



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS
ELECTROMAGNÉTICAS SIN ELECTRODOS**

Delwing Orlando Ajucejay Panteul

Asesorado por el Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, marzo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS
ELECTROMAGNÉTICAS SIN ELECTRODOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DELWING ORLANDO AJQUEJAY PANTEUL

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

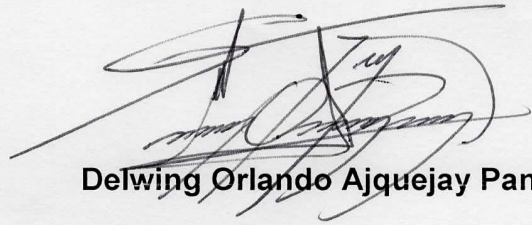
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Juan Fernando Morales Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Veliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS ELECTROMAGNÉTICAS SIN ELECTRODOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 9 de noviembre de 2011.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Delwing Orlando Ajquejay Panteul', is written over a faint, illegible stamp or watermark.

Delwing Orlando Ajquejay Panteul

Guatemala, 12 de diciembre de 2013

Ing. Romeo Neftalí López Orozco
Coordinador de Área Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Coordinador:

Por este medio le informo que he asesorado el trabajo de graduación titulado: ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS ELECTROMAGNÉTICAS SIN ELECTRODOS desarrollado por el estudiante Delwing Orlando Ajuquejay Panteul, previo a optar el título de Ingeniero Electricista.

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo, considero que llena los requisitos para su aprobación final

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Ing. Francisco Javier González López
Colegiado # 2364
Asesor

Ing. Francisco Javier González López
Colegiado No. 2364

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 09. 2014
Guatemala, 10 de febrero 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS
ELECTROMAGNÉTICAS SIN ELECTRODOS, del estudiante
Delwing Orlando Ajquejay Panteul, que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑADA TODOS


Ing. Romeo Nefali López Orozco
Coordinador Área Electrotécnica



SRO

Universidad de San
Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de Lingüística

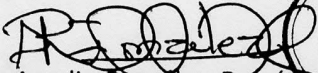
Guatemala, 10 de marzo de 2014
Ling.16/14

Ingeniero Guillermo Antonio Puente Romero
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Señor director:

Por este medio hago de su conocimiento que la Unidad de Lingüística hace una modificación al título del trabajo de graduación del estudiante **Delwing Orlando Ajquejay Panteul**, con número de carné: **2000-18176** el cual fue aprobado de acuerdo al protocolo como: **ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS ELECTROMAGNÉTICAS "SIN ELECTRODOS"**.

La Unidad modifica el título del trabajo en virtud de que el mismo no está bien redactado y propone la siguiente forma: **ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS ELECTROMAGNÉTICAS SIN ELECTRODOS**.


Licenciada Rosa Amelia González Domínguez
Coordinadora de la Unidad de Lingüística



Cc. Archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 09. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; DELWING ORLANDO AJQUEJAY PANTEUL titulado: ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS ELECTROMAGNÉTICAS SIN ELECTRODOS, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 3 DE MARZO 2014.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LAS LÁMPARAS ELECTROMAGNÉTICAS SIN ELECTRODOS**, presentado por el estudiante universitario: **Delwing Orlando Aquejay Panteul**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, marzo de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

Dios todopoderoso	Por el regalo más precioso, la vida eterna.
Mi madre	Dionisia Panteul, por su amor incondicional y motivarme a seguir adelante, por demostrarme con su ejemplo que con amor la vida es más hermosa.
Mi padre	Santiago Aiquejay (q.e.p.d.), por enseñarme que lo más importante en la vida es buscar el reino de Dios, por enseñarme a luchar y que con esfuerzo puedo alcanzar mis sueños.
Mi esposa	Ruth Sitán, por sus oraciones y amor incondicional, por estar a mi lado y ser mi ayuda idónea.
Mis hermanos	Walter, Marvin, Fredy y Rudy Aiquejay, por su apoyo y consejos en los momentos difíciles.
Mis hermanas	Wilma, Nidia y Jennifer Aiquejay, por su cariño y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haber sido mi centro de estudios en la etapa de formación profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad de pertenecer a tan prestigiosa Facultad.
Mi asesor	Ing. Francisco González, por su apoyo, confianza y su valiosa asesoría en este trabajo de graduación.
Mi familia	Por su amor y todo lo bueno que me han enseñado.
Mis amigos	Ana María Ordoñez, Henry Martínez, Milton Hernández, Juan Gomez y amigos que han estado a mi lado, por brindarme su amistad, apoyo y sinceridad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. DEFINICIONES Y GENERALIDADES	1
1.1. Conceptos básicos sobre la luz	1
1.2. Temperatura del color.....	5
1.3. Índice de rendimiento del color	6
1.4. Fuentes de luz	8
1.4.1. Termorradiación.....	8
1.4.2. Luminiscencia	9
1.5. Lámparas de descarga	11
1.5.1. Antecedentes.....	12
1.5.2. Estados de la descarga en gases.....	14
1.6. Inducción electromagnética	16
2. BALASTROS PARA LÁMPARAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	19
2.1. Generalidades sobre balastos.....	19
2.1.1. Función de un balastro	20
2.1.2. Requisitos que deben cumplir los balastos electrónicos.....	22

2.2.	Balastro electrónico o controlador	23
2.2.1.	Partes de un balastro electrónico	25
3.	LÁMPARAS FLUORESCENTES CON ACOPLAMIENTO INDUCTIVO O LÁMPARAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	27
3.1.	Introducción.....	27
3.2.	Ventajas para aplicaciones en iluminación.....	28
3.3.	Principios de funcionamiento	28
3.3.1.	Descarga capacitiva o tipo E	29
3.3.2.	Descarga inductiva o tipo H.....	30
3.4.	Clasificación de lámparas de inducción	33
3.4.1.	Lámpara de inducción electromagnética interna	33
3.4.2.	Lámpara de inducción electromagnética externa	35
3.5.	Interferencia electromagnética y seguridad.....	37
3.5.1.	Interferencia electromagnética	37
3.5.1.1.	Interferencia radiada	37
3.5.1.2.	Interferencia conducida	39
3.5.2.	Seguridad	40
3.6.	Desarrollos comerciales	41
3.6.1.	Lámpara QL de Philips	41
3.6.2.	Lámpara W-OVT de W-Energy Lux.....	43
3.7.	El problema del factor de potencia	44
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	47
4.1.	Metodología	47
4.2.	Procedimiento	50
4.3.	Mediciones: características técnicas de las lámparas, consumo de potencia y calidad de la potencia eléctrica.....	51

5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
5.1.	Potencia activa e iluminancia	73
5.2.	Factor de potencia	76
5.3.	Distorsión armónica.....	77
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sensibilidad espectral del ojo humano.....	5
2.	Progresos de las eficiencias luminosas de varios tipos de lámparas	13
3.	Característica corriente-voltaje de la descarga entre dos placas paralelas.....	16
4.	Generación de un voltaje inducido moviendo un conductor por un campo magnético.....	17
5.	Controlador de lámpara de inducción sin electrodos	24
6.	Partes de un balastro electrónico.....	25
7.	a) Esquemático de una descarga capacitiva en RF b) Lámpara con acoplamiento capacitivo en RF	30
8.	Lámpara de inducción en RF	31
9.	Partes de una lámpara de inducción electromagnética interna.....	33
10.	Lámpara de inducción electromagnética interna.....	34
11.	Partes de una lámpara de inducción electromagnética externa.....	35
12.	Lámpara de inducción electromagnética externa.....	36
13.	Esquema de la lámpara de inducción QL de Philips	42
14.	Modelo comercial de la lámpara de inducción QL de Philips	42
15.	Lámpara de inducción W-OVT de W-Energy Lux	43
16.	Unipower AB modelo Unilyzer 901/902.....	47
17.	Especificaciones luxómetro CA813.....	48
18.	Variación del voltaje respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC.....	51

19.	Variación de la corriente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	52
20.	Variación de la frecuencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	52
21.	Variación de la potencia activa respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	53
22.	Variación de la potencia reactiva respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	53
23.	Variación de la potencia aparente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	54
24.	Variación del factor de potencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	54
25.	THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	55
26.	THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	55
27.	Armónicos impares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	56
28.	Armónicos pares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	57
29.	Variación del voltaje respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	58
30.	Variación de la corriente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	58
31.	Variación de la frecuencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	59
32.	Variación de la potencia activa respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	59
33.	Variación de la potencia reactiva respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	60

34.	Variación de la potencia aparente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC.....	60
35.	Variación del factor de potencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	61
36.	THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	61
37.	THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	62
38.	Armónicos impares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	63
39.	Armónicos pares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC.....	64
40.	Variación del voltaje respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC	65
41.	Variación de la corriente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC	65
42.	Variación de la frecuencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC	66
43.	Variación de la potencia activa respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC	66
44.	Variación de la potencia reactiva respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC.....	67
45.	Variación de la potencia aparente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC.....	67
46.	Variación del factor de potencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC	68
47.	THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC	68
48.	THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC	69
49.	Armónicos impares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC	70

50.	Armónicos pares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC.....	71
51.	Comparación de la potencia (W) respecto del tiempo de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión	74
52.	Iluminancia (luxes) de la lámpara de inducción conectada en diferentes niveles de tensión	75
53.	Comparación del factor de potencia respecto del tiempo de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión	77
54.	Comparación del THDi (%) respecto del tiempo de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión	78
55.	Comparación del THDv (%) respecto del tiempo de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión	79

TABLAS

I.	Espectro electromagnético	2
II.	Longitudes de onda de seis colores básicos	4
III.	Temperatura de color correspondiente a la apariencia de color de fuentes derivadas de lámparas de descarga	6
IV.	Espectro electromagnético	7
V.	Límites de armónicos de corriente para equipos clase C impuestos por la norma IEC 1000-3-2	23
VI.	Potencia (W) de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión	73
VII.	Iluminancia (luxes) de la lámpara de inducción conectada en diferentes niveles de tensión	75
VIII.	Factor de potencia de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión	76
IX.	THDi (%) de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión....	78

X.	THDv (%) de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión.....	79
XI.	Armónicos de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC.....	80
XII.	Armónicos de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC.....	81
XIII.	Armónicos de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC.....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
LED	Diodo emisor de luz
DAT	Distorsión armónica total en la línea
FP	Factor de potencia
<i>f</i>	Frecuencia
IRC	Índice de rendimiento del color
IEM	Inducción electromagnética
λ	Longitud de onda
lx	Lux
nm	Nanómetro
ns	Nanosegundo
%	Porcentaje
RF	Radio frecuencia
K	Temperatura del color
UV	Ultravioleta
c	Velocidad de la luz
<i>e</i>	Voltaje inducido
V	Voltio
W	Watts

GLOSARIO

Bobina	Componente pasivo de un circuito eléctrico que debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.
Flujo luminoso	El flujo luminoso es la cantidad de luz que fluye en un determinado tiempo y es medido en lúmenes.
Frecuencia	Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.
Galvanómetro	Instrumento que detecta el paso de la corriente eléctrica y cuya aguja, ubicada en el centro, puede girar hacia la izquierda o derecha indicando el sentido de la corriente.
Gas inerte	Es un gas no reactivo bajo determinadas condiciones de presión y temperatura.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
Iluminancia	Es la cantidad de luz que incide en la unidad de área y es medida en <i>footcandles</i> (pies candela) o luxes.
INIRC	Comité Internacional de Radiación sin Ionización

Intensidad luminosa	Describe la cantidad de luz (lúmenes) en una unidad de ángulo sólido.
Lumen	Unidad del Sistema Internacional de Medidas para medir el flujo luminoso, es una medida de la potencia luminosa percibida.
Luminaria	Es un dispositivo que sirve para aumentar el flujo luminoso, evitar el deslumbramiento y viene condicionada por el tipo de iluminación y fuente de luz escogida.
Luminosidad	Es la cantidad de energía electromagnética que un cuerpo emite por unidad de tiempo.
Luxómetro	Es un instrumento de medición que permite medir simple y rápidamente la iluminancia real y no subjetiva de un ambiente. La unidad de medida es lux (lx).
NRPB	Mesa de Protección Radiológica Nacional
Período	Es el tiempo que dura un ciclo de una onda en volver a comenzar.
Plasma	El plasma es un conjunto cuasineutral de partículas con portadores libres de carga eléctrica, el cual desarrolla comportamiento colectivo.

THDi	Distorsión armónica total en corriente como porcentaje de la fundamental.
THDv	Distorsión armónica total en tensión como porcentaje de la fundamental.
Watts	El vatio (<i>watt</i>), unidad de potencia del Sistema Internacional de Unidades, equivalente a 1 Joule/segundo, el símbolo es W.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se realizó un análisis de la eficiencia de las lámparas electromagnéticas sin electrodos, fue un trabajo laborioso en el cual se realizó un monitoreo del comportamiento de los parámetros eléctricos conectando la lámpara en diferentes niveles de tensión. Se analizaron los resultados para determinar si la lámpara cumple con los límites establecidos por el fabricante y los estándares de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

En el capítulo I se presentan los fundamentos de las lámparas fluorescentes, conceptos básicos sobre la luz y la inducción electromagnética.

En el capítulo II se presentan los balastos para lámparas de inducción electromagnética, la función y requisitos que estos deben cumplir. Además, se describe la diferencia entre un balastro convencional y un balastro electrónico o controlador para lámparas de inducción.

En el capítulo III se presentan las lámparas fluorescentes con acoplamiento inductivo o lámparas de inducción electromagnética y las ventajas en aplicaciones en iluminación. Se desarrolló una breve descripción de la interferencia que estos provocan, los niveles de seguridad que se deben cumplir y el desarrollo comercial que han tenido en los últimos años.

En el capítulo IV se describen los detalles de las pruebas realizadas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería, edificio T-1 de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Antes de realizar las pruebas, la lámpara se sometió a un tiempo de estabilización de media hora conectándola a la tensión nominal de operación y a temperatura ambiente, después se conectó a diferentes niveles de tensión y se tomaron mediciones de tensión, corriente, potencia, factor de potencia, THDi y THDv con el analizador de redes marca Unipower AB modelo Unilyzer 901/902.

En el capítulo V se muestra y analiza los resultados obtenidos de las mediciones realizadas a la lámpara de inducción electromagnética sin electrodos. Para los resultados de potencia, iluminancia, factor de potencia y distorsión armónica, se elaboraron tablas y gráficas que se compararon con los límites establecidos por el fabricante y los estándares IEC.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis de la eficiencia de las lámparas electromagnéticas sin electrodos.

Específicos

1. Presentar los fundamentos de las lámparas fluorescentes y de descarga.
2. Mostrar los tipos de balastos que se utilizan para el funcionamiento de las lámparas de inducción.
3. Conocer las ventajas de las lámparas fluorescentes con acoplamiento inductivo o lámparas de inducción electromagnética para aplicaciones en iluminación.
4. Presentar los experimentos de laboratorio para determinar la eficiencia de las lámparas de inducción.
5. Realizar un análisis de los resultados obtenidos en los experimentos.

INTRODUCCIÓN

La tecnología básica para las lámparas electromagnéticas sin electrodos no es nada nuevo. Esencialmente, este tipo es una lámpara fluorescente sin electrodos. Al no tener electrodos, la lámpara opera bajo los principios fundamentales de la inducción electromagnética y la descarga eléctrica en gas para crear luz. La eliminación de los electrodos y filamentos dan por resultado una lámpara con una prolongada vida.

Basados en estos principios se puede generar luz vía descarga eléctrica en gas a través de simple magnetismo. Transformadores electromagnéticos que consisten de aros con bobinas metálicas, crean un campo electromagnético alrededor del tubo de vidrio que contiene el gas, usando una alta frecuencia generada por un oscilador electrónico.

El camino de descarga, inducido por las bobinas, forma un ciclo cerrado causando la aceleración de los electrones libres, que chocan con los átomos de mercurio y excitan los electrones. Según estos electrones excitados, los átomos regresan de este estado de alta excitación a un nivel estable, emiten radiación ultravioleta. Esta radiación ultravioleta creada es convertida en luz visible al pasar a través del recubrimiento de fósforo en la superficie del tubo.

La forma de la lámpara de inducción maximiza la eficiencia de los campos que son generados. La vida útil de las lámparas de inducción electromagnética (IEM) es sólo determinada por el nivel de calidad, el diseño de los circuitos y demás componentes electrónicos.

1. DEFINICIONES Y GENERALIDADES

1.1. Conceptos básicos sobre la luz

La luz consiste en una serie de ondas electromagnéticas que al incidir sobre el ojo humano producen un estímulo conocido como color. El conjunto de colores que pueden ser observados por el ojo humano constituye una pequeña franja del espectro electromagnético que se conoce como espectro visible. Las ondas electromagnéticas se distinguen por la longitud de onda (λ). La longitud de onda es: la distancia recorrida por la onda electromagnética durante un período.

La propagación de una onda electromagnética sufre ligeras variaciones dependiendo del medio en el que se propague, en el vacío, la velocidad de una onda electromagnética será la constante c conocida como la velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s). Puesto que la velocidad de la luz sufre muy ligeras variaciones en función del medio por el que se propague, la longitud de onda es un parámetro que depende básicamente de la frecuencia de la onda electromagnética. Las longitudes de onda que corresponden a la luz son muy pequeñas, para mayor comodidad, usamos la medida del nanómetro (nm).

En la tabla I se muestran los diferentes tipos de ondas que conforman el espectro electromagnético y las longitudes de onda respectivas. En esta tabla se observa que el espectro visible corresponde a radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda que van de 380 a 760 nm.

Para longitudes de onda menores de 380 nm se entra en la región de la radiación ultravioleta y para longitudes mayores de 760 nm en la región de los infrarrojos. Los límites señalados no son exactos pues en general existe un traslape entre las distintas bandas de colores.

Tabla I. **Espectro electromagnético**

Tipo de radiación	Longitudes de onda (nm)
Rayos cósmicos	$10^{-5} - 10^{-3}$
Rayos gamma	$10^{-3} - 10^{-4}$
Rayos X	0.01 - 100
Ultravioleta	100 - 380
Visible	380 - 760
Infrarrojo	760 - 10^6
Radar	$10^6 - 10^8$
Televisión y FM	$10^6 - 10^9$
Radio AM	$10^9 - 10^{12}$
Ondas Eléctricas	$10^{12} - 10^{16}$

Fuente: PONCE, Mario. *Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E*. p. 1-2.

