Molina.

Métodos	I_D(mA)	C (μF)	R(Ω)
J. Molina	23.9	8.63	20.20
Autor	18.03	67.37	108.48

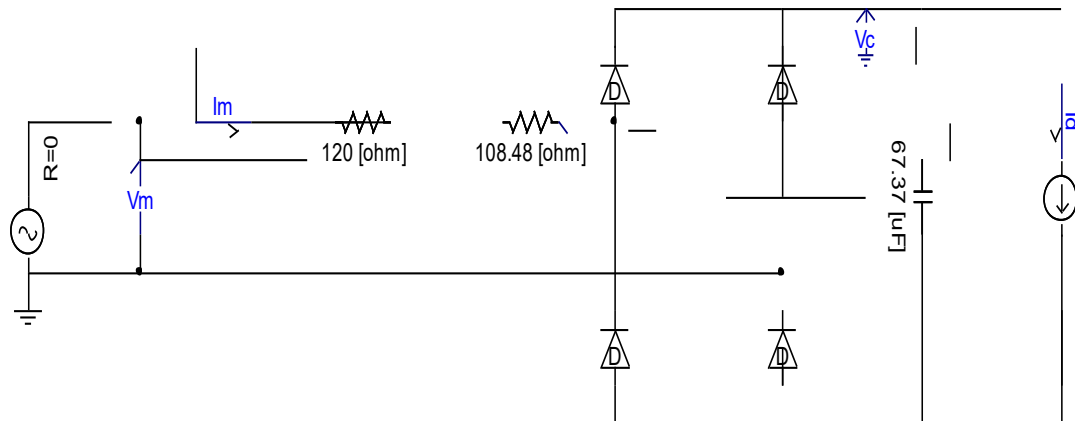
Implementación del Interfaz Gráfico PSCAD/EMTODC® como Método Comparativo. La validación de los parámetros obtenidos para el modelo equivalente utilizado en este trabajo es justificada mediante el uso del interfaz gráfico PSCAD/EMTODC®, herramienta con recursos suficientes para designar la tarea comparativa entre el dispositivo de iluminación utilizado por Molina y el utilizado para este estudio. Las especificaciones de consumo de cada dispositivo se encuentran descritas en la tabla 3.11.

www.bdigital.ula.ve

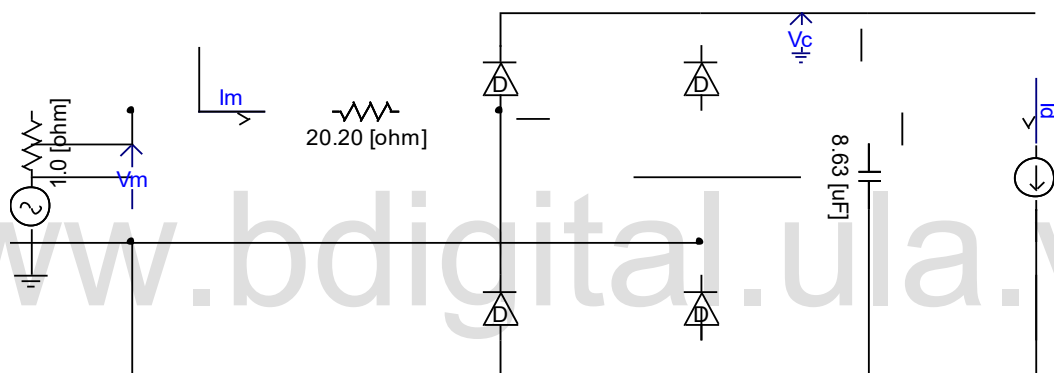
Tabla 3.11. Potencia Consumida por las Lámparas LED.

Métodos	Potencia LED (W)
J. Molina	8
Autor	1

Una vez obtenidos los parámetros necesarios para dar forma al circuito equivalente, el siguiente paso es construir y simular los modelos circuitales con el interfaz gráfico PSCAD/EMTODC®. Cada circuito es sometido condiciones de trabajo diferentes empleadas por cada autor, cuyo escenario es ligeramente diferente para cada modelo, empezando por el suministro de tensión, la resistencia adicional incluida en el circuito. Así los esquemas resultantes de ambos circuitos se muestran en la figura 3.4.



(a)



(b)

Figura 3.4. Modelo Circuito Equivalente: (a) Estudiado. (b) Julio Molina.

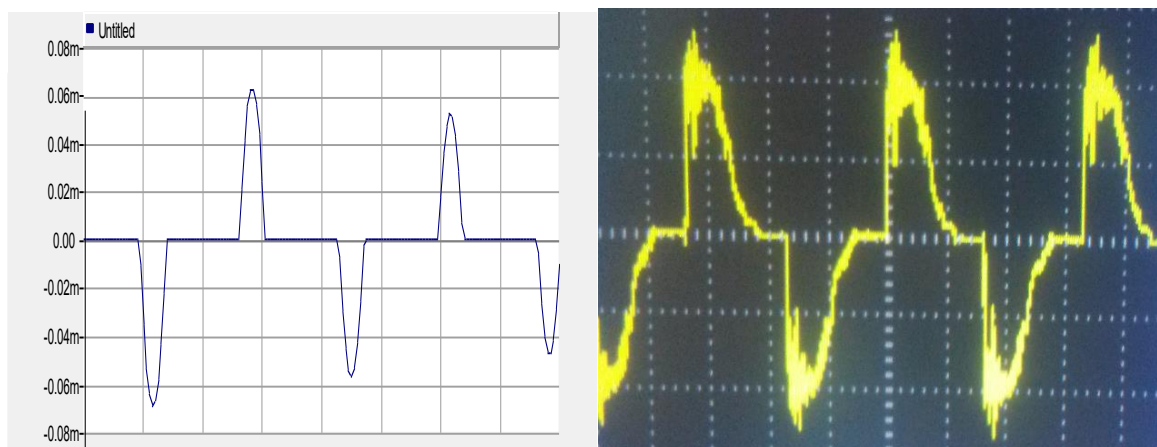
Como se observa en la figura 3.4, los circuitos equivalentes mostrados son modelos similares debido a la selección del modelo base para el estudio; la diferencia se aprecia en la Fig. 19 (a) donde resalta la adición de una resistencia de 120Ω , la cual fue empleada para poder observar la forma de onda de la corriente consumida por el dispositivo, esta resistencia no presentó un aporte negativo en cuanto a los resultados obtenidos, los cuales se muestran en la tabla 3.12. Estos resultados fueron obtenidos mediante el interfaz gráfico PSCAD/EMTODC®, así como también se consideraron como importantes para los análisis.

Tabla 3.12. Parámetros Eléctricos Obtenidos para las Lámparas LED.

Métodos	Irms (mA)	Vc pico (V)	Vrms(V)
J. Molina	26.24	330.63	230
Autor	19.55	166.29	120

Los resultados expuestos en la tabla 3.12, obtenidos a partir de la simulación de los parámetros calculados sólo permite realizar comparaciones aproximadas debido a no disponer de las magnitudes reales obtenidas a través de mediciones eléctricas realizadas por Molina, adicionalmente la tensión aplicada es diferente a la suministrada en el circuito estudiado.

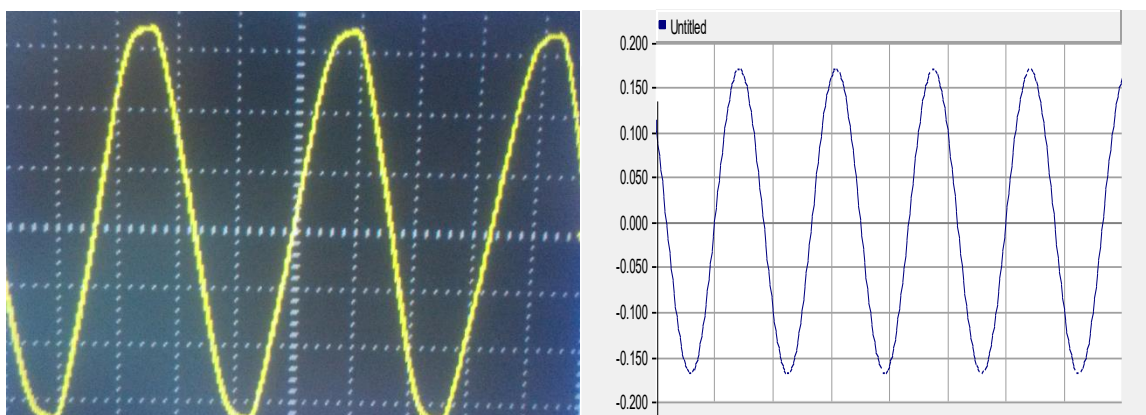
No obstante, se realizó la comparación entre la forma de onda de corriente y tensión extraídas del simulador y del osciloscopio cuyas señales son ilustradas en la gráfica 3.9 y 3.10, así, de esta manera permite contrastar y validar el modelo seleccionado para el estudio.



(a)

(b)

Gráfico 3.9. Forma de Onda Lámpara LED (a) Corriente Medida. (b) Corriente Simulada.



(a)

(b)

Gráfico 3.10. Forma de Onda Lámpara LED (a) Voltaje Medido. (b) Voltaje Simulado.

Sin embargo, para validar la confiabilidad del modelo, la gráfica 3.11 presenta un argumento con propiedad para realizar la comparación entre los resultados obtenidos mediante la simulación y los obtenidos mediante mediciones.

www.bdigital.ula.ve

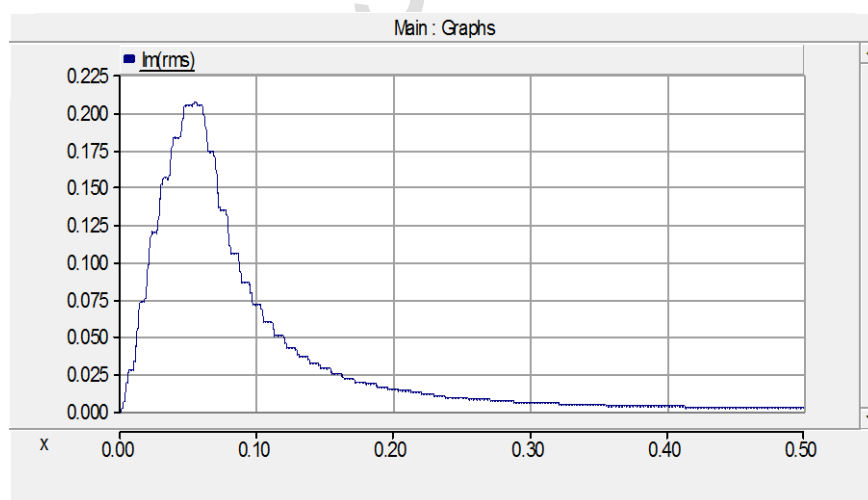


Gráfico 3.11. Forma de Onda Corriente Eficaz de la Lámpara LED.

La corriente eficaz medida con el osciloscopio es de 20 mA, la obtenida a través del interfaz gráfico, como lo muestra la gráfica 3.11 es de 19.55 mA. La diferencia entre resultados es de

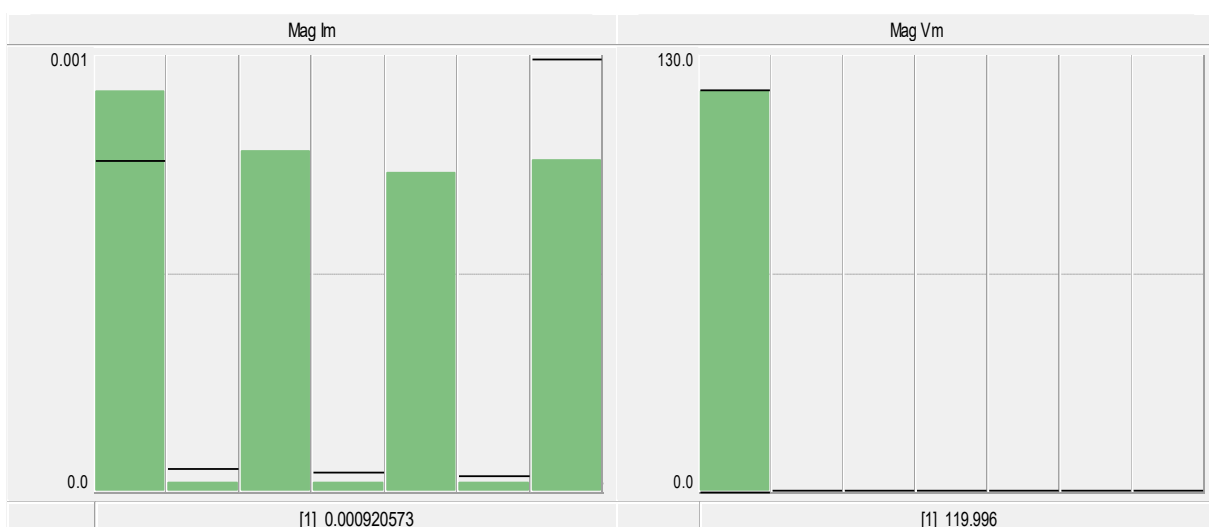
0.45 mA, este permite acotar con propiedad la confiabilidad del modelo seleccionado para el presente trabajo, permitiendo realizar análisis circuitales lo bastante cercanos a la realidad respecto al circuito referido a lámparas LED.

