



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

EFFECTOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEBIDO AL USO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS

Cristian Fernando Fuentes Orozco

Asesorado por el Ing. Julio Eduardo González Vásquez

Guatemala, septiembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEBIDO AL USO DE LAS
LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CRISTIAN FERNANDO FUENTES OROZCO

ASESORADO POR EL ING. JULIO EDUARDO GONZÁLEZ VÁSQUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2011

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	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Fernando Rodas
EXAMINADOR	Ing. Jose Luis Herrera Galvez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz 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:

EFFECTOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEBIDO AL USO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de noviembre de 2008.



Cristian Fernando Fuentes Orozco

Guatemala, 15 de noviembre de 2010

Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de ingeniería


Señor Coordinador:

La presente es para hacer de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación que lleva como título **“EFECTOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEBIDO AL USO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS”**, redactado y desarrollado por el estudiante **Cristian Fernando Fuentes Orozco**.

Con la revisión y corrección del presente trabajo de graduación hago constar que ha alcanzado los objetivos propuestos, por lo tanto el autor de este trabajo y mi persona, como asesor, nos hacemos responsables del contenido del mismo.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,


Julio Eduardo González Vásquez
Ing. Mecánico-Electricista
Colegiado 6059

JULIO EDUARDO GONZALEZ VASQUEZ
Ingeniero Mecánico Eléctrico
Colegiado 6059



Ref. EIME 24. 2011
Guatemala, 04 de ABRIL 2011.

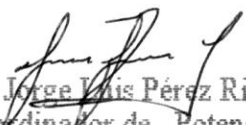
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
"EFECTOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEBIDO AL USO DE
LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS", del
estudiante CRISTIAN FERNANDO FUENTES OROZCO, que
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
Coordinador de Potencia

JLPR/sro





REF. EIME 32. 2011.

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; CRISTIAN FERNANDO FUENTES OROZCO titulado: "EFECTOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEBIDO AL USO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS", procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

GUATEMALA, 29 DE ABRIL 2011.





DTG. 317.2011

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: **EFFECTOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEBIDO AL USO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS**, presentado por el estudiante universitario **Cristian Fernando Fuentes Orozco**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Reinos
Decano



Guatemala, 01 de septiembre de 2011.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la luz que ha guiado mi camino en los momentos más importantes de mi existencia.
- Mis padres** Mario Fuentes y Milvia Orozco por su incondicional amor, confianza y apoyo en el transcurso de mi vida.
- Mis hermanos** Mario y Antonella por ser parte importante de mi vida.
- Mis abuelos** Por todas sus palabras de aliento y sabiduría. En especial a la memoria de mi abuelita Berta.
- Toda mi familia** Tíos, primos y a todos aquellos que me consideran parte de su familia.
- Mis amigos** Por los buenos momentos que hemos compartido y por brindarme su amistad todo el tiempo. En especial a la memoria de mi amigo Alejandro.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1 INTRODUCCIÓN A LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Necesidad de ahorro de energía	1
1.3 Emisión de luz fluorescente	2
1.4 Sistemas de iluminación	5
1.5 Descripción de una lámpara fluorescente	7
1.5.1 Comparación con lámparas convencionales	8
1.6 Clasificación de las lámparas fluorescentes	10
2 LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA AHORRADORA DE ENERGÍA (LFC).	13
2.1 Introducción	13
2.2 Reseña histórica de la lámpara fluorescente compacta	14
2.3 Partes de una lámpara fluorescente compacta	16
2.3.1 Tubo fluorescente	17
2.3.2 Balastro electrónico	18
2.3.3 Base	19
2.4 Funcionamiento de una lámpara fluorescente compacta	19

2.5	Características y ventajas de las lámparas fluorescentes compactas	22
2.5.1	Características de las LFC	22
2.5.2	Ventajas de las LFC comparadas con lámparas incandescentes	23
3	BALASTRO ELECTRÓNICO	25
3.1	Introducción	25
3.2	Clasificación de los balastos	25
3.2.1	Balastro electromagnético	26
3.2.2	Balastro electrónico	26
3.3	Funcionamiento de un balastro electrónico	27
3.3.1	Operación básica de un balastro	27
3.3.2	Estructura del balastro electrónico	28
3.4	Parámetros de rendimiento	28
3.4.1	Factor de potencia total o verdadero	29
3.4.2	Distorsión armónica total (DAT)	30
4	CALIDAD DE LA ENERGÍA Y ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	31
4.1	Introducción	31
4.2	Calidad de la energía eléctrica	31
4.3	Cargas lineales y no lineales	34
4.4	Generación de armónicos	36
4.5	Índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónica	39
4.5.1	Índice de distorsión armónica total (DAT)	40
4.5.2	Diversidad y curvas del contenido de armónicos	41
4.6	Incidencia del usuario en la calidad de la energía eléctrica	43

4.6.1	Distorsión armónica de la corriente generada por el usuario	44
4.6.2	Factor de potencia	48
5	COMPORTAMIENTO DE LA LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA EN LA RED ELÉCTRICA	49
5.1	Introducción	49
5.2	Clasificación del equipamiento eléctrico residencial	49
5.3	Definiciones de potencia para cargas no lineales	51
5.4	Desempeño de la lámpara fluorescente compacta	53
5.4.1	Resultados de un estudio sobre el desempeño de las lámparas de bajo consumo LFC	53
5.4.1.1	Lámparas que iluminan menos que la lámpara incandescente de potencia equivalente indicada en los envases	54
5.4.1.2	Lámparas que duran mucho menos que la cantidad de horas indicadas en los envases	55
5.4.1.3	Lámparas que no son eléctricamente seguras y podrían ser causa de incendios	56
5.4.1.4	Lámparas de bajo consumo	57
5.5	Comportamiento eléctrico de varias LFC compradas en la ciudad capital de Guatemala	58
5.6	Escenario de actuación simultánea de lámparas con diferentes características eléctricas	72
5.7	Efectos de las lámparas fluorescentes compactas	78
5.7.1	Transformadores	79
5.7.2	Conductores	85

5.7.3	Otras consideraciones	85
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación esquemática de la forma en que el átomo de mercurio (Hg) emite fotones de luz ultravioleta y cómo el átomo de fósforo (P) los convierte en fotones de luz blanca visible.	3
2.	Constitución de una lámpara fluorescente.	7
3.	Tipos de lámparas fluorescentes.	10
4.	LFC con tubo en forma de espiral.	15
5.	Partes de una LFC.	16
6.	Filamentos colocados dentro de los tubos de una lámpara fluorescente compacta.	17
7.	Elementos que componen el balastro electrónico.	18
8.	Etapas de funcionamiento de una LFC.	20
9.	Carga lineal. La corriente y el voltaje son proporcionales a lo largo de la línea de su impedancia.	34
10.	Carga no lineal de una resistencia controlada por un dispositivo semiconductor en la que la corriente y el voltaje no son lineales.	35
11.	Variación de la impedancia inductiva en función de la frecuencia.	37
12.	Variación de la impedancia capacitiva en función de la frecuencia.	38
13.	Potencias para cargas no lineales.	52
14.	LFC que iluminan menos que la lámpara incandescente de potencia equivalente indicada en los envases.	54
15.	LFC que duran mucho menos que la cantidad de horas indicadas en los envases.	56

16.	Relación entre la potencia eléctrica que consumiría una lámpara incandescente equivalente y la potencia que realmente será consumida por una LFC de diferentes marcas.	57
17.	Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Sylvania de 13 W.	61
18.	Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Fulgore de 15 W.	61
19.	Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Rotter de 15 W.	62
20.	Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Fulgore de 20 W.	62
21.	Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Rotter de 20 W.	63
22.	Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Ace de 20 W.	63
23.	Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC GE de 26 W.	64
24.	Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Philips de 27 W.	64
25.	Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Sylvania de 13W.	66
26.	Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Fulgore de 15W.	66
27.	Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Rotter de 15W.	67
28.	Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Fulgore de 20W.	67
29.	Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Rotter de 20W.	68
30.	Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Ace de 20W.	68
31.	Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC GE de 26W.	69

32.	Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Philips de 27W.	69
33.	Grafica de valores del factor de potencia de varias LFC conectadas simultáneamente.	74
34.	Aumento del factor de potencia cuando se agrega carga inductiva a las LFC.	75
35.	Valores de THDi% de varias LFC conectadas simultáneamente.	77
36.	Comportamiento de THDi% cuando se conecta un TF con las LFC.	77
37.	Escenario 1 (caso crítico, todas las cargas son LFC).	81
38.	Escenario 2 (LFC y aparatos eléctricos).	81
39.	Escenario 3 (carga predominantemente lineal).	82
40.	Variación THDv en función del % de LFC en relación a la carga total del transformador.	84

TABLAS

I.	Tolerancias de corrientes armónicas individuales para distintos niveles de tensión, potencia máxima demandada y orden de armónica.	46
II.	Listado de lámparas fluorescentes compactas compradas en supermercados de la ciudad capital.	59
III.	Datos de potencia, f.p. y valores rms de las lámparas fluorescentes compactas compradas en Guatemala.	60
IV.	Tasa de armónicas y distorsión armónica total de corriente de las lámparas fluorescentes compactas.	71
V.	Lámparas usadas en mediciones combinadas.	73
VI.	Datos de potencia, f.p. y valores rms de lámparas conectadas simultáneamente.	73
VII.	Tasa de armónicas y distorsión armónica total de corriente de lámparas combinadas.	76

VIII.	Aparatos eléctricos utilizados en simulación de armónicos en una casa residencial.	80
IX.	Valores de distintas magnitudes, en función del porcentaje de lámparas compactas.	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
φ	Ángulo fi
Ar	Argón
C	Capacitancia
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
K	Factor de contracción
FP o fp	Factor de potencia
λ	Factor de potencia con contenido armónico
f	Frecuencia
Hz	Hertz
L	Inductancia
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
INTI	Instituto Nacional de Tecnología Industrial (Argentina)
Kr	Kriptón
LFC	Lámpara fluorescente compacta
LI	Lámpara incandescente
lm/W	Lúmenes por Watt

Hg	Mercurio
μm	Micrómetros
Ne	Neón
NTSD	Normas Técnicas del Servicio de Distribución
Ω	Omega
%	Porcentaje
P	Potencia activa
S	Potencia aparente
Q	Potencia reactiva
D	Potencia reactiva de deformación
Xc	Reactancia capacitiva
XL	Reactancia inductiva
Σ	Sumatoria
TF	Tubo Fluorescente
π	Valor de pi
rms	Valor eficaz
VA	Voltamperios
VAR	Voltamperios reactivos
W	Watt

GLOSARIO

Acometida	Es el conjunto de elementos, materiales y equipos, que forma parte de la infraestructura eléctrica que el distribuidor instala en el punto de entrega al usuario final para la prestación del servicio eléctrico de distribución.
Efecto estroboscópico	Efecto óptico que se produce al iluminar mediante destellos, un objeto que se mueve en forma rápida y periódica.
Electrodos	Un electrodo es un conductor utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo un semiconductor, un electrolito, el vacío, un gas (en una lámpara de neón), etc.
Espectro de corrientes armónicas	Gráfico que muestra como es la descomposición de la señal senoidal de corriente en el dominio de la frecuencia.
Espectro electromagnético	Un continuo de radiación eléctrica y magnética que puede caracterizarse por frecuencia o longitud de onda. La luz visible incluye una pequeña parte de espectro electromagnético en la región, desde aproximadamente 380 nanómetros (violeta) hasta 760 nanómetros (rojo) por la longitud de onda.

Factor de coincidencia	Es la razón de la demanda máxima de la carga como un todo, medida en su punto de alimentación, a la suma de las demandas máximas de las partes componentes de una carga.
Flicker	Variación rápida y cíclica de la tensión, que causa una fluctuación correspondiente en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable por el ojo humano.
Frecuencia Nominal	Es la frecuencia nominal del sistema eléctrico nacional, con un valor de 60 Hertz.
Gases inertes	Gases que reaccionan difícilmente o que no reaccionan en absoluto con otros elementos.
Iluminancia	La cantidad de luz (lúmenes/área) que incide sobre una superficie. La iluminancia se mide en luxes.
Impedancia	Oposición efectiva al flujo de la corriente.
Ion	Partícula cargada constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra.
Ionización	Se puede entender como que a partir de un estado neutro se han ganado o perdido electrones.
Lámparas de filamento incandescente	Las lámparas de este tipo son fuentes de luz en las que la luz se produce por un filamento calentado a incandescencia por una corriente eléctrica.

Lúmen	La unidad internacional (SI) para medir el flujo luminoso o cantidad de luz.
Lúmenes por Watt (lm/W)	Medida de eficiencia, mejor dicho de “eficacia” de una fuente de luz. La eficacia es fácil de calcular tomando la producción de lúmenes de una lámpara y dividiéndola entre los watts de la misma.
Lux	La unidad SI (internacional) de iluminancia. 1 lux es igual a un lúmen por metro cuadrado.
Plasma	Se denomina plasma a un gas constituido por partículas cargadas (iones) libres y cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados por las interacciones electromagnéticas de largo alcance entre las mismas.
Portalámparas o Plafonera	Pieza metálica en que se introduce el casquillo de la lámpara para asegurar su conexión con el circuito eléctrico.
Transductor	Dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida.
Valores eficaces	Raíz cuadrada del valor cuadrático medio de una corriente variable.

RESUMEN

Para entender mejor la forma de trabajar de una lámpara fluorescente compacta (LFC), en el capítulo 1 se explica el proceso para producir luz fluorescente y se describe el funcionamiento de las lámparas fluorescentes en general.

Para conocer los efectos de las lámparas fluorescentes compactas en las redes de distribución debemos conocer su funcionamiento. En el capítulo 2 encontramos una breve reseña histórica de la LFC, las partes que la conforman y se describe su funcionamiento.

La parte más importante de las lámparas fluorescentes compactas es el balastro electrónico. En el capítulo 3 se encuentra la clasificación de estos dispositivos electrónicos, también se explica su funcionamiento y parámetros de rendimiento.

En el capítulo 4 se explica la importancia que tiene la calidad de la energía en las redes de distribución y los factores que pueden afectarla.

En el capítulo 5 se clasifica el equipamiento residencial, se analiza el comportamiento eléctrico de varias LFC, se analiza también su comportamiento eléctrico cuando son conectadas simultáneamente con varias lámparas con diferentes características electrónicas y por último se describen los efectos que tienen las LFC en las redes de distribución.

OBJETIVOS

General

Determinar los efectos negativos más importantes en las redes de distribución, causados por el uso de lámparas fluorescentes compactas.

Específicos

1. Explicar la función que tienen los balastos electrónicos en las lámparas fluorescentes compactas.
2. Establecer los cambios que se presentan en el factor de potencia y la distorsión armónica en la red eléctrica.

INTRODUCCIÓN

La crisis energética que se vive a nivel mundial ha obligado a muchos gobiernos a buscar soluciones que permitan ahorrar energía, por otro lado los usuarios residenciales también han buscado soluciones para ahorrar energía y cada vez es más frecuente el uso de las lámparas fluorescentes compactas (LFC). Las empresas distribuidoras de energía están cada vez más preocupadas sobre los efectos que tienen las LFC en las redes de distribución y en la calidad de la energía.

Es importante conocer el proceso para emitir luz fluorescente, el funcionamiento de las lámparas fluorescentes tubulares de gran longitud, para entender mejor el modo de operación de las LFC, la calidad de la energía eléctrica y los parámetros que la afectan nos ayudan a entender mejor los posibles efectos que pueden ejercer en las redes eléctricas.

Las LFC afectan de cierta forma la calidad de la energía en las redes de distribución, pero hay muchos factores que se ven involucrados en el proceso. No todas las LFC son construidas con los parámetros óptimos de calidad y eficiencia, lo cual influye directamente sobre los efectos en las redes eléctricas, entonces se debe empezar por estandarizar las LFC que son distribuidas en el país para obtener un análisis más objetivo del problema.

1 INTRODUCCIÓN A LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES

1.1 Introducción

En la actualidad, las lámparas fluorescentes se han convertido en el medio de iluminación de uso más generalizado en comercios, oficinas, sitios públicos, viviendas, etc. Sin embargo, no todas las personas conocen cómo funcionan, cómo emiten luz sin generar excesivo calor, ni cómo pueden desarrollar más lúmenes por watt (lm/W) con menor consumo de energía eléctrica, comparadas con las lámparas incandescentes.

La tecnología más antigua conocida en las lámparas fluorescentes es la del encendido por precalentamiento. De ese tipo de lámpara aún quedan millones funcionando en todo el mundo a pesar del avance tecnológico que han experimentado en estos últimos años y las nuevas variantes que se han desarrollado. Sin embargo, su principio de funcionamiento no ha variado mucho desde 1938 cuando se introdujeron las primeras en el mercado.