La radiación electromagnética se puede considerar no como una serie de ondas sino como un haz o flujo de partículas, llamadas fotones. Esta dualidad hace que cada fotón tenga una energía directamente proporcional a la frecuencia de la onda asociada, dada por la relación de Planck.

$$E = hf$$

Ecuación 1. Relación de Planck.

En donde E es la energía del fotón, f es la frecuencia de la onda y h es la constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ Js).

Así mismo, considerando la radiación electromagnética como onda, la longitud de onda (λ) y la frecuencia de oscilación (f) están relacionadas por una constante, la velocidad de la luz en el medio (c en el vacío).

$$c = \lambda f$$

Ecuación 2. Velocidad de la luz en el vacío.

A mayor longitud de onda, menor frecuencia y menor energía según la relación de Planck.

En el espectro visible, cada color corresponde a un rango determinado de longitudes de onda. En la tabla II se muestran las longitudes de onda correspondientes a seis colores básicos.

El porqué sólo se distinguen los colores con longitudes de onda de 380 a 760 nm, se debe a las características del ojo humano. El ojo humano posee dos tipos de sensores conocidos como bastones y conos, el nombre se debe a la forma geométrica. Cada sensor se adapta a un cierto nivel de luminosidad.

Tabla II. **Longitudes de onda de seis colores básicos**

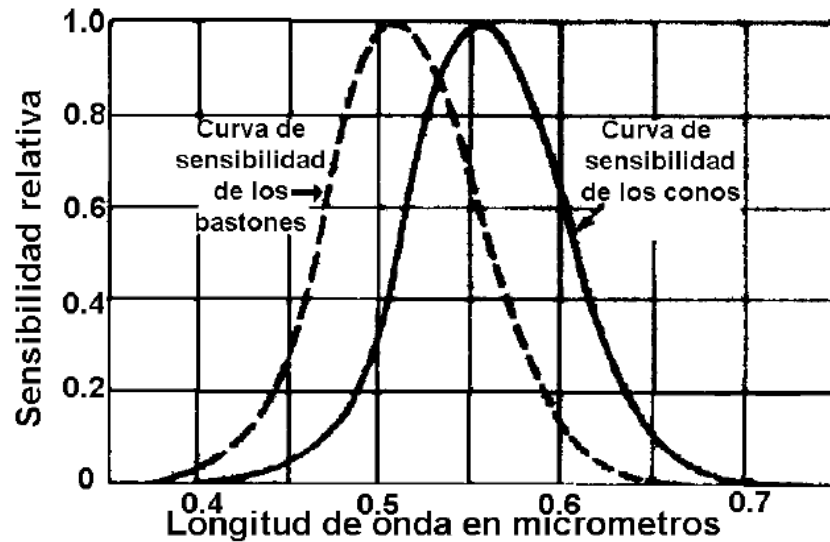
Tipo de radiación	Longitudes de onda (nm)
Violeta	380 – 436
Azul	436 – 495
Verde	495 – 566
Amarillo	566 – 589
Naranja	589 – 627
Rojo	627 – 760

Fuente: PONCE, Mario. *Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E*. p. 1-2.

Los bastones son más apropiados para condiciones de alta luminosidad y los conos para condiciones cercanas a la oscuridad. En la gráfica de la figura 1 se muestran las curvas de sensibilidad espectral del ojo humano para los bastones y los conos. En esta figura se observa que la sensibilidad no es constante para todos los colores.

El ojo humano percibe mejor colores como el amarillo y el verde, y en menor medida el rojo y el violeta, además; la percepción variará de acuerdo con las condiciones de luminosidad. Para la curva de visión diurna (la de los conos), la respuesta visual es máxima para una longitud de onda de 555 nm, correspondiente a la región verde amarilla.

Figura 1. **Sensibilidad espectral del ojo humano**



Fuente: PONCE, Mario. *Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E*. p. 1-3.

1.2. Temperatura del color

La temperatura de color de una fuente de luz se determina por comparación contra una fuente patrón. Generalmente se toma como fuente patrón una esfera negra calentada hasta la incandescencia. A medida que el cuerpo se va calentando, la superficie va adquiriendo distintas tonalidades correspondientes cada una de ellas a la temperatura a la cual se encuentra el cuerpo negro. Este concepto solo se aplica a fuentes de luz que basan el funcionamiento en la termorradiación.

Para las fuentes de luz que no son radiadores completos; por ejemplo, las lámparas de descarga: se emplea el concepto de temperatura de color similar o correlacionada, que puede definirse como la temperatura a la que el cuerpo negro presenta una apariencia de color similar o correlacionada, que a la vez puede definirse como la temperatura a la que el cuerpo negro presenta una apariencia de color similar a la de la fuente de luz ensayada. La equivalencia práctica entre apariencia de color y temperatura de color se establece convencionalmente según la siguiente tabla:

Tabla III. **Temperatura de color correspondiente a la apariencia de color de fuentes derivadas de lámparas de descarga**

Apariencia de color	Temperatura de color (K)
Cálida	<3300
Intermedia	3300 – 5000
Fría (luz de día)	5000

Fuente: PONCE, Mario. *Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E*. p. 1-3.

1.3. Índice de rendimiento del color

El índice de rendimiento de color (IRC) se puede definir como la capacidad de una fuente de luz de reproducir correctamente los colores de los cuerpos iluminados. Este índice ofrece una indicación de la capacidad de la fuente de luz para reproducir unas muestras de colores normalizados, en comparación con la reproducción proporcionada por una luz patrón de referencia.

Convencionalmente, el IRC varía entre 0 y 100, pero no debe entenderse como un porcentaje de la exactitud con que una fuente reproduce un color determinado, sino como una cifra genérica que se obtiene como promedio de las reproducciones efectuadas de los colores de la muestra. Por ejemplo, dos lámparas de descarga pueden tener un mismo IRC, y sin embargo reproducir de modo distinto un determinado color.

Con respecto a los IRC de las lámparas comunes, las lámparas incandescentes tienen un excelente rendimiento de color de 100, las lámparas fluorescentes tienen un IRC de entre 50 (normal) y las que peor rendimiento de color tienen son las lámparas de vapor de sodio con IRC de alrededor de 40. En la tabla IV se muestra el IRC para algunas lámparas.

Tabla IV. **Espectro electromagnético**

Tipo de Lámpara	IRC
Incandescente	100
Halógena	100
Fluorescente compacta	15 a 85
Inducción	79
Alta presión	0 a 70
Baja presión	0

Fuente: PONCE, Mario. *Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E*. p. 1-4.

1.4. Fuentes de luz

Para la producción de luz, se requiere de fuentes que emitan radiaciones electromagnéticas que se encuentren dentro del espectro visible del espectro electromagnético, es decir, radiaciones con longitudes de onda de 380 nm a 760 nm.

Las formas de producción de luz pueden clasificarse de acuerdo con la forma en que se emiten estas radiaciones electromagnéticas y se distinguen dos tipos característicos: la termorradiación y la luminiscencia.

1.4.1. Termorradiación

Se define como termorradiación a la emisión de energía radiante que depende exclusivamente de la temperatura del material. A la parte de esta radiación emitida dentro del espectro visible, se le denomina incandescencia. De esta manera, la incandescencia es la producción de luz por la elevación de la temperatura de un cuerpo.

Las interacciones entre los átomos del cuerpo se intensifican a medida que aumenta la temperatura del cuerpo, puesto que la excitación de los átomos es general, se radia energía desde el nivel de excitación más alto hasta el más bajo consiguiéndose un espectro de emisión continuo, es decir, que emite en todas las longitudes de onda hasta nivel de color correspondiente a la temperatura.

El rendimiento visual, para una curva de emisión determinada, vendrá dado por la relación entre la energía radiada en el espectro visible y la energía radiada total, teniendo en cuenta la sensibilidad espectral del ojo humano.

El valor máximo de este rendimiento visual se establece alrededor de los 4 300 K, cifra bastante superior al punto de fusión de los materiales utilizados en la producción de luz por incandescencia.

Por lo tanto, con los materiales utilizados usualmente en la producción de luz por termorradiación se tienen rendimientos visuales muy bajos.

1.4.2. Luminiscencia

Las radiaciones luminiscentes dependen, esencialmente, de la estructura atómica de los materiales y consiste en una radiación electromagnética visible, cuya intensidad en determinadas longitudes de onda (características de cada material) es mucho mayor que la de la radiación térmica del mismo cuerpo a la misma temperatura. Es decir, produce luz sólo en determinadas longitudes de onda.

La luminiscencia es la radiación luminosa emitida por un cuerpo, por efecto de un agente exterior que excita los átomos de dicho cuerpo. En este caso, la excitación de los átomos se da solo en ciertos niveles de energía y la luz se emite en un número limitado de longitudes de onda, lo que origina un espectro discontinuo. Dependiendo del agente excitador la luminiscencia se puede clasificar en:

Electroluminiscencia

Se produce por la acción de un campo eléctrico en el seno de un gas o un material sólido. Cuando la descarga es a través de un gas, se aplica un potencial eléctrico que ioniza el gas y permite el paso de corriente eléctrica a través del gas.

Los electrones que forman el chorro de corriente, o arco de descarga, se aceleran a enormes velocidades; al entrar en colisión con los átomos del gas o vapor, alteran momentáneamente la estructura atómica de estos, produciéndose la luz por la energía desprendida cuando los átomos alterados vuelven a su estado normal, este es el caso que se observa en las lámparas de descarga.

La electroluminiscencia a través de un material sólido se puede observar en un diodo emisor de luz (LED) y el principio de funcionamiento es diferente pues no se basa en una descarga eléctrica.

Fotoluminiscencia

Se produce por la acción de otras radiaciones de distinta longitud de onda, a la vez puede ser:

- Fluorescencia: conversión de radiación ultravioleta en visible (como es el caso en las lámparas fluorescentes). Es una fotoluminiscencia simultánea, puesto que el tiempo transcurrido entre la excitación y la emisión es inferior a 10 ns.
- Fosforescencia: fotoluminiscencia retardada, en la que existe emisión de luz durante cierto tiempo después que ha cesado la excitación (como la que se observa en las luciérnagas).
- Láseres (gases y sólidos): emisión monocromática

Otras luminiscencias

Se producen por causas diversas y normalmente, sin aplicación práctica como fuentes de producción de luz. Entre otras se pueden citar la bioluminiscencia (quimioluminiscencia en seres vivos como la luciérnaga), triboluminiscencia (fricción de algunos materiales) y la radioluminiscencia (proveniente de materiales radiactivos). Las principales fuentes de luz comerciales que utilizan la luminiscencia se basan en la electroluminiscencia.

1.5. Lámparas de descarga

La luz de las lámparas de descarga se consigue mediante el fenómeno de electroluminiscencia, provocado por el bombardeo de los átomos de un gas a través de los electrones emitidos en una descarga eléctrica; en el caso de las lámparas fluorescentes también en la fluorescencia.

Estas lámparas están compuestas por una ampolla de vidrio o cuarzo en forma tubular; en los extremos van fijados los electrodos que emiten electrones al conectarse a una fuente de energía. El tubo de descarga está recubierto de una segunda ampolla que adopta distintas formas, según el tipo de lámpara.

La ampolla interior contiene un gas inerte (neón, kriptón, etc.) y una pequeña cantidad de metal (sodio, mercurio, etc.) que se vaporiza al iniciarse la descarga. Estas lámparas funcionan conectadas a un transformador o reactancia estabilizadora.

1.5.1. Antecedentes

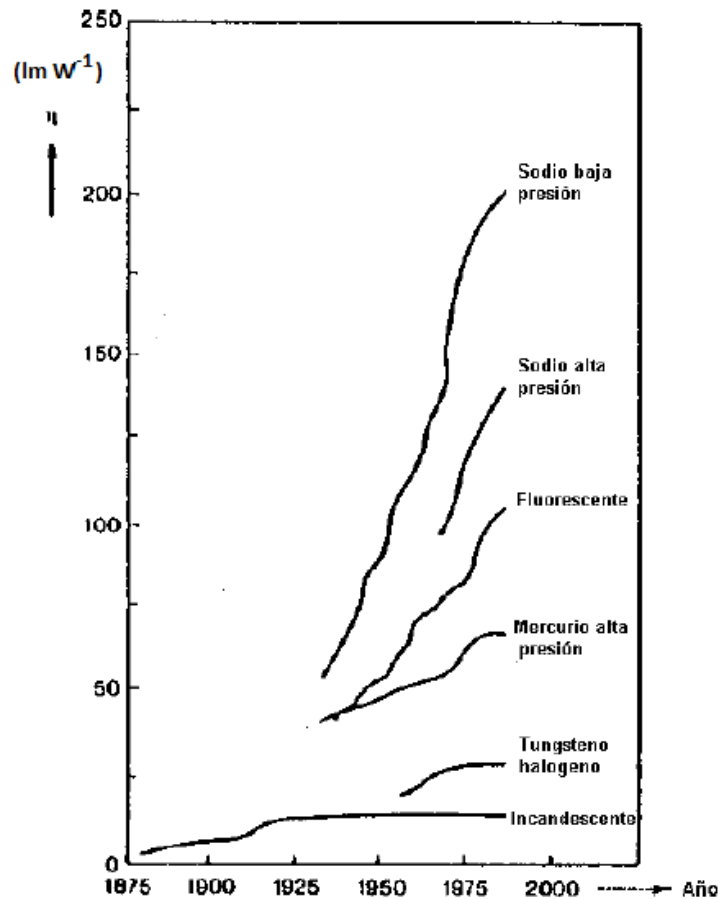
El término descarga tiene origen en la época de los primeros experimentos de flujo de corriente a través de un gas que se observaba en la descarga de un capacitor. Una de las primeras descargas en gas, causadas accidentalmente, fue observada por Pacard en París en 1676 cuando transportaba un barómetro de mercurio. El movimiento del mercurio dentro del barómetro produjo el fenómeno luminoso.

En 1742 Christian August Hansen experimentó con un tubo de vacío que contenía una pequeña cantidad de mercurio y observó que cuando aplicaba un voltaje elevado de corriente directa (DC), el tubo emitía luz (se puede considerar que fue la primer lámpara de mercurio de baja presión). En 1856 se hicieron experimentos en tubos de vidrio despresurizados con una bomba de mercurio y operando con una fuente de voltaje de corriente alterna (AC) elevada. El período de 1890-1910 presencié la invención de una familia completa de descargas en gas de mercurio a alta y baja presión como posibles fuentes de luz. Alrededor de 1920 se obtuvieron descargas en vapor de sodio a baja presión.

La producción de descargas en vapor de sodio se vio retrasada con respecto a las descargas en mercurio debido a que el sodio es un elemento muy reactivo que tendía a degradar los tubos de vidrio en los cuales se contenía. No fue hasta que se desarrollaron recipientes de vidrio resistentes al sodio que pudieron desarrollarse descargas en vapor de sodio. A partir de 1930, el desarrollo de las lámparas incandescentes obstaculizó el desarrollo de las lámparas de descarga pues representaba una competencia desleal y fue hasta 1960 cuando sucesivas mejoras en la eficacia de las lámparas de descarga despertaron un nuevo interés en ellas.

En la figura 2 se muestran los progresos en la eficiencia luminosa de varios tipos de lámparas a lo largo del siglo, para las lámparas de descarga no se consideran las pérdidas en el balastro. En esta figura se observa los enormes progresos que han tenido las lámparas de descarga con respecto a las lámparas incandescentes.

Figura 2. **Progresos de las eficiencias luminosas de varios tipos de lámparas**



Fuente: PONCE, Mario. *Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E*. p. 1-6.

En la gráfica anterior se puede notar que la eficiencia de las lámparas incandescentes es inferior en comparación con las otras tecnologías, y que su evolución a través de los años ha sido mínima. Las lámparas de mercurio, fluorescentes y sodio de baja presión fueron desarrolladas en períodos de tiempo muy cercanos pero la más eficiente y con mayor evolución ha sido la lámpara de sodio de baja presión. Las lámparas de tungsteno y sodio de alta presión fueron diseñados en períodos posteriores, la tecnología del tungsteno presenta poco desarrollo por la baja eficiencia en comparación con la tecnología de sodio de alta presión.

1.5.2. Estados de la descarga en gases

El encendido involucra el paso del gas de llenado del estado sólido-gaseoso a la formación del plasma, en el cual el gas se vuelve conductor y permite el flujo de electrones estableciendo la descarga eléctrica. El primer estado importante en el proceso de encendido es la ruptura de la rigidez dieléctrica del gas de llenado, la cual solo puede ser alcanzada cuando se han cumplido las condiciones de campo eléctrico, tiempo de aplicación del campo e intensidad adecuadas. El proceso de encendido puede ser comprendido analizando la descarga entre dos placas paralelas planas, el mismo se ilustra con detalle en la figura 3.

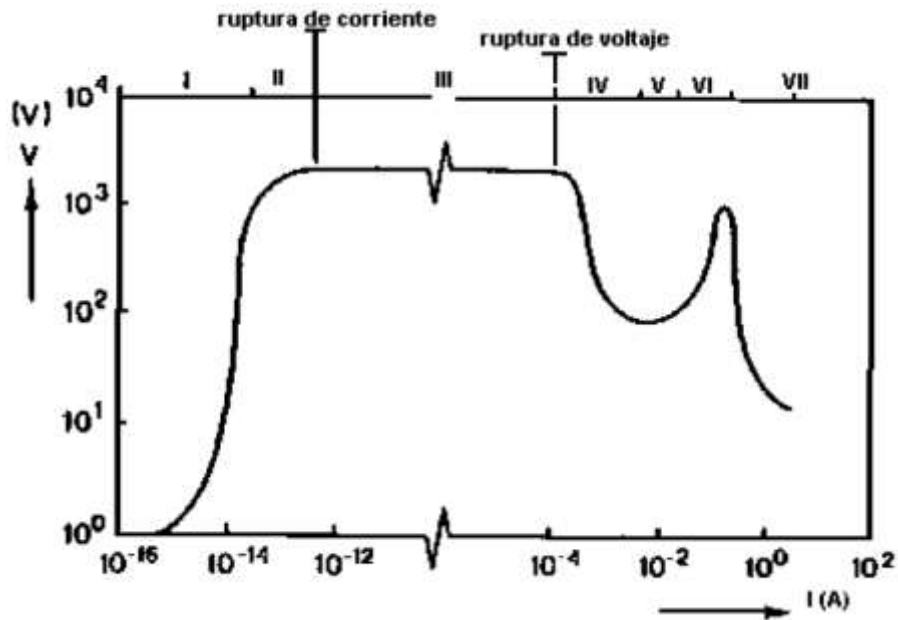
Una corriente intermitente muy pequeña fluye entre las placas cuando un voltaje relativamente bajo es aplicado. Son los llamados electrones primarios debidos a la radiación liberada por el efecto fotoeléctrico o por radiación cósmica del ánodo al cátodo. Para liberar el valor promedio de esta corriente, el voltaje aplicado a las placas debe incrementarse.