Sin embargo, es importante destacar los factores influyentes en el momento de realizar las mediciones físicas tales como las perturbaciones presentes en la red eléctrica, ruido en la señal aplicada al dispositivo, entre otros.

Estas mediciones fueron ejecutadas sin los filtros necesarios para poder reducir o eliminar estos factores los cuales pueden causar lecturas imprecisas y de esta forma afectar las magnitudes necesarias para el cálculo de los parámetros internos del circuito equivalente.

Por otro lado, las lámparas LED entran en el grupo clasificado como generadores de corrientes y tensiones armónicas lo que implica realizarle un análisis para a este tipo de perturbaciones ocasionadas por esta clase de dispositivos de iluminación.

En la gráfica 3.12 se exponen los niveles armónicos de tensión y corriente generados por la lámpara LED empleada para este trabajo, cuya potencia consumida es de 1 W. Estos niveles se presentan hasta el séptimo armónico y son ilustrados en forma de barra



(a)

(b)

Gráfico 3.12. (a) Niveles Armónicos de Corriente. (b) Niveles Armónicos de Tensión.

Los niveles de tensiones y corrientes armónicas representados por barras en la gráfica 3.8, representan las magnitudes atribuidas a cada orden de armónicos generado por la lámpara LED, en donde se representa hasta el 7mo orden armónico.

Cada nivel armónico de tensión y corriente posee su correspondiente magnitud, esta se describe en la tabla 3.13 de forma individual.

Tabla 3.13. Magnitud de Corrientes y Tensiones armónicas.

Parámetros	Grado Armónicos						
	1	2	3	4	5	6	7
Ia(mA)	9.20	0.001608	7.76	0.00181	7.31	0.00193	7.62
Va(V)	119.99	0.00116	0.00099	0.000625	0.000626	0.000591	0.000222

Cada magnitud de tensión y corriente armónica aunque fueron descritas en valores eléctricos característicos, es importante manejarlos de forma porcentual debido al estándar IEEE, permitiendo así establecer criterios de forma localizada o generalizada, es decir, englobar los límites permitidos de distorsión establecidos por [IEEE Std 519, 2014].

Estos porcentajes pueden ser calculados aplicando las ecuaciones (2.3) y (2.4), sin embargo con ayuda del programa PSCAD/EMTODC® se pueden obtener de forma rápida y aproximada los porcentajes armónicos de tensión y corriente de forma individual (HD) e incluso también se puede extraer el porcentaje general o total de distorsión armónica conocido como Distorsión Total de Armónicos (THD).

El análisis armónico presenta su punto de partida con las distorsiones armónicas individuales de corrientes y tensiones, las cuales se encuentran disponibles en las tablas 3.14 y 3.15 respectivamente.

Tabla 3.14. Distorsión Armónica de Corriente.

Distorsión Armónica de Corriente	J. Molina (%)	Autor (%)
HD_{I_1}	100	100
HD_{I_2}	7.88	1.74
HD_{I_3}	65.18	84.33
HD_{I_4}	8.53	1.97
HD_{I_5}	62.85	79.43
HD_{I_6}	10.29	2.09
HD_{I_7}	68.17	82.78

Tabla 3.15. Distorsión armónica de voltaje.

Distorsión Armónica de Voltaje	J. Molina (%)	Autor (%)
HD_{V_1}	100	100
HD_{V_2}	0.00096	0.00095
HD_{V_3}	0.00082	0.000106
HD_{V_4}	0.000521	0.00056

Distorsión	J. Molina (%)	Autor (%)
Armónica de Voltaje		
HD_{V_5}	0.000522	0.00079
HD_{V_6}	0.000492	0.00045
HD_{V_7}	0.00018	0.00027

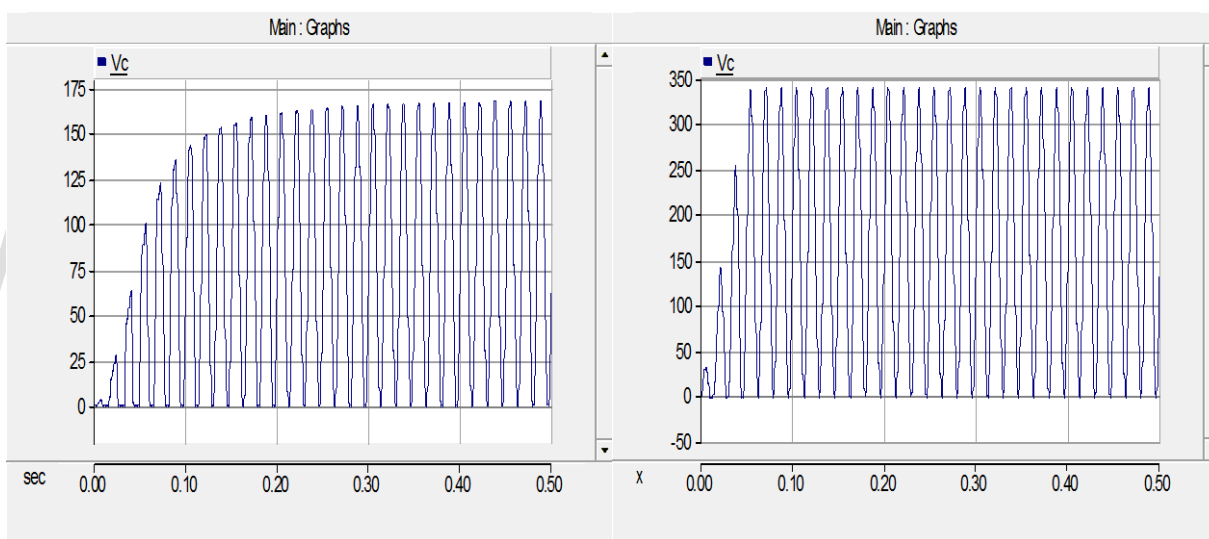
La distorsión armónica de corriente generada por el modelo estudiado presentadas en la tabla 3.14 refleja un nivel mayor de armónicos en el orden impar respecto al modelo alternativo el cual presenta niveles resaltantes en el orden par de armónicos. Estas diferencias se presentan debido a la configuración interna de cada lámpara ya que al presentar diferencia en cuanto a la potencia consumida por los dispositivos (1 W vs 8 W) estas pueden atribuir diferentes alteraciones en los parámetros internos del circuito.

Por otro lado, la asignación de consumo en este tipo de dispositivos requiere de la mayor precisión posible respecto al controlador de corriente, este se encarga de garantizar un suministro de tensión y corriente estable al arreglo de LEDs, es decir, al ser elementos semiconductores estos son diseñados para operar a cierto niveles de tensión y corriente, cualquier alteración un el suministro hacia el arreglo de LEDs es reflejado, por ejemplo, en el color de luz emitido. Debido a esto, la calidad de los componentes electrónicos utilizados puede afectar el desempeño del dispositivo. Indirectamente influye en la generación de corrientes armónicas por parte del dispositivo, las que resultan significativas o de peso cuando se presenta conexiones masivas en un punto común.

Los límites armónicos de corrientes establecidos por la norma IEEE no serán objeto de comparación ya que al ser un estudio particular sobre este tipo de carga no lineal, no se dispone de la información fundamental para corroborar si los niveles se encuentran dentro de la normativa. Información relacionada con la relación I_{SC}/I_L la cual gobierna estos límites de

distorsión. Para comprobar los límites definidos por la norma, estos pueden ser empleados de forma individual o de forma global.

Las tensiones armónicas al igual que las corrientes armónicas presentan distorsiones significativas cuando se encuentran conectados un gran número de cargas no lineales en un punto común. La capacitancia DC se considera un elemento influyente en las magnitudes de tensiones armónicas generadas por la lámpara. Es decir, cuando el circuito se encuentra sometido a una tensión diferente afecta de forma directa este elemento, variando así su comportamiento como por ejemplo tiempo de carga y descarga capacitiva. La forma de onda generada por las capacitancias se muestra en la gráfica 3.13.



(a)

(b)

Gráfico 3.13. Forma de Onda Capacitor DC: (a) Modelo Estudiado. (b) Julio Molina.

También es importante incluir al estudio los niveles armónicos totales de corrientes (THDi) y tensiones armónicas (THDv) resultantes, ambos obtenidos mediante el interfaz gráfico PSCAD/EMTODC®. En la tabla 3.16 se encuentran tabulados estos niveles armónicos de forma porcentual.

Tabla 3.16. Resultados THD_V y THD_I para los Diferentes Modelos Estudiados.

Parámetro	J. Molina	Autor
$THD_I(\%)$	114.407	142.428
$THD_V(\%)$	0.00156	0.00181

La característica THD_I descrita en la tabla 3.16, refleja un alto porcentaje de armónicos generados por este tipo dispositivo, permitiendo así estimar los efectos en la red causados por este tipo de lámparas cuando son utilizadas de manera masiva. Los límites de corrientes armónicas para diferentes tensiones no serán incluidos para el presente trabajo por la razón de ser un estudio enfocado a una carga lineal específica y no dirigido a un conjunto de cargas generalizado.

Estos efectos se le puede atribuir al producto presentado por cada fabricante, estas al ser lámparas de diferente consumo y diferente fabricante existe altas posibilidades de variación en cuanto al diseño y a la calidad de los elementos empleados para dar forma al dispositivo, lo que genera así grandes perturbaciones armónicas y al no incluir los correspondientes filtros atenuadores para este tipo de efectos aumentan considerablemente los problemas en la red de suministro eléctrico. En muchos casos no se garantiza la operación de estos dispositivos dentro de los límites establecidos por el estándar IEEE.

Por el contrario, para la característica THD_V si serán empleados los límites de tensiones armónicas establecidos por el estándar IEEE. Estos límites descritos en la tabla 3.17, son propuestos para un número de cargas mayor en comparación a la carga estudiada.

Sin embargo, nos presenta una guía la cual se puede extrapolar y estimar si fuese el caso, cuando un punto en común se encuentra bajo la influencia de muchas cargas no lineales, para nuestro caso, lámparas LED.

3.2.3 Pruebas para la Determinación de Parámetros Eléctricos en una Lámpara Fluorescente

La gestación de las pruebas a la cual fue sometido este tipo de dispositivo de iluminación tuvo como punto de partida la realización de mediciones eléctricas en el laboratorio, con el fin de obtener la corriente consumida por la luminaria, estas fueron realizadas con el respaldo de un multímetro digital en conjunto con una serie de instrumentos descritos a continuación:

- Luminaria con dos lámparas fluorescentes de 32 W c/u.
- Juego de conectores.
- Bornera.
- Multímetro.
- Fuente variable AC/DC.

www.bdigital.ula.ve

El circuito empleado para las pruebas eléctricas en la luminaria es ilustrado en la figura 3.5.