1.2 Necesidad de ahorro de energía

Las limitantes en los combustibles fósiles han llevado a buscar la forma de ahorrar energía, es estimado que los sistemas de iluminación consumen alrededor de 25% de la energía del mundo. Debido a esto los sistemas de iluminación fluorescente son de gran popularidad debido a su gran eficiencia lumen por watt frente a la que se puede obtener en las lámparas incandescentes tradicionales, lo que se traduce en una considerable reducción

de costo-operación. Los fabricantes de este tipo de sistemas hacen un esfuerzo constante para mejorar la calidad, eficiencia y costo de sus productos.

Algunos gobiernos como: USA, Australia o Alemania, han adoptado diversas medidas de apoyo para la sustitución de equipos de bajo rendimiento, por otros más eficientes, como el cambio de lámparas incandescentes por fluorescentes compactas. Además, el ahorro de energía supone una menor contaminación. Sin embargo, la mayoría de equipos de alto rendimiento energético son receptores no lineales, que consumen una corriente altamente distorsionada.

1.3 Emisión de luz fluorescente

La luz en sí misma, constituye una forma de energía que puede liberar como fotón el átomo de un determinado elemento químico. El fotón se caracteriza por ser una pequeñísima partícula poseedora de energía, pero carente de masa, a diferencia de los elementos químicos o de cualquier tipo de materia. Para que un átomo libere fotones de luz es necesario excitar alguno de sus electrones, empleando medios físicos o químicos.

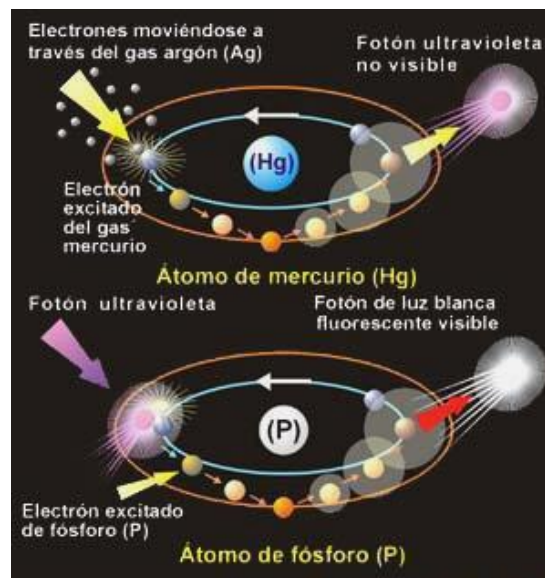
Dada la fuerte atracción que ejerce el núcleo de un átomo sobre los electrones que giran a su alrededor en sus correspondientes órbitas, no es normal que estos la abandonen por sí mismos, si no son excitados por un agente externo. Sin embargo, cuando eso ocurre el electrón salta a otra órbita superior dentro del mismo átomo, que al encontrarse más alejada del núcleo posee mayor nivel de energía.

Debido a la atracción que continúa ejerciendo siempre el núcleo del átomo sobre sus electrones, aquel que abandona su órbita es obligado a que, en

fracciones de segundo, se reincorpore a la suya propia. En ese momento la energía extra que adquirió el electrón en la otra órbita la libera en forma de fotón de luz.

El hecho de que un fotón de luz, sea visible o no para el ojo humano depende, fundamentalmente, de la longitud de onda, frecuencia y del tipo de átomo excitado que posea dicho fotón dentro del espectro electromagnético.

Figura 1. **Representación esquemática de la forma en que el átomo de mercurio (Hg) emite fotones de luz ultravioleta y cómo el átomo de fósforo (P) los convierte en fotones de luz blanca visible.**



Fuente: Afinidad Eléctrica. www.afinidadelectrica.com.ar. Abril de 2009.

En el tubo de descarga de una lámpara de luz fluorescente, los electrones libres y los iones de un gas inerte contenido en su interior, como el gas argón (Ar) en este caso, crean las condiciones necesarias para la creación de un puente de plasma a través del cual puede fluir la corriente eléctrica.

Cuando los electrones libres, se mueven a través del puente de plasma, colisionan con los electrones de los átomos de gas mercurio (Hg) contenidos también dentro del tubo y los saca de sus órbitas. De inmediato, el núcleo de los átomos de mercurio obliga a que los electrones despedidos se reintegren de nuevo a sus correspondientes órbitas, a la vez que liberan fotones de luz ultravioleta, invisible para el ojo humano.

Al mismo tiempo, para que se pueda obtener luz visible, los fotones de luz ultravioleta liberados impactan sobre la capa fosforescente que recubre la pared interior del tubo de cristal de la lámpara, excitando los electrones de los átomos de fósforo (P) contenidos en éste. El impacto saca de sus órbitas a los electrones de los átomos de fósforo, los que son atraídos y obligados a reincorporarse de nuevo a sus correspondientes órbitas. En ese instante, liberan fotones de luz blanca fluorescente visibles para el ojo humano. Ese proceso provoca que el tubo de descarga de la lámpara fluorescente se ilumine, proporcionando luz.

El color de la luz que emiten los tubos de las lámparas fluorescentes, depende de la composición química de la capa de fósforo que recubre su interior. Es por eso, que dentro de la gama de luz blanca que emiten estos tubos podemos encontrar variantes de blancos más cálidos o más fríos. Incluso se fabrican también tubos fluorescentes que emiten luz verde, amarilla o roja.

Como en el proceso de encendido las lámparas fluorescentes utilizan sólo por breves instantes los filamentos de tungsteno, no da tiempo a que se calienten tanto como ocurre con las lámparas incandescentes. Así, al ser mucho menor la pérdida de energía por disipación de calor al medio ambiente, el consumo eléctrico se reduce en un 70 a 80 por ciento aproximadamente.

Esto las convierte en una fuente emisora de luz más económica, eficiente y duradera si las comparamos con las lámparas o bombillas incandescentes.

1.4 Sistemas de iluminación

En la actualidad, los centros laborales y lugares en que vivimos o nos encontramos, son algo más que un mero lugar de trabajo u ocio, son entornos en los que las personas y sus necesidades deben ser puntos de máxima atención para el diseñador de iluminación. Por lo tanto, se exige que las soluciones tomadas en una instalación de iluminación sean parte de un conjunto, de soluciones que generen ambientes agradables, ergonómicamente correctos y energéticamente racionales.

Los factores fundamentales que se deben tener en cuenta al realizar el diseño de una instalación son los siguientes:

- Iluminancias requeridas (niveles de flujo luminoso (lux) que inciden en una superficie)
- Uniformidad de la repartición de las iluminancias
- Limitación de deslumbramiento
- Limitación del contraste de luminancias
- Color de la luz y la reproducción cromática
- Selección del tipo de iluminación de las fuentes de luz y de las luminarias

Por lo tanto, es importante tener en cuenta la cantidad y calidad de luz necesaria, siempre en función de la dependencia que se va a iluminar y de la actividad que en ella se realizará.

Como elementos de un sistema de iluminación tenemos:

- Fuente de luz. Tipo de lámpara utilizada, que nos permitirá conocer las necesidades eléctricas.
- Luminaria. Es la responsable del control y la distribución de la luz emitida por la lámpara, evita el deslumbramiento y viene condicionada por el tipo de iluminación y fuente de luz escogida.
- Sistema de control y regulación de la luminaria.

Por otro lado, las dos grandes ramas de fuente de luz que existen actualmente son las de incandescencia (luz producida por termo-radiación) y la de descarga (luz producida por luminiscencia).

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

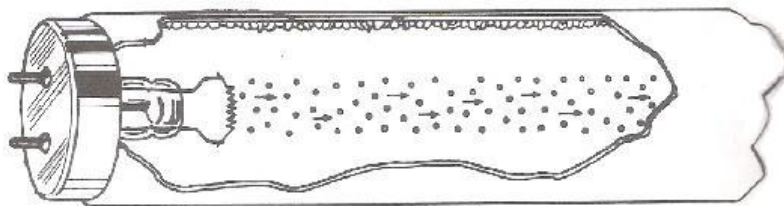
En oposición con la incandescencia, la luminiscencia consiste en la emisión de una radiación electromagnética visible, cuya intensidad en determinadas longitudes de onda (características de cada material) es mucho mayor que la radiación térmica del mismo cuerpo a la misma temperatura. Esencialmente la 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 el número de niveles de energía posibles es muy reducido y la luz se emite en un número limitado de longitudes de onda, lo que origina un espectro discontinuo.

1.5 Descripción de una lámpara fluorescente

Las lámparas fluorescentes son lámparas de descarga eléctrica en atmósfera de vapor de mercurio a baja presión y un gas inerte. La descarga se produce en un recipiente tubular de gran longitud con relación a su diámetro, sobre cuya pared interior se ha depositado una fina capa de sustancias minerales fluorescentes. En las extremidades del tubo se sitúan los electrodos. El tubo está relleno de un gas noble, generalmente argón a algunos milímetros de presión, y de una pequeña cantidad de mercurio, como se describió anteriormente en el proceso para emitir luz fluorescente.

Con la ayuda de la figura 2, se ve cómo se produce la luz en una lámpara fluorescente. Al aplicar una tensión adecuada entre los electrodos o cátodos de la lámpara, se produce una descarga eléctrica entre ellos; los electrones procedentes de los cátodos, invaden el espacio entre cátodos, chocando con los átomos de mercurio, que existen en dicho espacio.

Figura 2. **Constitución de una lámpara fluorescente.**



Fuente: RAMÍREZ VÁZQUEZ, D. José. Luminotecnia, Enciclopedia CEAC de Electricidad. p. 302.

A consecuencia de estos choques una parte de los átomos se ioniza, aumentando así la corriente de descarga; pero la mayor parte de los átomos de

mercurio se excitan. Ahora bien, la baja presión que existe en el interior del tubo, es la causa que en la excitación de los átomos de mercurio se emitan, casi exclusivamente radiaciones ultravioleta cuya longitud de onda es de 253.7 μm . Estas radiaciones excitan a su vez las materias fluorescentes depositadas en las paredes del tubo que, según la ley de Stokes, emitirán radiaciones de mayor longitud de onda que las radiaciones ultravioletas incidentes; o, dicho de otra forma, emitirán radiaciones visibles.

La mayoría de las lámparas fluorescentes funcionan en serie con un dispositivo que limita la corriente. Una lámpara fluorescente presenta una impedancia negativa en su región de operación. Conforme el gas interno de la lámpara se ioniza al paso del tiempo, la impedancia de la lámpara se reduce. Si no existe control de flujo de corriente a través de la lámpara, esta puede llegar a dañarse a causa de una corriente muy elevada. Por lo tanto, la mayoría de las lámparas fluorescentes funcionan en serie con un dispositivo que limita la corriente. Este circuito auxiliar, llamado normalmente balastro limita la corriente a un valor determinado para cada lámpara. El balastro, en otras palabras, será el encargado de proporcionar la tensión de arranque y funcionamiento en régimen permanente de la lámpara.

1.5.1 Comparación con lámparas convencionales

En el uso de lámparas fluorescentes no existen demasiadas pérdidas en forma de calor, en comparación con las lámparas incandescentes. Sin embargo, los componentes electrónicos empleados en los balastros si consumen energía que se pierde en forma de calor. Por ello es importante el estudio de topologías con el mínimo de componentes y etapas de conversión. Por otra parte, el costo de las lámparas incandescentes es notablemente más

bajo que el de una lámpara fluorescente, de tal forma, que es necesario buscar nuevos diseños para obtener competitividad en el mercado.

Algunas de las ventajas que presentan las lámparas fluorescentes, sobre las demás lámparas eléctricas existentes son:

- Buen rendimiento luminoso, que puede llegar hasta los 70 lúmenes por vatio es decir 4 ó 5 veces mayor que las lámparas incandescentes de igual potencia.
- Variedad de los tonos de luz, sobre todo en la luz blanca.
- En ciertos tonos de luz tienen una distribución espectral muy parecida a la de la luz natural.

Ahora podemos añadir las siguientes cualidades:

- Emisión de luz por una línea luminosa, que puede ser ininterrumpida
- Débil luminancia

Estas cualidades enunciadas significan un importantísimo progreso en luminotecnia porque han abierto nuevas posibilidades y han renovado profundamente la técnica de la iluminación.

Sobre todo, las lámparas fluorescentes, por su alto rendimiento luminoso, han permitido la elevación general de los niveles de iluminación, una mejor calidad de la luz emitida y una variedad, desconocida hasta ahora, en la adaptación a las líneas arquitectónicas por medio de líneas luminosas poco brillantes.

1.6 Clasificación de las lámparas fluorescentes

Por la forma del encendido y por el tipo de los cátodos empleados, las lámparas fluorescentes pueden clasificarse en estos tres tipos fundamentales.

- Lámparas fluorescentes de cátodo caliente y arranque por precalentamiento de los electrodos (véase la figura 3 a).
- Lámparas fluorescentes de cátodo caliente y arranque instantáneo, llamadas también lámparas *Slimline* (véase la figura 3 b).
- Lámparas fluorescentes de cátodo frío, llamadas también lámparas fluorescentes de alta tensión (véase la figura 3 c).

Figura 3. Tipos de lámparas fluorescentes.

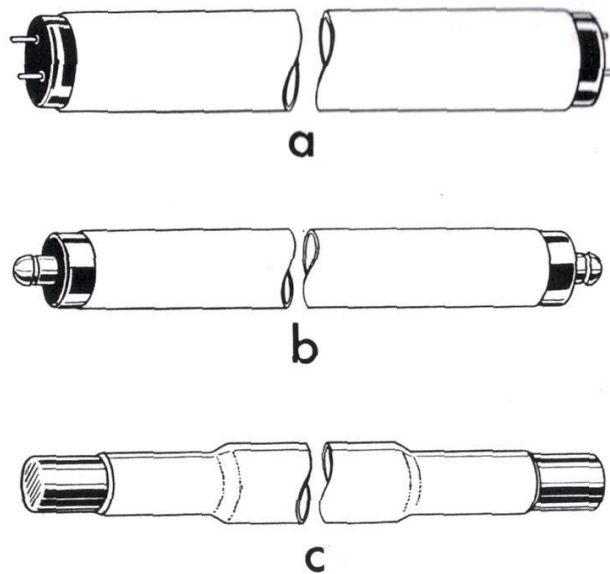


Fig. 173. — Tipos de lámparas fluorescentes. a—de cátodo caliente y arranque por precalentamiento de los electrodos. b—de cátodo caliente y arranque instantáneo. c—de cátodo frío.

Fuente: RAMÍREZ VÁZQUEZ, D. José. Luminotecnia, Enciclopedia CEAC de Electricidad. p. 314.

De los tres tipos indicados, el más generalizado es el que emplea precalentamiento de cátodos para el arranque. Por esta razón, se consideran lámparas normales fluorescentes.

Entre las lámparas fluorescentes se encuentran, por ejemplo, los tubos rectos y circulares y, de aparición más reciente, las lámparas fluorescentes compactas ahorradoras de energía.

2 LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA AHORRADORA DE ENERGÍA (LFC)

2.1 Introducción

Desde que Thomas Alva Edison patentó la bombilla incandescente, en 1879, se han venido desarrollando hasta la fecha otros tipos de lámparas con menor consumo de energía eléctrica y de características mucho más eficientes, como es el caso de las lámparas fluorescentes y las lámparas fluorescentes compactas.

Presentadas mundialmente a principios de los años ochenta, las ventas de las lámparas ahorradoras de energía LFC se han incrementado constantemente debido a las mejoras en su funcionamiento y la reducción de sus precios. El más importante avance en la tecnología de las lámparas fluorescentes (incluidas las LFC) ha sido el reemplazo de los balastos magnéticos o cebadores (transformadores usados para su encendido) por los del tipo electrónico. Este reemplazo ha permitido la eliminación del efecto de "parpadeo" y del lento encendido tradicionalmente asociados a la iluminación fluorescente.

Las lámparas compactas fluorescentes utilizan un 80% menos de energía (debido principalmente a que producen mucho menos calor) y pueden durar hasta 4 veces más, ahorrando así dinero en la factura eléctrica.

2.2 Reseña histórica de la lámpara fluorescente compacta

Las lámparas ahorradoras de energía denominadas LFC (Lámpara Fluorescente Compacta) son una variante mejorada de las lámparas de tubos rectos fluorescentes, que fueron presentadas por primera vez al público en la Feria Mundial de New York efectuada en el año 1939.

Desde su presentación al público en esa fecha, las lámparas de tubos fluorescentes se utilizan para iluminar variados tipos de espacios, incluyendo nuestras casas. En la práctica el rendimiento de esas lámparas es mucho mayor, consumen menos energía eléctrica y el calor que disipan al medio ambiente es prácticamente despreciable en comparación con el que disipan las lámparas incandescentes.

Generalmente, las lámparas o tubos rectos fluorescentes son voluminosos y pesados, por lo que en 1976 el ingeniero Edward Hammer, de la empresa norteamericana *General Electric*, creó una lámpara fluorescente compuesta por un tubo de vidrio alargado y de reducido diámetro, que dobló en forma de espiral para reducir sus dimensiones. Así construyó una lámpara fluorescente del tamaño aproximado de una bombilla común, cuyas propiedades de iluminación eran muy similares a la de una lámpara incandescente, pero con un consumo mucho menor y con poca disipación de calor al medio ambiente.