Esta primer etapa se conoce como región Geiger (I) los electrones primarios son acelerados en el campo eléctrico homogéneo entre las placas. El valor de la corriente promedio se determina por el número de electrones primarios generados por segundo así como por la energía que adquieren los electrones en el campo eléctrico.

En la región Townsend (II) la corriente sigue en forma intermitente, pero el valor promedio de incrementa en gran medida ante ligeros incrementos de voltaje. En el punto de ruptura de la corriente, la descarga se vuelve auto sostenido (III). El voltaje cambia ligeramente si, después de la ruptura de corriente, la corriente se incrementa hasta el punto donde la ruptura de voltaje ocurre. A partir de este punto entra en la descarga luminosa subnormal (IV) donde se observa una caída de voltaje substancial.

Al persistir la corriente elevada, se presenta la descarga luminosa normal (V), donde el voltaje permanece casi constante. Al incrementarse aún más la corriente, la descarga luminosa normal se convierte en una descarga luminosa anormal (VI), donde el voltaje vuelve a incrementarse. La transición de la región (VI) a la (VII), en la cual el voltaje cae considerablemente, solo es posible si el cátodo del cual parte la descarga es calentado para que tenga lugar la emisión de electrones por efecto termoiónico.

Figura 3. **Característica corriente-voltaje de la descarga entre dos placas paralelas**



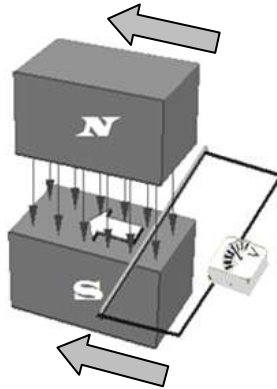
Fuente: PONCE, Mario. *Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E*. p. 1-12.

En resumen, durante el proceso de encendido la descarga pasa a través de una sucesión de estados, de los cuales los más importantes son: la ruptura de corriente, la ruptura de voltaje y la transición de luminiscencia a arco.

1.6. Inducción electromagnética

Es el fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz, f.e.m. o voltaje, en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable en el tiempo, o también en un medio móvil respecto a un campo magnético estático. Por tal motivo, cuando dicho cuerpo es un conductor, se produce una corriente inducida, figura 4.

Figura 4. **Generación de un voltaje inducido moviendo un conductor por un campo magnético**



Fuente: Boylestad. *Análisis introductorio de circuitos*. p. 435.

Este fenómeno fue descubierto por Michael Faraday, quien lo expresó indicando que la magnitud del voltaje inducido es proporcional a la variación del flujo magnético, esto se conoce como Ley de Faraday.

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

Ecuación 3. Ley de Faraday.

En donde e es el voltaje inducido (en voltios) y $\frac{d\phi}{dt}$ es el cambio instantáneo en el flujo (en webers).

Por otra parte, Heinrich Lenz comprobó que la corriente debida a la f.e.m. inducida se opone al cambio de flujo magnético, de forma tal que la corriente tiende a mantener el flujo. Esto es válido tanto para el caso en que la intensidad del flujo varíe, o que el cuerpo conductor se mueva respecto de él.

2. BALASTROS PARA LÁMPARAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

2.1. Generalidades sobre balastos

Los balastos o reactancias, son dispositivos empleados para limitar y estabilizar la corriente de arco de las lámparas. En ocasiones se utilizan también para generar las tensiones necesarias para el encendido de las lámparas, ya sean solos o en combinación con arrancadores o condensadores. Los balastos son en sí mismos impedancias, por lo que teóricamente podría haber de varios tipos:

- Inductivas
- Resistencias o
- Combinación entre ellas

Sin embargo, en la práctica se utilizan casi en exclusividad los balastos de tipo inductivo y en algunos casos los inductivo-capacitivos. Los balastos resistivos no se utilizan debido a las elevadas pérdidas en forma de calor que ocasionarían y los capacitivos por deformar grandemente la forma de onda de la corriente de lámpara y dar por ello baja potencia en la misma.

Como complemento a estos tipos enumerados están los balastos electrónicos, que combinan en sí mismos el sistema de encendido, compensación y regulación de corriente en la lámpara consiguiéndose consumos menores de potencia.

2.1.1. Función de un balastro

Los balastos son uno de los principales componentes de las lámparas, estos elementos cumplen múltiples funciones, de las cuales las más importantes son las siguientes:

- Proporcionar una tensión suficientemente elevada para encender la lámpara.
- Limitar la corriente de descarga
- Proporcionar una señal alterna y simétrica

Existen dos tipos de balastos: los balastos electromagnéticos y los electrónicos y cada uno de ellos realiza las funciones mencionadas anteriormente de forma diferente. En el caso de los balastos electrónicos, se usa un tanque resonante en paralelo con la lámpara el cual provee la tensión necesaria para que la lámpara logre encender.

Balastos electrónicos vs electromagnéticos

Actualmente se optan los balastos electrónicos debido a las ventajas que presentan en comparación a los balastos electromagnéticos. A continuación se realiza una comparación entre estos tipos de balastos y los principales criterios para hacer esta comparación son los siguientes:

- Tipo de alimentación al balastro (con AC o DC)
- Capacidad de corrección del factor potencia (alto FP o bajo FP)
- Capacidad de implementar un control de intensidad luminosa
- Frecuencia de trabajo
- Arranque de la lámpara

Las características de los balastros electromagnéticos son los siguientes:

- Se alimentan con corriente alterna
- Pueden ser de alto o bajo factor de potencia (la corrección del factor de potencia la realizan por medio de capacitores).
- No permiten un control de intensidad luminosa
- Operan a frecuencia fija de 60 Hz
- Son pesados y voluminosos
- Producen ruido audible (zumban)
- No regulan las variaciones del voltaje de alimentación
- Son económicos

Las características de los balastros electrónicos son:

- En general, se alimentan con DC por lo que, si se alimentan de tensión de línea, requieren una etapa de rectificación y filtrado.
- Pueden ser de alto o bajo factor de potencia (la corrección del factor de potencia se puede realizar por medios activos, pasivos o híbridos).
- Permiten el control de intensidad luminosa
- Trabajan en alta frecuencia (>25 kHz) y lo pueden hacer a frecuencia fija o variable.
- Son más ligeros y ocupan menos espacio que los electromagnéticos
- Pueden trabajar en lazo cerrado regulando la intensidad luminosa ante variaciones de la tensión de alimentación, envejecimiento y variaciones de temperatura.
- Generalmente son más costosos que los electromagnéticos

En general, se observa que los balastos electrónicos son mucho más versátiles que los electromagnéticos, ya que ofrecen más beneficios y además, mejoran el manejo de las lámparas por trabajar en alta frecuencia y en lámparas de inducción esta es una característica importante, por tal motivo, para lámparas de inducción electromagnética no se utilizan balastos electromagnéticos sino solamente balastos electrónicos. Sin embargo, la principal desventaja de un balastro electrónico es el precio, pero esta desventaja se ve amortiguada por los beneficios adicionales que ofrece.

2.1.2. Requisitos que deben cumplir los balastos electrónicos

Algunos de los requisitos más importantes que deben de cumplir los balastos para lámparas de inducción electromagnética son los siguientes:

- Factor de potencia (FP). Actualmente no existe una norma que regule este parámetro. Pues las normas regulan la distorsión armónica, sin embargo; se recomienda que el factor de potencia sea al menos del 90 %.
- Distorsión armónica total en la línea (DAT). Actualmente, en Guatemala no existe una norma que regule este parámetro, sin embargo; en Europa se tiene la norma EN 61000-3-2 (IEC 1000-3-2), esta norma regula los límites máximos de los armónicos inyectados por equipo eléctrico y electrónico a la red eléctrica. Esta norma clasifica a los equipos de iluminación dentro de la clase C y establece que los armónicos inyectados a la red no deben exceder los límites especificados en la tabla V.

Lamentablemente, esta norma sólo es válida para equipos alimentados desde 220 VAC, que es la tensión Europea, pero puede tomarse como referencia para los balastos electrónicos de las lámparas de inducción, los cuales tienen la ventaja de ser multivoltaje con un rango de 85 a 277 VAC.

Tabla V. **Límites de armónicos de corriente para equipos clase C impuestos por la norma IEC 1000-3-2**

Orden de armónico	Máxima corriente armónica permisible expresada como un porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental
n	%
2	2
3	30·FP*
5	10
7	7
9	5
11 ≤ n ≤ 39 (sólo armónicos impares)	3
* FP factor de potencia	

Fuente: Norma IEC 1000-3-2.

2.2. Balastro electrónico o controlador

En el caso de las fuentes luminosas sin electrodos, como es el caso de la lámpara de inducción, el equipo que controla la señal eléctrica necesaria para encender la lámpara se llama controlador, en lugar de balastro, ya que al no tener electrodos, el funcionamiento es distinto, al no ser necesario producir un arco entre los electrodos al encender. Además, los balastos convencionales tienen pérdidas de un 25 %, mientras que los balastos electrónicos o controladores tienen 8 % solamente.

Se entiende que un balastro tiene como funciones principales:

- Generar un alto voltaje inicial para provocar un arco eléctrico entre los cátodos de la lámpara.
- Controlar la corriente de dicho arco

Mientras que el aparato electrónico que controla a una lámpara de inducción sin cátodos lo que hace es generar una señal de alta frecuencia para ionizar la lámpara de inducción sin cátodos. Por lo tanto, este aparato electrónico no se puede clasificar como balastro, más bien se le conoce como generador de potencia de alta frecuencia, aunque se le llama también balastro electrónico para diferenciarlo del balastro convencional.

Figura 5. **Controlador de lámpara de inducción sin electrodos**

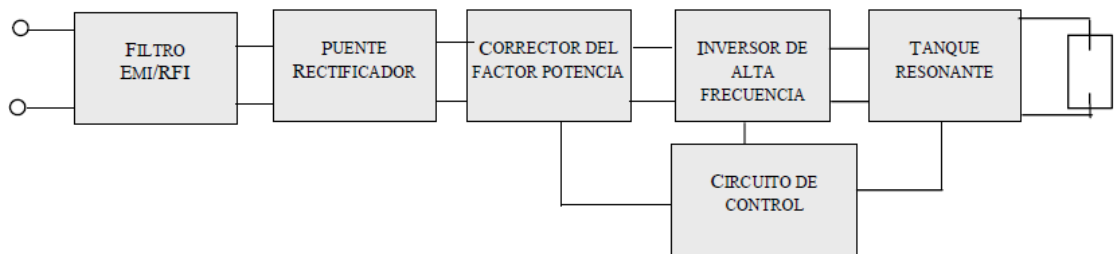


Fuente: Laboratorio de Máquinas Eléctricas, T-1, Facultad de Ingeniería.

2.2.1. Partes de un balastro electrónico

La electrónica de potencia ha experimentado un crecimiento sostenido, en el área de la iluminación no se ha quedado atrás y el mayor impacto del desarrollo de la electrónica de potencia lo ha tenido en los balastros electrónicos y la mayoría de estos cuenta con las siguientes partes:

Figura 6. Partes de un balastro electrónico



Fuente: PONCE, Mario. *Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E*. p. 2-6.

El primer bloque corresponde a un filtro pasa bajos, que se encarga de eliminar el ruido de alta frecuencia donde el inversor y la lámpara inyectan en la línea de distribución. El segundo bloque se encarga de rectificar la señal de línea y convertirla en corriente continua (CC). El corrector de factor de potencia se encarga de forzar a la corriente de alimentación a seguir el voltaje de línea, de tal manera que, las etapas subsiguientes se comporten como una resistencia. Además, se encarga de entregar una componente de DC a la siguiente etapa.

El inversor de alta frecuencia convierte la señal de DC producida por el bloque anterior, en una señal cuadrada alterna de alta frecuencia. Esta señal cuadrada es filtrada y acondicionada para que a la lámpara se aplique una señal sinusoidal y la potencia nominal de la lámpara.

Finalmente, el bloque del circuito de control produce las señales de control para los interruptores de potencia del corrector de factor de potencia y del inversor de alta frecuencia y de ser necesario, controlar el nivel de luz producido por la lámpara.

3. LÁMPARAS FLUORESCENTES CON ACOPLAMIENTO INDUCTIVO O LÁMPARAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

3.1. Introducción

La lámpara de Inducción Electromagnética, también llamada IEM, es básicamente una lámpara fluorescente sin electrodos con electroimanes envueltos alrededor de una parte del tubo, o también insertado dentro de la lámpara. Esta tecnología no es nada nueva, este tipo de lámpara opera bajo los principios fundamentales de la inducción electromagnética y la descarga eléctrica en gas para crear luz. Al eliminar los electrodos y filamentos, da por resultado una lámpara con una prolongada vida.

En otros tipos de lámparas, el filamento o el electrodo es el elemento fundamental para fuentes comunes de luz y la vida útil depende de la vida útil del filamento o de los electrodos utilizados.

La vida útil de la lámpara de IEM (sin electrodos) es ilimitada por no existir elementos que se desgasten, por lo que la vida útil puede prolongarse de manera indefinida. La vida útil de las lámparas de IEM es sólo determinada por el nivel de calidad, el diseño de los circuitos y demás componentes electrónicos.

3.2. Ventajas para aplicaciones en iluminación

A continuación se enuncian algunos de los beneficios de las lámparas de inducción sin electrodos, aunque algunos de ellos aun necesitan desarrollos considerables.

- En cuanto al encendido y reencendido instantáneo, el beneficio de este tipo de lámparas es mayor con respecto a las fluorescentes.
- Son más convenientes para realizar un control de intensidad luminosa
- Al no tener electrodos, no existirán pérdidas en los electrodos. La eficiencia en las lámparas fluorescentes disminuye por causa de las perdidas en los electrodos.
- Por el buen diseño de la lámpara se logra la condición de producción óptima de luz ultravioleta, gracias a este beneficio se obtiene la mayor cantidad de luz visible.
- Se obtiene mayor eficiencia
- Son excelentes para las aplicaciones en donde el mantenimiento es a largo plazo, de alto costo o de difícil acceso.
- Tienen mucho mayor duración, de 60 000 a 100 000 horas según sea el modelo.

3.3. Principios de funcionamiento

Existen diferentes formas de obtener luz mediante la descarga en radio frecuencia (RF) sin electrodos. A continuación se describe una clasificación práctica para la descarga sin electrodos en RF la cual se divide en dos diferentes maneras para crear plasma, que corresponden a diferentes tipos de interacción de los campos electromagnéticos con el plasma limitado y a diferentes tipos de descarga en RF, estas son: descarga capacitiva e inductiva.

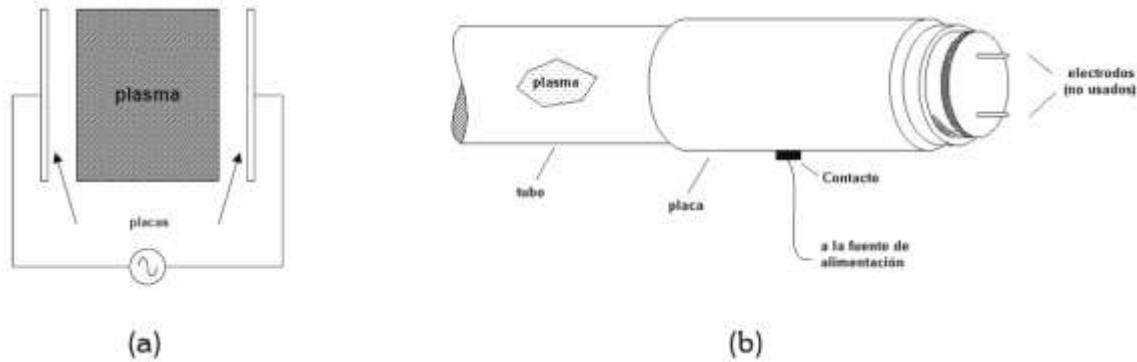
3.3.1. Descarga capacitiva o tipo E

La descarga capacitiva en RF también conocida como tipo E, es una forma simple de descarga tipo E, puede realizarse en el tubo de descarga entre dos placas de un capacitor colocadas dentro o fuera del tubo como se muestra en la figura 5. El camino de la corriente en el plasma por descarga capacitiva se cierra por medio de corrientes de desplazamiento en la placa del electrodo de RF. Esta descarga opera a una presión de gas considerablemente más baja que la presión atmosférica y es excitada por un campo eléctrico E con una frecuencia por debajo de 1 GHz y una longitud de onda λ mucho más grande que la longitud de onda de la descarga.

Como los electrones se colocan en las placas, la impedancia entre las mismas es mucho más grande que la impedancia del plasma. Por tal motivo, existe una caída de tensión en las placas y la impedancia de las placas controla la corriente de descarga. Cuando se logra la ruptura, la corriente de desplazamiento fluye a través de la capacitancia de la pared del tubo, de las placas fluctuantes de DC y de las placas de AC fluctuantes al borde del plasma.

Los inevitables valores bajos de esta capacitancia significan que es difícil disipar mucha potencia en una descarga E, excepto a altas frecuencias cuando las reactancias de estos capacitores se vuelven pequeñas. A bajas frecuencias la eficiencia es baja debido a las pérdidas en potencia en las placas no luminosas asociadas con los electrodos externos. A altas frecuencias la eficiencia de la descarga E del gas de mercurio en baja presión puede aproximarse a las columnas de DC positivas.

Figura 7. **a) Esquemático de una descarga capacitiva en RF**
b) Lámpara con acoplamiento capacitivo en RF



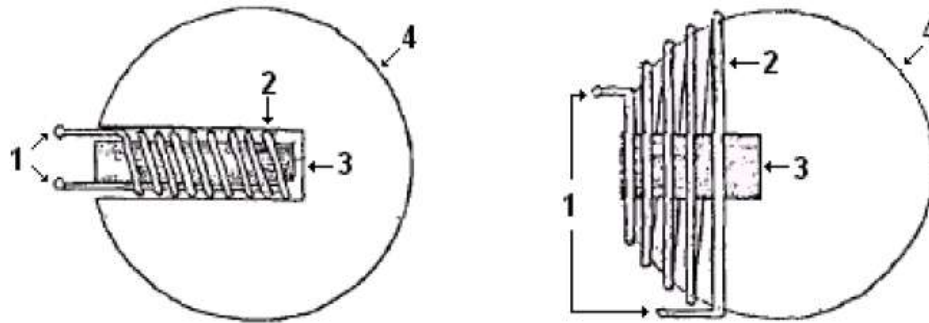
Fuente: GUERRERO, Irene. *Balastro electrónico para lámpara fluorescente*. p. 13.