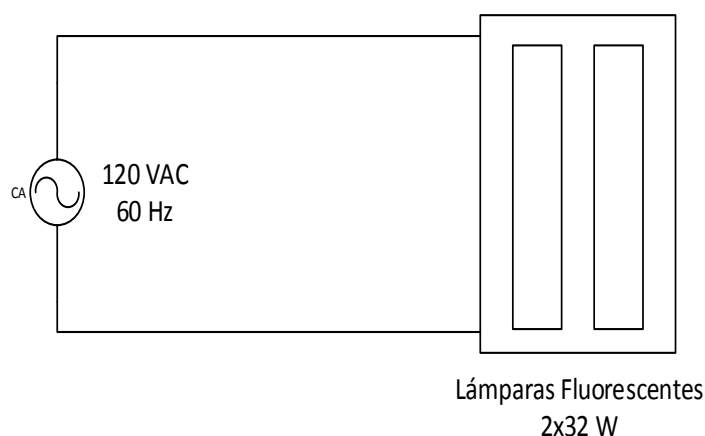


Figura 3.5. Circuito Implementado para Obtener la Corriente Consumida por las LF

Una vez configurado el circuito de la figura 3.5 se procede al ajuste de tensión en la fuente variable AC/DC, fijando el voltaje de alimentación entre los terminales de la luminaria en 120 VAC. Con ayuda del multímetro y asignándole una escala adecuada, se obtiene la corriente consumida por la luminaria, parámetro presentado en la tabla 3.17.

Tabla 3.17. Tensión y Corriente Consumida por la Luminaria.

Parámetros	Irms(A)	Vrms(V)
Mediciones	0.537	120

La corriente consumida por la luminaria, obtenida mediante las mediciones eléctricas se convierte en parámetro de referencia para ser posteriormente comparado con modelo propuesto por [Kazimierczuk, 1993], modelo el cual mediante el uso de un interfaz gráfico permitirá evaluar la confiabilidad del circuito y así ser empleado para con un los análisis con un sustentable grado de seguridad.

Cálculo de los Parámetros del Circuito de un Inversor Resonante Clase D para dos Lámparas Fluorescentes. El circuito del inversor clase D como se muestra en la figura 2.19 se encuentra conformado por una fuente de tensión continua V_{DD} , dos transistores POWER MOSFET MTP5N40 cuya alimentación se debe a una fuente generadora de señales, en este caso, una señal cuadrada; un inductor L , dos capacitancias C_P y C_C , y una resistencia R_P .

Como el inversor de clase D propuesto por [Kazimierczuk, 1993] es empleado para controlar dos lámparas fluorescentes, es necesario adjuntar al análisis las especificaciones eléctricas de los tubos fluorescentes empleados para el estudio. El tubo utilizado para el ensayo es una lámpara fluorescente SYLVANIA FO32 T8 – SUPER – NW. Los datos proporcionados por el fabricante se encuentran con más detalle en el anexo A, sin embargo, los parámetros eléctricos necesarios para dar inicio al cálculo de los elementos circuitales se describen en la tabla 3.18.

Tabla 3.18. Tensión y Corriente de Funcionamiento.

Parámetros Eléctricos			
Kazimierczuk		Autor	
V_{1L} (V)	I_{1L} (A)	V_{1L} (V)	I_{1L} (A)
97	0.365	64	0.27

La tensión y corriente de funcionamiento en estado estable de la lámpara empleada para el estudio y cuyos datos se encuentra tabulados en la tabla 3.18 permite realizar el cálculo de lo que representa el elemento equivalente de un tubo fluorescente, sin embargo es necesario obtener el elemento que involucra los dos tubos fluorescentes controlados por el inversor clase D, de esta forma mediante las ecuaciones (3.29) y (3.30) respectivamente obtener el primer elemento del circuito, es decir, resistencia R_p .

$$R_{L1} = \frac{V_L}{I_L} \quad (3.29)$$

$$R_p = 2 \cdot R_{L1} \quad (3.30)$$

Una vez obtenido el elemento el cual representa el equivalente de los dos tubos fluorescentes, haciendo referencia a la resistencia R_p , el siguiente paso es estimar el factor de calidad de carga Q_L . Para ello es necesario asignar una magnitud de tensión al voltaje V_{DD} la cual representa la fuente de tensión continua, este valor de tensión será impuesto por la hoja de datos característica del transistor MOSFET. El voltaje aplicado por la fuente DC será de una magnitud igual a 400 V de acuerdo a la data suministrada por el fabricante. Data ilustrada en el anexo 2.

Se debe tener presente para el cálculo del factor de calidad de carga la conexión serie de las dos lámparas, en donde la tensión $V_L = 2V_{L1} = 128 V$, así mediante el uso de la ecuación (3.31) obtener Q_L . Adicionalmente el factor de calidad de carga permite estimar la impedancia de salida Z_O mediante la ecuación (3.32); asociada a los elementos pasivos y activos del circuito (R_P , C_P y L).

$$Q_L = \frac{\pi \cdot V_L}{V_{DD} \cdot \sqrt{2}} \quad (3.31)$$

$$Z_O = \frac{R_P}{Q_L} \quad (3.32)$$

Luego de obtener la impedancia de salida Z_O es necesario su participación para calcular los dos parámetros del circuito resonante como son la inductancia L y la capacitancia C_P . Estos elementos se calculan a partir de las ecuaciones (3.33) y (3.34), teniendo en cuenta la frecuencia inicial ω_o .

$$L = \frac{Z_O}{\omega_o} \quad (3.33)$$

$$C_P = \frac{1}{Z_O \cdot \omega_o} \quad (3.34)$$

Como último elemento perteneciente al inversor clase D a estimar se tiene el capacitor de bloque C_C , este es de alta capacitancia y se encuentra en serie a la inductancia resonante, cuya función es de evitar el flujo de corriente continua a través de la resistencia de carga R_P , en otras palabras, actúa como un filtro. Este se asume de una capacitancia igual a $1\mu F$.

Así, en la tabla 3.19 se representan los resultados obtenidos para este trabajo y los obtenidos por Kazimierczuk respecto a la estimación de los elementos circuitales del inversor clase D.

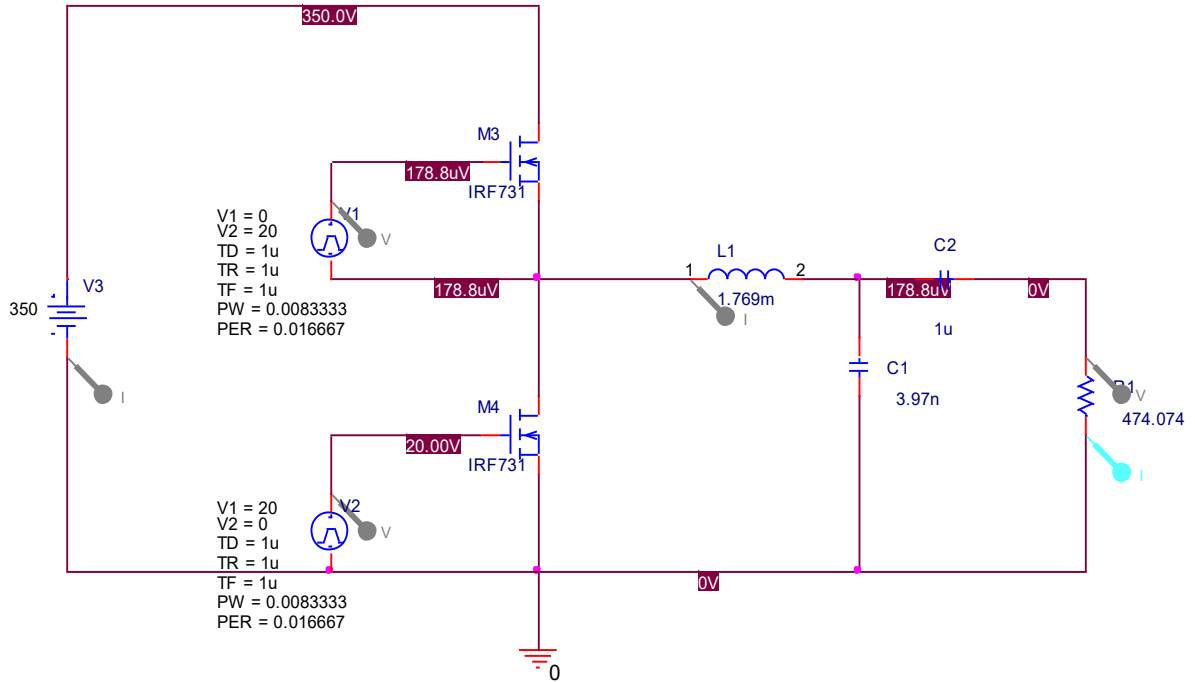
Tabla 3.19. Magnitudes de los Elementos del Circuito Inversor Clase D.

Parámetros del Circuito Inversor Clase D									
Kazimierczuk					Autor				
V_{DD} (V)	R_P (Ω)	C_C (μF)	L (mH)	C_P (nF)	V_{DD} (V)	R_P (Ω)	C_C (μF)	L (mH)	C_P (nF)
340	470	1	1.18	8.2	350	474.074	1	1.77	3.97

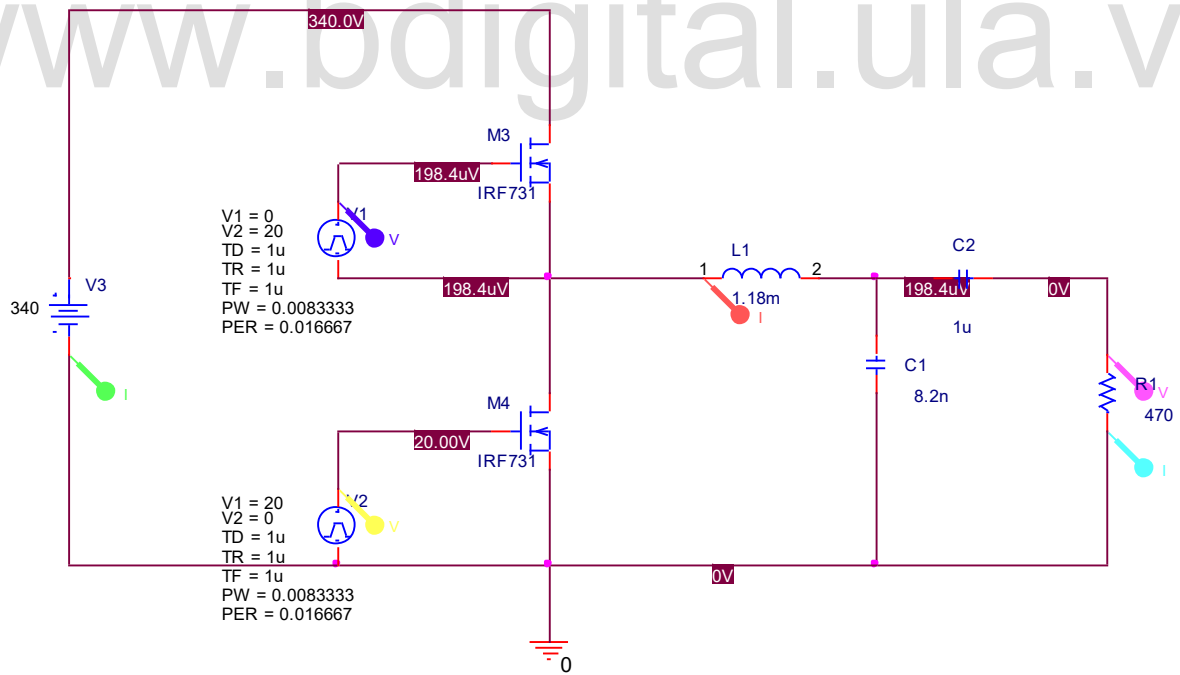
Implementación del Interfaz Gráfico ORCAD CAPTURE® como Método Comparativo. La herramienta comparativa seleccionada para el estudio de este tipo de dispositivo de iluminación es el interfaz gráfico ORCAD CAPTURE®, este representa un objeto alternativo y versátil para realizar pruebas en forma de simulación al circuito seleccionado para el presente trabajo.

Este simulador tiene como carta de presentación una amplia librería formada por diversos elementos eléctricos, así como también la disponibilidad de realizar diversas mediciones eléctricas bajo el efecto de escenarios alternos. Es por ello la implementación de este simulador para el estudio comparativo.