Aunque esta lámpara fluorescente de bajo consumo prometía buenas perspectivas de explotación, el proyecto de producirla masivamente quedó engavetado, pues la tecnología existente en aquel momento no permitía la producción en serie de una espiral de vidrio tan frágil como la que requería en aquel momento ese tipo de lámpara.

Sin embargo, con el avance de las tecnologías de producción, hoy en día, además de las LFC con tubos rectos, las podemos encontrar también con el tubo en forma de espiral, tal como fueron concebidas en sus orígenes y que podemos ver en la figura 4.

Figura 4. **LFC con tubo en forma de espiral.**



Fuente: Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Lámpara_fluorescente_compacta. Enero de 2009.

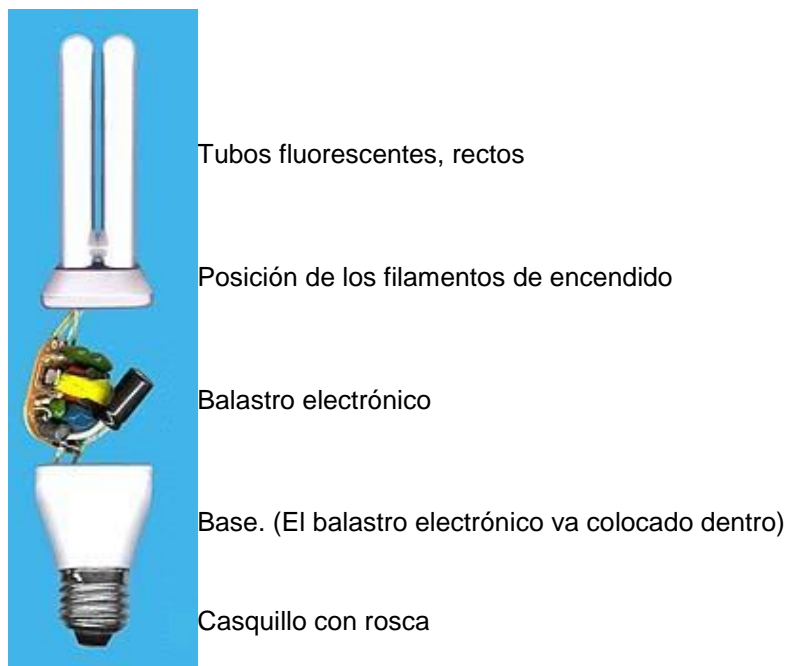
No obstante, en la década de los años 80 del siglo veinte, otros fabricantes apostaron por la nueva lámpara y se arriesgaron a lanzarla al mercado, pero a un precio de venta elevado, equivalente a lo que hoy serían 30 dólares por unidad. Sin embargo, los grandes pedidos que hizo en aquellos momentos el gobierno norteamericano a los fabricantes y su posterior subvención por el ahorro que representaban estas lámparas para el consumo de energía eléctrica, permitieron ir disminuyendo poco a poco su precio, hasta acercarlo al costo de producción.

La posterior aceptación obtenida por las nuevas lámparas ahorradoras de energía dentro de los amplios círculos económicos y de la población, estimuló a los fabricantes a acometer las inversiones necesarias, emprender la producción masiva y bajar mucho más el precio de venta al público.

Hoy en día una LFC estándar, entre 9 y 14 watt, se puede adquirir normalmente en diferentes establecimientos comerciales, a un precio que oscila alrededor de 16 Quetzales o, dependiendo de la calidad, aunque se fabrican también con diferentes estructuras y potencias, que se comercializan a un precio más alto.

2.3 Partes de una lámpara fluorescente compacta

Figura 5. Partes de una LFC.



Fuente: GARCÍA ÁLVAREZ, José Antonio E. Así funcionan las lámparas ahorradoras CFL.
www.asifunciona.com. Abril de 2009.

Las LFC constan de las siguientes partes:

2.3.1 Tubo fluorescente

Se componen de un tubo de unos 6 mm de diámetro aproximadamente, doblados en forma de “U” invertida, cuya longitud depende de la potencia en watt que tenga la lámpara. En todas las LFC existen siempre dos filamentos de tungsteno o wolframio (W) alojados en los extremos libres del tubo con el propósito de calentar los gases inertes, como el neón (Ne), el kriptón (Kr) o el argón (Ar), que se encuentran alojados en su interior. Junto con los gases inertes, el tubo también contiene vapor de mercurio (Hg). Las paredes del tubo se encuentran recubiertas por dentro con una fina capa de fósforo.

Figura 6. **Filamentos colocados dentro de los tubos de una lámpara fluorescente compacta.**



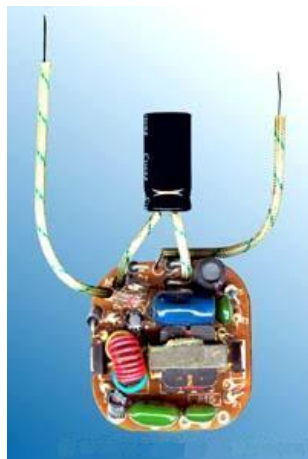
Fuente: GARCÍA ÁLVAREZ, José Antonio E. Así funcionan las lámparas ahorradoras CFL.
www.asifunciona.com. Abril de 2009.

2.3.2 Balastro electrónico

Las LFC son de encendido rápido, por tanto, no requieren cebador (encendedor, *starter*) para encender el filamento, sino que emplean un balastro electrónico en miniatura, encerrado en la base que separa la rosca del tubo de la lámpara. Ese balastro suministra la tensión o voltaje necesario para encender el tubo de la lámpara y regular, posteriormente, la intensidad de corriente que circula por dentro del propio tubo después de encendido.

El balastro electrónico se compone, fundamentalmente, de un circuito rectificador diodo de onda completa y un oscilador, encargado de elevar la frecuencia de la corriente de trabajo de la lámpara a valores entre 20,000 y 60,000 hertz aproximadamente, en lugar de los 50 ó 60 hertz con los que operan los balastos electromagnéticos e híbridos que emplean los tubos rectos y circulares de las lámparas fluorescentes comunes antiguas.

Figura 7. **Elementos que componen el balastro electrónico.**



Fuente: GARCÍA ÁLVAREZ, José Antonio E. Así funcionan las lámparas ahorradoras CFL.
www.asifunciona.com. Abril de 2009.

2.3.3 Base

La base de la LFC se compone de un receptáculo de material plástico, en cuyo interior hueco se aloja el balastro electrónico. Unido a la base se encuentra un casquillo con rosca normal E-26 (conocida también como rosca Edison), la misma que utilizan la mayoría de las bombillas o lámparas incandescentes. Se pueden encontrar también LFC con rosca E-14 de menor diámetro (conocida como rosca candelabro). No obstante, existen variantes con otros tipos de conectores, de presión o bayoneta, en lugar de casquillos con rosca, que funcionan con un balastro electrónico externo, que no forma parte del cuerpo la lámpara.

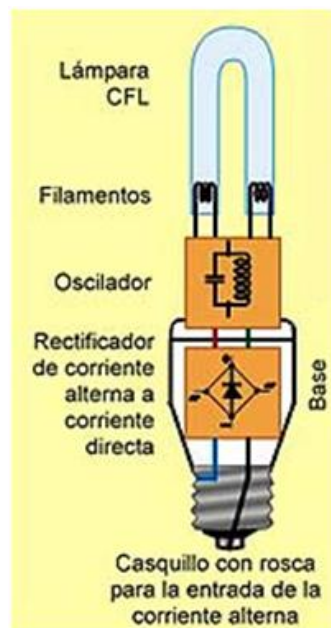
2.4 Funcionamiento de una lámpara fluorescente compacta

El funcionamiento de una lámpara fluorescente ahorradora de energía es el mismo que el de un tubo fluorescente común, excepto que es mucho más pequeña y manuable.

Cuando enroscamos la LFC en un portalámparas (igual al que utilizan la mayoría de las lámparas incandescentes) y accionamos el interruptor de encendido, la corriente eléctrica alterna fluye hacia el balastro electrónico, donde un rectificador diodo de onda completa se encarga de convertirla en corriente directa. A continuación un circuito oscilador, compuesto fundamentalmente por un circuito transistorizado en función de amplificador de corriente, un enrollado o transformador (reactancia inductiva) y un capacitor o condensador (reactancia capacitiva), se encarga de originar una corriente alterna con una frecuencia, que llega a alcanzar entre 20 mil y 60 mil ciclos o hertz por segundo.

La función de esa frecuencia tan elevada, es disminuir el parpadeo que provoca el arco eléctrico que se crea dentro de las lámparas fluorescentes cuando se encuentran encendidas. De esa forma se anula el efecto estroboscópico que normalmente se crea en las antiguas lámparas fluorescentes de tubo recto que funcionan con balastos electromagnéticos (no electrónicos). En las lámparas fluorescentes antiguas el arco que se origina posee una frecuencia de sólo 50 ó 60 hertz, la misma que le proporciona la red eléctrica doméstica a la que están conectadas.

Figura 8. **Etapas de funcionamiento de una LFC.**



Fuente: GARCÍA ÁLVAREZ, José Antonio E. Así funcionan las lámparas ahorradoras CFL.
www.asifunciona.com. Abril de 2009.

Para el alumbrado general, el efecto estroboscópico es prácticamente imperceptible, pero en una industria donde existe maquinaria funcionando, impulsadas por motores eléctricos, la instalación de este tipo de lámparas

puede resultar peligroso debido a que la frecuencia del parpadeo de la lámpara fluorescente se puede sincronizar con la velocidad de giro de las partes móviles de las máquinas, creando la ilusión óptica de que no están funcionando, cuando en realidad se están moviendo.

En las LFC no se manifiesta ese fenómeno, pues al ser mucho más alta la frecuencia del parpadeo del arco eléctrico en comparación con la velocidad de giro de los motores, nunca llegan a sincronizarse ni a crear efecto estroboscópico.

Desde el mismo momento en que los filamentos de una LFC se encienden, el calor que producen ioniza el gas inerte que contiene el tubo en su interior, creando un puente de plasma entre los dos filamentos. A través de ese puente se origina un flujo de electrones, que proporcionan las condiciones necesarias para que el balastro electrónico genere una chispa y se encienda un arco eléctrico entre los dos filamentos. En este punto del proceso los filamentos se apagan y se convierten en dos electrodos, cuya misión será la de mantener el arco eléctrico durante todo el tiempo que permanezca encendida la lámpara. El arco eléctrico no es precisamente el que produce directamente la luz en estas lámparas, pero su existencia es fundamental para que se produzca ese fenómeno.

A partir del momento en que los filamentos de la lámpara se apagan, la única misión del arco eléctrico será continuar y mantener el proceso de ionización del gas inerte. De esa forma los iones desprendidos del gas inerte al chocar contra los átomos del vapor de mercurio contenido también dentro de tubo, provocan que los electrones del mercurio se exciten y comiencen a emitir fotones de luz ultravioleta. Dichos fotones, cuya luz no es visible para el ojo humano, al salir despedidos chocan contra las paredes de cristal del tubo

recubierto con la capa fluorescente. Este choque de fotones ultravioletas contra la capa fluorescente provoca que los átomos de flúor se exciten también y emitan fotones de luz blanca, que sí son visibles para el ojo humano, haciendo que la lámpara se encienda.

2.5 Características y ventajas de las lámparas fluorescentes compactas

2.5.1 Características de las LFC

- Son compatibles con los portalámparas, zócalos o “sockets” de las lámparas incandescentes de uso común.
- Al igual que las lámparas incandescentes, sólo hay que enroscarlas en el portalámparas, pues no requieren de ningún otro dispositivo adicional para funcionar.
- Disponibles en tonalidades “luz de día” (daylight) y “luz fría” (cool light), sin que introduzcan distorsión en la percepción de los colores.
- Encendido inmediato tan pronto se acciona el interruptor, pero con una luz débil por breves instantes antes que alcancen su máxima intensidad de iluminación.
- Precio de venta al público un poco mayor que el de una lámpara incandescente de igual potencia, pero que se compensa después con el ahorro que se obtiene por menor consumo eléctrico y por un tiempo de vida útil más prolongado.

2.5.2 Ventajas de las LFC comparadas con lámparas incandescentes

- Ahorro en el consumo eléctrico. Consumen sólo la 1/5 parte de la energía eléctrica que requiere una lámpara incandescente para alcanzar el mismo nivel de iluminación, es decir, consumen un 80% menos para igual eficacia en lúmenes por watt de consumo (lm-W).
- Recuperación de la inversión en 6 meses (manteniendo las lámparas encendidas un promedio de 6 horas diarias) por concepto de ahorro en el consumo de energía eléctrica y por incremento de horas de uso sin que sea necesario reemplazarlas. Comparado respecto a su equivalente en lámpara incandescente.
- Tiempo de vida útil aproximado entre 8,000 y 10,000 horas, en comparación con las 2,500 horas que ofrecen las lámparas incandescentes.
- Requieren menos inversión en mantenimiento que las lámparas incandescentes.
- Generan 80% menos calor que las incandescentes, siendo prácticamente nulo el riesgo de provocar incendios por calentamiento si por cualquier motivo llegaran a encontrarse muy cerca de materiales combustibles.
- Ocupan prácticamente el mismo espacio que una lámpara incandescente.
- Tiene una eficacia luminosa mucho mayor en lúmenes por watt (lm-W) comparadas con una lámpara incandescente de igual potencia.

- Se pueden adquirir con diferentes formas, bases, tamaños, potencias y tonalidades de blanco.

3 BALASTRO ELECTRÓNICO

3.1 Introducción

En el uso de sistemas de iluminación fluorescente, es necesario alimentar a la lámpara de descarga con el voltaje adecuado para evitar un mal funcionamiento y que su vida útil disminuya. De tal forma que la lámpara debe trabajar siempre a su voltaje nominal. Sin embargo, como es sabido para el arranque de la lámpara es necesario un voltaje alto para poder ionizar el gas y encender la lámpara. Debido a esto, una vez suministrado dicho voltaje para el arranque es necesario ajustarlo al voltaje nominal de la lámpara. Es en esta parte, donde toman sentido los circuitos arrancadores en los balastos electrónicos, por tal motivo es necesario describir el funcionamiento de los balastos electrónicos y sus parámetros de rendimiento.

3.2 Clasificación de los balastos

Debido a que los balastos son vitales para la operación de las lámparas fluorescentes, éstos han tenido un importante desarrollo tecnológico. A través de la historia la mayoría de los balastos han sido electromagnéticos, pero en la actualidad los que ofrecen mejor rendimiento y ahorro eléctrico son los balastos electrónicos.

3.2.1 Balastro electromagnético

El balastro electromagnético consiste básicamente de un núcleo de láminas de acero rodeadas por dos bobinas de cobre o aluminio, un transformador. Este arreglo transforma potencia eléctrica en una forma apropiada para arrancar y regular la corriente en la lámpara fluorescente. El tercer componente principal de la mayoría de los balastros electromagnéticos es el capacitor. El capacitor en dichos balastos optimiza el factor de potencia, de tal forma que puede utilizar la energía de manera más eficiente. Los balastros electromagnéticos que están equipados con el capacitor son considerados balastros de alto factor de potencia.

3.2.2 Balastro electrónico

La revolución electrónica ha dado lugar a mejoras drásticas en el funcionamiento de los balastros. El balastro electrónico está basado en una tecnología enteramente diferente a la del balastro electromagnético. Enciende y regula las lámparas fluorescentes en altas frecuencias, generalmente mayores a 20kHz., usando componentes electrónicos en vez del tradicional transformador.

Un aspecto muy importante en la evolución que han tenido los balastros electrónicos dentro de los sistemas de iluminación fluorescente, son las ventajas que presentan con respecto a los balastros electromagnéticos tradicionales, tales como la eliminación del parpadeo de la lámpara en el encendido, el ruido audible, la habilidad para ajustar la salida de luz de la lámpara a casi cualquier nivel cuando es usado un control de intensidad luminosa.

Aunque los balastos electromagnéticos presentan gran simplicidad y bajo costo, estos tienen que trabajar a frecuencia de red lo cual, trae como consecuencia un elevado peso y gran volumen así como bajo rendimiento. Por ello los balastos electrónicos de alta frecuencia son utilizados hoy en día para la alimentación de lámparas fluorescentes. Comparando el balastro tradicional electromagnético con el electrónico, este último puede proporcionar mayor rendimiento, control de la potencia de salida, larga vida a la lámpara y reducido volumen.

3.3 Funcionamiento de un balastro electrónico

El desarrollo de nuevas topologías en la implementación de un factor de potencia alto y balastos de bajo costo, se ha convertido en una importante rama de investigación en el área de la electrónica de potencia. Varias soluciones pueden ser obtenidas de la literatura. Una primera solución para implementar un alto factor de potencia en un balastro está basada en la integración de las dos etapas que lo constan, gracias a la reducción de elementos de control que comparten uno o más interruptores.