Si bien las descargas E son extremadamente estables y pueden ser usadas en formas muy útiles, los circuitos que se necesitan en alta frecuencia no son lo suficientemente eficientes o económicos para habilitar una lámpara comercial en un futuro previsible. Sin embargo, las descargas tipo E para iluminación aparecen en la literatura de patentes, operando en el ancho de banda de los 915 MHz, que es la banda industrial científica y médica permitida en los Estados Unidos para propósitos de no comunicación.

3.3.2. Descarga inductiva o tipo H

En una descarga tipo H o inductiva la corriente de descarga es cerrada dentro del plasma sin formar placas. El campo eléctrico que mantiene la descarga es inducido por una corriente de RF fluyendo a través de una espira de inducción fuera o dentro del plasma.

Figura 8. Lámpara de inducción en RF



Fuente: GUERRERO, Irene. *Balastro electrónico para lámpara fluorescente*. p. 14.

Una descarga tipo H maneja un campo azimutal, el cual resulta de cambiar el flujo de campo magnético de un arrollamiento. En términos eléctricos, el plasma forma un secundario de una simple vuelta en el enrollamiento de excitación, el cual es conectado vía una impedancia que iguala a la de la fuente de poder. Tales descargas son conocidas como descargas acopladas inductivamente, lámparas de inducción, campo eléctrico solenoidal o de libre divergencia.

Para una descarga sostenida, el campo eléctrico azimutal resultante del cambio de flujo magnético en el enrollamiento de excitación debe ser lo suficientemente largo para igualar el campo de mantenimiento del plasma.

A una frecuencia angular ω , el flujo cambiante es proporcional al producto de la frecuencia angular por la corriente del primario y así mismo de la misma frecuencia angular por la corriente del secundario (plasma).

Para mantener la descarga en bajas frecuencias, se requiere de una corriente grande y por lo tanto se requiere una potencia del secundario grande, debido a que el campo de mantenimiento es proporcional a la descarga. La eficiencia en una descarga H se define por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_p}{P_p + P_c}$$

Ecuación 4. Eficiencia en una descarga H.

En donde P_p es la potencia depositada en el plasma y P_c es la potencia disipada en el conductor

La eficiencia de la transferencia de potencia depende de muchos factores, los cuales puede ser:

- Gas de llenado
- La presión del gas
- La topología y geometría de la descarga
- La frecuencia de conmutación
- La construcción del inductor

A diferencia de la descarga capacitiva, en donde la fracción de potencia es transferida a las paredes del plasma con incrementos de la potencia, en la descarga inductiva, la eficiencia usualmente crece con la potencia. Por lo tanto, el mayor beneficio del acoplamiento inductivo es el alto nivel de potencia que puede manejar.

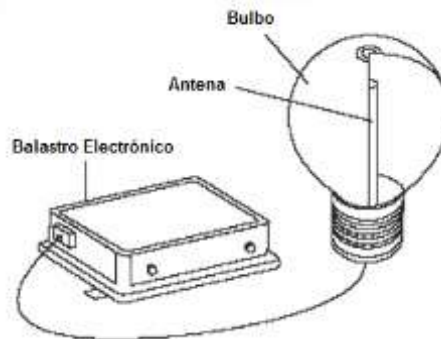
3.4. Clasificación de lámparas de inducción

Existen dos tipos de lámparas de inducción electromagnética, las de inductor interno sin electrodos funcionan a una frecuencia de operación de 2,65 MHz y las de inductor externo sin electrodos funcionan a una frecuencia de operación de 2,5 kHz.

3.4.1. Lámpara de inducción electromagnética interna

Está compuesta por un bulbo, una antena (bobina de inducción) y un balastro electrónico (alimentación) como lo muestra la figura 9.

Figura 9. Partes de una lámpara de inducción electromagnética interna



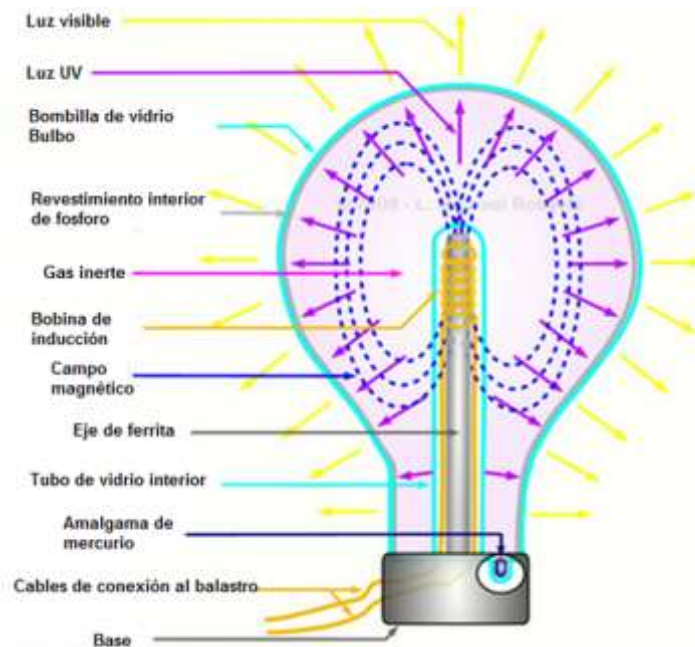
Fuente: <http://www.gescomchile.com>. Consulta: enero de 2013.

Este tipo de lámpara es una bombilla de vidrio con forma de foco (bulbo), que tiene un tubo con una cavidad central, está recubierta con fósforo en el interior, llena de gas inerte y un sedimento de amalgama (una forma sólida de mercurio).

La bobina de inducción se enrolla en un eje de ferrita (antena) el cual se inserta en la cavidad central del tubo. La antena es excitada por energía de alta frecuencia proporcionada por un balastro electrónico externo, este balastro genera un voltaje constante de 2,65 MHz. Al excitarse la antena, crea un fuerte campo magnético estático dentro del bulbo que penetra en el vidrio y excita los átomos de mercurio.

Cuando los átomos de mercurio reaccionan, la energía obtenida anteriormente se irradia en forma de 253,7 nm de radiación ultravioleta, cumpliendo con el proceso de transformación de la energía. Entonces, el fósforo que posee el bulbo en la superficie interna, será estimulado lo que permitirá emitir una luz visible.

Figura 10. **Lámpara de inducción electromagnética interna**

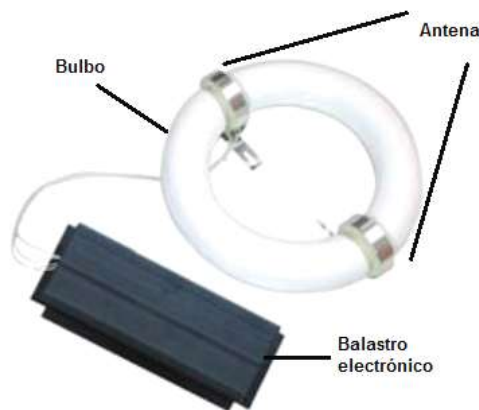


Fuente: <http://www.eneri-source.wikispaces.com/Induction>. Consulta: enero de 2013.

3.4.2. Lámpara de inducción electromagnética externa

Está compuesta por un bulbo, una antena de doble poder (bobinas de inducción) y un balastro electrónico (alimentación) como lo muestra la figura 11.

Figura 11. Partes de una lámpara de inducción electromagnética externa

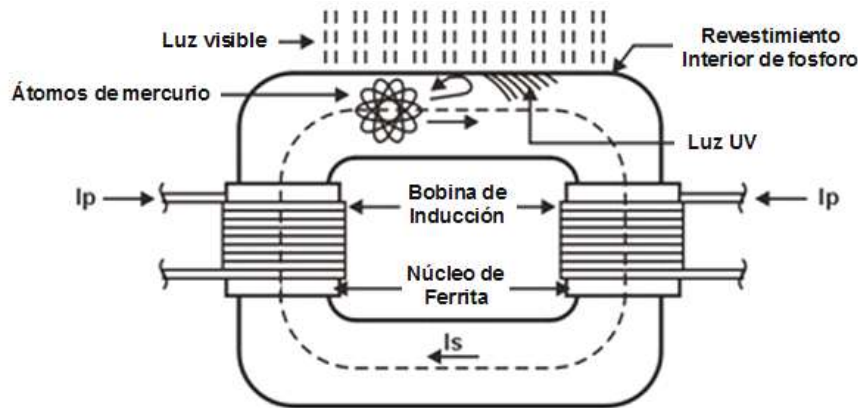


Fuente: <http://www.gescomchile.com>. Consulta: enero de 2013.

En las lámparas de inductor externo, la energía se genera en el balastro electrónico y se envía a través de cables, que se enrollan en una bobina alrededor de un núcleo de ferrita, creando un potente imán. Las bobinas de inducción producen un campo magnético muy fuerte que viaja a través del vidrio y genera la aceleración de electrones libres. Estos electrones libres excitan a los átomos de mercurio, que se proporcionan por un sedimento de amalgama (una forma sólida de mercurio). Cuando los átomos de mercurio reaccionan, la energía obtenida anteriormente, como en la lámpara de inducción interna, se irradia en forma de 253,7 nm de radiación ultravioleta, cumpliendo con el proceso de transformación de la energía.

La luz ultravioleta (UV) se convierte en luz visible por el revestimiento de fósforo que posee el bulbo en la superficie interna. Este sistema puede considerarse como un tipo de transformador donde el inductor es el devanado primario, mientras que los átomos de mercurio dentro del tubo forman un segundo devanado de una sola vuelta.

Figura 12. **Lámpara de inducción electromagnética externa**



Fuente: <http://www.eneri-source.com/Induction>. Consulta: enero de 2013.

La lámpara de inducción electromagnética externa tiene la ventaja de que el calor generado por los conjuntos de bobinas de inducción es externo al tubo y puede ser fácilmente disipado por convección en el aire, o de la conducción en el accesorio. El diseño del inductor externo se presta a mayores lámparas de potencia de salida que puede ser rectangular o en forma de rosquilla. En la lámpara inducción electromagnética interna, el calor generado por la bobina de inducción se emite en el interior del cuerpo de la lámpara y se debe enfriar por conducción a un disipador de calor en la base de la lámpara, y por radiación a través de las paredes de cristal.

La lámpara IEM interna tiende a tener una vida útil más corta que los de tipo inductor externo debido a mayores temperaturas en el interior. El tipo de inductor interno se parece más a una bombilla convencional, la lámpara IEM externa puede ser más atractiva en algunas aplicaciones.

3.5. Interferencia electromagnética y seguridad

A continuación se describirán brevemente algunos aspectos relevantes correspondientes a la interferencia electromagnética de las lámparas en RF sin electrodos y de la seguridad para las personas al exponerse al campo generado por este tipo de lámparas.

3.5.1. Interferencia electromagnética

Desde que las fuentes para lámparas sin electrodos han operado dentro de la banda de radio comunicaciones, se ha tenido gran preocupación por evitar la interferencia que éstas ocasionan.

A continuación se describen dos tipos de interferencia: radiada y conducida.

3.5.1.1. Interferencia radiada

La interferencia radiada es el resultado de campos electromagnéticos generados por el plasma, el arrollamiento y la circuitería. El circuito puede ser protegido con el uso de una cerca guía, pero la conductividad requerida significa que no es posible proteger a la lámpara sin pérdidas de luz.

La banda industrial, científica y médica (ISM) a 13,56, 27,12 y 40,68 MHz respectivamente, provee de una secuencia útil, la cual trata con los problemas de la fundamental, así como con los armónicos, usando la fundamental que, desde el punto de vista electrónico, es práctica. La banda ISM tiene un ancho de banda permitido muy pequeño, haciendo uso obligatorio del control por cristal. Esto significa un incremento en el costo y en la complejidad del circuito.

Lograr una disminución en la interferencia radiada no es imposible. Uno de estos caminos es rodear a la lámpara con vueltas guiadas. Otra forma es usar un núcleo excitador, el cual cancela la componente dipolar a cierta distancia, dejando sólo la señal cuadripolar que es mucho más débil, aunque esto no aclara que tan efectivo puede ser.

La interferencia radiada puede ser reducida de la siguiente manera:

- Reduciendo la emisión radiada al nivel de la tablilla del circuito. Brevemente, las proximidades apropiadas para tablillas de una sola cara son: a) distribuir la potencia y la tierra por trazos largos, corriendo de lado a lado b) abriendo áreas con tierra plana y c) si es posible, dedicar un lado de la tablilla para la tierra.
- Reduciendo las corrientes de la fuente a las más bajas posibles, especialmente a bajas frecuencias.
- Reduciendo la impedancia de conexión del circuito (esto hace necesario caminos cortos, buen aterrizado).
- Seleccionar componentes con cuidado, saber las características de la lámpara IEM y de las partes.
- Guardar caminos cortos para minimizar la inductancia del cableado y el área de vuelta.

3.5.1.2. Interferencia conducida

Resulta de una corriente de alta frecuencia fluyendo de la fuente principal, de donde ésta es radiada hacia el ambiente. Es importante la protección contra la interferencia conducida de modo diferencial mediante el uso de filtros de bloqueo en la parte principal de la fuente de alimentación.

El modo común de interferencia conducida no puede ser removido ágilmente por medio del filtrado, porque esto resulta del flujo de las corrientes de RF de las partes de potencial alto de la bobina de excitación a través de la capacitancia de RF a tierra, de donde ésta retorna al cero de RF del circuito.

La interferencia conducida puede ser reducida de la siguiente manera:

- Disminuyendo la distancia causada por la bobina parásita: la reducción de todas las inductancias parásitas se puede obtener asociando trazos positivos y de retorno. Los capacitores de filtrado deben de tener resistencia serie e inductancia baja.
- Reduciendo la capacitancia de acoplamiento parásita: esta reducción se puede obtener por medio del uso de protecciones de RF, localizadas en los lugares en donde el acoplamiento capacitivo es importante debido a la proximidad a la tierra de RF, por ejemplo; interruptores, diodos, transformadores e inductores.
- Optimizar el esquema de circuito impreso: un recurso efectivo para la eliminación de problemas de IEM en los circuitos de los balastros es minimizar el área del circuito que lleva las corrientes de ruido de alta frecuencia. Conceptualmente, esto significa:

- Colocar los componentes del circuito de alta frecuencia tan juntos como sea posible.
- Dirigir los trazos llevando las corrientes de alta frecuencia tan estrechamente como sea posible con su retorno.
- Los componentes sensibles a EMI deben tener una orientación tal, de modo que se minimice el acoplamiento entre ellos el éxito de las lámparas sin electrodos depende de varios factores como son el costo, la eficacia y los niveles de EMI entre otras cosas. Existen varias técnicas y métodos de supresión de EMI como las que se nombraron anteriormente. Con la combinación de los mismos aplicados a lámparas sin electrodos se logrará la aprobación de los estándares internacionales.

3.5.2. Seguridad

La seguridad de la gente que es expuesta al campo electromagnético de las lámparas sin electrodos es un aspecto importante a considerar. En 1998 el Comité Internacional de Radiación sin Ionización (INIRC) publicó una guía concerniente a las exposiciones al campo electromagnético (EM). Asimismo, se proporcionó por parte de la Mesa de Protección Radiológica Nacional (NRPB), Inglaterra un sumario con excelente información al respecto.

Los niveles recomendados no deben de exceder 1 W/m^2 en un rango de 10 a 400 MHz para áreas de acceso público que no están controladas. A bajas frecuencias los niveles se incrementan progresivamente debido a que la longitud de onda llega a ser significativamente más grande que las dimensiones del cuerpo humano. Lamentablemente, no existe un estándar internacional que regule la seguridad EM, aunque están haciéndose esfuerzos para establecer un estándar Europeo, aunque esto tal vez lleve un largo tiempo para lograrse.

Con un simple cálculo, es relativamente fácil garantizar que las lámparas sin electrodos operen dentro de los límites recomendados por la INIRC. Por ejemplo, se tiene una lámpara de 10 W con un diámetro de 100 mm, si los 10 W de entrada fueran radiados con una potencia de RF isotrópica, la densidad de potencia en la superficie de la lámpara sería cerca de 30 W/m^2 , mientras que el nivel a 2,56 MHz está cerca de los 18 W/m^2 .

Por lo tanto, las recomendaciones de seguridad no deben de representar un problema para el desarrollo de lámparas de descarga sin electrodos a frecuencias altas.

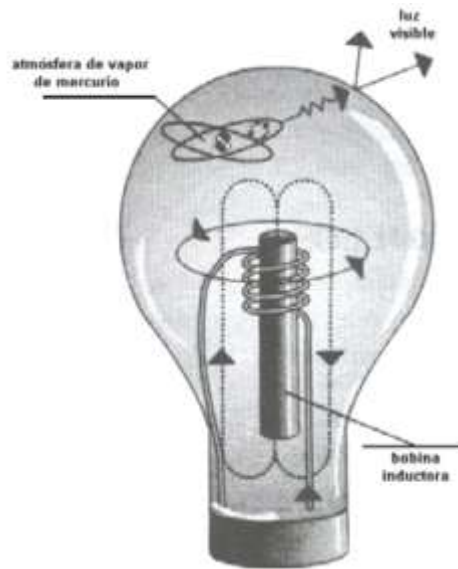
3.6. Desarrollos comerciales

Existen varias compañías que han producido varias fuentes de luz de radio frecuencias sin electrodos. Las lámparas sin electrodos han tenido un desarrollo importante en los últimos años, en donde la principal finalidad de éstas es incrementar su vida útil.

3.6.1. Lámpara QL de Philips

Uno de los desarrollos comerciales es la lámpara de inducción QL de Philips. En lugar de los electrodos, la lámpara cuenta con una bobina que se alimenta por un generador electrónico de alta frecuencia. La bobina induce en el plasma un campo eléctrico que es capaz de excitar a los átomos de mercurio produciéndose luz ultravioleta, que se convierte en luz visible debido al recubrimiento de la pared de la bombilla. La figura 12 muestra un esquema de la lámpara QL. La lámpara se introdujo al mercado en 1991 y opera a una frecuencia de 2,65 MHz, una potencia de 85 W y una eficiencia de 70 lm/W.