De esta forma, se procede a integrar al simulador los elementos estimados del circuito que configuran el inversor resonante clase D ya determinados y los estimados por Kazimierczuk, mostrando así su configuración en la figura 3.6. En donde posteriormente serán contrastados para generar los correspondientes análisis y así obtener los resultados necesarios para validar el este modelo propuesto.



(a)



(b)

Figura 3.6. Circuito Inversor Clase D: (a) Autor (b) Kazimierczuk.

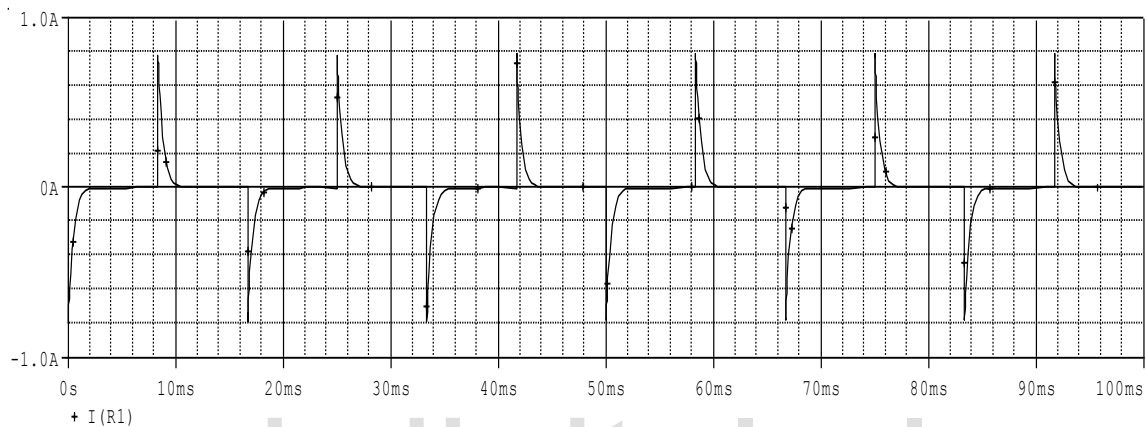
En la figura 3.6 se observa la sustitución del transistor POWER MOSFET MTP5N40 por su dual IRF731, esto se debe a la facilidad con respecto a las conexiones e interacciones del elemento presentes en la simulación. Las características eléctricas del transistor IRF731 alternativo implementado pueden ser ampliadas en la hoja de datos ilustrada en el anexo B. Una vez ejecutada la simulación del circuito, se tabularon en la tabla 3.20 los datos más importantes obtenidos en el presente estudio y los referentes al propuesto por Kazimierczuk.

Tabla 3.20. Resultados Obtenidos Utilizando ORCAD CAPTURE®.

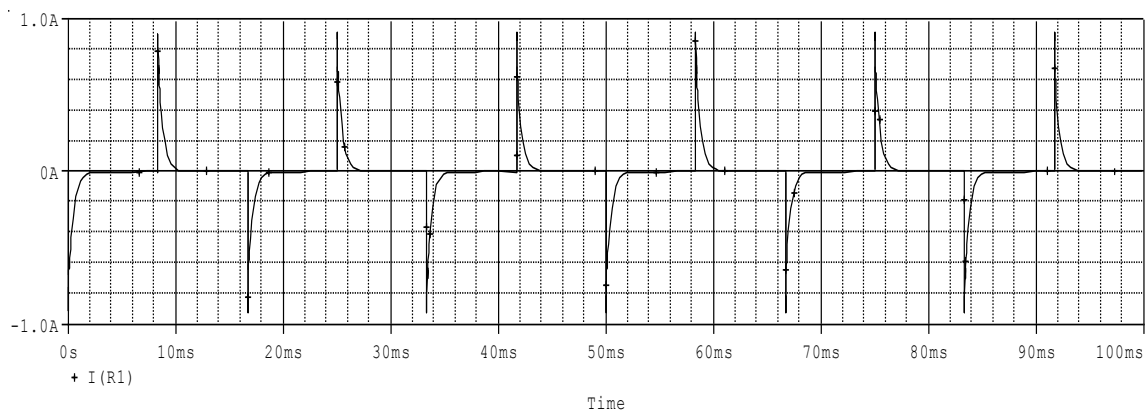
Resultados Simulación					
Kazimierczuk			Autor		
Corriente pico en la carga R_p	Corriente eficaz en la carga R_p	Corriente eficaz de una lámpara $R_p/2$	Corriente pico en la carga R_p	Corriente eficaz en la carga R_p	Corriente eficaz de una lámpara $R_p/2$
910.484mA	643.809mA	321.905mA	775.128mA	548.098mA	272.049mA

La corriente eficaz consumida por la luminaria obtenida para este estudio mediante mediciones es de 537mA, lo que significa el consumo por lámpara de aproximadamente unos 268.5mA, por otro lado, la corriente eficaz consumida por la luminaria empleada por Kazimierczuk es de aproximadamente 730mA, siendo así el consumo por cada lámpara de 365mA. Comparando estas magnitudes medidas, con las magnitudes presentes en la tabla 3.20 estas reflejan la confiabilidad el modelo circuital propuesto por [Kazimierczuk, 1993]. Resultados considerados similares, cuyo diferencias pueden ser ocasionadas por la ejecución de mediciones de forma ideal por el simulador en la que no son considerados factores como la variación de tensión, pérdidas en el circuito, entre otras. También puede ser considerado como

factor variable el implemento del transistor alternativo, en donde a pesar de ser resaltado como confiable de acuerdo a la hoja de datos, el simulador no necesariamente asegura toda su configuración, incluso para el transistor original propuesto en el circuito inversor. Sin embargo, la forma de onda de corriente en la carga, la cual se extrae del simulador permite respaldar las mediciones, así, las forma de onda se ilustra en la gráfica 3.14.



(a)

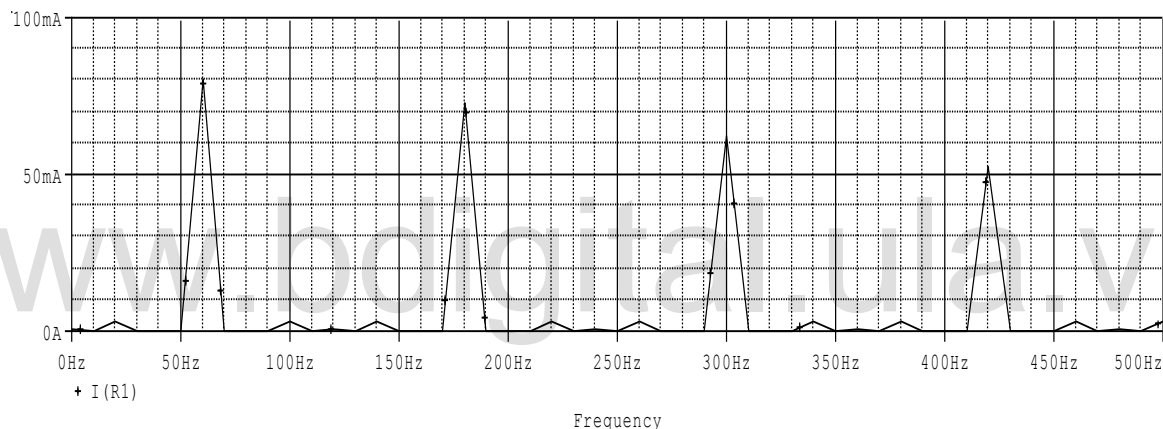


(b)

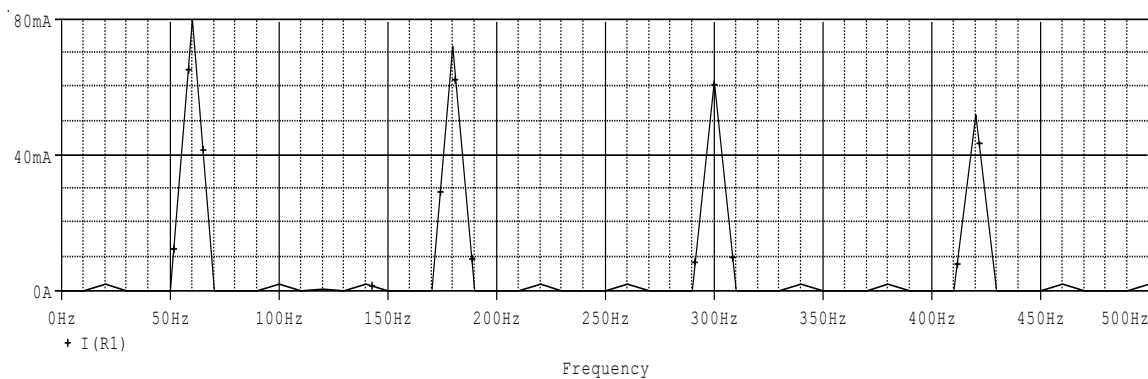
Gráfico 3.14. Forma de Onda Corriente Consumida por R_p . (a) Autor. (b) Kazimierzczuk.

Este tipo de lámparas también se encuentran en el grupo perteneciente a las cargas no lineales, por lo tanto son fuentes generadoras de tensiones y corrientes armónicas las cuales son

inyectadas al sistema de suministro eléctrico. Debido a esto, se incluye al estudio unos análisis de los armónicos generados por este tipo de dispositivo, específicamente generado por el balastro electrónico cuyos componentes son electrónicos, tal y como se ha descrito a lo largo del presente capítulo. Para gestionar el estudio de los armónicos generados por este dispositivo se implementa de la misma forma para obtener los parámetros eléctricos del circuito el simulador ORCAD CAPTURE® mediante la transformada rápida de Fourier (FTT), característica disponible en la barra de herramientas del interfaz. Así, en la gráfica 3.15 y 3.16 se muestran la distribución de las magnitudes armónicas de corriente y tensión respectivamente, evaluadas para cada circuito.

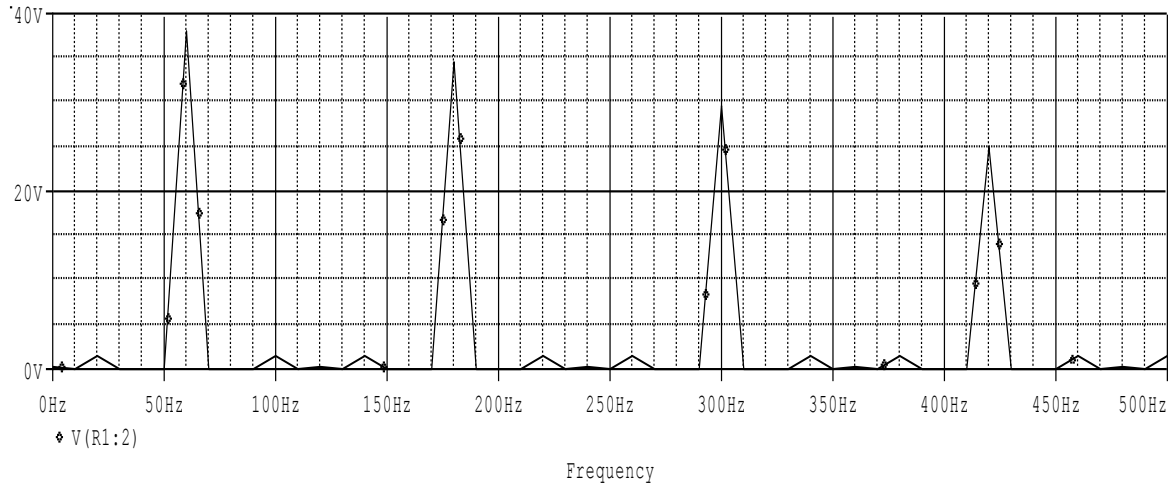


(a)

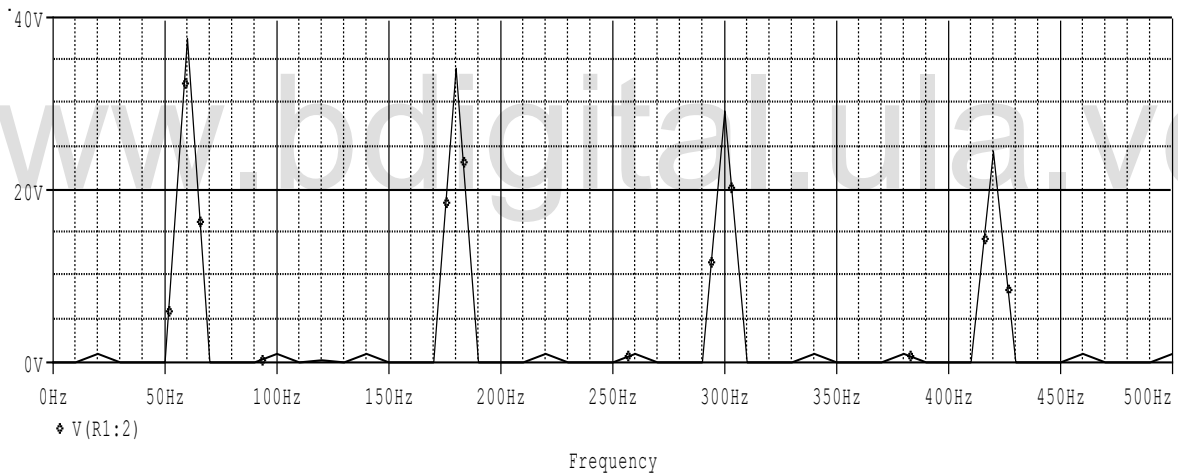


(b)

Gráfico 3.15. Magnitud de Corrientes Armónicas (a) Autor. (b) Kazimierczuk



(a)



(b)

Gráfico 3.16. Magnitud de Tensiones Armónicas. (a) Autor. (b) Kazimierczuk

Las magnitudes obtenidas por los diferentes niveles armónicos de corriente y tensión considerados hasta el séptimo armónico para ambos circuitos, se presentan con más detalle en las tablas 3.21 y 3.22.