3.3.1 Operación básica de un balastro

Los balastos son diseñados para operar las lámparas fluorescentes y proveer el voltaje requerido apropiado para el arranque y operación de la lámpara. En todos los sistemas de iluminación fluorescente, el balastro se encarga de tres principales tareas:

- Provee el voltaje adecuado para establecer un arco entre los dos electrodos que enciende la lámpara.

- Regula la corriente eléctrica que fluye a través de la lámpara para estabilizar la salida de luz.
- Proporciona el voltaje de operación correcto para proveer la corriente de operación específica de la lámpara. Los balastos también pueden compensar variaciones del voltaje de fuente.

3.3.2 Estructura del balastro electrónico

Los balastos son dispositivos diseñados para operar las lámparas fluorescentes y proveer el voltaje requerido apropiado para el arranque y operación de la lámpara. Los balastos electrónicos están compuestos de grupos de componentes electrónicos que convierten voltaje CA a CD, pasando por un convertidor CD-CD el cual funciona como corrector de factor de potencia. Posteriormente la salida se conecta a un inversor de alta frecuencia que alimenta la lámpara.

3.4 Parámetros de rendimiento

Los factores de rendimiento de los balastos proporcionan medidas comparativas de los parámetros de eficiencia del funcionamiento de los sistemas de iluminación y cómo estas afectan el comportamiento del balastro. Los siguientes parámetros son los que especifican el buen desempeño de un balastro.

3.4.1 Factor de potencia total o verdadero

Es la razón entre potencia activa (W) y total (VA) que consume una carga eléctrica. Su valor puede variar entre 0 y 1. El FP es una característica de la carga eléctrica. En teoría mientras mayor sea un FP (cercano a 1) es mejor ya que hay una disipación máxima de potencia. Asimismo, también se define como una medida de la efectividad del dispositivo para convertir la potencia aparente S, el producto rms de la corriente y el voltaje de entrada, en potencia eléctrica útil ó potencia activa.

El factor de potencia, se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad [1]$$

La fórmula anterior, describe el efecto combinado de la potencia reactiva que proviene del desplazamiento existente entre la corriente y el voltaje de entrada con el contenido armónico de la corriente de salida. Si la componente fundamental de la corriente está en fase con el voltaje, es posible expresar el factor de potencia de la siguiente forma:

$$FP = \frac{V_{rms} I_{rms,1}}{V_{rms} I_{rms}} = 1 \quad [2]$$

Un factor de potencia alto, significa que la mayor parte de la energía que recibe el dispositivo eléctrico es aprovechada para efectuar su función.

3.4.2 Distorsión armónica total (DAT)

Son las componentes no fundamentales de la frecuencia de una onda de energía eléctrica deformada de 60 Hz. Estas tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de 60 Hz.

Además de estos dos parámetros antes mencionados, existen también, protección a transitorios de línea, corriente de arranque e interferencia de radio frecuencia ó interferencia electromagnética (RFI/EMI).

4 CALIDAD DE LA ENERGÍA Y ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

4.1 Introducción

El suministro de energía eléctrica es uno de los principales servicios en las sociedades modernas para el soporte de la vida cotidiana. Los consumidores de electricidad deben tomar conciencia de la necesidad de contar con un servicio de alto nivel en términos de calidad en la tensión proporcionada por las compañías distribuidoras.

Uno de los principales puntos de la calidad de la energía se refiere a la tensión armónica. Regularmente existen problemas en las instalaciones eléctricas que no se reconocen fácilmente, los cuales son causados eventualmente por corrientes armónicas.

4.2 Calidad de la energía eléctrica

Un sistema eléctrico ideal debe proporcionar un voltaje con las siguientes características:

- Amplitud constante
- Forma de onda sinusoidal
- Frecuencia constante
- Balance en el caso de red trifásica

Bajo estas condiciones, las máquinas y equipos eléctricos conectados a este sistema no deben presentar un comportamiento anormal y tienen que funcionar tal como se espera en su diseño.

Sin embargo, un sistema eléctrico real no cumple con las características ideales, mencionadas anteriormente. En la práctica, las redes eléctricas presentan una serie de alteraciones o perturbaciones que alteran a la calidad del servicio, dentro de las cuales destacan:

- Variaciones de frecuencia
- Variaciones de la amplitud del voltaje (flicker)
- Sobretensiones
- Desbalances entre las fases
- Distorsiones en voltajes y corrientes (Armónicas)

Cuando un voltaje senoidal es aplicado a un circuito lineal las corrientes que fluyen en el sistema y caídas de voltaje también son senoidales. Durante los últimos 20 años ha crecido la preocupación debido al hecho de que la forma de onda de corrientes y voltajes en alimentadores y buses se ha corrompido por la aparición de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos de potencia, debido principalmente a la introducción masiva de la electrónica de potencia en las redes industriales, así como a la operación, cada vez más extendida, de grandes hornos de arco usados para fundición de acero, grandes instalaciones de computadoras y equipo electrónico de control. Ante esta situación es indispensable aplicar medidas que conlleven a mantener los sistemas eléctricos con una calidad de energía adecuada y aprovechar las ventajas de la tecnología de los equipos electrónicos que ayudan a incrementar la productividad, comodidad y ahorro de energía.

De conformidad con lo establecido en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD), el servicio eléctrico de distribución debe prestarse a la población, con calidad, continuidad y sin distorsiones que menoscaben la calidad del servicio al usuario final.

Según el artículo 2 de las NTSD, el objetivo de las normas es establecer derechos y obligaciones de los prestatarios y Usuarios del Servicio Eléctrico de Distribución, índices o indicadores de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica, tanto en el punto de entrega como en el punto de utilización de tales servicios, tolerancias permisibles, métodos de control, Indemnizaciones, sanciones y/o multas, respecto de los siguientes parámetros:

a) Calidad del producto suministrado por el distribuidor:

- Regulación de tensión,
- Desbalance de tensión en servicios trifásicos,
- Distorsión armónica, y
- Flicker.

b) Incidencia del usuario en la calidad del producto:

- Distorsión armónica,
- Flicker, y
- Factor de potencia.

c) Calidad del servicio técnico:

- Interrupciones.

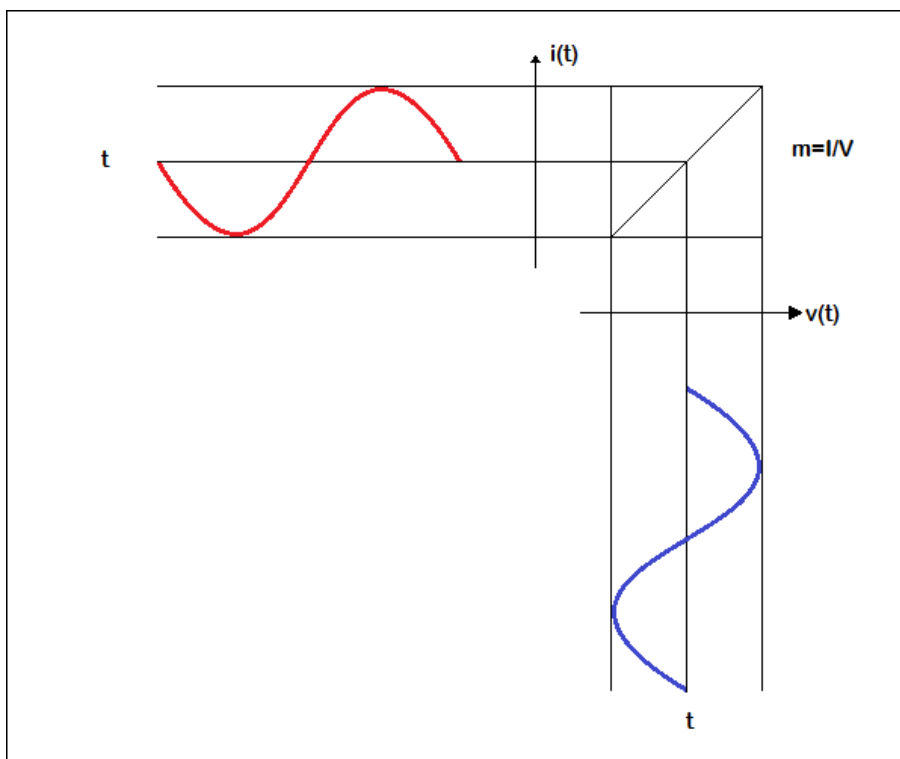
d) Calidad del servicio comercial:

- Calidad del servicio comercial del distribuidor, y
- Calidad de la atención al usuario.

4.3 Cargas lineales y no lineales

Cuando se aplica un voltaje senoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denominan cargas lineales.

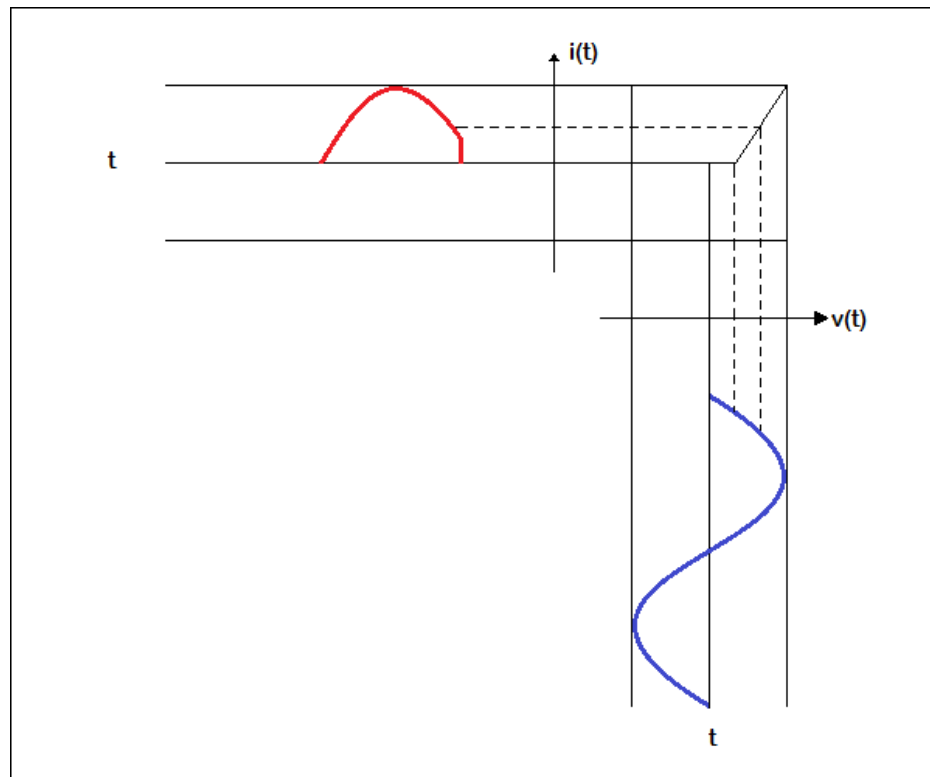
Figura 9. **Carga lineal. La corriente y el voltaje son proporcionales a lo largo de la línea de su impedancia.**



Fuente: ARRILLAGA, J.; EGUÍLUZ, L.I. Armónicos en sistemas de potencia.

En los circuitos en los que su curva corriente-voltaje, no es lineal, el voltaje aplicado no es proporcional a la corriente, resultando una señal distorsionada con respecto a la senoidal.

Figura 10. **Carga no lineal de una resistencia controlada por un dispositivo semiconductor en la que la corriente y el voltaje no son lineales.**



Fuente: ARRILLAGA, J.; EGUÍLUZ, L.I. Armónicos en sistemas de potencia.

La curva característica corriente-voltaje de la carga define, si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales.

La distorsión armónica en los sistemas eléctricos es provocada por las cargas no lineales, contaminando la red y pudiendo afectar incluso a otros usuarios que únicamente posean cargas lineales.

4.4 Generación de armónicos

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo φ respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de corriente que inyectan armónicos en la red.

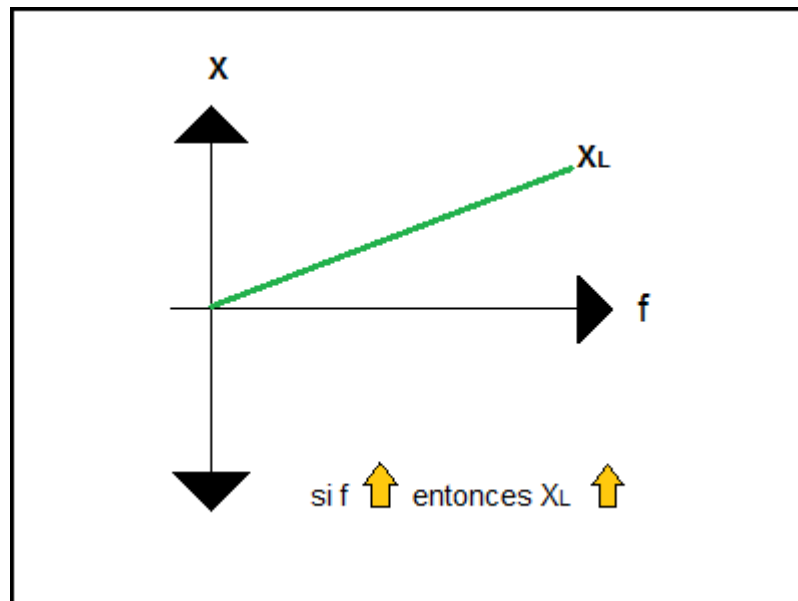
Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores y otros elementos con características similares. El resto de las cargas tienen un comportamiento lineal y no generan armónicos, inductancias, resistencias y condensadores.

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal. Diodos y elementos semiconductores son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos. Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia. En la figura 11 se ha representado la variación de la impedancia de una inductancia respecto a la frecuencia. La fórmula que determina dicha función es la siguiente:

$$X_l = L \times 2 \times \pi \times f \quad [3]$$

Figura 11. **Variación de la impedancia inductiva en función de la frecuencia.**

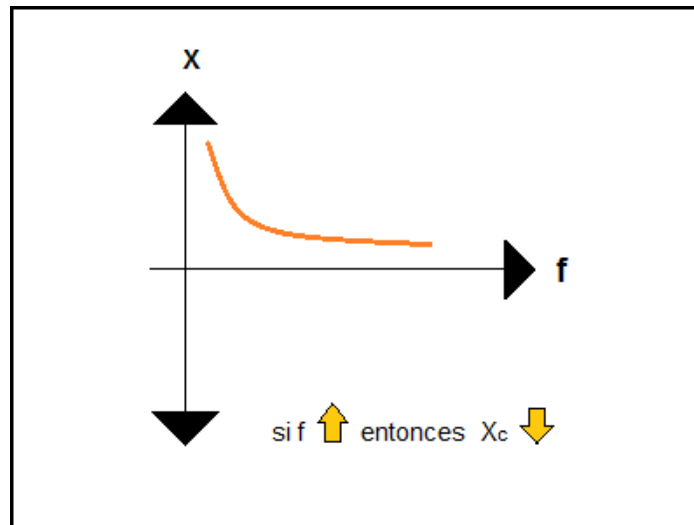


Fuente: WILSON, Jerry D. Física. p. 641.

Análogamente, en la figura 12 se ha representado la misma curva para una impedancia capacitiva. La fórmula que determina dicha función es:

$$X_c = \frac{1}{C \times 2 \times \pi \times f} \quad [4]$$

Figura 12. **Variación de la impedancia capacitiva en función de la frecuencia.**



Fuente: WILSON, Jerry D. Física. p. 640.

O sea, a una determinada frecuencia pueden tener una impedancia constante pero su impedancia varía en función de la frecuencia. Estos tipos de elementos no generan armónicos si son energizados con una tensión de una sola frecuencia, sin embargo, si distorsionan la entrada, si existe más de una frecuencia y pueden alterar el contenido de armónicos.

Las dos categorías de equipos generadores de armónicos, pueden originar una interacción compleja en la cual la energía de los armónicos es transformada o multiplicada de una frecuencia a otra.

Los usuarios residenciales, comerciales e industriales, tienen una gran cantidad de equipos como hornos de microondas, computadoras, sistemas con control robótico, televisión, VCR, estéreos y otros equipos. Todos estos equipos contribuyen con la generación de cantidades variables de armónicos. Aún

ventiladores eléctricos y simples motores de inducción trabajando sobrecargados pueden contribuir a la creación de armónicos debido a la saturación de sus bobinas. Las salidas de armónicos de estos múltiples aparatos pueden sumarse y originar problemas en el sistema de potencia.

4.5 Índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónica

EL incremento en el uso cada vez más frecuente de cargas no lineales en usuarios residenciales, ha provocado en los últimos años una mayor dedicación entre los investigadores de la ingeniería eléctrica al problema de la distorsión de la onda de tensión en los sistemas de distribución.