Figura 13. **Esquema de la lámpara de inducción QL de Philips**



Fuente: GUERRERO, Irene. *Balastro electrónico para lámpara fluorescente*. p. 19.

Ahora también se consigue en 55 y 165 W. En la figura 12 se muestra el modelo comercial QL de Philips.

Figura 14. **Modelo comercial de la lámpara de inducción QL de Philips**



Fuente: <http://www.qlcompany.com/es/cartera/lamparas/85-w>. Consulta: enero de 2013.

3.6.2. Lámpara W-OVT de W-Energy Lux

Estas lámparas están integradas con la más avanzada tecnología de poder electrónico, plasma y material magnético. Esto permite que este tipo de lámparas operen sin ningún electrodo, en lugar utilizan un campo magnético de alta frecuencia. Este funciona induciendo a los átomos de plasma con energía eléctrica, los cuales al pasar rápidamente una y otra vez por las paredes del tubo del vidrio de la lámpara, generan la luz eléctrica.

Figura 15. Lámpara de inducción W-OVT de W-Energy Lux



Fuente: Laboratorio de Máquinas Eléctricas, T-1, Facultad de Ingeniería.

A continuación se describen algunas características de esta lámpara:

- Disponible en 40, 60, 80, 100, 120 o 150 Watts
 - Controlador multivoltaje de 85 a 277 VAC
 - Reflector anodizado de aluminio de alta reflectancia
 - Lente de vidrio transparente templado diseñado para optimizar la distribución de la iluminación.

- Larga vida promedio: De 88 000 a 100 000 Horas, cerca de 20 años de vida con un uso de 4 000 horas por año.
- Alta eficiencia luminosa 70 - 80 Lm/W
- Alto índice de rendimiento de color (IRC) 90 %, alta resolución y color natural.
- Arranque rápido: ventaja especialmente con arranque con lámpara caliente, teniendo una ventaja obvia contra las lámparas de vapor de sodio de alta presión y de aditivos metálicos.
- Alto factor de potencia: mayor o igual a 0,90
- Alta frecuencia de operación: efecto de luz suave, sin parpadeos, protege a la vista, hace que los colores se vean más naturales, parecidos a la luz del sol.
- Bajo decaimiento de luminosidad: la luminancia se mantiene a un 70 % después de 60,000 horas, lo que asegura la salida estable de luz en la vida de la lámpara.
- Amplio rango de temperaturas de color: 2 700K a 6 500K dependiendo de la aplicación (5 000K Estándar).
- Potencia constante: la potencia varía menos de un 3 % con una variación del voltaje de entrada de +/-20 %, para asegurar una fuente constante de luz.
- THD menor o igual al 10 %

3.7. El problema del factor de potencia

Uno de los parámetros más importantes a considerar en cualquier equipo eléctrico o electrónico es el factor de potencia (FP). El factor de potencia es una cantidad adimensional que indica la relación entre la energía consumida con respecto a la solicitada.

Las compañías productoras de energía eléctrica recomiendan a los consumidores que sus equipos tengan un factor de potencia alto, pues de esta manera no solo hacen un uso más eficiente de la energía eléctrica, sino que se disminuyen las pérdidas en las líneas de distribución.

El factor de potencia de una carga se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente consumida por la carga. La potencia activa es la potencia promedio consumida por la carga y la potencia aparente es el producto entre los valores eficaces de corriente y voltaje entregados a la carga. En forma de ecuación:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{I_{rms} V_{rms}}$$

Ecuación 5. Factor de potencia.

Por lo general, la señal de voltaje que se aplica a equipos eléctricos y electrónicos es una señal de voltaje sinusoidal. Por lo tanto, aunque la forma de onda de corriente no sea sinusoidal, solamente la componente fundamental de corriente contribuirá a la potencia promedio o activa entregada a la carga. Con base en esta aseveración, la potencia promedio entregada a la carga será:

$$P = V_{rms1} I_{rms1} \cos\Phi_1$$

Ecuación 6. Potencia promedio.

Donde: I_{rms1} es el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente, Φ_1 es el ángulo de desfase entre I_{rms1} y V_{rms1} .

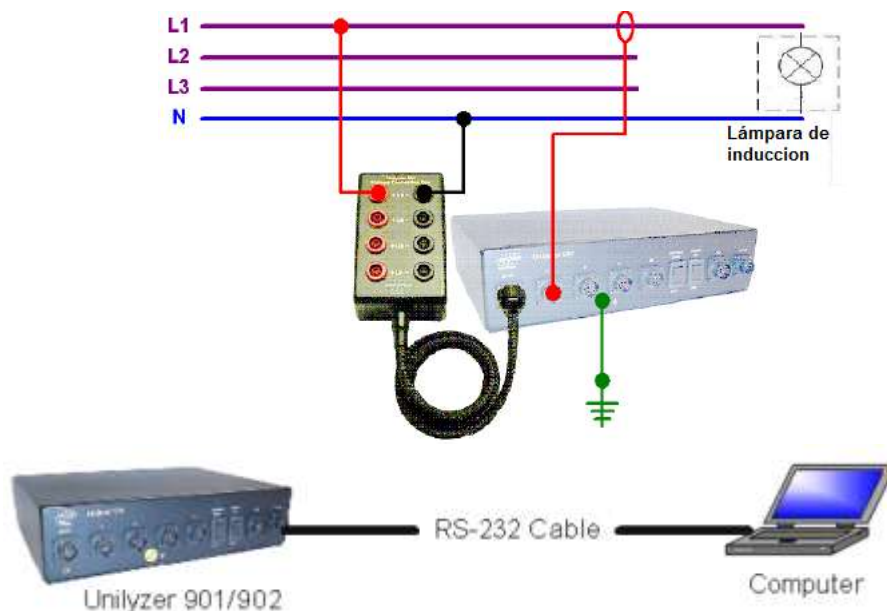
El factor de potencia puede verse afectado por dos fenómenos: la distorsión de la corriente, o bien, el desfaseamiento entre la señal de corriente y la de voltaje. En las lámparas de inducción electromagnética el factor de potencia no es un problema porque su valor es mayor o igual a 0,90.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Metodología

Se utilizó como muestra una lámpara de inducción W-OVT de W-Energy Lux y se midieron parámetros eléctricos (tensión, corriente, potencia, factor de potencia, THDi, THDv) y lumínicos (iluminancia). Para la medición de parámetros eléctricos se utilizó un analizador de redes Clase A marca Unipower AB modelo Unilyzer 901/902 y el programa de análisis y evaluación PQ Secure, en la configuración de medida presentada en la siguiente figura.

Figura 16. Unipower AB modelo Unilyzer 901/902



Fuente: UNIPOWER AB. Consulta: octubre de 2013.

El Unilyzer 901/902 es un instrumento de campo a prueba de polvo y resistente al agua (IP65), está diseñado para la medición y análisis de redes y calidad de la potencia. Junto al software PQ Secure forman el sistema PQ Secure para el monitoreo, análisis y evaluación de la red eléctrica. Este equipo brinda la capacidad de realizar mediciones de armónicos, *flicker*, transitorios y demás parámetros de calidad de potencia en un amplio ancho de banda utilizando sus transformadores de potencial capacitivos. Esto se realiza empleando la tecnología PQ Sensor que se integra al analizador de redes.

Por otra parte, para la medición de iluminancia se empleó un luxómetro marca AEMC modelo CA813, este equipo cuenta con trazabilidad al NIST de Estados Unidos.

Figura 17. Especificaciones luxómetro CA813

Especificaciones

MODELO	CA811	CA813*
MEDICIONES		
Escala	20pc, 200pc, 2000pc, 20kpc	20pc, 200pc, 2000pc, 20kpc
pc = plé-candela = lm/πie = 10.76 lux	20lux, 200lux, 2000lux, 20klux,	20lux, 200lux, 2000lux, 20klux, 200klux
Resolución	0,01pc ó 0,01lux	0,01pc ó 0,01lux
Sensor	Fotodiodo de silicio	Fotodiodo de silicio
Respuesta espectral	Curva fotóptica CIE	Curva fotóptica CIE
Precisión para una fuente de luz de 2856K	±3% de Lectura ± 10cts	±3% de Lectura ± 10cts
Frecuencia muestreo de display	2,5 veces por segundo, nominal	
GENERALES		
Pantalla	Pantalla LCD de 3½ dígitos	
Temperatura de Operación	32° a 122°F (0° a 50°C), <80% RH	
Temperatura de Almacenaje	-4° a 140°F (-20° a 60°C), 0 a 80% RH sin batería	
Polaridad	Automática	
Alimentación	9V Alkaline battery	
Indicación de Batería Baja	[- -] aparece cuando la tensión de la batería está baja	
Dimensiones	6,81 x 2,38 x 1,5" (173 x 60,5 x 38mm)	
Peso	Approx. 7,55 oz (214g) incluye batería	Approx. 7,9 oz (224g) incluye batería

*Nota: El Modelo CA813 tiene mayor sensibilidad (200klux) y posee una mejor respuesta espectral a fuentes de luz comunes.



Fuente: <http://www.aemc.com/products/index.asp>. Consulta: octubre de 2013.

A continuación se muestra la descripción y aplicaciones del luxómetro CA813.

- Descripción
 - Los luxómetros modelos CA813 son instrumentos portátiles, equipados con sensores ópticos diseñados para ofrecer la respuesta del ojo humano, esto hace de ellos instrumentos ideales para el análisis de iluminación. Estos instrumentos están diseñados para utilizarse con una sola mano y disponen de selección de unidad de medidas en lux o *foot candle*, pantalla LCD retro iluminado de 3 1/2 dígitos y función HOLD.

- Aplicaciones
 - Pruebas de iluminación en puestos de trabajo, oficinas, ambientes industriales, locales de pública concurrencia.

 - Pruebas de iluminación ambientales para sensores fotoeléctricos en archivos, museos y galerías de arte.

4.2. Procedimiento

A continuación se describen los detalles de las pruebas realizadas a la lámpara de inducción:

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería, edificio T-1 de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para esta tecnología no fue posible localizar un estándar internacional que brindará el procedimiento de prueba. Se tomaron mediciones de tensión, corriente, potencia, factor de potencia, THDi y THDv con el analizador de redes marca Unipower AB modelo Unilyzer 901/902. Antes de realizar las pruebas, la lámpara se sometió a un tiempo de estabilización de media hora conectándola a la tensión nominal de operación y a temperatura ambiente.

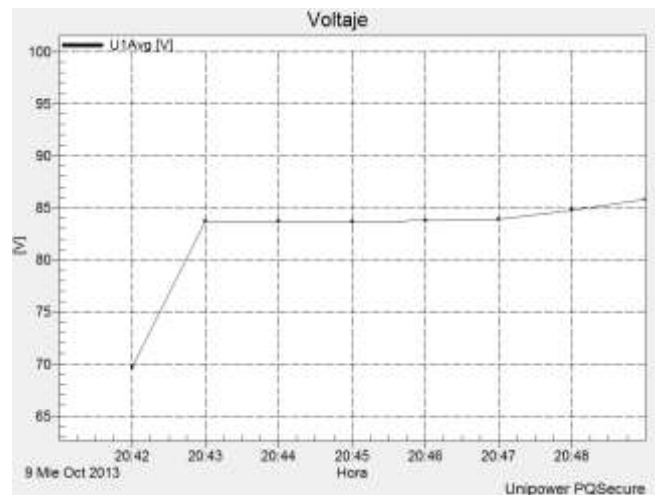
Para la muestra se hicieron variaciones de tensión y se monitoreo el comportamiento de los parámetros eléctricos conectando la lámpara a diferentes niveles de tensión, la lámpara se conectó a una fuente de voltaje monofásica a 85, 120 y 208 voltios de corriente alterna y se midió el nivel de iluminancia en lux a una altura de 1 metro del nivel del suelo para determinar si existía variación de la iluminancia cuando la lámpara se conecta en diferentes niveles de tensión.

Según el fabricante, la lámpara de inducción W-OVT de W-Energy Lux puede funcionar a un voltaje nominal de 85 a 277 VAC con una potencia nominal de 120 W, factor de potencia mayor o igual a 0,95 con un contenido de armónicas menor o igual al 10 %.

4.3. Mediciones: características técnicas de las lámparas, consumo de potencia y calidad de la potencia eléctrica

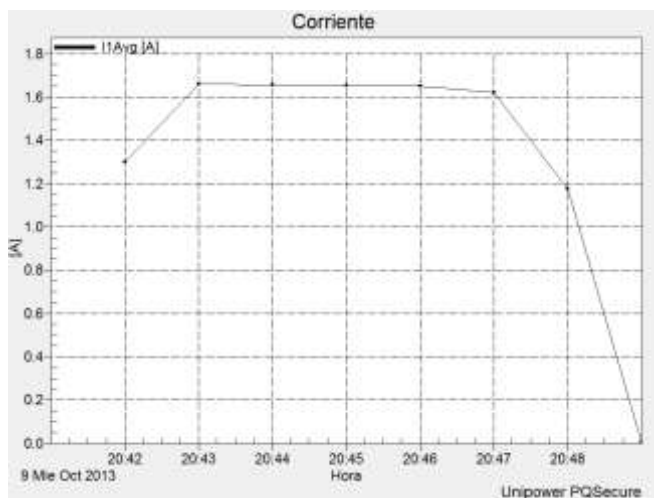
En las figuras siguientes se presentan los resultados y comportamiento de la lámpara conectada en diferentes niveles de voltaje de corriente alterna:

Figura 18. **Variación del voltaje respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



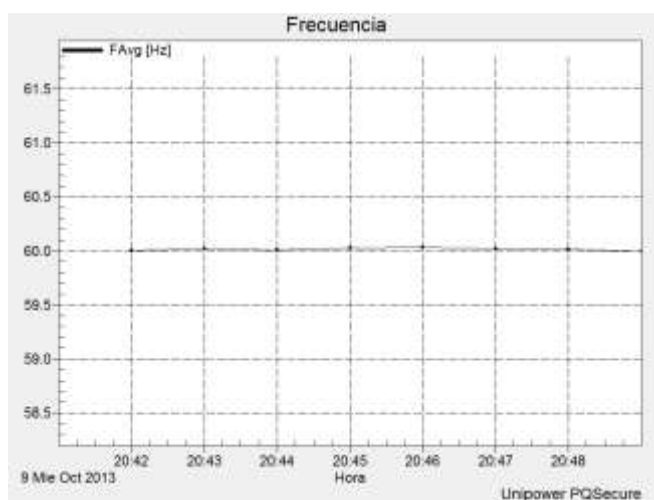
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 19. **Variación de la corriente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



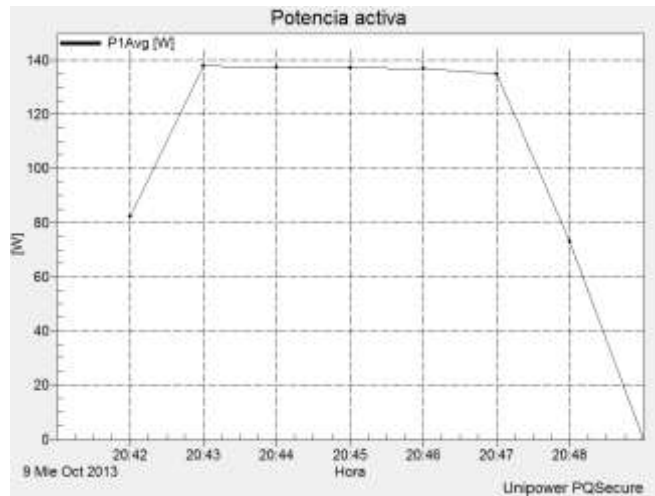
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 20. **Variación de la frecuencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



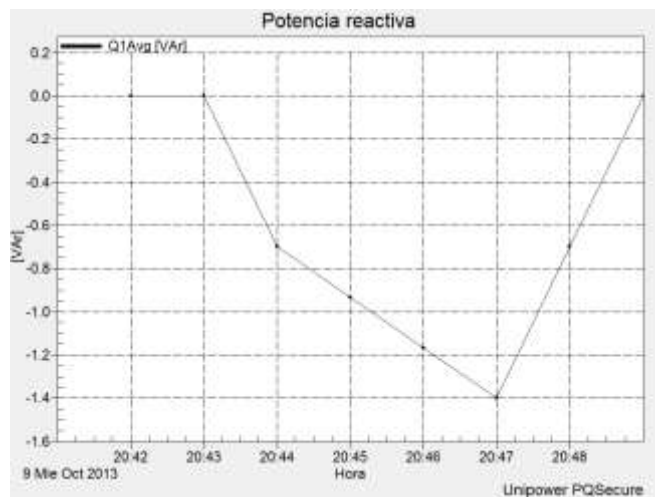
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 21. **Variación de la potencia activa respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



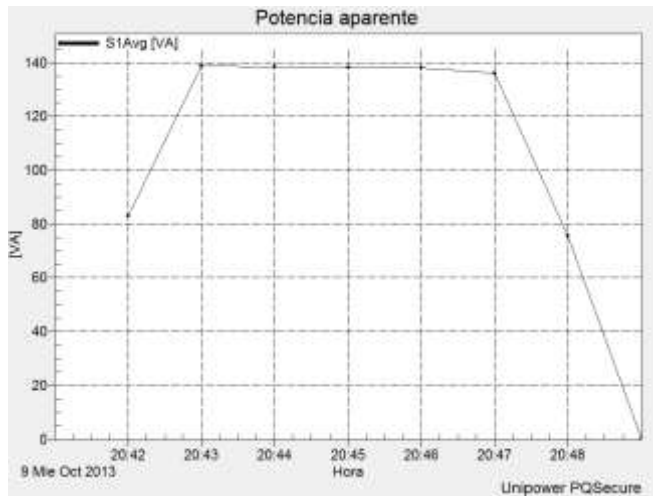
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 22. **Variación de la potencia reactiva respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



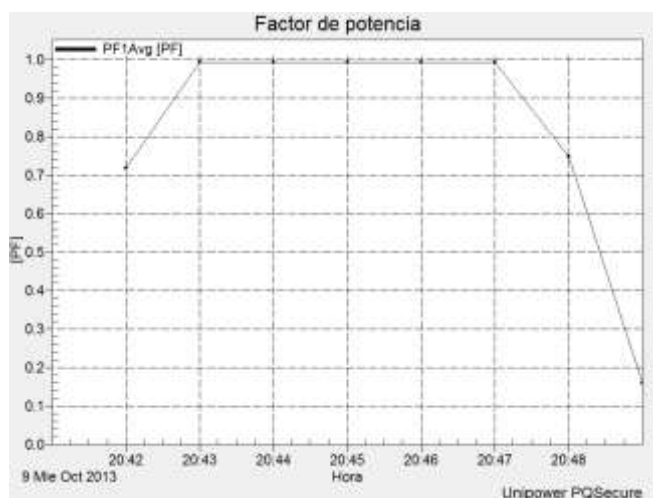
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 23. **Variación de la potencia aparente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