Tabla 3.21. Magnitud de Corrientes y Tensiones Armónicas.

Autor	Grado Armónicos						
	1	2	3	4	5	6	7
Ia(mA)	79.831	0.882	72.63	0.612	62.55	0.39	52.85
Va(V)	37.84	0.418	34.43	0.298	29.65	0.183	24.058

Tabla 3.22. Magnitud de Corrientes y Tensiones Armónicas.

Kazimierczuk	Grado Armónicos						
	1	2	3	4	5	6	7
Ia(mA)	79.79	0.293	72.28	0.237	61.85	0.224	52.01
Va(V)	37.502	0.135	33.97	0.113	29.07	0.105	24.44

Como es de esperar, los armónicos más influyentes generados por este tipo de carga no lineal son los armónicos de corrientes y tensiones impares, presentando cierto grado de similitud en cuanto a las magnitudes obtenidas para cada modelo simulado. La diferencia entre modelos se presenta en los armónicos pares, considerados de un efecto pequeño pero no de menor importancia para los sistemas eléctricos de potencia.

Los efectos ocasionados por este tipo de perturbaciones tienen una mayor influencia, como se ha expresado con anterioridad, cuando existe un gran número de cargas no lineales acoplados en un mismo punto, esto implica una disminución considerable del factor de potencia. Este decremento del factor de potencia se le atribuye principalmente al 3er, 5to y 7mo armónico.

Como se observa en la tabla 3.21 y la tabla 3.22 los armónicos con una gran magnitud respecto al resto de los armónicos se tiene los de 3er, 5to y 7mo orden, esto permite comprobar el alto nivel de armónicos generados por este tipo de dispositivo de iluminación, permitiendo así contrastar estos efectos con los niveles admisibles establecidos por la normativa IEEE.

Los análisis armónicos de acuerdo a la normativa IEEE [IEEE Std 519, 2014] son representados de forma porcentual, esto se realiza con el fin de manejar este tipo de perturbaciones de forma compacta y así establecer los límites admisibles en los diferentes sistemas eléctricos de potencia.

Por lo tanto, las magnitudes armónicas de tensión y corriente pueden ser expresadas, de acuerdo al tipo de análisis, de forma individual (HD) o de forma global (THD). Para un primer estudio las magnitudes de corriente y tensiones se presentan de forma individual en las tablas 3.23 y 3.24 respectivamente.

Tabla 3.23. Distorsión Armónica de Corriente.

Distorsión Armónica de Corriente	Kazimierzuk (%)	Autor (%)
HD_{I_1}	100	100
HD_{I_2}	0.367	1.104
HD_{I_3}	90.587	90.97
HD_{I_4}	0.297	0.766
HD_{I_5}	77.516	78.353
HD_{I_6}	0.281	0.488
HD_{I_7}	65.18	66.202

Tabla 3.24. Distorsión Armónica de Voltaje.

Distorsión Armónica de Voltaje	Kazimierczuk (%)	Autor (%)
HD_{V_1}	100	100
HD_{V_2}	0.359	1.104
HD_{V_3}	90.581	90.98
HD_{V_4}	0.301	0.787
HD_{V_5}	77.515	78.356
HD_{V_6}	0.279	0.483
HD_{V_7}	65.16	63.57

La diferencia entre los porcentajes armónicos de corriente es casi despreciable a pesar de ser lámparas con diferentes potencias de consumo, siendo así la seleccionada para el presente dos lámparas SYLVANIA de 32 W, mientras las empleadas por Kazimierczuk son SYLVANIA de 35 W. Sin embargo estos porcentajes respaldan el estudio referente a la distorsión generada por este tipo de dispositivos, resaltando el gran efecto de distorsión causado por este tipo de luminaria, efecto el cual aporta, de forma negativa, mayor distorsión al sistema eléctrico cuando los dispositivos de este tipo se encuentran conectados de forma masiva en un punto de acoplamiento común (PCC). Por otro lado, los límites de corrientes armónicas no pueden ser comparados a gran escala como lo indica el estándar IEEE. Este al ser un estudio particular sobre una carga no lineal no se cuenta con las magnitudes suficientes para establecer una comparación, cuyos límites de corrientes se basan en la relación entre la corriente de cortocircuito atribuida al punto de acoplamiento y la corriente de la demanda (I_{SC}/I_L).

La etapa en la cual fueron realizadas las mediciones de armónicos mediante el uso del interfaz gráfico ORCAD CAPTURE®, se trata de la etapa posterior a la del convertidor DC/DC, tal y como se observa en la figura 3.6 se tiene una fuente DC para suplir energía al circuito. El nivel del circuito convertidor consta de un reductor-elevador (buck-boost) cuya función empleada para este circuito consta de elevar la tensión DC previamente rectificadas a partir de un puente de diodos.

Los circuitos buck-boost tienen la particularidad de que la salida seleccionada (elevadora o reductora) suministra una tensión inversa, para corregir esto se emplea un inversor, en este circuito propuesto, un inversor resonante clase D.

Respecto a las tensiones armónicas medidas, estas son representadas hasta el séptimo armónico ya que son los órdenes considerados más importantes para los análisis de armónicos en los sistemas de potencia. A pesar de que las mediciones fueron realizadas luego de una serie de etapas hasta llegar a la carga, se tienen resultados aproximados, esto es debido al circuito inversor resonante cuya principal característica es la de transferir la potencia de entrada a la salida bajo la frecuencia fundamental establecida.

Ahora, el estándar IEEE también presenta límites de distorsiones armónicas de tensiones, como lo muestra la tabla 3.9. En ella se observa para los sistemas cuyas tensiones son menores a 1kV el porcentaje admisible es de 5% para las distorsiones individuales (HD) y 8% para la distorsión total de armónicos (THD) en un punto de acoplamiento común.

Los resultados obtenidos en la tabla 3.24 muestran un porcentaje el cual sobrepasa de gran forma los límites establecidos por el estándar IEEE, reflejando los altos niveles de distorsión al cual es sometida la red eléctrica debido a este tipo de dispositivo de iluminación. Aunque de la misma forma como se destacó para las corrientes armónicas, el porcentaje de tensión armónicas es obtenido para una etapa del circuito electrónico ya que como se logra apreciar, la tensión fundamental no es la suministrada por la red, por el contrario, es la aplicada a los terminales de los tubos fluorescentes de acuerdo al diseño del inversor clase D. Adicionalmente este tipo de dispositivos son sometidos a un aumento de frecuencia, en un rango de frecuencia establecido entre los 25 y 100 kHz a la cual son sometidas este tipo de lámparas con el fin de disminuir el efecto del parpadeo (flicker).

De la misma forma se establecen límites en cuanto a la distorsión total de armónicos de corriente ($THDi$) y tensión ($THDv$), cuyos resultados obtenidos para ambos métodos se expresan en la tabla 3.25.

Tabla 3.25. Resultados THD_V y THD_I para los Diferentes Modelos Estudiados.

Parámetros	Kazimierczuk	Autor
$THD_I(\%)$	135.88	137.118
$THD_V(\%)$	135.872	135.878

Los límites totales de armónicos son importantes para el sistema eléctrico de potencia, estos deben ser corregidos en lo posible debido a los numerosos problemas generados por este tipo de perturbación. Evaluando los porcentajes presentados en la tabla 3.25 representan niveles altos de armónicos, donde se puede resaltar la intervención de dos lámparas presentes en una misma unidad o en la misma luminaria

CAPÍTULO 4

EFFECTOS OCASIONADOS POR LA CONEXIÓN DE VARIAS LÁMPARAS EN EL MISMO PUNTO DE ACOPLAMIENTO COMÚN

Los dispositivos de iluminación como lámparas fluorescentes, LFC y lámparas LED al encontrarse conectados de forma masiva en un mismo punto de acoplamiento, o en una misma instalación eléctrica, presentan efectos armónicos más significativos en comparación, por ejemplo, cuando intervienen en el circuito sólo un par de lámparas.

En el presente capítulo se exponen los análisis y variaciones respecto a las magnitudes de tensión y corrientes armónicas obtenidas por la conexión de varios dispositivos de iluminación en el mismo punto de acoplamiento, así como también se muestran los niveles armónicos porcentuales de forma individual (HD) y total (THD).

4.1 EFECTO DEBIDO A LA CONEXIÓN DE VARIAS LFC

Actualmente las lámparas fluorescentes compactas desplazan cada vez más en el mercado a las lámparas incandescentes convencionales, esto debido a su bajo consumo de potencia así como también a su eficiencia lumínica. Esto lleva consigo el surgimiento de nuevos fabricantes, nuevos diseños de acuerdo a las exigencias del cliente, o simplemente para realizar un diseño innovador y así competir en el mercado contra otras marcas. Sin embargo, esta competencia entre fabricantes puede generar reducción en la calidad de los elementos implementados para el

circuito y así obviar las consideraciones presentes para la construcción de este tipo de dispositivo, es decir, cumplir con los estándares IEEE.

El desarrollo de este estudio parte del circuito implementado en el capítulo 3, específicamente en la figura 3.2 (a), cuya equivalente planteado por [Molina, 2014], acotando también que las pruebas realizadas fueron generadas mediante el uso del interfaz gráfico PSCAD/EMTODC®. De esta forma, en la figura 4.1 se muestra el circuito implementado para los análisis.

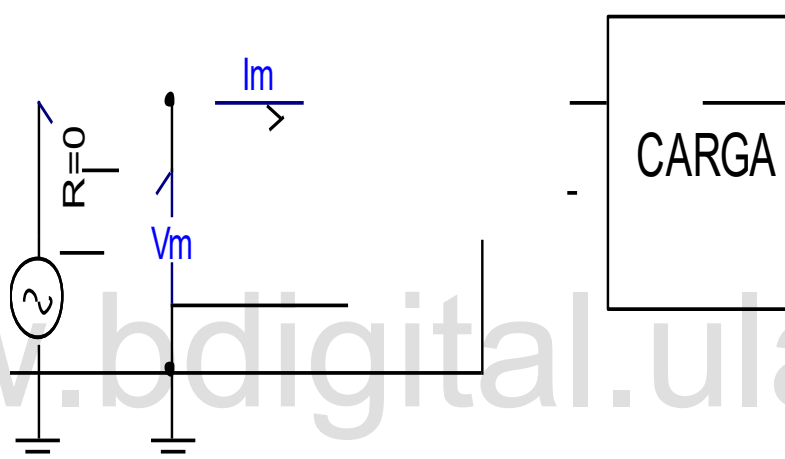


Figura 4.1. Circuito con Carga Lumínica.