Actualmente en una típica vivienda residencial puede encontrarse un número importante de cargas no lineales: televisores, computadoras personales, videograbadoras, equipos de audio, hornos microondas, lámparas fluorescentes compactas, etc., las que introducen un elevado contenido armónico en la red de distribución. Muchos de estos dispositivos utilizan fuentes convertidoras de c.a. a c.c., que en esencia consisten en diodos rectificadores de onda completa que alimentan a un condensador conectado en paralelo con la carga. La continua carga y descarga del condensador provoca distorsiones en la forma de onda de la corriente presentando crestas puntiagudas, a lo cual se le conoce como factor de rizado del capacitor.

Las cargas no lineales originan corrientes armónicas que se propagan en las redes de transmisión y distribución eléctrica, afectando los índices de calidad del suministro. Esto puede ser peligroso para algunos equipos y cargas sensibles (ej. dispositivos de protección, circuitos de medida eléctrico o electrónicos, motores, etc. En el caso de los motores las componentes de

secuencia cero y negativa generan pares inversos que frenan el motor, generando sobrecalentamiento y recortando su vida útil.), además de los problemas de calentamiento que originan en las líneas y transformadores de distribución. A continuación se detallan los índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónica.

4.5.1 Índice de distorsión armónica total (DAT)

Uno de los índices más utilizados es la denominada distorsión armónica total, citada en la literatura anglosajona como THD (*Total Harmonic Distortion*), y aplicable tanto para corriente como para tensión. Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Este valor es usualmente expresado como un porcentaje de la onda fundamental. Así para la onda de corriente será:

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} 100\% \quad [5]$$

Donde:

k: número de armónica.

I_1 : valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

I_k : valor eficaz de él armónico k.

El THD_I puede variar desde pocas unidades porcentuales hasta superar el 100%, como ocurre en las fuentes de potencia conmutadas.

Aunque los armónicos de corriente de frecuencia más elevada pueden tener valores pequeños, al ser las reactancias de la línea y de los transformadores proporcionales a la frecuencia, los armónicos de tensión pueden tomar valores significativos.

De forma similar se expresa la distorsión en la tensión:

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} 100\% \quad [6]$$

4.5.2 Diversidad y curvas del contenido de armónicos

Como la propia carga, la generación de armónicos por los usuarios varía en función del tiempo, siendo posible graficar curvas de armónicos en forma similar a las curvas de carga. Esta variación en la generación de armónicos es causada por los mismos aparatos eléctricos que se conectan a la fuente de potencia eléctrica, siendo variables con la hora del día, el día de la semana, la estación del año, es decir, en la misma forma en que varía su curva de carga. Sin embargo, los armónicos no son proporcionales a la carga o necesariamente una función del uso de los aparatos eléctricos, frecuentemente dependen de otros factores que originan cambios en las impedancias del sistema.

Los armónicos sumados en un sistema de potencia en una determinada área o sobre un alimentador, está sometido a un comportamiento similar al del factor de coincidencia. Como la demanda pico, el pico de armónicos creado por un grupo de usuarios, no es igual a la suma de los picos individuales de los niveles de armónicos que pueden originar, esto se debe a los siguientes 3 factores:

- Diversidad temporal. Es idéntico en el concepto y en la aplicación a la coincidencia o diversidad aplicada a la demanda máxima: diferentes usuarios producen su pico de armónicos que salen de sus instalaciones a diferentes horas. Como la carga, los picos de armónicos tienen períodos de unos cuantos minutos a una determinada hora, siguiendo el ciclo de encendido y apagado de los diferentes aparatos eléctricos. El nivel máximo de armónicos para un grupo de usuarios ocurre cuando la suma de sus demandas es un máximo, y como ellos no tienen su demanda máxima al mismo tiempo, esto puede ser mucho menor que la suma de los picos de armónicos de los usuarios individuales.
- Diversidad de fase. Supongamos que, dos aparatos eléctricos idénticos se conectan al mismo tiempo a la fuente de potencia eléctrica y que ambos producen igual cantidad de armónicos de tercer orden, pero debido a la diferencia en sus circuitos la polaridad de uno con respecto al otro es inversa (180 grados de diferencia de fase), su salida de armónicos se cancelará completamente. Conociendo las principales fuentes de armónicos en un sistema de potencia, existe un ancho rango de ángulos de fase en los armónicos generados y cierta cantidad de cancelaciones ocurren. Sin embargo, a todos los aparatos eléctricos se les aplica la misma forma de onda, lo cual tiende a sincronizar su comportamiento. Simultáneamente muchas otras fuentes están un poco sincronizadas, con diversidad en fase que se presenta, debido a las diferencias en especificaciones de equipo, etc.
- Atenuación. Si un número suficiente de aparatos similares generadores de armónicos son instalados, pueden llegar a ser significativos con respecto a la impedancia del sistema visto desde su localización, ellos distorsionan la tensión que ven (la tensión que se les aplica para que

produzcan armónicos) y en muchos casos esto reduce su contribución armónica individual.

Como resultado de estos tres fenómenos, la contribución armónica por aparato disminuye a medida que más aparatos son incluidos. En general, el factor de diversidad y la diversidad de fase, son las razones más importantes, de qué los armónicos de menor orden disminuyen cuando se incrementa el tamaño del grupo, y la atenuación es el mayor fenómeno que reduce la magnitud de las armónicas de mayor nivel.

El factor de coincidencia armónico se define de la siguiente manera.

$$HC = \frac{\text{Distorsión Armónica total de un grupo de usuarios}}{\text{Sumatoria de las distorsiones armónicas individuales}} \quad [7]$$

En general en la presencia de muchas fuentes similares de armónicos, el nivel de armónicos en el sistema tiende a adquirir un nivel de saturación, en donde el factor de coincidencia reduce su contribución a valores del 70 %.

4.6 Incidencia del usuario en la calidad de la energía eléctrica

Según el artículo 2 de las NTSD los parámetros de incidencia del usuario en la calidad del producto son: distorsión armónica, *flicker* y factor de potencia. Los puntos de más interés para efectos de este trabajo son: la distorsión armónica y el factor de potencia, los cuales desarrollaremos a continuación.

4.6.1 Distorsión armónica de la corriente generada por el usuario

En esta parte citamos los artículos 41, 42 y 43 de las NTSD que abarcan casi en su totalidad la distorsión armónica de la corriente generada por el usuario y están escritos tal y como sigue:

- Artículo 41. Índice de Calidad de la Distorsión Armónica de la Corriente de Carga. El índice está dado por la Distorsión Armónica de la Corriente de Carga medida en el punto de conexión.

Para tensiones mayores de 1 kv y potencias de carga mayores de 10 kw, se utiliza:

$$DATI = \left(\sqrt{\sum I_i^2} / I_{12} \right) * 100 \quad [8]$$

$$DAII = (I_i / I_1) * 100 \quad [9]$$

En donde:

DATI: Distorsión Armónica Total de Corriente.

DAII: Distorsión Armónica Individual de Corriente.

I_i : Componente de la intensidad de corriente de la armónica de orden i .

I_1 : Componente de la intensidad de corriente de la frecuencia fundamental (60 Hz).

Para tensiones menores de 1 kv y potencias de carga menores de 10 kw, se utiliza:

$$\Delta I_i = (I_i \text{ carga} - I_i \text{ límite}) \quad [10]$$

Donde:

I_i límite: límite de tolerancia establecida para la intensidad armónica.

- Artículo 42. Tolerancias para la Distorsión Armónica de la Corriente de Carga. La distorsión armónica de tensión producida por una fuente de corriente armónica dependerá de la potencia del Usuario, del nivel de tensión al cual se encuentra conectado, y del orden de la armónica, por lo que en la Tabla siguiente se establecen las tolerancias de corrientes armónicas individuales para distintos niveles de tensión, potencia máxima demandada y orden de armónica.

Tabla 1. **Tolerancias de corrientes armónicas individuales para distintos niveles de tensión, potencia máxima demandada y orden de armónica.**

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	P ≤ 10 Kw V ≤ 1kV	P >10Kw 1kV < V ≤ 60kV	P >50kW v >60kV
	INTENSIDAD ARMONICA MAXIMA (AMP)	DISTORSION ARMONICA INDIVIDUAL DE CORRIENTE DAII, EN %	
IMPARES NO MULTIPLOS DE 3			
5	2,28	12,0	6,0
7	1,54	8,5	5,1
11	0,66	4,3	2,9
13	0,42	3,0	2,2
17	0,26	2,7	1,8
19	0,24	1,9	1,7
23	0,20	1,6	1,1
25	0,18	1,6	1,1
> 25	4,5/n	0,2 + 0,8*25/n	0,4
IMPARES MULTIPLOS DE 3			
3	4,60	16,6	7,5
9	0,80	2,2	2,2
15	0,30	0,6	0,8
21	0,21	0,4	0,4
> 21	4,5/n	0,3	0,4
PARES			
2	2,16	10,0	10,0
4	0,86	2,5	3,8
6	0,60	1,0	1,5
8	0,46	0,8	0,5
10	0,37	0,8	0,5
12	0,31	0,4	0,5
> 12	3,68/n	0,3	0,5
DISTORSION ARMONICA TOTAL DE CORRIENTE DATI, EN %	--	20	12

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). Normas técnicas del servicio de distribución (NTSD). Artículo 42.

Se considerará, que la energía eléctrica es de mala calidad, cuando en un lapso de tiempo mayor al cinco por ciento, del empleado en las mediciones en el Período de Medición, dichas mediciones muestran que la Distorsión Armónica de la Corriente de Carga ha excedido el rango de tolerancias establecidas.

- Artículo 43. Control para la Distorsión Armónica de la Corriente de Carga. El control de la generación de armónicas por los Usuarios será responsabilidad de los Distribuidores, así como también el desarrollo de las acciones necesarias para que se dé solución al problema, realizando mediciones en los puntos que considere necesarios.

Las mediciones deberán ser realizadas de acuerdo con la Norma IEC 1000-4-7 registrando la Distorsión Armónica Total Corriente de Carga conjuntamente con la Distorsión Armónica Individual de Corriente de Carga, así como de la corriente de carga. En aquellos casos donde se decida realizar mediciones sin carga o carga mínima, para referencia, deberán ser tomadas por cinco horas.

La medición de la Distorsión Armónica comenzará a partir del inicio de la Etapa de Transición. De los resultados obtenidos durante los dos primeros años de medición, se determinará si es necesaria alguna modificación para medir la Distorsión Armónica en la Corriente. Podrán utilizarse los mismos puntos donde se mida la Distorsión Armónica de Tensión.

4.6.2 Factor de potencia

Ahora, citamos los artículos 49 y 50 de las NTSD, los cuales tratan sobre el factor de potencia y están escritos tal y como sigue:

- Artículo 49. Valor Mínimo para el Factor de Potencia. El valor mínimo admitido para el factor de potencia se discrimina de acuerdo a la potencia del Usuario, de la siguiente forma:

Usuarios con potencias de hasta 11 kw	0.85
Usuarios con potencias superiores a 11 kw	0.90

- Artículo 50. Control para el Factor de Potencia. El control se realizará en el punto de medición o en la acometida del Usuario, en períodos mínimos de siete días, registrando datos de energía activa y reactiva. El factor de potencia se determinará, efectuando mediciones tanto en el período horario de punta como en el resto del día, de acuerdo a lo indicado a continuación:

$$Fpot_p = \text{EnergAct}_p / \sqrt{(\text{EnergAct}_p^2 + \text{EnergReact}_p^2)} \quad [11]$$

Donde:

$Fpot_p$: Factor de Potencia para el período horario (p)

EnergAct_p : Energía activa registrada en el período de registro para el período horario (p)

EnergReact_p : Energía reactiva registrada en el período de registro para el período horario (p)

5 COMPORTAMIENTO DE LA LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA EN LA RED ELÉCTRICA

5.1 Introducción

Las LFC son cargas no lineales las cuales pueden presentar problemas a la red. Los sectores residencial, comercial y público presentan características no lineales. El creciente uso de LFC en los hogares residenciales preocupa a los distribuidores de energía eléctrica y es importante conocer los efectos que tienen en las redes de distribución.

La introducción cada vez más notable de equipos electrónicos de respuesta no lineal, presta también su colaboración al aumento de la contaminación armónica en las redes eléctricas.

5.2 Clasificación del equipamiento eléctrico residencial

Se puede agrupar el equipamiento eléctrico residencial teniendo en cuenta su diferente comportamiento frente a la red. Con este criterio es posible diferenciar cuatro tipos de consumo:

- Aparatos que presentan fuerte comportamiento no lineal: televisores, videos, microondas, equipos de audio, computadoras personales, iluminación fluorescente con balastro electrónico sin filtro, lámparas fluorescentes compactas. En estos equipos, la corriente se encuentra prácticamente en fase con la tensión presentando frecuentemente un leve comportamiento capacitivo.

- Aparatos que presentan comportamiento lineal y la corriente en fase con la tensión. Cargas totalmente resistivas: lámparas incandescentes, estufas, secadores de pelo, etc. Cuando se realiza un control de potencia por medios electrónicos en cargas totalmente resistivas, si pueden presentar un comportamiento fuertemente distorsivo.
- Aparatos que presentan comportamiento “cuasi lineal” y su corriente se encuentra desfasada respecto a la tensión: refrigeradoras, lavadoras de ropa, ventiladores, secadoras de ropa, lavaplatos eléctrico, equipos de aire acondicionado, etc., e iluminación fluorescente con balastro magnético.
- Aparatos que presentan distorsión y desfasaje simultáneo.

En la clasificación anterior es preciso diferenciar el peso relativo de cada una de las cargas mencionados en cuanto a su aporte a la demanda eléctrica total de la vivienda. Por ejemplo la conexión de una estufa de 1000 Watt frente a otras posibles cargas conectadas (televisor 100 W, LFC 20 W) modifica en forma notable la característica del consumo. Es por ello que en este estudio se plantean diferentes escenarios donde se deberá analizar la variación de la característica de la demanda total de una vivienda frente a la conexión de diferentes cargas.

5.3 Definiciones de potencia para cargas no lineales

Es conveniente aclarar primero algunos conceptos teóricos que aparecen frecuentemente en forma confusa. Cuando no existe una relación matemática lineal entre el voltaje y la corriente aplicada a un circuito, los conceptos de potencia conocidos regularmente no son aplicables, por ello las definiciones deben ampliarse, haciendo la potencia aparente:

$$S = V * I = V * \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad [12]$$

A la potencia activa solo contribuye la onda fundamental de la corriente en:

$$P = P_1 = V * I_1 * \cos \varphi_1 \quad [13]$$

La potencia reactiva total es:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad [14]$$

Que contiene dos componentes, el reactivo de la onda fundamental:

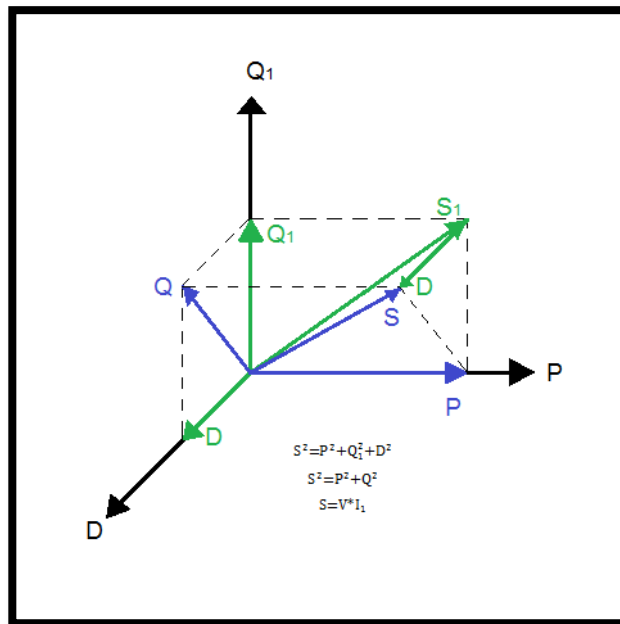
$$Q = V * I_1 * \sin \varphi_1 \quad [15]$$

Y la potencia reactiva de deformación debida a las armónicas:

$$D = V * \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots} \quad [16]$$

Las magnitudes definidas se pueden representar gráficamente por medio de triángulos rectángulos en el espacio. (Figura 13)

Figura 13. **Potencias para cargas no lineales.**



Fuente: BRUGNONI, Mario S.F.; IRIBARNE, Rosana. Estudio de impactos en redes de distribución y medio ambiente debido al uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas (informe). p. 43.

El factor de potencia para ondas con contenido armónico será:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{V * I_1 * \cos \varphi_1}{V * I} = K * \cos \varphi_1$$

Donde:

$$K = \frac{I_1}{I}$$

El $\cos \varphi_1$, se denomina factor de potencia de desplazamiento y es una medida de desfase que existe entre la tensión y la componente fundamental de la corriente. La relación I_1/I , se denomina “factor de contracción (K)” y

representa un índice del grado de distorsión de la onda de corriente. Estos dos conceptos a menudo se confunden, sin embargo, solo son iguales para una corriente sinusoidal, o sea cuando el factor de la fundamental $K = 1$.