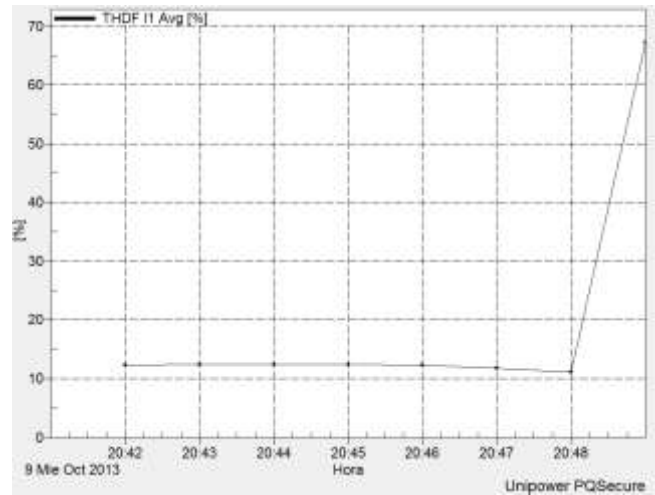
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 24. **Variación del factor de potencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



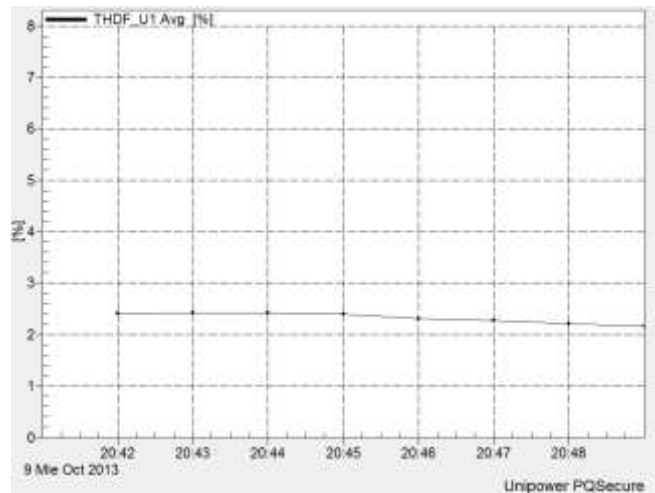
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 25. **THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



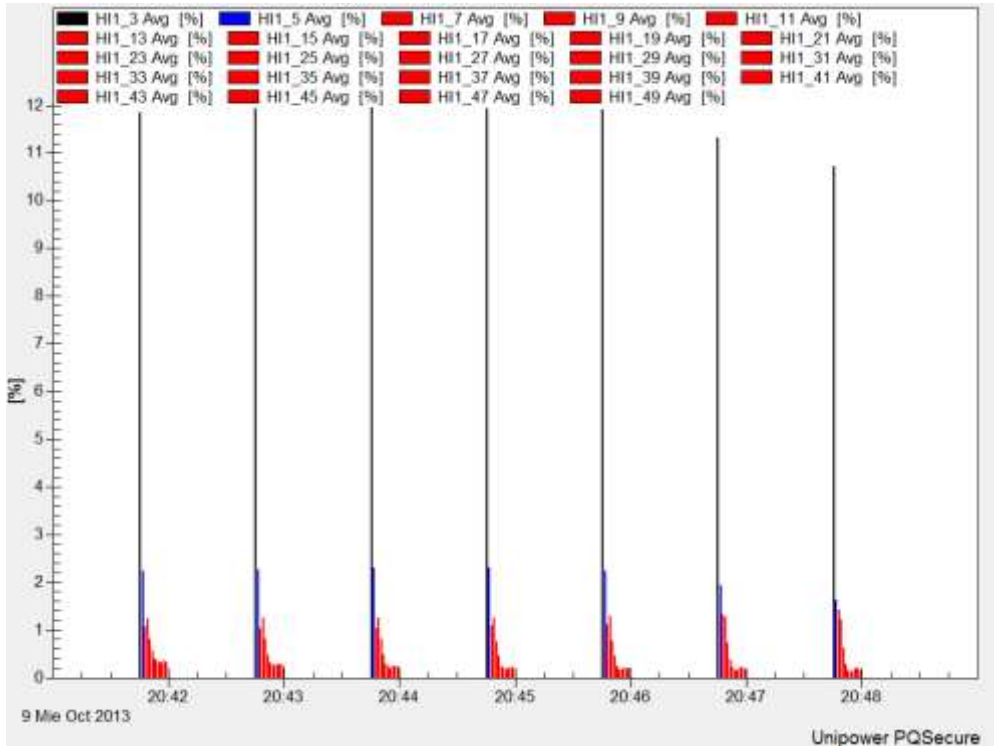
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 26. **THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



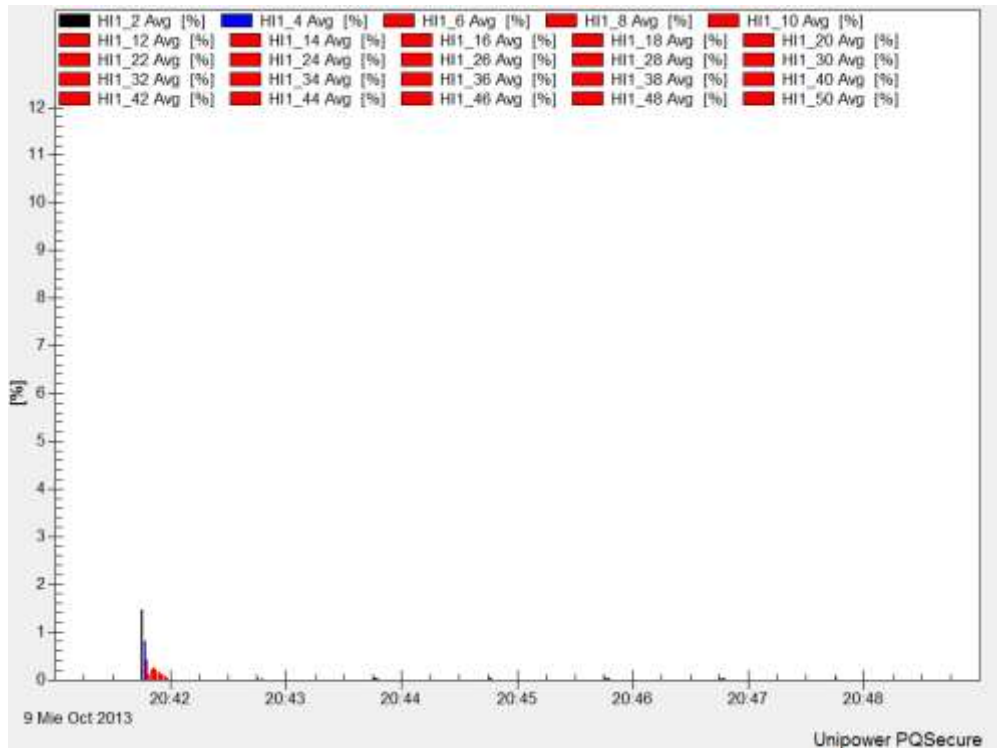
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 27. **Armónicos impares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**



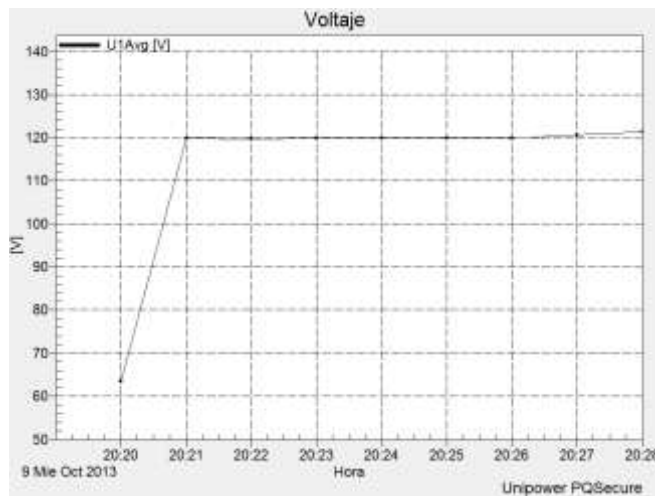
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 28. Armónicos pares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC



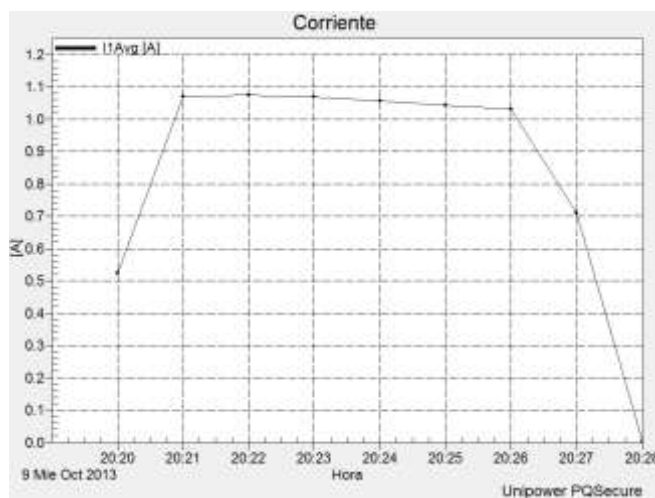
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 29. **Variación del voltaje respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC**



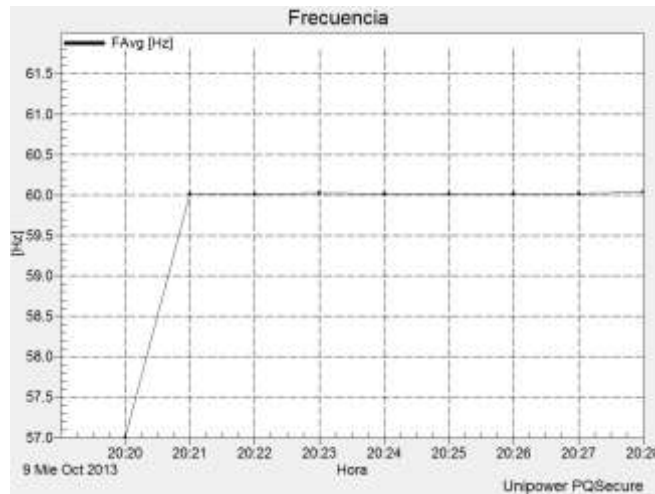
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 30. **Variación de la corriente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC**



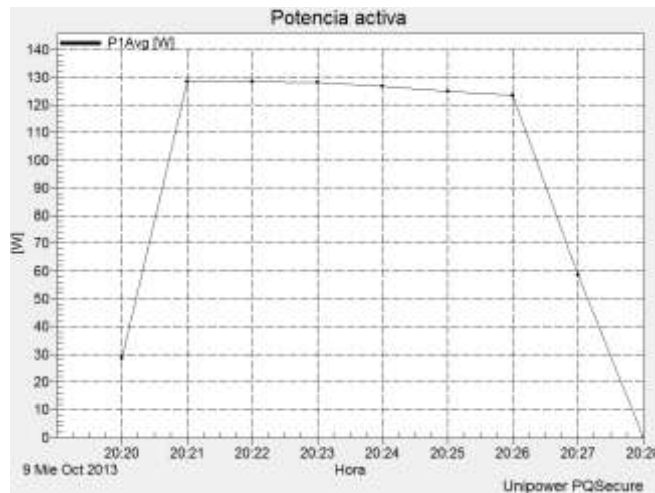
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 31. **Variación de la frecuencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC**



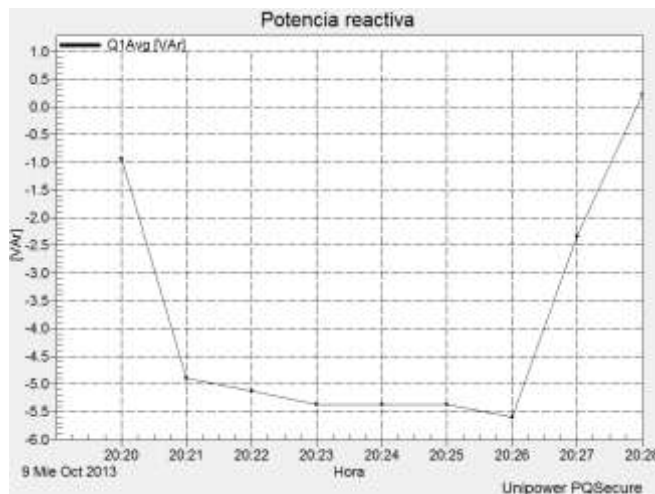
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 32. **Variación de la potencia activa respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC**



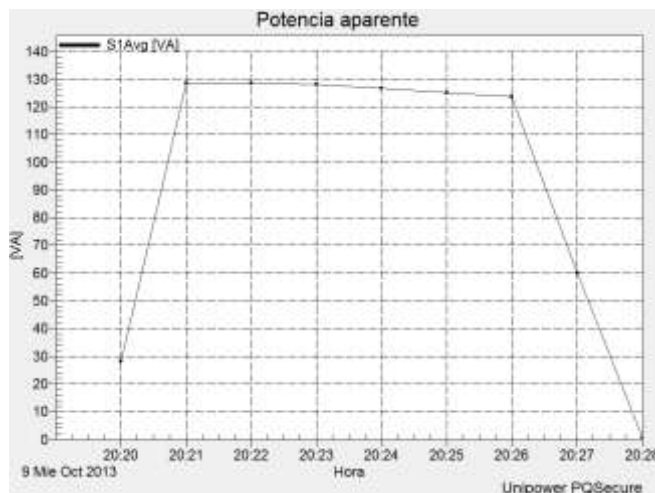
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 33. **Variación de la potencia reactiva respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC**



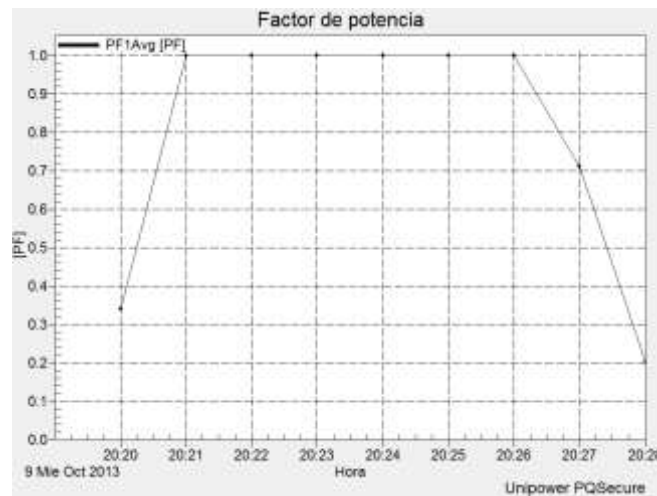
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 34. **Variación de la potencia aparente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC**



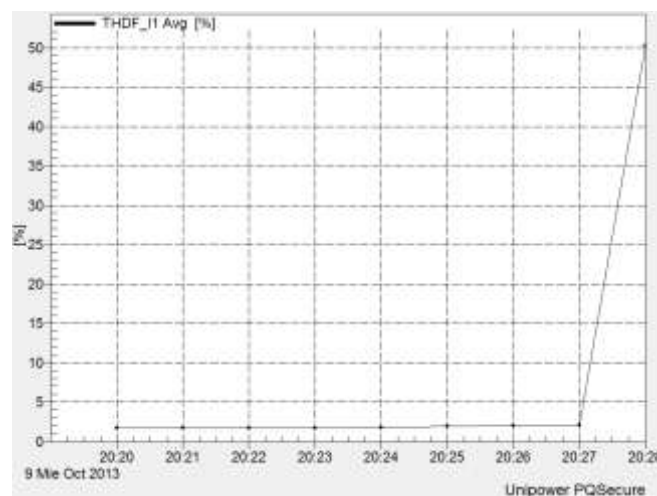
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 35. **Variación del factor de potencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC**



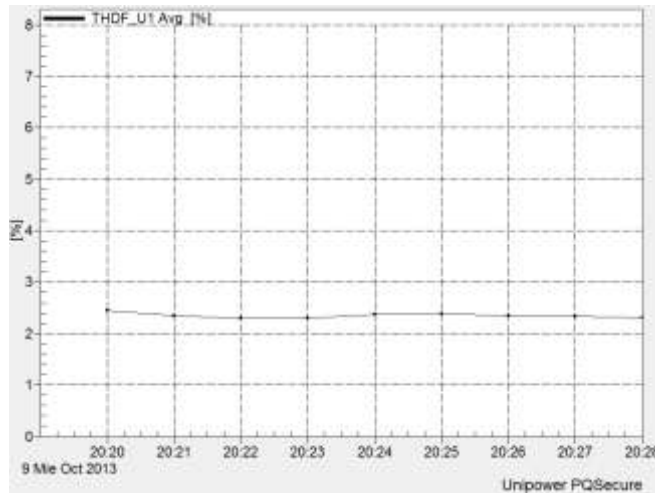
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 36. **THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC**