El módulo de carga presente en el circuito de la figura 4.1 representa el equivalente de 15 lámparas compactas fluorescentes conectadas en una misma instalación, lo que puede considerarse como una cantidad aproximada de luminarias presentes en un departamento promedio, así como también evaluar y analizar el peor de los casos, es decir, tener los 15 dispositivos en funcionamiento.

Una vez implementado el circuito y ejecutada la simulación la primera observación se dirige a la corriente consumida por el conjunto de lámparas, cuya magnitud a pesar de no ser significativa ya que el consumo de estos dispositivos es pequeño, se considera de importancia al momento de obtener la demanda asignada a una instalación en particular. Esta magnitud se presenta en la tabla 4.1 junto a la magnitud obtenida para un solo dispositivo.

Tabla 4.1. Corriente Eficaz Obtenida para 1 y 15 LFC.

Parámetros	
$I_{rms_{1L}}$	$I_{rms_{15L}}$
61.03mA	0.6113A

La simulación fue realizada considerando el peor de los casos, es decir, cuando se encuentran encendidas las 15 LFC. Por esto se observa el incremento en la corriente consumida por los dispositivos, como es natural cuando se adicionan elementos a la red. Cabe destacar el aumento proporcional de la corriente conforme se eleva o disminuye el uso de las lámparas.

Por ser un estudio dirigido al análisis de armónicos, a pesar del paréntesis realizado para observar el incremento de la corriente de consumo, no se considera las variaciones de tensión en la instalación; esto se debe a no ser considerada la caída de tensión ya que es un estudio particular de cargas.

En cuanto a las magnitudes armónicas de corriente y tensión generadas por la conexión de varias LFC y obtenidas hasta el séptimo armónico, estas se muestran en la tabla 4.2 y 4.3 respectivamente.

Tabla 4.2. Magnitud de Corrientes Armónicas.

Parámetros	Grado Armónicos						
	1	2	3	4	5	6	7
$I_{m_{1L}}(\text{mA})$	46.82	0.0131	34.32	0.00938	16.66	0.00718	3.46
$I_{m_{15L}}(\text{A})$	0.468	0.000214	0.343	0.000213	0.165	0.000056	0.0339

Tabla 4.3. Magnitud de Tensiones Armónicas.

Parámetros	Grado Armónicos						
	1	2	3	4	5	6	7
$V_{m_{1L}}(V)$	119.96	0.00117	0.000775	0.000709	0.000492	0.000515	0.000423
$V_{m_{15L}}(V)$	119.98	0.00115	0.00188	0.00019	0.00758	0.000801	0.000455

En la tabla 4.2 se aprecian las magnitudes de corriente de cada orden armónico considerado en el estudio, es decir, hasta el 7mo armónico. Sin embargo, en la gráfica 4.1 se ilustra el efecto sobre la forma de onda de la corriente consumida por los dispositivos.

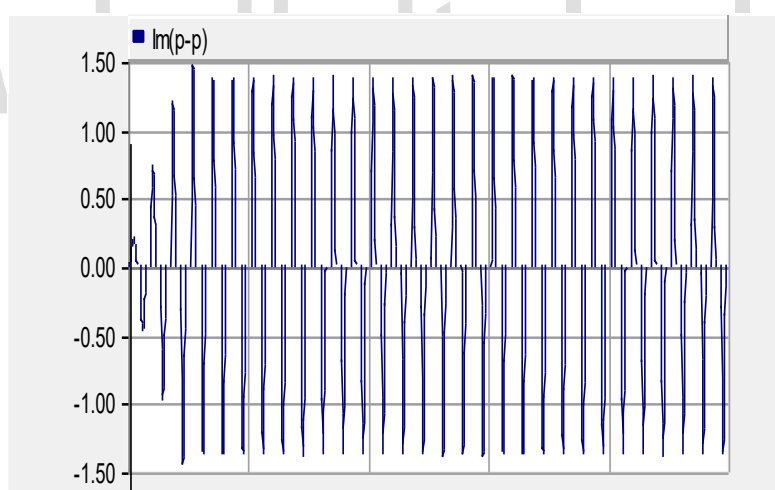


Gráfico 4.1. Distorsión Armónica de Corriente Causada por la Conexión de 15 LFC.

La forma de onda mostrada en la gráfica 4.1 refleja una aproximación sustentable sobre el efecto ocasionado por la conexión de varias LFC en un mismo punto de acoplamiento. De la misma manera, la forma de onda de tensión resulta afectada por los armónicos, aunque no de

forma aguda como los efectos que intervienen en la forma de onda de corriente, así, en la gráfica 4.2 se pueden apreciar estos efectos.

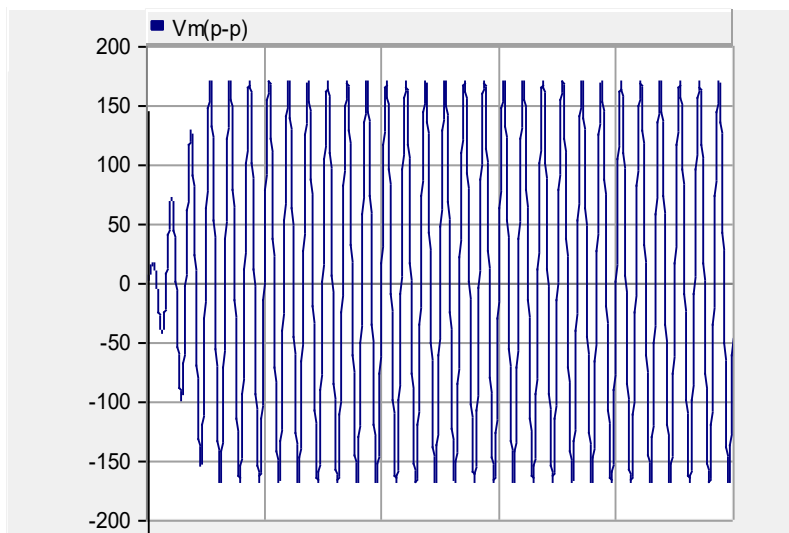


Gráfico 4.2. Distorsión Armónica de Voltaje Causado por la Conexión de 15 LFC.

De la misma forma como la corriente consumida es directamente proporcional al número de lámparas conectadas para este dispositivo, también aumentan las magnitudes armónicas tanto las de corriente como las de tensiones.

Por lo tanto, cuando se tiene un gran número de elementos no lineales conectados de forma masiva en un mismo punto de acoplamiento se deben considerar los niveles armónicos admisibles de acuerdo a los límites presentados por el estándar [IEEE Std 519, 2014].

Adicionalmente los niveles de distorsión armónicos fueron obtenidos de forma porcentual para este estudio mediante el uso del interfaz gráfico PSCAD/EMTODC®, cuyos números fueron extraídos de forma individual (HD) y de forma total (THD). Así, en primer lugar se tabulan los porcentajes armónicos para cada magnitud de corriente y tensión, los cuales se representa en las tablas 4.4 y 4.5 respectivamente.

Tabla 4.4. Distorsión Armónica de Corriente.

Distorsión Armónica de Corriente	15 LFC (%)	1 LFC (%)
HD_{I_1}	100	100
HD_{I_2}	0.0456	0.027
HD_{I_3}	73.18	73.29
HD_{I_4}	0.0455	0.020
HD_{I_5}	35.37	35.58
HD_{I_6}	0.012	0.015
HD_{I_7}	7.25	7.39

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.5. Distorsión Armónica de Voltaje.

Distorsión Armónica de Voltaje	15 LFC (%)	1 LFC (%)
HD_{V_1}	100	100
HD_{V_2}	0.000964	0.00097
HD_{V_3}	0.0015	0.00064
HD_{V_4}	0.000159	0.00059
HD_{V_5}	0.00063	0.00041
HD_{V_6}	0.00066	0.00042
HD_{V_7}	0.00038	0.00035

Evaluando los niveles de corrientes armónicas se observan porcentajes los cuales no varían significativamente en cuanto a los armónicos impares, estos son considerados de importancia para el sistema eléctrico de potencia, por otro lado, los armónicos pares sufren ligeros cambios en su magnitud aunque no se consideran de peso para el sistema eléctrico. Los límites armónicos de corriente no serán objeto de comparación respecto al estándar IEEE, a pesar de incluir al estudio una serie de cargas las cuales son conectadas en un mismo punto de acoplamiento, estas no representan la demanda total en una instalación, siendo la corriente de demanda en conjunto con la corriente de cortocircuito necesarias para obtener una relación la cual permite comprobar el límite de distorsión.

Respecto a las variaciones en las tensiones armónicas, se observa un cambio significativo en sus órdenes impares, sin embargo estos siguen representando niveles aún por debajo de los límites armónicos IEEE mostrados en la tabla 3.9.

Estos niveles serían el equivalente de un pequeño departamento o una pequeña casa, resultados que pueden cambiar cuando se considera un complejo residencial cuyas cargas sean mayores debido al número de áreas las cuales deben ser iluminadas y en donde se incluyen otros tipos de cargas no lineales. Por otro lado, las magnitudes armónicas totales extraídas del circuito se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Distorsión Armónica Total de Corriente y Tensión.

Parámetro	15 LFC	1 LFC
$THD_I(\%)$	81.61	81.81
$THD_V(\%)$	0.002102	0.00181

En cuanto al total de armónicos el cambio más vistoso es el referente al THD_V , como se observa en la tabla 4.6. Estos niveles de tensión a pesar de ser menores a los establecidos por el

estándar, permiten proyectar y tener una idea cuando a estudios futuros se adicionen el resto de cargas que conforman normalmente las instalaciones eléctricas de un complejo urbanístico.

Es importante acotar que, los resultados obtenidos debido a la interacción de 15 LFC en un mismo punto de acoplamiento, sólo se está considerando como si todas las lámparas están configuradas bajo la misma potencia de consumo, es decir, el dispositivo empleado para el presente estudio consume una potencia de 11 W. Estos resultados pueden variar cuando se emplean lámparas de diferente consumo incluso diferentes fabricantes.

4.2 EFECTO DEBIDO A LA CONEXIÓN DE VARIAS LÁMPARAS LED

Las lámparas LED forman parte de la nueva tecnología en iluminación, dispositivos de muy bajo consumo y con gran variedad de reproducción de colores. Este tipo de dispositivo requiere de un sistema de control muy preciso de sus parámetros eléctricos con el fin de garantizar un buen rendimiento lumínico, cuya configuración circuital interna se encuentra formada por elementos electrónicos empleados para disminuir el tamaño del dispositivo y para obtener mejores resultados en cuanto al consumo de potencia.

Entre los efectos negativos causados por estas lámparas, se tiene la generación de perturbaciones al sistema eléctrico de potencia, específicamente la generación de armónicos los cuales son inyectados a la red eléctrica, causando efectos negativos cuando se encuentran conectados de forma masiva en un mismo punto de acoplamiento.

Debido a estos efectos se realizó un análisis armónico con la ayuda de un interfaz gráfica como lo es el PSCAD/EMTODC®, estudios dirigidos al modelo circuital planteado por [Molina, 2016] pero particularizado para el presente trabajo, es decir, bajo los parámetros circuitales obtenidos en el capítulo 3, cuyo circuito equivalente se muestra en la figura 3.4.

Una vez obtenido el circuito equivalente, se procedió a realizar un módulo el cual contiene un arreglo de 15 LED's, esto con la finalidad de obtener un circuito simple en cuanto a su presentación. El circuito resultante se muestra en la figura 4.2.

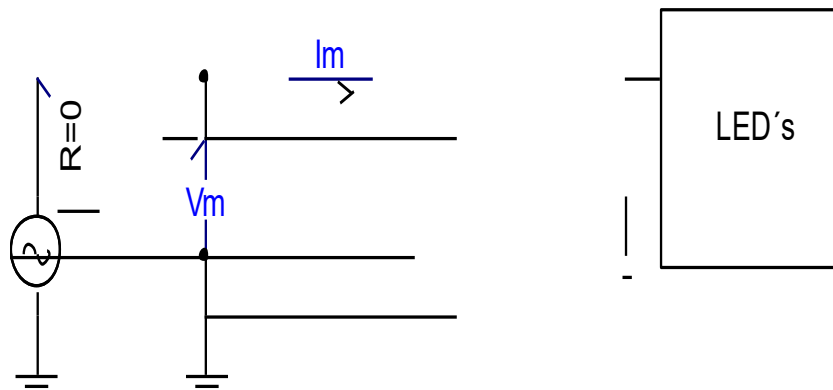


Figura 4.2. Circuito con Carga Lumínica.