5.4 Desempeño de la lámpara fluorescente compacta

La evaluación de la calidad de las lámparas de bajo consumo está determinada por tres factores: la potencia eléctrica efectiva, el ahorro que representa respecto de una lámpara incandescente de la misma potencia lumínica, y la cantidad de horas de vida útil. Las marcas de mejor calidad no sólo consumen hasta cinco veces menos que las incandescentes sino que duran hasta cuatro veces más, es decir, que el mayor precio que se paga al comprarlas, termina recuperándose rápidamente por su efectividad y duración.

Es importante saber que no todas las LFC poseen un comportamiento tal como lo expresan en sus especificaciones, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI, Argentina), realizó un estudio sobre 600 lámparas de bajo consumo de 17 marcas diferentes, y los resultados son alarmantes, encontraron que hay lámparas que iluminan menos que lo señalado en sus envases y otras cuya vida útil es mucho menor a la cantidad de horas que declaran.

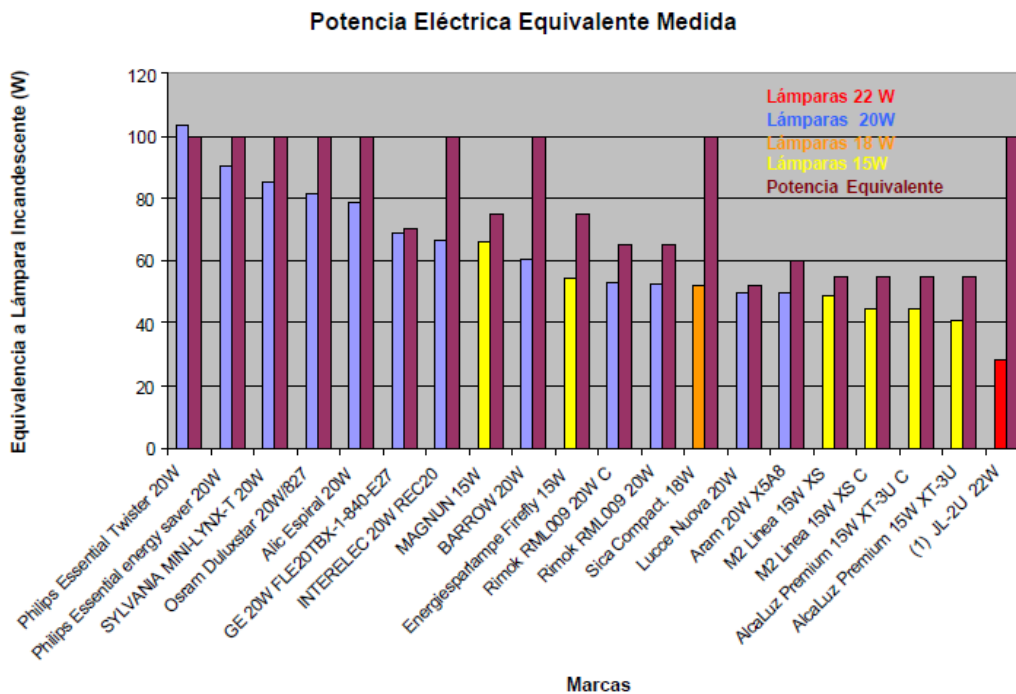
5.4.1 Resultados de un estudio sobre el desempeño de las lámparas de bajo consumo LFC

Es notorio que cada vez más consumidores se quejan que hay lámparas de bajo consumo que iluminan poco y también duran poco. Ante esta situación, el INTI decidió efectuar un análisis del comportamiento de distintas lámparas de bajo consumo que se comercializan en el mercado (todas las lámparas

estudiadas provienen de China). A continuación se sintetizan los resultados obtenidos en los laboratorios del INTI sobre un total de 600 lámparas de distintas marcas.

5.4.1.1 Lámparas que iluminan menos que la lámpara incandescente de potencia equivalente indicada en los envases

Figura 14. LFC que iluminan menos que la lámpara incandescente de potencia equivalente indicada en los envases.



Fuente: Laboratorio de luminotecnía del centro INTI – física y metrología. Resultados de un estudio del INTI sobre el desempeño de las lámparas de bajo consumo LFC. <http://www.inti.gov.ar/novedades/inf-tec.pdf>. Abril de 2009.

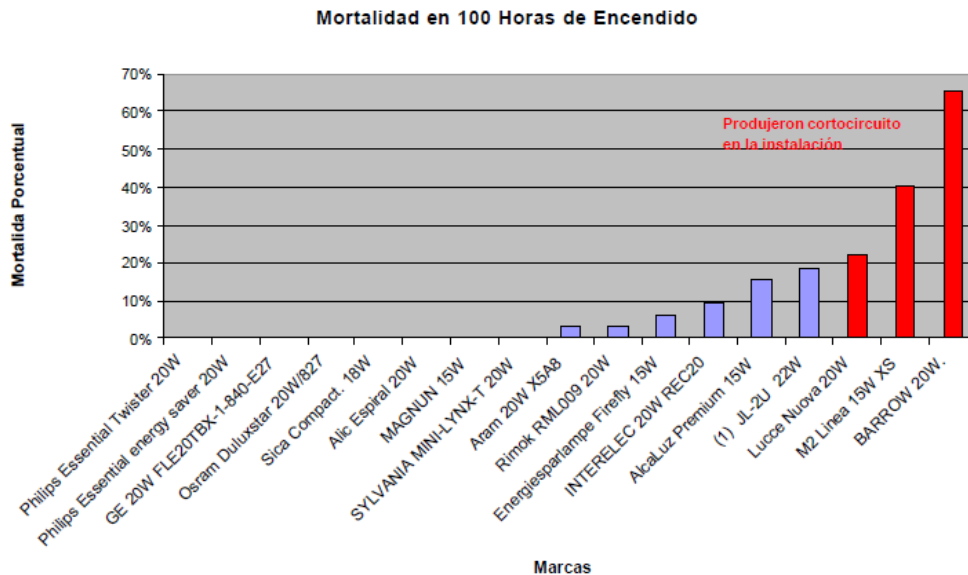
El gráfico muestra dos valores para cada marca de las consideradas. La altura de las barras indica en cada caso la potencia equivalente a una lámpara incandescente medida en laboratorios del INTI y junto a ella en color marrón oscuro el valor indicado en el envase. Así por ejemplo la primera de la izquierda muestra que para un valor equivalente indicado en 100 W el valor medido es prácticamente igual. En cambio para la última de la derecha el valor medido es de 29 W, sustancialmente menor al señalado en el envase de 100 w.

En el primer caso el consumidor logrará reemplazar su lámpara incandescente por otra de bajo consumo que ilumine en forma equivalente, mientras que en el último caso comprará una lámpara de potencia equivalente a menos de la mitad de lo indicado por el importador en el envase.

5.4.1.2 Lámparas que duran mucho menos que la cantidad de horas indicadas en los envases

La vida útil de las lámparas indicada en los envases varía desde 3,000 horas hasta 8,000 horas. El INTI estudió el comportamiento de las lámparas durante las primeras 100 horas de encendido, encontrando que en algunas marcas un porcentaje importante se extinguen ya antes de las 100 horas. Así, por ejemplo, la última de la derecha en el gráfico siguiente corresponde a una marca en cuyo envase se especifica una vida media de 5,000 horas, mientras que el 66% de las mismas dejaron de iluminar antes de las 100 horas.

Figura 15. **LFC que duran mucho menos que la cantidad de horas indicadas en los envases.**



Fuente: Laboratorio de luminotecnica del centro INTI – física y metrología. Resultados de un estudio del INTI sobre el desempeño de las lámparas de bajo consumo LFC. <http://www.inti.gov.ar/novedades/inf-tec.pdf>. Abril de 2009.

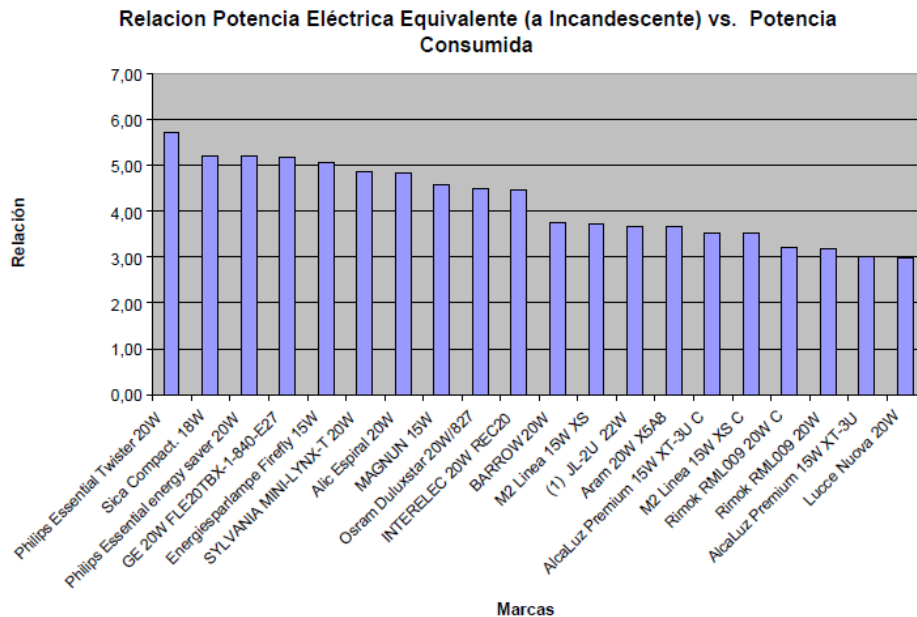
5.4.1.3 Lámparas que no son eléctricamente seguras y podrían ser causa de incendios

En el mismo gráfico del punto anterior se indica en color rojo que para tres de las marcas estudiadas hubo lámparas que interrumpieron su funcionamiento produciendo cortocircuitos en la instalación. Sin embargo, todas las lámparas llevan en su envase el sello oficial de seguridad eléctrica “S” basado en las certificaciones de organismos privados como IRAM, Bureau Veritas y TÜV. Estas dos últimas certificadoras habrían certificado la seguridad eléctrica de las tres marcas que produjeron cortocircuitos.

5.4.1.4 Lámparas de bajo consumo

El gráfico siguiente muestra la relación entre la potencia eléctrica que consumiría una lámpara incandescente equivalente y la potencia que realmente será consumida para cada una de las marcas estudiadas. Así por ejemplo, La primera lámpara de la izquierda consumirá 5.7 veces menos que otra incandescente de potencia equivalente, mientras que la última lámpara de la derecha consumirá solamente 3 veces menos.

Figura 16. **Relación entre la potencia eléctrica que consumiría una lámpara incandescente equivalente y la potencia que realmente será consumida por una LFC de diferentes marcas.**



Fuente: Laboratorio de luminotecnia del centro INTI – física y metrología. Resultados de un estudio del INTI sobre el desempeño de las lámparas de bajo consumo LFC. Abril de 2009. <http://www.inti.gov.ar/novedades/inf-tec.pdf>

5.5 Comportamiento eléctrico de varias LFC compradas en la ciudad capital de Guatemala

La energía es fundamental para el desarrollo y para proporcionar muchos servicios esenciales que mejoren la condición humana. Debido a factores económicos o ambientales los usuarios residenciales de la red eléctrica se ven en la necesidad de ahorrar energía, una de las primeras medidas que a cualquier ciudadano se le ocurre adoptar es el reemplazo de las lámparas incandescentes por lámparas de bajo consumo. Si bien estas son más caras, deberían durar más y producir con una potencia sustancialmente menor el mismo efecto que una lámpara incandescente de potencia equivalente.

En los supermercados guatemaltecos, se venden lámparas fluorescentes compactas de varias marcas, por lo general las de mayor número de unidades existentes en los supermercados, son lámparas de marcas desconocidas las cuales también son las de menor precio comparadas con otras LFC de marcas más reconocidas y de igual potencia.

Se procede a recorrer diferentes supermercados de la ciudad capital de Guatemala, para comparar varios tipos de marcas y precios de LFC, el número de unidades que se desea comprar se ve limitado por el presupuesto que se asignó inicialmente para la compra de material utilizado en la investigación. Finalmente por limitaciones de presupuesto se decide comprar ocho LFC aleatoriamente de diferente marca y potencia, en diferentes supermercados de la ciudad capital con el objetivo de realizar varias mediciones eléctricas que nos ayuden a comprender mejor el comportamiento eléctrico de las lámparas cuando están encendidas. El listado de las lámparas fluorescentes compactas esta ordenado de forma ascendente según su potencia y es presentado en la tabla 2.

Tabla 2. **Listado de LFC compradas en supermercados de la ciudad capital.**

	Marca	Potencia
1.	Sylvania	13W
2.	Fulgore	15W
3.	Rotter	15W
4.	Fulgore	20W
5.	Rotter	20W
6.	Ace	20W
7.	GE	26W
8.	Philips	27W

Fuente: elaboración propia.

Las LFC de marca Rotter y Fulgore son las lámparas con mayor número de unidades para la venta y también son las de menor precio en los supermercados. Todas las LFC del listado son fabricadas en China.

Para la toma de medidas eléctricas las LFC se conectaron en una plafonera que soporta 250 V y 650 W a la cual se le agregó un cable calibre 2x18 AWG y una espiga con capacidad de 125 V y 15 A; al cable se conectó un interruptor de dos vías capaz de soportar 125 V y 15 A.

La plafonera se conectó a la red eléctrica a través del cable de corriente y el encendido y apagado de la lámpara se controló con el interruptor de dos vías. Para obtener las medidas eléctricas se utilizó el instrumento de medida ACE 4000 capaz de medir valores reales y se colocaron transductores sobre el circuito de medición. Se procedió a colocar la primera lámpara y a encenderla, después de unos segundos de espera para permitir que la LFC se estabilizara se tomaron los datos que proporcionaba el instrumento de medida, de la misma forma se fueron obteniendo los datos para las lámparas restantes.

Los datos obtenidos son muestras continuas en el tiempo y son de interés para analizar el efecto de las LFC en la red eléctrica, las muestras de tensión y corriente permiten representar varios ciclos, de frecuencia igual a 60 Hz, utilizando 255 valores respectivamente. Otros datos obtenidos son los valores de corriente y voltaje rms, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, y valores de módulo de las componentes armónicas hasta el orden 29.

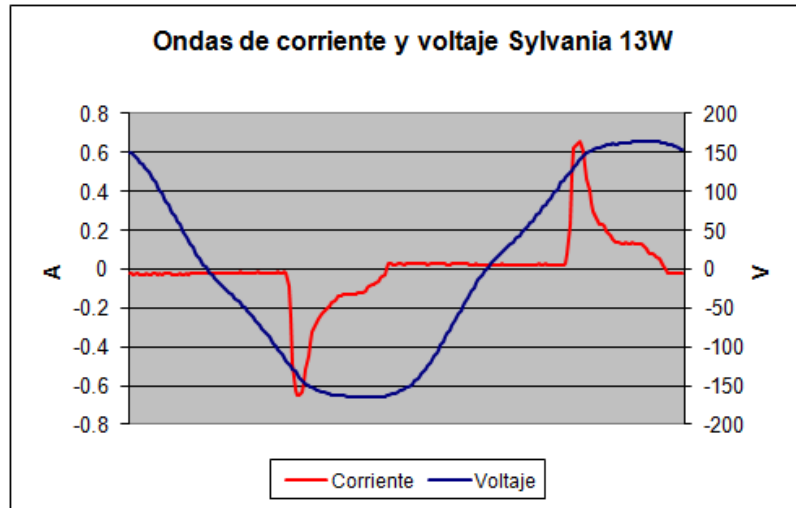
Tabla 3. **Datos de potencia, f.p. y valores rms de las LFC compradas en Guatemala.**

LFC	Watt	VA	VAR	F.P.	I rms	V rms
Sylvania 13w	11,308	22,757	-9,787	0,495	0,190	119,885
Fulgore 15w	10,723	22,186	-9,499	0,483	0,186	119,404
Rotter 15w	6,979	16	-7,138	0,436	0,132	120,816
Fulgore 20w	14,107	33,834	-14,208	0,417	0,280	120,882
Rotter 20w	7,559	17,427	-8,845	0,432	0,144	120,918
Ace 20w	18,138	40,076	-14,507	0,451	0,331	121,122
GE 26w	22,432	47,635	-20,853	0,469	0,397	119,967
Philips 27w	20,416	49,550	-21,256	0,412	0,411	120,678

Fuente: elaboración propia.