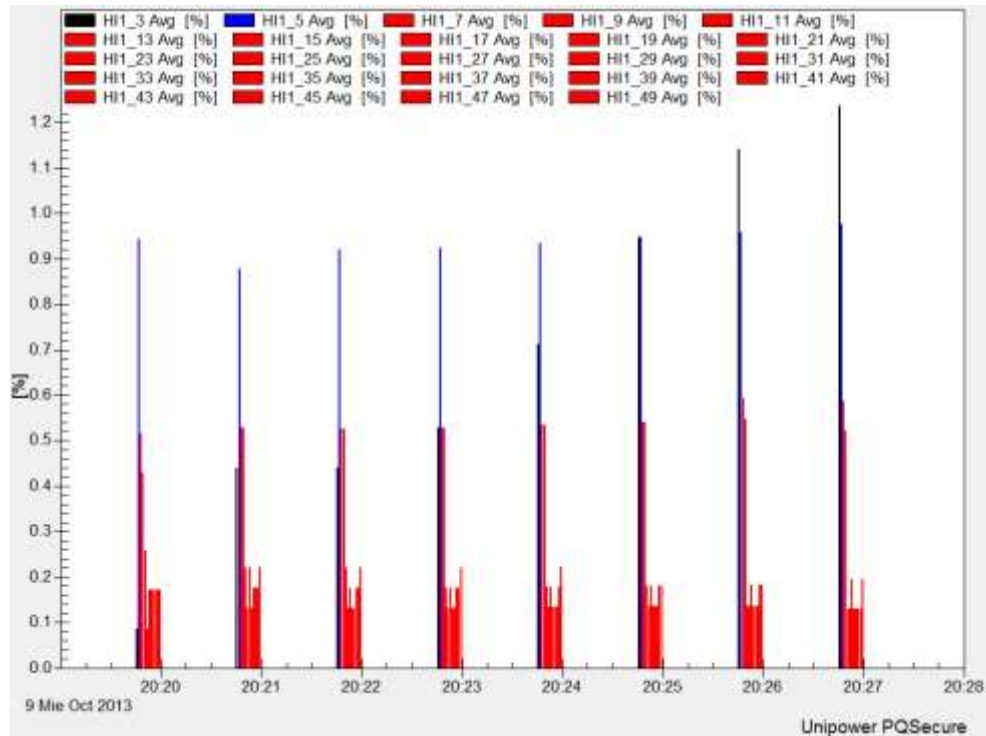
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 37. THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC



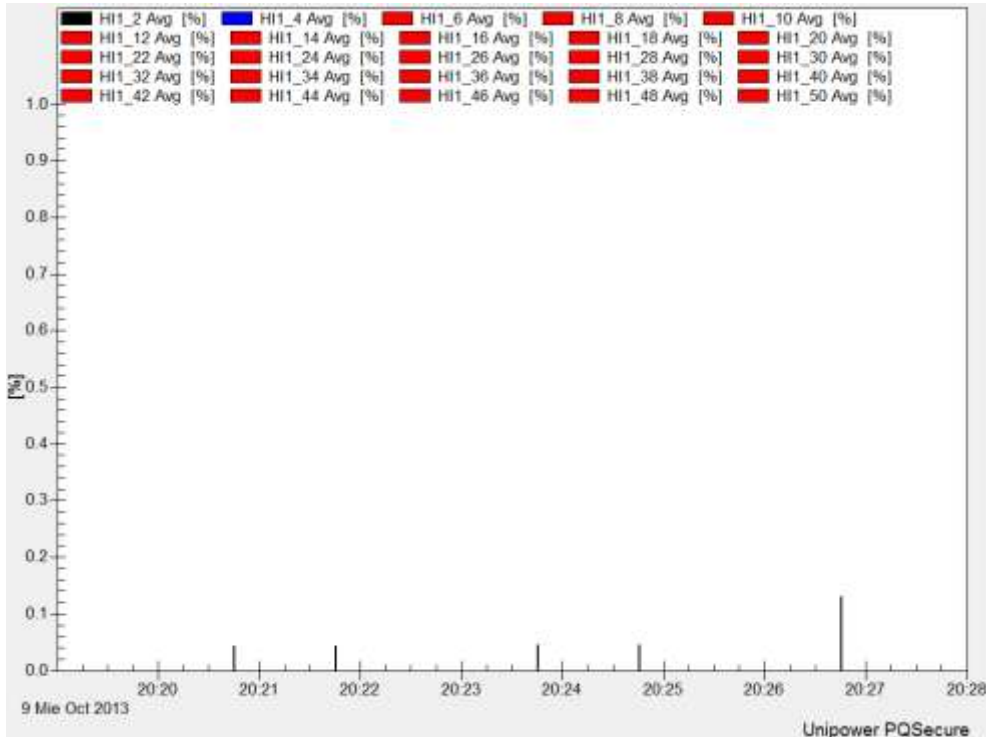
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 38. Armónicos impares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC



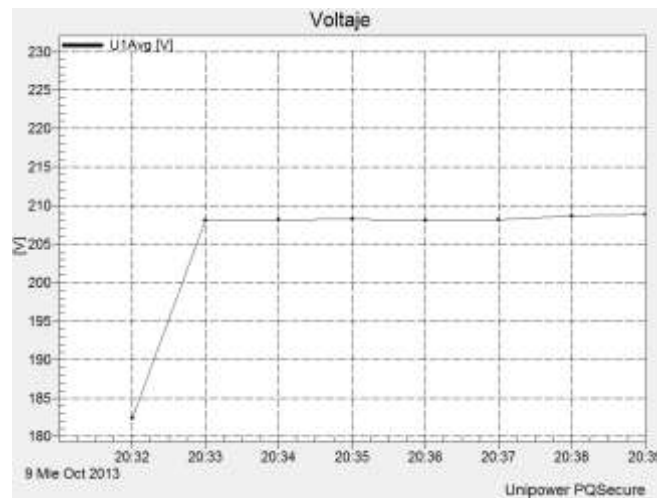
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 39. Armónicos pares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC



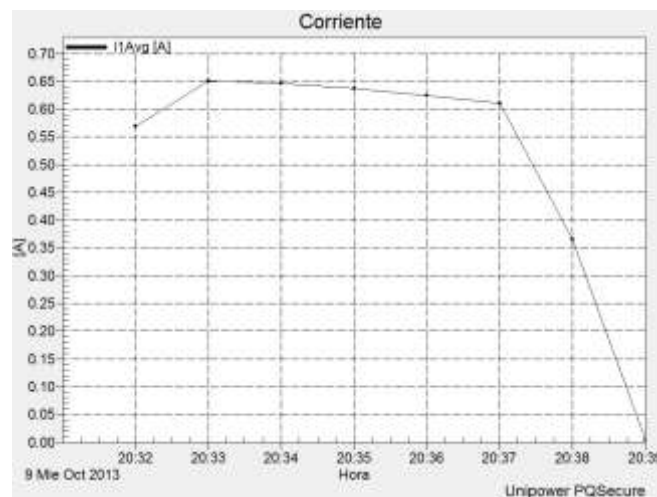
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 40. **Variación del voltaje respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



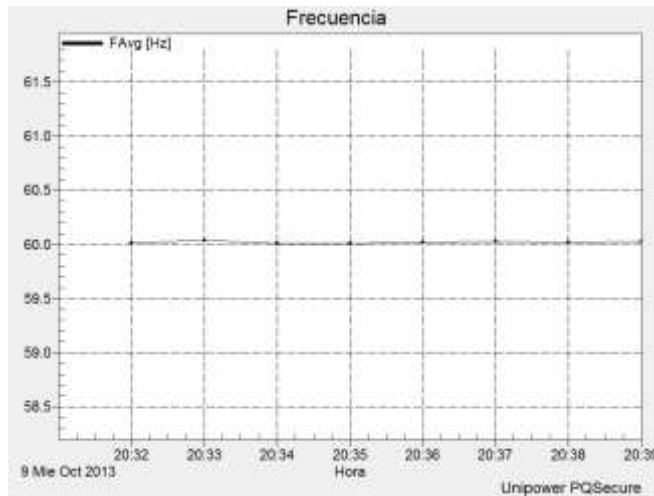
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 41. **Variación de la corriente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 42. **Variación de la frecuencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



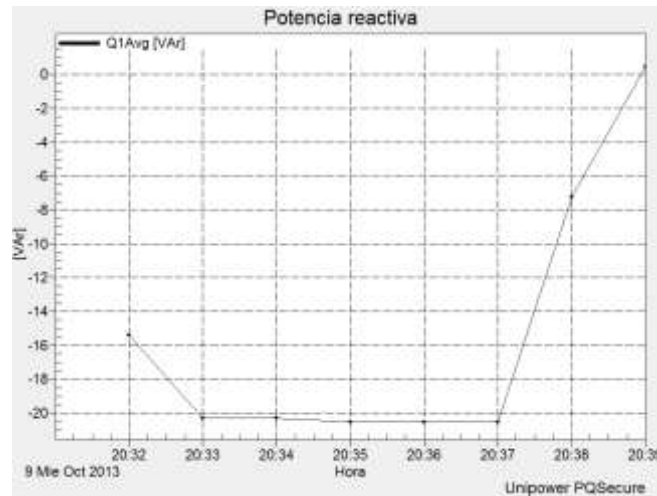
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 43. **Variación de la potencia activa respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



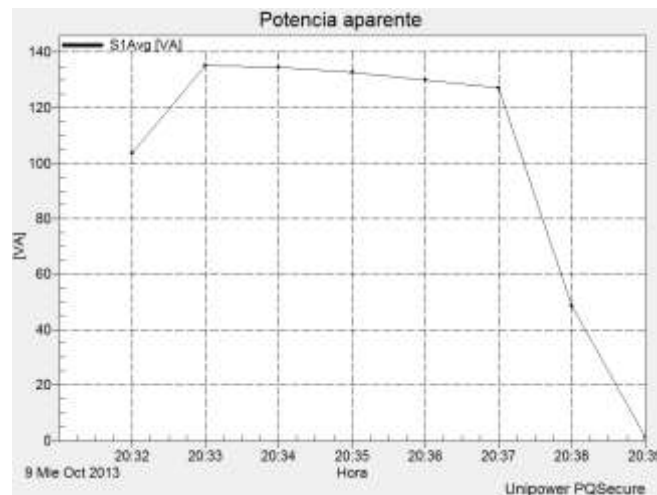
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 44. **Variación de la potencia reactiva respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



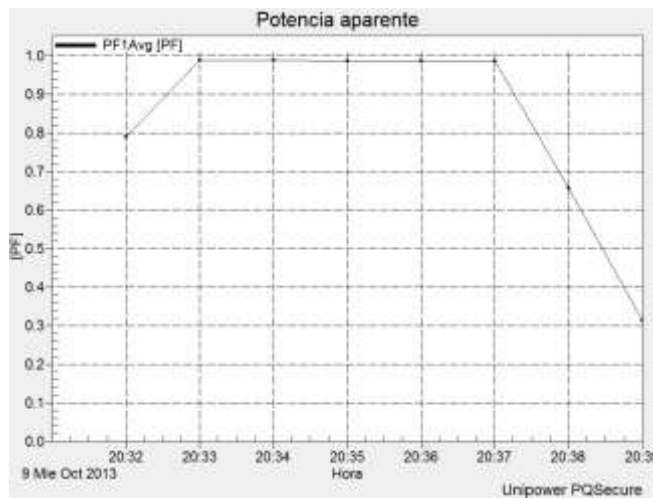
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 45. **Variación de la potencia aparente respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



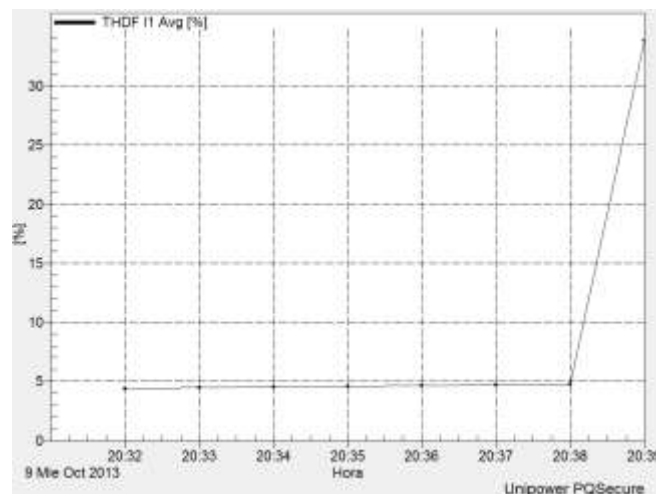
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 46. **Variación del factor de potencia respecto del tiempo de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 47. **THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



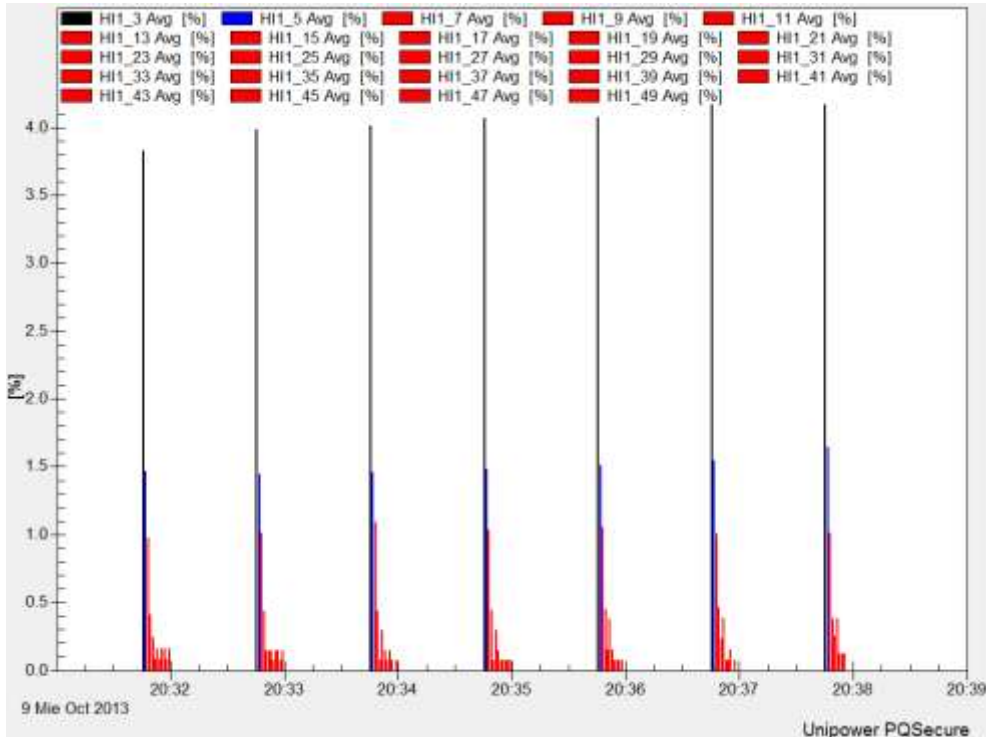
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 48. **THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC**



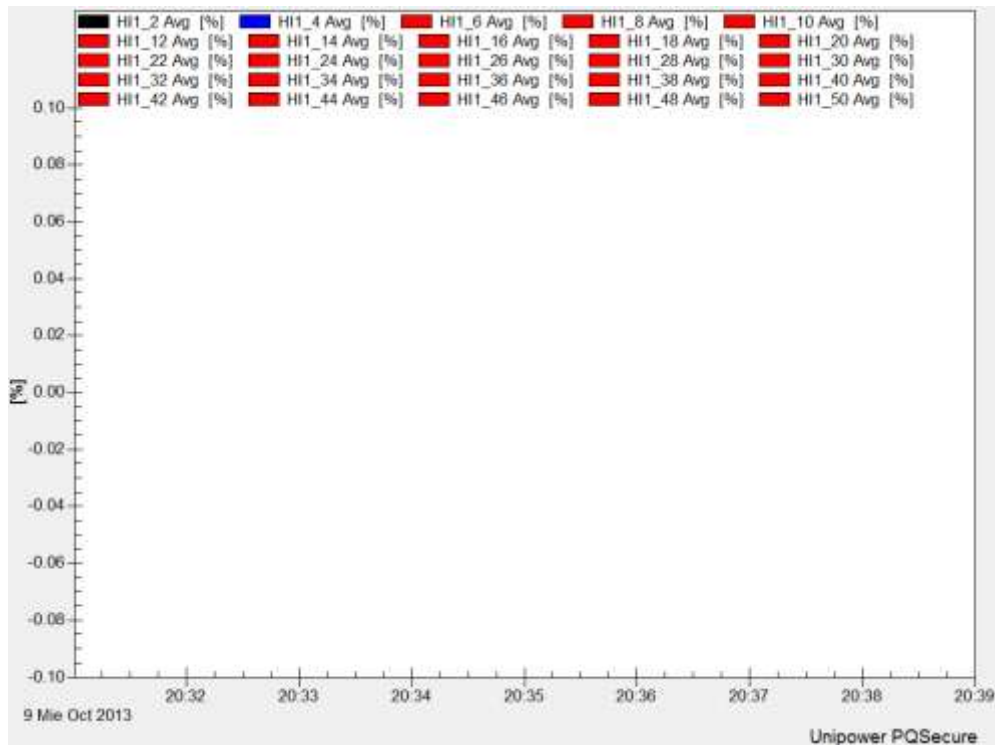
Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 49. Armónicos impares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC



Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

Figura 50. Armónicos pares de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC



Fuente: Unipower PQSecure. Fecha de medición: 9 de octubre de 2013.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra y analiza los resultados obtenidos de las mediciones realizadas a la lámpara de inducción electromagnética.

5.1. Potencia activa e iluminancia

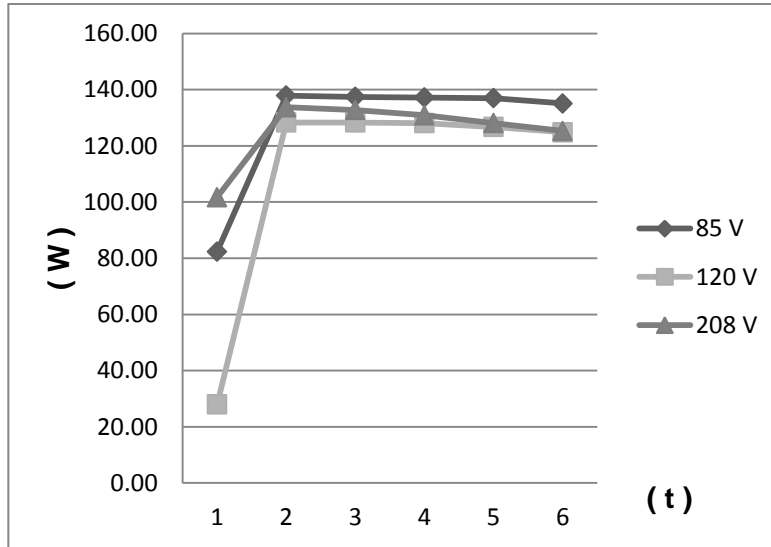
En la tabla VI se puede observar que para diferentes niveles de tensión, la lámpara tiene un menor consumo de potencia activa cuando se conecta a una fuente de 120 VAC. También es importante observar que el menor consumo de potencia de encendido se da en este mismo voltaje, esto demuestra que si bien la lámpara es multivoltaje, lo óptimo es que la misma funcione en este nivel de tensión. Esta comparación la podemos observar de forma gráfica en la figura 51.