Con el módulo ilustrado en la figura 4.2 se pretende representar un promedio de lámparas utilizadas por un usuario promedio, cuyo análisis circuital inicia con la extracción de la corriente eléctrica consumida por el conjunto de lámparas, magnitudes representadas en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Corriente Eficaz Obtenida para 1 y 15 lámparas LED.

Parámetros	
$I_{rms_{1L}}$	$I_{rms_{15L}}$
19.55mA	0.2032A

Este tipo de dispositivo de iluminación al igual que ocurre con las LFC aumenta su consumo de corriente en forma proporcional. Debido a su diseño y características representa aproximadamente el 30% respecto a la magnitud presentada por las lámparas compactas fluorescentes. Por lo tanto, es importante representar las magnitudes de corrientes y tensiones armónicas generadas por este módulo equivalente; magnitudes representadas en las tablas 4.8 y 4.9. Y las distorsiones causadas por este tipo de dispositivo en la forma de onda de tensión y corriente se ilustran en las gráficas 4.3 y 4.4 respectivamente.

Tabla 4.8. Magnitud de Corrientes Armónicas.

Parámetros	Grado Armónicos						
	1	2	3	4	5	6	7
$Im_{1L}(mA)$	9.20	0.001608	7.76	0.00181	7.31	0.00193	7.62
$Im_{15L}(A)$	0.138	0.00241	0.116	0.00272	0.109	0.00289	0.114

Tabla 4.9. Magnitud de Tensiones Armónicas.

Parámetros	Grado Armónicos						
	1	2	3	4	5	6	7
$Vm_{1L}(V)$	119.996	0.00116	0.00099	0.000625	0.000626	0.000591	0.000222
$Vm_{15L}(V)$	119.996	0.00116	0.00099	0.000625	0.000626	0.000591	0.000222

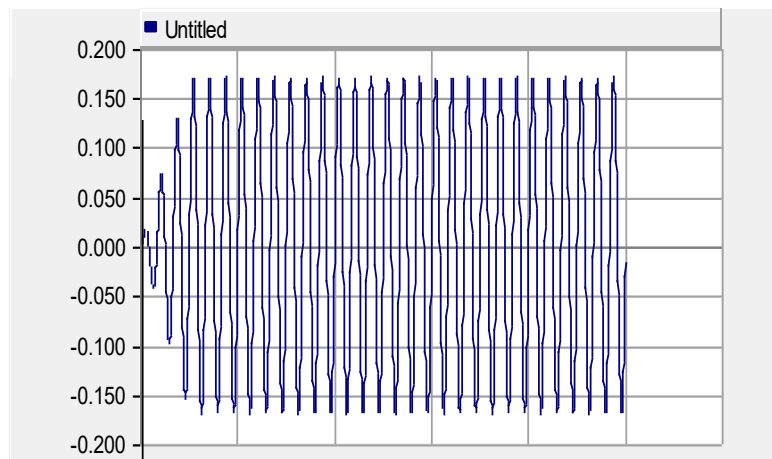


Gráfico 4.3. Distorsión Armónica de Voltaje Causado por la Conexión de 15 Lámparas LED.

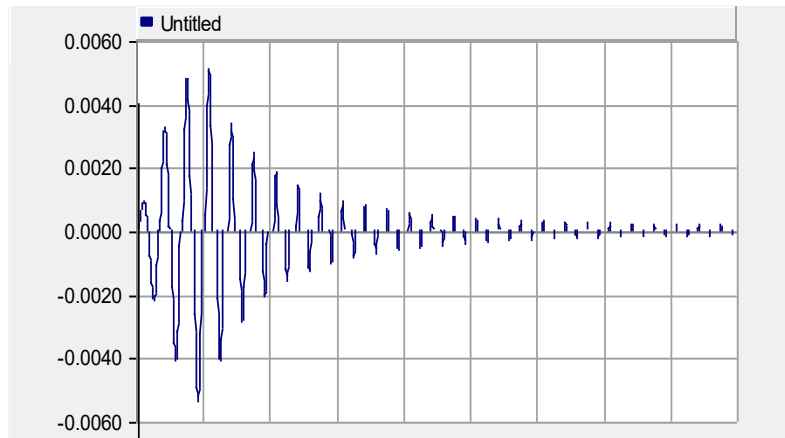


Gráfico 4.4. Distorsión Armónica de Voltaje Causado por la Conexión de 15 Lámparas LED.

Como se aprecia en la gráfica 4.4, la distorsión mayor ocurre en el régimen transitorio, sin embargo estas oscilaciones no son proporcionales con la forma de onda de tensión (figura 4.3), esto se debe al control de voltaje proporcionado por el controlador del arreglo de LEDs.

Es importante extraer la información contenida en la forma de onda de tensión y corriente, para desglosar y sintetizar su contenido, así, las magnitudes de corrientes como se observa en la tabla 4.8 presentan cambio significativos en cuanto al orden armónico impar, aumentos directamente proporcionales al número de dispositivos que se conecten en el mismo punto de acoplamiento. La diferencia entre este tipo de dispositivo de los demás es la cercanía en cuanto a las magnitudes armónicas impares, genera mayor contribución por parte del 3er y 5to armónico, considerados de cuidado para el sistema de potencia debido a sus efectos.

Este tipo de incremento puede atribuirse a varios factores como por ejemplo la calidad de los dispositivos electrónicos empleados para la configuración del dispositivo, la no inclusión de filtros atenuadores con el fin de disminuir los gastos de operación por el fabricante. Todo esto se basa en los estándares ya establecidos por la IEEE. En cuanto a las magnitudes de tensiones obtenidas y representadas en la tabla 4.9, en donde se puede observar una variación nula significativa, esto trae como consecuencia dirigir los análisis al diseño del driver utilizado para este dispositivo cuya función es garantizar los niveles de tensión suministrados al arreglo de LED, adicionalmente la no variación brusca de tensión en la capacitancia DC ante cualquier evento procedente fuera del circuito perteneciente al dispositivo.

Sin embargo, estos niveles deben ser expresados de forma porcentual para así posteriormente traducirse a los límites admisibles establecidos por el estándar [IEEE Std 519, 2014]. Los niveles de armónicos fueron extraídos mediante la implementación del interfaz gráfico PSCAD/EMTODC®, los cuales son obtenidos de forma individual (HD) y de forma total (THD). Así, los primeros niveles de distorsión armónica ilustrados son los individuales, tanto de corriente como de tensión, ambos disponibles en las tablas 4.10 y 4.11 respectivamente.

Tabla 4.10. Distorsión Armónica de Corriente.

Distorsión Armónica de Corriente	15 LED (%)	1 LED (%)
HD_{I_1}	100	100
HD_{I_2}	1.74	1.74
HD_{I_3}	84.33	84.33
HD_{I_4}	1.97	1.97
HD_{I_5}	79.43	79.43
HD_{I_6}	2.09	2.09
HD_{I_7}	82.78	82.78

Tabla 4.11. Distorsión armónica de voltaje.

Distorsión Armónica de Voltaje	15 LED (%)	1 LED (%)
HD_{V_1}	100	100
HD_{V_2}	0.000966	0.00095

Distorsión Armónica de Voltaje	15 LED (%)	1 LED (%)
HD_{V_3}	0.000827	0.000827
HD_{V_4}	0.000521	0.000521
HD_{V_5}	0.000522	0.000522
HD_{V_6}	0.000492	0.000492
HD_{V_7}	0.000185	0.000185

Los porcentajes de corrientes armónicas obtenidos en la tabla 4.10 representan porcentajes altos, donde resalta la contribución de los órdenes impares los que permiten contrastar una idea de los niveles posibles cuando se trata de un conjunto macro de usuarios implementando este tipo de dispositivos sin respetar los límites establecidos.

Estos límites no pueden ser apreciados en este trabajo ya que el estudio se encuentra definido al estudio particular de una carga, estas no representan el total de la demanda característica de una instalación residencial, es decir, para ser objeto de comparación con el estándar es necesario obtener la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de demanda; parámetros con los cuales no fueron considerados para el presente trabajo.

Por otro lado, los porcentajes de tensiones armónicas expresados en la tabla 4.11 presentan los mismos porcentajes respecto a una lámpara. Estos niveles de tensión según los establecidos en la tabla 3.9 se consideran inferiores. Cuando se realiza el estudio de armónicos en un determinado complejo residencial adicionalmente se deben tener en cuenta las otras posibles cargas no lineales presentes como pueden ser los cargadores de móviles, cargadores de laptops, entre otros dispositivos. Siendo así, las corrientes armónicas la mayor contribución generada por este tipo de dispositivo, aunque es importante concretar el análisis con los porcentajes armónicos totales presentes en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Distorsión Armónica Total de Corriente y Tensión.

Parámetro	15 LFC	1 LFC
$THD_I(\%)$	142.428	142.428
$THD_V(\%)$	0.00156	0.00156

Como era de esperarse, los porcentajes armónicos son iguales debido a la no variación en las magnitudes. Pero, resaltando el gran porcentaje reflejado por los armónicos totales de corrientes, estos se llevan la mayor atención en cuanto a los ajuste que se deben realizar al momento de los fabricantes diseñar este tipo de dispositivos, considerar la inclusión de filtros atenuadores para disminuir considerablemente estos efectos los cuales comprometen la integridad del sistema eléctrico de potencia con el aumento en cuanto a la implementación de este tipo de dispositivo.

www.bdigital.ula.ve

CONCLUSIONES

Teniendo como base el proceso de simulación aplicado, se generan las siguientes conclusiones:

- Los modelos circuitales equivalentes propuestos por los diferentes autores tomados en cuenta para el estudio se consideran una herramienta con suficientes argumentos para confiar diversos análisis, particularmente análisis de magnitudes armónicas, para los dispositivos de iluminación como lámparas LED, lámparas fluorescentes compactas y lámparas fluorescentes con balastro electrónico. Obteniéndose resultados notables.
- La realización de análisis dirigidos a las perturbaciones armónicas resulta beneficioso para la red eléctrica, este tipo de estudios permite comprender el desenvolvimiento de las cargas no lineales presentes en el sistema como son los dispositivos de iluminación, cuyo comportamiento permite realizar evaluaciones y posteriormente definir las soluciones para atenuar o disminuir este tipo de efectos de naturaleza negativa para el sistema de potencia.
- De acuerdo a los resultados se puede observar que el dispositivo con mayor generación de armónicos fue la lámpara fluorescente con balastro electrónico ya que este dispositivo controla dos lámparas con la misma potencia lo que representa un mayor consumo de corriente.

RECOMENDACIONES

- Las empresas encargadas de fabricar estos dispositivos de iluminación deben considerar incorporar al circuito interno de control, filtros, con el fin de atenuar las perturbaciones armónicas.
- Para estudios futuros es importante ampliar el número de dispositivos de iluminación empleados para los análisis de armónicos, en cuanto a la cantidad y al tipo de fabricante, para así contrastar el desempeño de cada uno de ellos.
- Se recomienda a la empresa eléctrica realizar análisis eventuales de armónicos a nivel nacional a través de estudios de flujo de carga, de esta forma mantener actualizada la data y monitorear la evolución de estas perturbaciones.
- Hacer cumplir los límites de distorsión armónicas estipuladas por el estándar IEEE para el control de estas perturbaciones en los sistemas de potencia.
- Afinar los sistemas de control de calidad en las empresas dedicadas al rubro de la iluminación, con el fin de garantizar el cumplimiento de los estándares asociados a la fabricación de estos dispositivos

REFERENCIAS

García Álvarez, J. A. (03 de Junio de 2018). *Así Funciona*. Obtenido de <http://www.asifunciona.com>.

GU10, D. 7. (03 de Junio de 2018). *masterled.es*. Obtenido de <http://ww.masterled.es>

Kazimierczuk, K., & Szaraniec, W. (1993). "Electronic ballast for fluorescent lamps". *IEEE Trans. Power Elec*, 386-395.