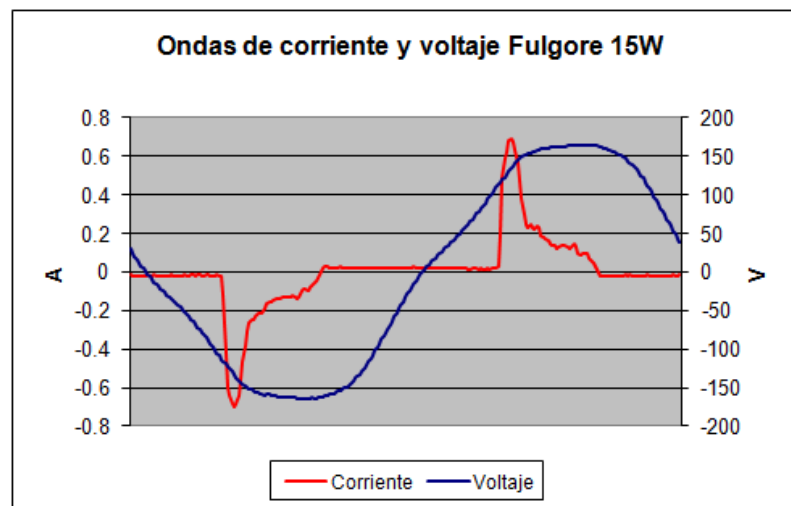
En la tabla 3 podemos observar los valores de la potencia activa, reactiva y aparente, los valores de voltaje y corriente eficaz pero el valor que más llama la atención es el factor de potencia, se pueden apreciar valores muy bajos para todas las lámparas. Para entender mejor el comportamiento tan pobre del factor de potencia de las LFC se muestran a continuación las curvas de corriente y voltaje según el orden de la tabla 2. Las gráficas fueron elaboradas en el programa Microsoft Excel con las muestras de tensión y corriente obtenidas en las mediciones eléctricas.

Figura 17. **Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Sylvania de 13 W.**



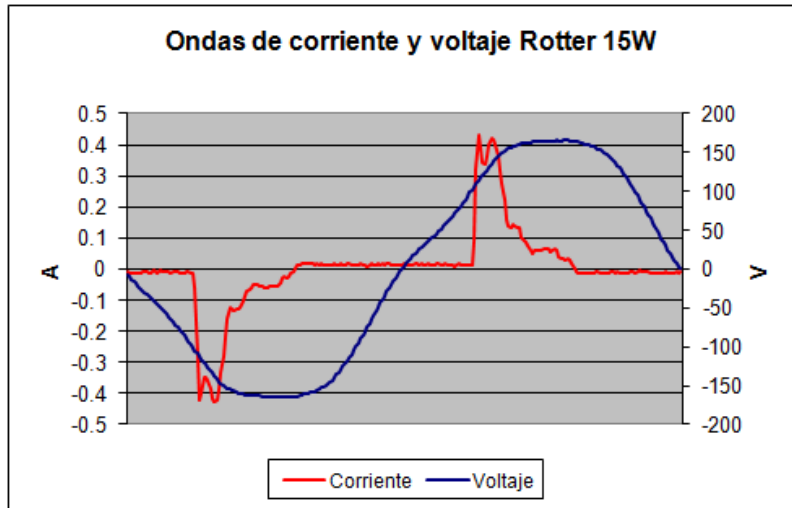
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Fulgore de 15 W.**



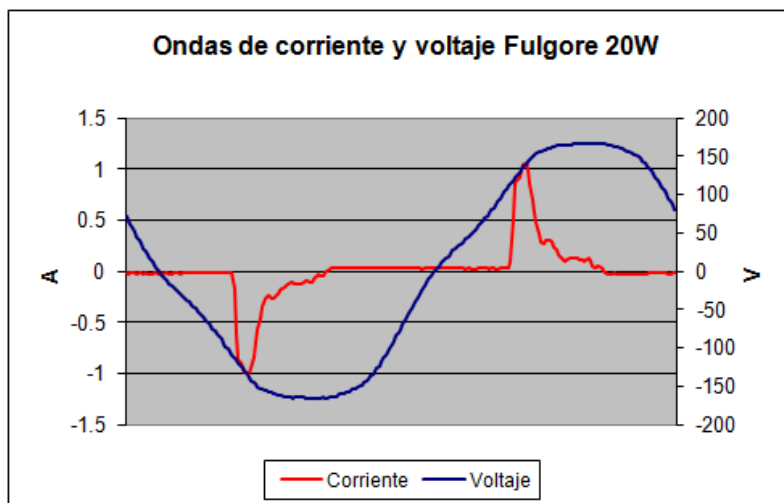
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Rotter de 15 W.**



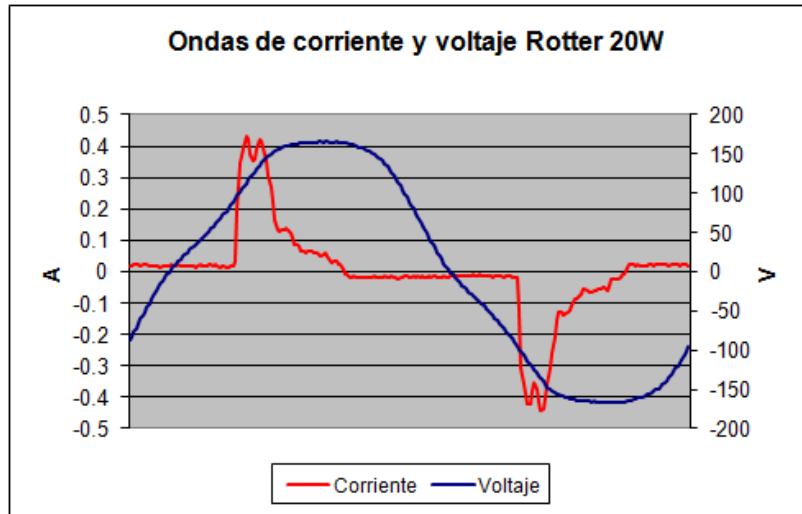
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Fulgore de 20 W.**



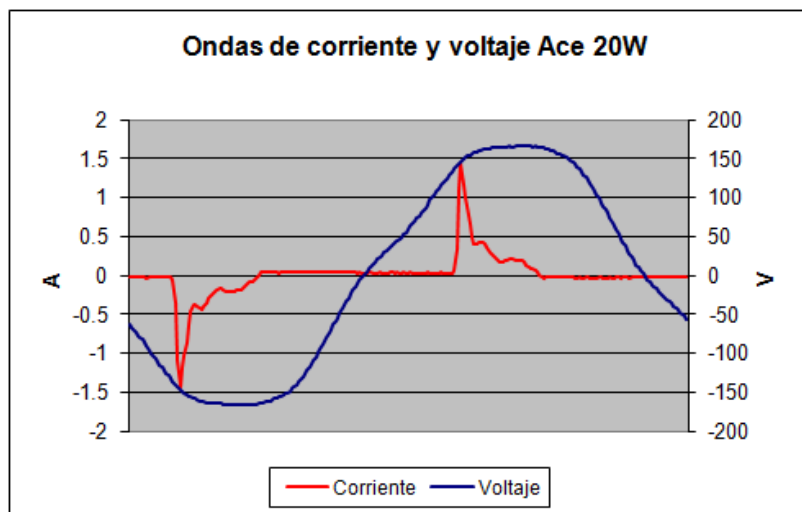
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Rotter de 20 W.**



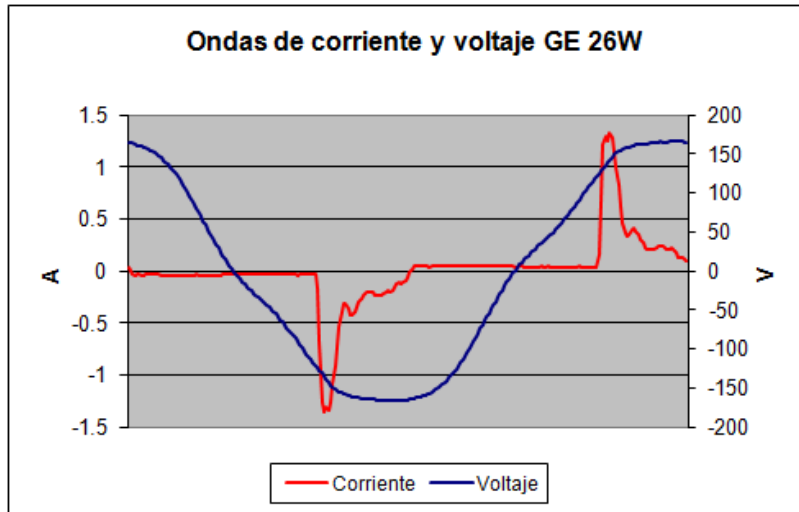
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Ace de 20 W.**



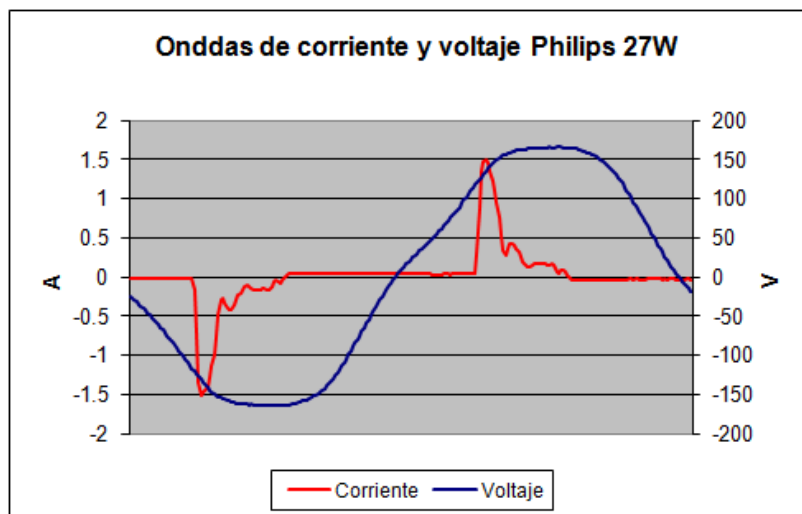
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC GE de 26 W.**



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfica de las ondas de corriente y voltaje de una LFC Philips de 27 W.**



Fuente: elaboración propia.

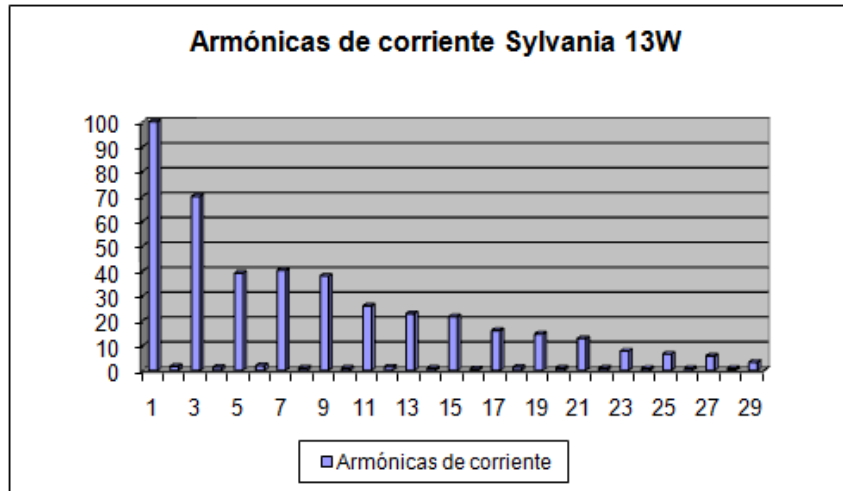
Como se observa en la tabla 3, el factor de potencia de todas las LFC es muy bajo y esto se debe a dos aspectos muy notables en todas las gráficas de ondas de corriente. El primer aspecto que incide en el bajo factor de potencia en las LFC, es el alto grado de distorsión en la onda de corriente, esto es producido por el circuito convertidor AC/DC que forma parte del balastro electrónico el cual se comporta como una carga electrónica no lineal. El segundo aspecto que se puede notar en las gráficas es el leve comportamiento capacitivo que tiene la onda de corriente.

Como se ha mencionado anteriormente, se desea mejorar la forma de onda de las LFC, se debe incorporar un filtro para obtener una onda similar a la senoidal, esto conduce también a un mejoramiento significativo en el factor de potencia. Hay que tomar en cuenta que este cambio en el circuito de la lámpara elevaría los costos de producción y reduciría considerablemente las ventas a nivel mundial.

El bajo factor de potencia (total) se debe a la existencia de armónicas en la onda de corriente. Como resultado de esto se puede observar en la tabla 3 que la potencia aparente excede a la potencia activa en gran medida.

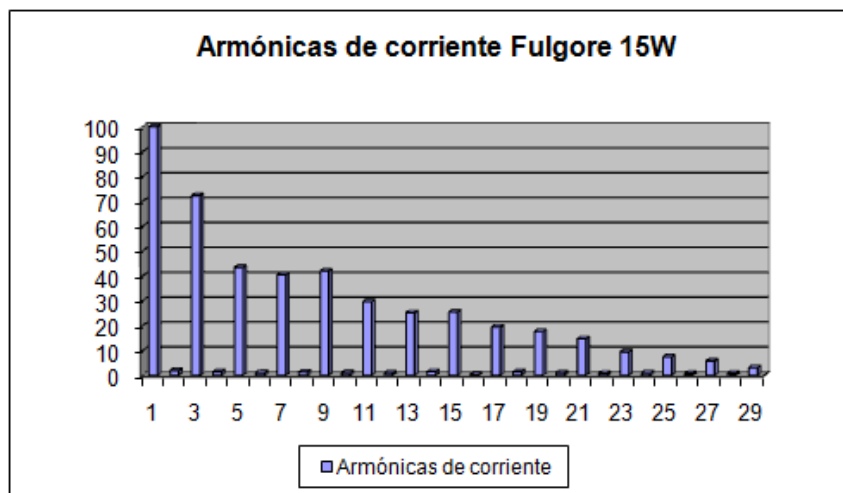
Otros datos de interés para comprender el comportamiento eléctrico de las LFC son los valores de módulo de las componentes armónicas, obtenidos en las mediciones eléctricas. A continuación se muestran los espectros de corrientes armónicas de las ondas de corriente. Las gráficas se presentan según el orden de la tabla 2 y se realizaron en el programa Microsoft Excel.

Figura 25. **Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Sylvania de 13W.**



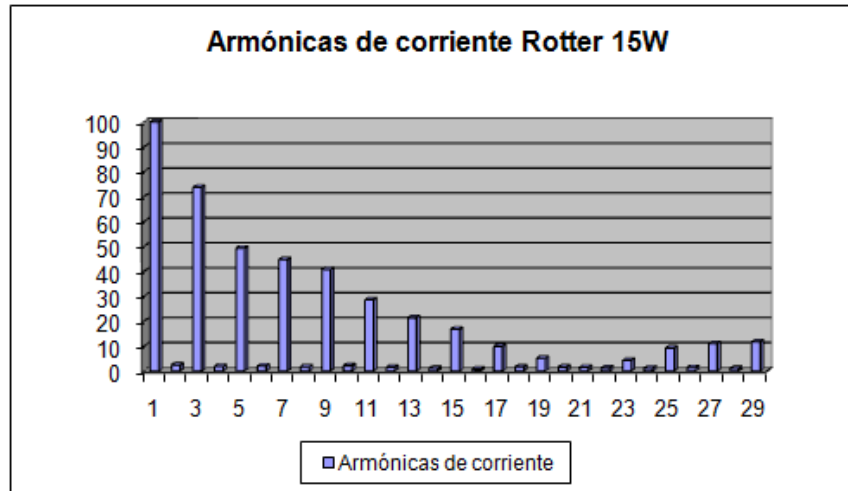
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Fulgore de 15W.**



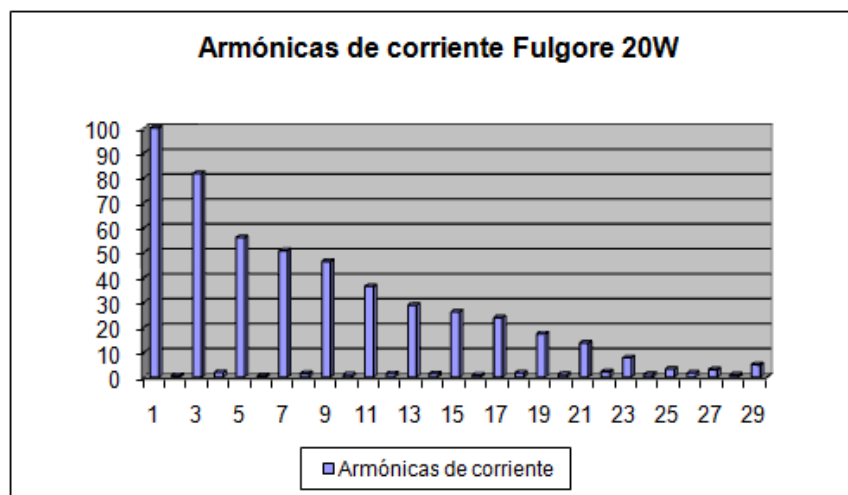
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Rotter de 15W.**