Tabla VI. **Potencia (W) de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión**

Tiempo en minutos	Potencia (W) de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	Potencia (W) de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	Potencia (W) de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC
1	82,37	28,00	101,73
2	137,90	128,33	133,70
3	137,43	128,33	132,77
4	137,20	128,10	130,90
5	136,97	126,70	128,10
6	135,10	124,83	125,30

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Comparación de la potencia (W) respecto del tiempo de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión**



Fuente: elaboración propia.

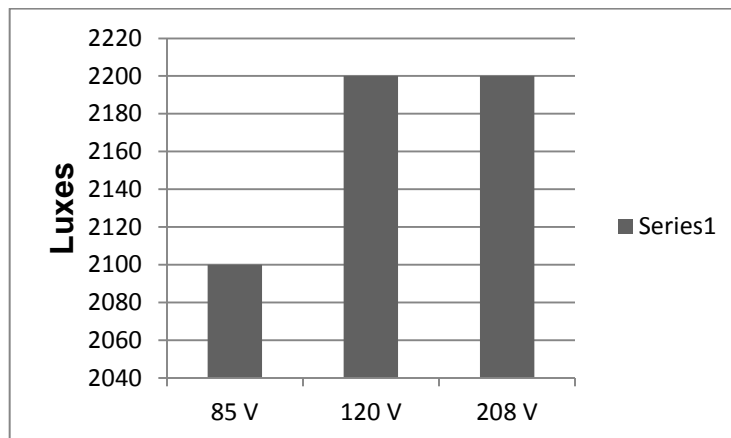
Además, es muy importante la utilización de iluminación eficiente, mediante luminarias de alto rendimiento que incorporen equipos de bajo consumo y lámparas con un alto nivel de iluminancia (lux). Para efectos de prueba, se midió el nivel de iluminancia de la lámpara de inducción a una altura de 1 metro sobre el nivel del suelo para determinar en qué nivel de voltaje la lámpara es más eficiente en cuanto al nivel de iluminancia, los resultados se muestran en la tabla VII y figura 52.

Tabla VII. **Iluminancia (luxes) de la lámpara de inducción conectada en diferentes niveles de tensión**

Distancia (m) de la lámpara al nivel del suelo	Nivel de tensión (VAC)	Iluminancia (Luxes)
1	85	2100
1	120	2200
1	208	2200

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Iluminancia (luxes) de la lámpara de inducción conectada en diferentes niveles de tensión**



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, el nivel óptimo para el funcionamiento de la lámpara es cuando se conecta a una fuente de 120 V de corriente alterna, esta afirmación se puede respaldar porque en ese nivel de tensión se mantiene el menor consumo de potencia activa (ver figura 51).

5.2. Factor de potencia

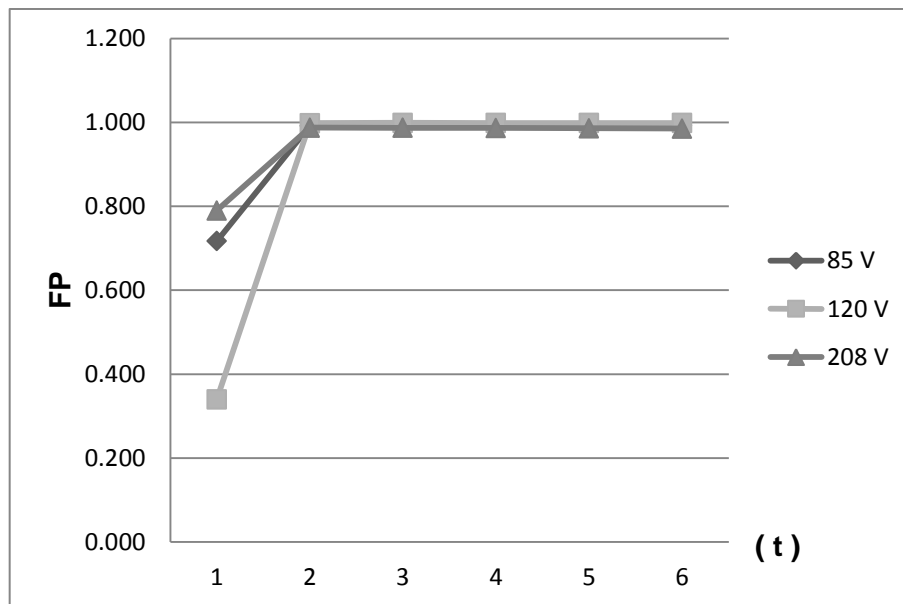
Como el factor de potencia es un indicador de la eficiencia con la que se está utilizando la energía eléctrica, podemos observar que la lámpara de inducción es bastante eficiente porque el factor de potencia es aproximadamente 1 y como lo indica el fabricante, el factor de potencia de esta lámpara es mayor a 0,95. Además, en diferentes niveles de tensión la lámpara trabaja con un buen FP pero lo óptimo es cuando la lámpara trabaja en 120 VAC, esto se muestra en la tabla VIII y figura 53.

Tabla VIII. **Factor de potencia de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión**

Tiempo en minutos	Factor de potencia de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	Factor de potencia de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	Factor de potencia de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC
1	0,7172	0,3400	0,7900
2	0,9921	0,9981	0,9875
3	0,9917	0,9988	0,9872
4	0,9921	0,9986	0,9866
5	0,9919	0,9986	0,9860
6	0,9928	0,9985	0,9853

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Comparación del factor de potencia respecto del tiempo de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión**



Fuente: elaboración propia.

5.3. Distorsión armónica

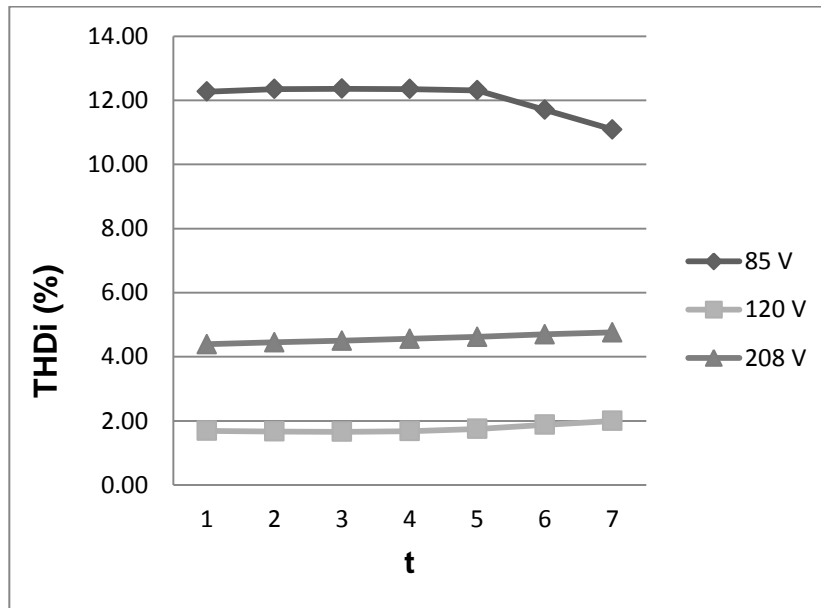
La distorsión armónica total en corriente para la lámpara conectada a una fuente de 120 y 208 VAC, cumple con lo establecido por el fabricante al tener un THDi menor al 10 %, pero cuando se conecta a una fuente de 85 VAC el total de THDi es superior al 10 %. Además, se observa que cuando la lámpara se conecta a un fuente de 120 VAC la distorsión armónica en corriente es menor que cuando se conecta a una fuente de fuente de 208 VAC. Esto se puede observar en la tabla IX y gráficamente en la figura 54.

Tabla IX. **THDi (%) de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión**

Tiempo en minutos	THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	THDi (%) de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC
1	12,27	1,69	4,39
2	12,35	1,67	4,45
3	12,36	1,66	4,50
4	12,35	1,68	4,56
5	12,31	1,75	4,62
6	11,70	1,88	4,70
7	11,09	2,00	4,76

Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Comparación del THDi (%) respecto del tiempo de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión**



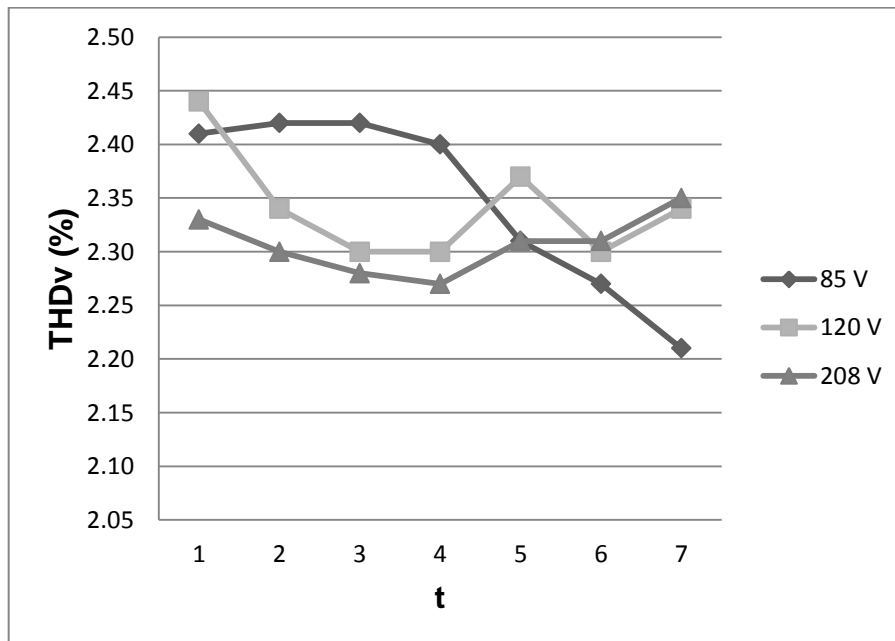
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **THDv (%) de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión**

Tiempo en minutos	THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC	THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC	THDv (%) de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC
1	2,41	2,44	2,33
2	2,42	2,34	2,30
3	2,42	2,30	2,28
4	2,40	2,30	2,27
5	2,31	2,37	2,31
6	2,27	2,30	2,31
7	2,21	2,34	2,35

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Comparación del THDv (%) respecto del tiempo de la lámpara conectada en diferentes niveles de tensión**



Fuente: elaboración propia.

Además, en la tabla XI, XII y XIII se muestran los valores de la máxima corriente armónica permisible expresada como un porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental de la lámpara cuando se conecta en los niveles de tensión de prueba. Se comparan los resultados obtenidos con la Norma IEC 1000-3-2, la cual regula los límites máximos de los armónicos inyectados por equipos de iluminación clase C, se puede observar que en ningún nivel de prueba se supera lo establecido por dicha norma (ver tabla V).

Tabla XI. **Armónicos de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 85 VAC**

Tiempo en minutos	Segundo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 segundo armónico (%)	Tercer armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 tercer armónico 30*fp (%)
1	1,46	2,00	11,84	21,52
2	0,03	2,00	11,92	29,76
3	0,06	2,00	11,94	29,75
4	0,03	2,00	11,94	29,76
5	0,06	2,00	11,91	29,76
6	0,03	2,00	11,31	29,78

Tiempo en minutos	Quinto armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 quinto armónico (%)	Septimo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 septimo armónico (%)
1	2,24	10,00	1,07	7,00
2	2,26	10,00	0,03	7,00
3	2,29	10,00	0,03	7,00
4	2,30	10,00	1,09	7,00
5	2,24	10,00	1,12	7,00
6	1,93	10,00	1,32	7,00

Tiempo en minutos	Noveno armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 noveno armónico (%)	Onceavo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 onceavo armónico (%)
1	1,24	5,00	0,82	3,00
2	1,26	5,00	0,80	3,00
3	1,26	5,00	0,80	3,00
4	1,26	5,00	0,77	3,00
5	1,29	5,00	0,78	3,00
6	1,29	5,00	0,73	3,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Armónicos de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 120 VAC

Tiempo en minutos	Segundo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 segundo armónico (%)	Tercer armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 tercer armónico 30*fp (%)
1	0,00	2,00	0,09	10,20
2	0,04	2,00	0,44	29,94
3	0,04	2,00	0,44	29,96
4	0,00	2,00	0,53	29,96
5	0,04	2,00	0,71	29,96
6	0,05	2,00	0,91	29,96

Tiempo en minutos	Quinto armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 quinto armónico (%)	Septimo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 septimo armónico (%)
1	0,94	10,00	0,51	7,00
2	0,88	10,00	0,53	7,00
3	0,92	10,00	0,53	7,00
4	0,92	10,00	0,53	7,00
5	0,94	10,00	0,53	7,00
6	0,95	10,00	0,54	7,00

Tiempo en minutos	Noveno armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 noveno armónico (%)	Onceavo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 onceavo armónico (%)
1	0,43	5,00	0,26	3,00
2	0,53	5,00	0,22	3,00
3	0,53	5,00	0,22	3,00
4	0,53	5,00	0,18	3,00
5	0,53	5,00	0,18	3,00
6	0,54	5,00	0,18	3,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Armónicos de corriente relativos a la frecuencia fundamental de la lámpara conectada a una fuente de 208 VAC

Tiempo en minutos	Segundo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 segundo armónico (%)	Tercer armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 tercer armónico 30*fp (%)
1	0,00	2,00	3,93	23,70
2	0,00	2,00	3,98	29,63
3	0,00	2,00	4,01	29,62
4	0,00	2,00	4,07	29,60
5	0,00	2,00	4,08	29,58
6	0,00	2,00	4,17	29,56

Tiempo en minutos	Quinto armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 quinto armónico (%)	Septimo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 septimo armónico (%)
1	1,47	10,00	0,98	7,00
2	1,45	10,00	1,01	7,00
3	1,46	10,00	1,09	7,00
4	1,48	10,00	1,04	7,00
5	1,51	10,00	1,06	7,00
6	1,54	10,00	1,00	7,00

Tiempo en minutos	Noveno armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 noveno armónico (%)	Onceavo armónico de corriente relativo a la frecuencia fundamental (%)	IEC-1000-3-2 onceavo armónico (%)
1	0,41	5,00	0,24	3,00
2	0,43	5,00	0,14	3,00
3	0,44	5,00	0,07	3,00
4	0,44	5,00	0,07	3,00
5	0,45	5,00	0,15	3,00
6	0,46	5,00	0,23	3,00

Fuente: elaboración propia.

Los resultados anteriores, demuestran que la lámpara electromagnética sin electrodos tiene la gran ventaja de trabajar con un bajo contenido de armónicos.

CONCLUSIONES

1. El factor de potencia para el equipo de iluminación analizado se encuentra dentro de las exigencias mínimas de eficiencia en el uso de la red ($FP > 0,9$), es decir, más del 90 % de la potencia transmitida está haciendo un trabajo.
2. La distorsión armónica total en corriente cuando la lámpara se conecta en los niveles de tensión de prueba, 120 y 208 voltios de corriente alterna, se encuentra dentro del límite establecido por el fabricante, que es un valor menor o igual al 10 % de THD.
3. Cuando la lámpara se conecta a una fuente de 85 voltios de corriente alterna, el contenido de THD excede el 10 % establecido por el fabricante.
4. El rendimiento y vida útil de las lámparas de inducción es mucho mayor que otras tecnologías, porque no utilizan electrodos y filamentos de encendido.
5. A condiciones de laboratorio, la distorsión armónica en corriente generada al conectar la lámpara, no supera los límites establecidos por los estándares IEC. Lo cual en primera instancia, garantizaría que al conectarse a un circuito de distribución, no afectarían la distorsión armónica en tensión.

6. A pesar de que la lámpara electromagnética sin electrodos puede funcionar en diferentes niveles de tensión, los resultados demuestran que el nivel óptimo de funcionamiento se obtiene cuando se conecta a una fuente de 120 voltios de corriente alterna.

7. Se determina durante la fase de experimentación que la variación del nivel de iluminancia es mínima para voltajes de 120 y 208 voltios de corriente alterna.

RECOMENDACIONES

1. Para la utilización industrial o masiva de la lámpara de inducción, se debe llevar a cabo un análisis más específico de la seguridad electromagnética debido a que no existe un estándar internacional que lo regule.
2. Incentivar estudios de distorsión armónica total en la línea en Guatemala, que fijen los límites máximos de los armónicos inyectados a la red de distribución, para armonizar la conexión de las lámparas de inducción electromagnética.
3. Utilizar la lámpara de inducción externa en donde se requiera alumbrado expuesto a la intemperie.
4. Utilizar la lámpara de inducción interna para aplicaciones de alumbrado en interiores.

BIBLIOGRAFÍA

1. Biblioteca Digital. [en línea]. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_7.htm.> La inducción electromagnética. [Consulta: febrero de 2013].
2. CZAJKOWSKI D., Jorge. *Luminotecnia e iluminación artificial*. México: CIE, 2006. 21 p.
3. EISOURCE. [en línea]. <<http://eneri-source.wikispaces.com/Induction>.> [Consulta: enero de 2013].
4. Enciclopedia de Electricidad. *Luminotecnia*. España: CEAC, S.A. 171 p.
5. GESCOM. [en línea]. <http://www.gescomchile.com/inducccion_electromagnetica-1.html.> [Consulta: enero de 2013].
6. GUERRERO MORA, Irene. *Balastro electrónico para lámpara fluorescente basado en un amplificador clase E operando a una frecuencia mayor a 1 MHZ*. Trabajo de graduación de Maestría. Cuernavaca, Morelos, México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2002. 249 p.
7. GONZÁLEZ, Francisco. *Iluminación*. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 121 p.

8. INDALUX. *Magnitudes luminosas, Luminotecnia*. México: IVES, 2002. 180 p.
9. Nueva Biblioteca del Instalador Electricista. *Instalaciones eléctricas de baja tensión y alumbrado, lámparas de descarga*. España: CEAC, S.A. 171 p.
10. PHILIPS. [en línea]. <<http://www.qlcompany.com/es/cartera/lámparas/85-w>> [Consulta: enero de 2013].
11. PONCE SILVA, Mario. *Sistemas de Alimentación para Lámparas de Descarga Basados en Amplificadores Clase E*. Trabajo de graduación de Maestría. Cuernavaca, Morelos, México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 1998. 218 p.
12. UNIPOWER AB. *User Manual English version 4.6 Unilyzer 902 / 901 English version 4.6*. 280 p.
13. WWESTMEXICO. [en línea]. <<http://www.wwestmexico.com/productos/oev.html>> [Consulta: enero de 2013].