Molina, J., & Sainz, L. (2014). "Model of electronic ballast compact fluorescent lamps". *IEEE Trans. Power Del*, 1363-1371.

Molina, J., Mesas, J. J., Mesbahi, N., & Sainz, L. (2016). "LED lamp modelling for harmonic studies in distribution systems". *IET Generation, transmission & distribution* , 1063-1071.

Norma IEEE Estándar 519 (2014). Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. United State of América.

Phipps, J., & Nelson, S. S. (1994). "Power quality and harmonic distortion on distribution systems". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 476.

Rosales, O. (2006). Estudio de Frecuencias Armónicas. Trabajo de grado publicado. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Sánchez, V. (2006). "Perturbaciones en la red eléctrica. *Caos Conciencia*, 1-6.

Slezinger, J., Drapela, J., Langella, R., & Tesla, A. (2012). "A new simplified model of compact fluorescent lamps in the scenario of smart grids". *IEEE Int. Conf. Harmon. Qual. Power*, 835-841.

Suárez, J., Di Mauro, G., Anaut, D., & Agüero, C. (2005). "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales". *IEEE Latin America transactions*, 429-435.

Uddin, S., Shareef, H., & Mohamed, A. (2012). "An analysis of harmonic diversity factors applied to LED lamps". *IEEE Int. Conf. on Power system Technology*, 1-5.

Uddin, S., Shareef, H., & Mohamed, A. (2013). "Power quality performance of energy-effect low-wattage LED lamps". *IEEE Measurement*, 3783-3795.

Uddin, S., Shareef, S., & Mohamed, A. (2012). "An analysis of harmonics from LED lamps". *Proc. Asia-PACIFIC Symp. Electromagnetic Compatibility*, 837-840.

Yong, J., Chen, L., Nassif, A., & Xu, W. (2010). "A frequency-domain harmonic model for compact fluorescent lamps". *IEEE Trans. Power Del.*, 1182-1189.

www.bdigital.ula.ve

ANEXO DIGITAL A CARACTERÍSTICAS TUBO FLUORESCENTE SYLVANIA F032 T8

The logo for SYLVANIA, featuring the brand name in a bold, white, sans-serif font centered within a dark teal rectangular background.

Fluorescentes T8

Tubo Fluorescente FO32 T8 - SUPER – NW P01425

Tubo T8 fluorescente, su tamaño facilita el diseño de luminarias compactas, alto rendimiento y eficiencia energética.

CARACTERISTICAS

- Excelente reproducción cromática
- Requiere de balastro electrónico
- Base G13
- Bajo costo

APLICACIONES

- Iluminación General
- Edificios
- Supermercados
- Oficinas

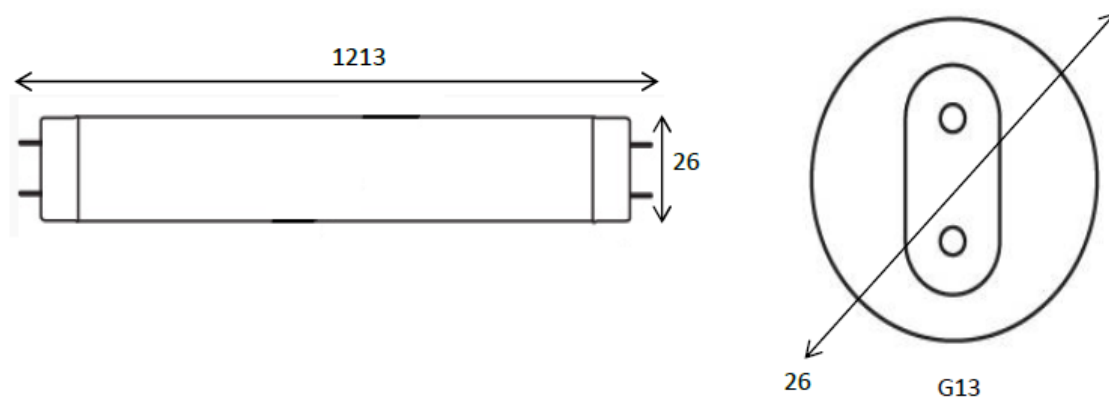
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO**CODIGO****P01425****NOMBRE DEL PRODUCTO****Tubo Fluorescente FO32 T8 - SUPER - NW****TECNOLOGÍA****FLUORESCENTE****DESCRIPCIÓN**

Tubo T8 de 32W fluorescente, eficiencia de hasta 87lm/W, fácil instalación, reduce costes de mantenimiento, aptos para instalaciones que requieren un alto flujo lumínico

DATOS ÓPTICOS**DATOS FÍSICOS****DATOS ELECTRICOS**

IRC	COLOR	CONSUMO TOTAL DE POTENCIA (W)
85Ra	Blanco	32W
VIDA ÚTIL	CASQUILLO/BASE	VOLTAJE
20000h	G13	64V
CLASE DE ENERGIA	DIMENSIONES/DIAMETRO (mm)	EFICACIA
B	1213 x 26	87lm/W
FLUJO LUMINOSO (lm)	FORMA DEL BULBO	TEMPERATURA MAXIMA DE OPERACIÓN
2784lm	Tubular	25°
TEMPERATURA DE COLOR		CORRIENTE (A)
6500K		0.27

DIMENSIONES



ANEXO DIGITAL B

HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR MOSFET

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR

84 DE 3469674 0027899 0

FAIRCHILD
A Schlumberger Company

IRF330-333/IRF730-733
MTM/MTP5N35/5N40
N-Channel Power MOSFETs,
5.5 A, 350 V/400 V
Power And Discrete Division

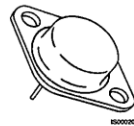
T-39-11

Description

These devices are n-channel, enhancement mode, power MOSFETs designed especially for high voltage, high speed applications, such as off-line switching power supplies, UPS, AC and DC motor controls, relay and solenoid drivers.

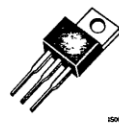
- V_{GS} Rated at ± 20 V
- Silicon Gate for Fast Switching Speeds
- I_{DSS} , $V_{DS(on)}$, SOA and $V_{GS(th)}$ Specified at Elevated Temperature
- Rugged

TO-204AA



IRF330
IRF331
IRF332
IRF333
MTM5N35
MTM5N40

TO-220AB



IRF730
IRF731
IRF732
IRF733
MTP5N35
MTP5N40

Maximum Ratings

Symbol	Characteristic	Rating IRF330/332 IRF730/732 MTM/MTP5N40	Rating IRF331/333 IRF731/733 MTM/MTP5N35	Unit
V_{DSS}	Drain to Source Voltage	400	350	V
V_{DGR}	Drain to Gate Voltage $R_{GS} = 1.0 \text{ M}\Omega$	400	350	V
V_{GS}	Gate to Source Voltage	± 20	± 20	V
T_J, T_{stg}	Operating Junction and Storage Temperature	-55 to +150	-55 to +150	$^{\circ}\text{C}$
T_L	Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes, 1/8" From Case for 5 s	275	275	$^{\circ}\text{C}$

Maximum On-State Characteristics

		IRF330/331 IRF730/731	IRF332/333 IRF732/733	MTM5N35/40 MTP5N35/40	
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On Resistance	1.0	1.5	1.0	Ω
I_D	Drain Current Continuous Pulsed	5.5 22	4.5 22	5.0 22	A

Maximum Thermal Characteristics

		1.67	1.67	1.67	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction to Case				
P_D	Total Power Dissipation at $T_C = 25^{\circ}\text{C}$	75	75	75	W

Notes
For information concerning connection diagram and package outline, refer to Section 7.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR

84 DE 3469674 0027900 2

IRF330-333/IRF730-733

T-39-11

Electrical Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Symbol	Characteristic	Min	Max	Unit	Test Conditions
Off Characteristics					
$V_{(BR)DSS}$	Drain Source Breakdown Voltage ¹ IRF330/332/730/732 IRF331/333/731/733			V	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\ \mu\text{A}$
		400			
		350			
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current		250	μA	$V_{DS} = \text{Rated } V_{DSS}, V_{GS} = 0\text{ V}$
			1000	μA	$V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } V_{DSS}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_C = 125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-Body Leakage Current IRF330-333 IRF730-733		± 100 ± 500	nA	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}, V_{DS} = 0\text{ V}$
On Characteristics					
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	4.0	V	$I_D = 250\ \mu\text{A}, V_{DS} = V_{GS}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-Source On-Resistance ² IRF330/331/730/731 IRF332/333/732/733			Ω	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 3.0\text{ A}$
			1.0		
			1.5		
g_{fs}	Forward Transconductance	3.0		S (Ω)	$V_{DS} = 10\text{ V}, I_D = 3.0\text{ A}$
Dynamic Characteristics					
C_{iss}	Input Capacitance		900	pF	$V_{DS} = 25\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$ $f = 1.0\text{ MHz}$
C_{oss}	Output Capacitance		300	pF	
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance		80	pF	
Switching Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$, Figures 12, 13)					
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time		30	ns	$V_{DD} = 175\text{ V}, I_D = 3.0\text{ A}$ $V_{GS} = 10\text{ V}, R_{GEN} = 15\ \Omega$ $R_{GS} = 15\ \Omega$
t_r	Rise Time		35	ns	
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time		55	ns	
t_f	Fall Time		35	ns	
Q_g	Total Gate Charge		30	nC	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 7.0\text{ A}$ $V_{DD} = 180\text{ V}$
Symbol Characteristic Typ Max Unit Test Conditions					
Source-Drain Diode Characteristics					
V_{SD}	Diode Forward Voltage IRF330/331/730/731 IRF332/333/732/733		1.6	V	$I_S = 5.5\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}$
			1.5	V	$I_S = 4.5\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}$
t_{rr}	Reverse Recovery Time	400		ns	$I_S = 5.5\text{ A}, di_S/dt = 100\text{ A}/\mu\text{S}$

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR

84 DE 3469674 0027901 4

MTM/MTP5N35/5N40

T-39-11

Electrical Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Symbol	Characteristic	Min	Max	Unit	Test Conditions
Off Characteristics					
$V_{(BR)DSS}$	Drain-Source Breakdown Voltage ¹			V	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 5.0\text{ mA}$
	MTM/MTP5N40	400			
	MTM/MTP5N35	350			
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current		0.25	mA	$V_{DS} = 0.85 \times \text{Rated } V_{DSS}, V_{GS} = 0\text{ V}$
			2.5	mA	$V_{DS} = 0.85 \times \text{Rated } V_{DSS}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_C = 100^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-Body Leakage Current		± 500	nA	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}, V_{DS} = 0\text{ V}$
On Characteristics					
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	4.5	V	$I_D = 1.0\text{ mA}, V_{DS} = V_{GS}$
		1.5	4.0	V	$I_D = 1.0\text{ mA}, V_{DS} = V_{GS}, T_C = 100^\circ\text{C}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-Source On-Resistance ²		1.0	Ω	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 2.5\text{ A}$
$V_{DS(on)}$	Drain-Source On-Voltage ²		2.5	V	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 2.5\text{ A}$
			6.2	V	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 5.0\text{ A}$
			5.0	V	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 2.5\text{ A}, T_C = 100^\circ\text{C}$
g_{fs}	Forward Transconductance	2.0		S (Ω)	$V_{DS} = 10\text{ V}, I_D = 2.5\text{ A}$
Dynamic Characteristics					
C_{iss}	Input Capacitance		1200	pF	$V_{DS} = 25\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$
C_{oss}	Output Capacitance		300	pF	
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance		80	pF	
Switching Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$, Figures 12, 13)³					
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time		50	ns	$V_{DD} = 25\text{ V}, I_D = 2.5\text{ A}, V_{GS} = 10\text{ V}, R_{GEN} = 50\ \Omega, R_{GS} = 50\ \Omega$
t_r	Rise Time		100	ns	
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time		200	ns	
t_f	Fall Time		100	ns	
Q_g	Total Gate Charge		30	nC	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 7.0\text{ A}, V_{DD} = 180\text{ V}$

Notes

- $T_J = +25^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$
- Pulse test: Pulse width $\leq 80\ \mu\text{s}$, Duty cycle $\leq 1\%$
- Switching time measurements performed on LEM TR-58 test equipment.