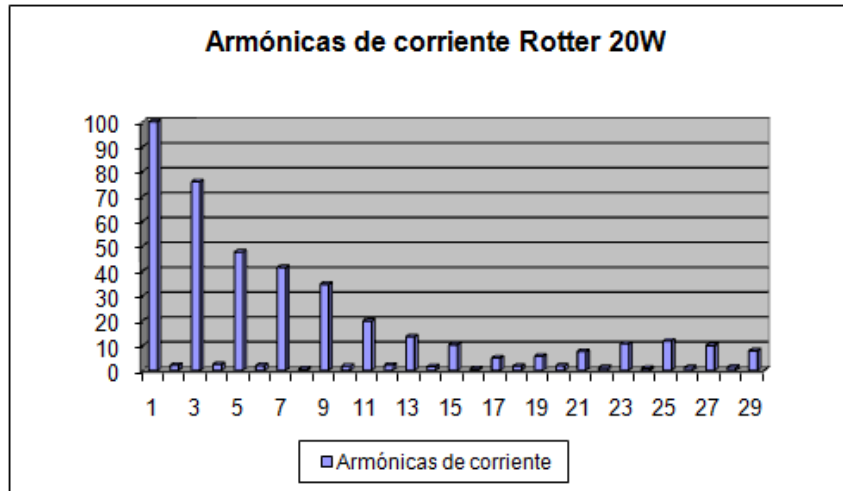
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Fulgore de 20W.**



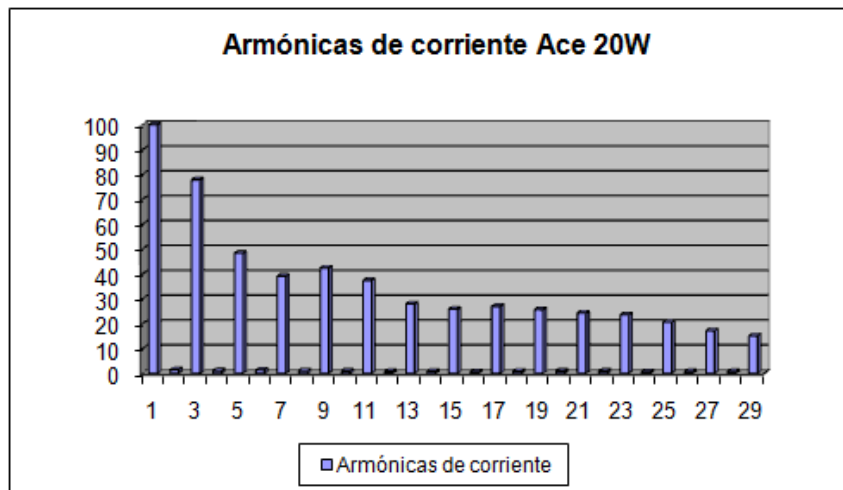
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Rotter de 20W.**



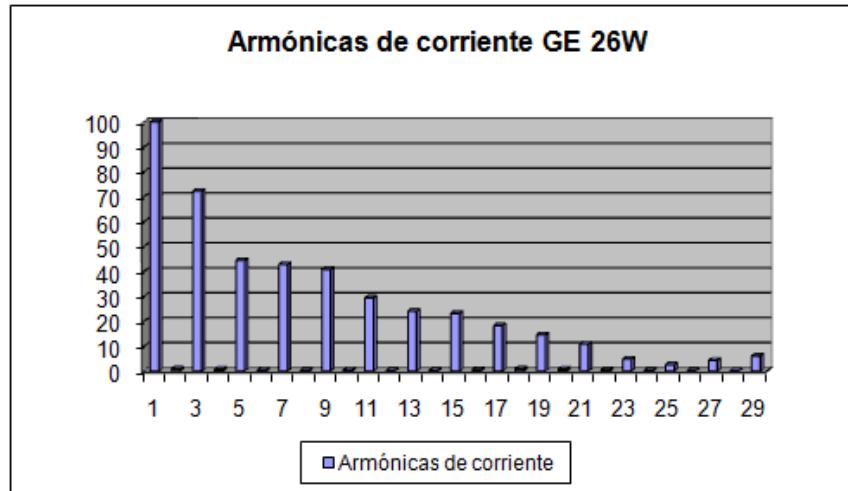
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Ace de 20W.**



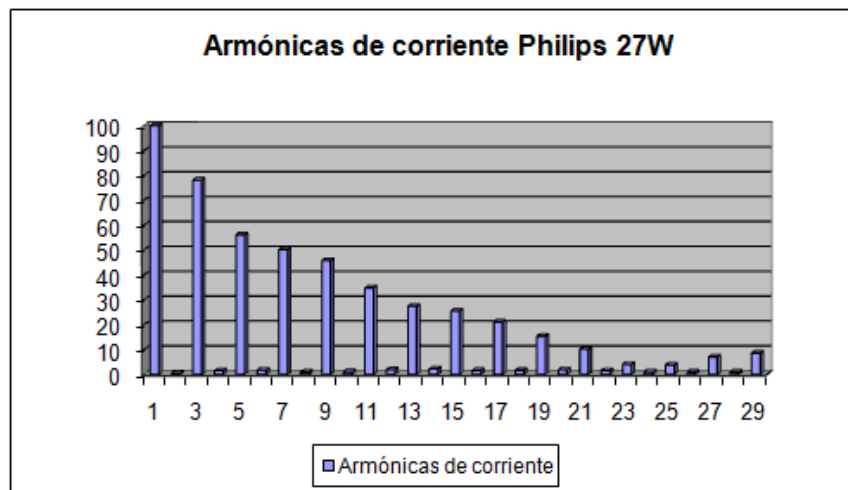
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC GE de 26W.**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfica de las armónicas de corriente en una LFC Philips de 27W.**



Fuente: elaboración propia.

Como se observa, en las gráficas anteriores existe una gran cantidad de armónicas impares generadas por las LFC las cuales son inyectadas a la red. Para simplificar se considera las LFC como cargas no lineales que presentan un comportamiento de fuentes de intensidad que inyectan armónicos a la red. Debido al comportamiento no lineal de las LFC la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia, tal y como se puede observar en los espectros de corrientes armónicas de las ondas de corriente.

Como se ha mencionado anteriormente el espectro de corriente solamente contiene armónicas impares, pero entre estas se destaca la tercera armónica. En el caso de las armónicas triples impares que circulan por los conductores de línea “se potencian” en el conductor neutro sumándose en fase, agregándose a la corriente debida al desbalance de la carga, dando lugar en conjunto a una corriente de neutro cuyo valor eficaz en muchos casos supera la sección de diseño.

Tabla 4. Tasa de armónicas y THD de corriente de las LFC.

<i>n</i>	LFC1	LFC2	LFC3	LFC4	LFC5	LFC6	LFC7	LFC8
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	1,66	2,00	2,49	0,71	2,09	1,46	0,94	0,59
3	69,99	72,36	73,80	81,76	75,91	77,90	72,23	78,20
4	1,31	1,52	1,95	1,95	2,42	1,09	0,79	1,53
5	39,15	43,51	49,35	56,07	47,64	48,43	44,42	56,19
6	1,96	1,10	2,09	0,59	1,97	1,38	0,56	1,75
7	40,27	40,54	44,83	50,78	41,46	39,19	42,90	50,28
8	0,99	1,39	1,75	1,46	0,59	1,07	0,35	0,94
9	38,00	42,01	40,85	46,45	34,68	42,40	40,88	45,80
10	1,00	1,14	2,17	1,05	1,78	1,00	0,54	1,10
11	25,95	29,67	28,64	36,44	19,88	37,45	29,42	34,84
12	1,38	1,01	1,54	1,44	2,07	0,79	0,38	1,97
13	22,84	25,20	21,44	28,90	13,54	27,95	24,11	27,43
14	0,98	1,57	1,19	1,39	1,54	0,87	0,39	2,23
15	21,59	25,52	16,85	26,19	10,36	25,88	23,23	25,53
16	0,62	0,41	0,83	0,88	0,63	0,63	0,66	1,63
17	16,10	19,47	9,96	23,90	5,04	27,01	18,31	21,08
18	1,32	1,50	1,71	1,76	1,73	0,90	0,98	1,65
19	14,65	17,75	5,25	17,41	5,71	25,66	14,57	15,36
20	1,00	1,04	1,62	1,11	1,88	0,99	0,80	1,95
21	12,84	14,77	1,59	13,77	7,62	24,33	10,97	10,23
22	0,94	0,89	1,31	2,18	1,11	0,95	0,64	1,57
23	7,85	9,51	4,32	7,78	10,74	23,62	4,85	4,03
24	0,90	1,08	1,24	1,22	0,84	0,70	0,43	1,07
25	6,65	7,52	9,26	3,27	11,82	20,70	2,66	3,83
26	0,84	0,77	1,41	1,70	1,19	0,75	0,29	0,96
27	5,83	5,80	11,10	3,02	9,95	17,21	4,36	7,04
28	0,82	0,83	1,19	0,99	1,27	0,74	0,21	0,98
29	3,32	3,15	11,78	5,00	7,90	15,14	6,19	8,63
THD%	119,67	138,28	136,58	186,09	122,08	181,06	134,49	174,88

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4 se muestran las tasas de los armónicos de corriente de cada una de las LFC (ordenadas según la tabla 2) hasta la armónica número 29, en la misma tabla también se encuentran los valores de la distorsión total armónica (DTA) para las ondas de corriente, se observa que todas las lámparas poseen valores de THD que superan el 100% y algunas incluso se acercan al 200%, es evidente que el efecto térmico de todos los armónicos alcanza valores muy elevados.

Como se ha visto, en las mediciones eléctricas, existen varios aspectos que influyen negativamente en las redes de distribución, pero todo esto,

solamente aplica si se plantea un escenario hipotético en el cual las únicas cargas conectadas fueran lámparas fluorescentes compactas, por otro lado se ha visto también que no todas las LFC poseen un comportamiento tal como lo expresan sus fabricantes en las especificaciones, por lo que puede influir positivamente la creación de una normativa que regule la calidad de las LFC que son importadas a Guatemala.

5.6 Escenario de actuación simultanea de lámparas con diferentes características eléctricas

Se sabe que la generación de armónicas causada por las cargas de los usuarios residenciales se debe al uso de aparatos eléctricos que se conectan a la fuente de potencia eléctrica. Hasta ahora solo se han tomado en cuenta las armónicas producidas por las LFC, pero si se plantea un escenario hipotético donde varios aparatos eléctricos se conectan conjuntamente con las LFC los niveles de armónicas en el circuito se ven afectados debido a la diversidad de fase y la atenuación (véase la página 57).

Al analizar una sola LFC en un circuito residencial los resultados que se observan respecto a los valores de las armónicas no son muy alentadores pero se “debe” tomar en cuenta que en una casa residencial común, los valores de armónicos van a estar en función del tiempo, ya que en un momento dado puede estar conectada solamente una LFC, pero un tiempo después alguien más puede conectar un televisor, una computadora o cualquier otro tipo de carga de diferentes características eléctricas.

Como se ha podido observar, las LFC son cargas eléctricas no lineales con características levemente capacitivas. Se conectan LFC simultáneamente con lámparas que tienen una relación lineal y además poseen características

inductivas o resistivas, para observar el comportamiento eléctrico de la combinación de lámparas en el circuito residencial. Las lámparas que se utilizaron se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. **Lámparas usadas en mediciones combinadas**

Siglas	Lámpara	Marca	Watts
LFC	Fluorescente compacta	Philips	27
LFC	Fluorescente compacta	GE	26
LFC	Fluorescente compacta	Fulgore	15
TF	Tubo Fluorescente	Lights of America	15
LI	Incandescente	Sylvania	75

Fuente: elaboración propia.

Las mediciones eléctricas se realizaron de la misma forma descrita para una sola LFC conectada al circuito, la conexión de lámparas combinadas y los resultados de las mediciones se muestran a continuación.

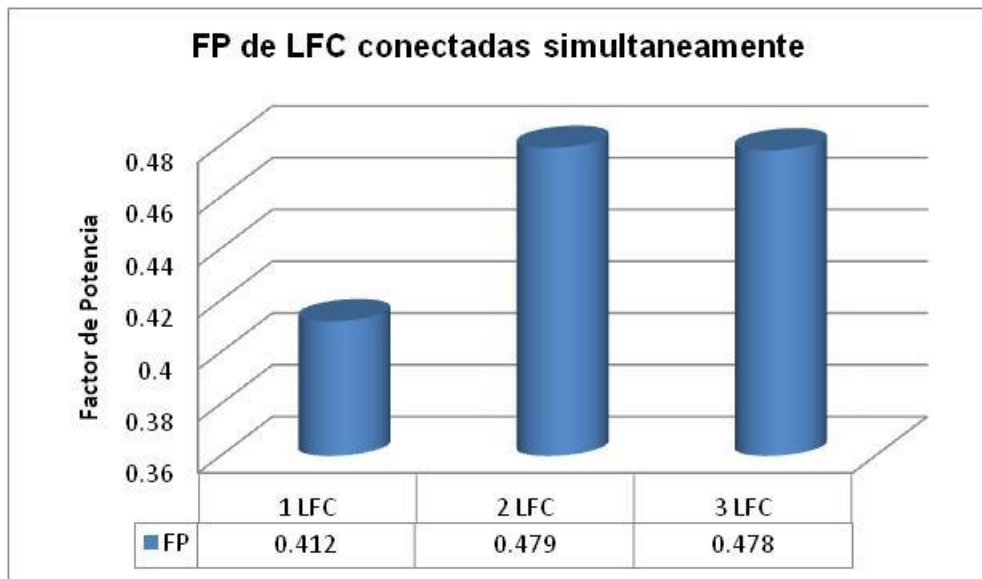
Tabla 6. **Datos de potencia, f.p. y valores rms de lámparas conectadas simultáneamente**

Lámparas	Watt	VA	VAR	F.P.	I rms	V rms
TF	19,506	26,722	17,218	0,73	0,229	116,569
LI	82,541	86,125	-24,457	0,958	0,752	114,541
2 LFC	38,177	79,638	-34,013	0,479	0,692	115,61
3 LFC	50,001	104,567	-44,868	0,478	0,897	116,57
TF y 1 LFC	39,034	53,413	1,297	0,731	0,456	117,134
TF y 2 LFC	57,567	87,052	-15,267	0,661	0,756	115,206
TF y 3 LFC	68,948	109,083	-24,183	0,632	0,945	115,437
LI y TF	104,744	104,949	-4,88	0,998	0,902	116,413
LI y 1 LFC	103,711	117,322	-42,677	0,884	1,01	116,189
LI y 2 LFC	124,532	151,97	-58,67	0,819	1,306	116,372

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar un fenómeno curioso con respecto al factor de potencia cuando aumentamos el número de LFC conectadas al circuito. Si se revisa la tabla 3, se encuentra que el valor más bajo de factor de potencia es de 0.412 y corresponde a la LFC Philips de 27W, pero al conectar simultáneamente otra LFC, sobresale el aumento del factor de potencia que ahora es de 0.479 (tabla 6). En la gráfica siguiente se observa el comportamiento del factor de potencia para varias LFC conectadas al mismo tiempo.

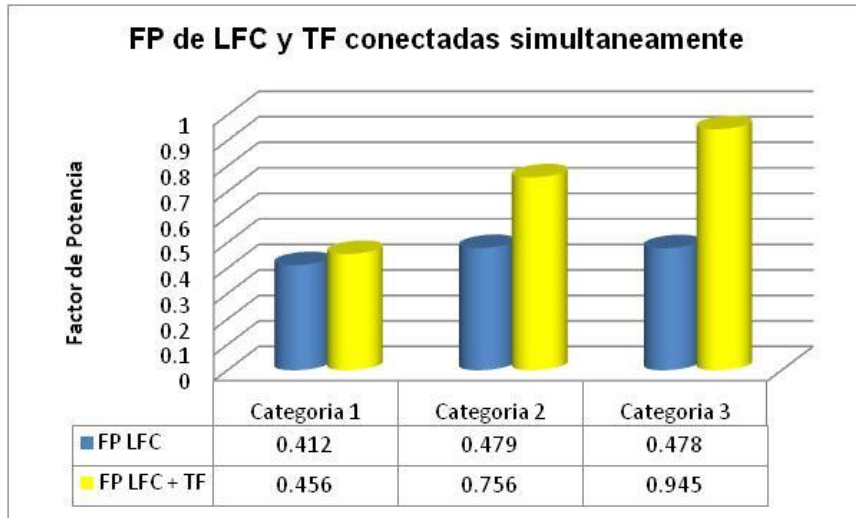
Figura 33. **Grafica de valores del factor de potencia de varias LFC conectadas simultáneamente**



Fuente: elaboración propia.

Debido a que las LFC son cargas levemente capacitivas veamos qué pasa con los valores del factor de potencia cuando se conecta al mismo tiempo un tubo fluorescente que tiene características eléctricas de una carga inductiva.

Figura 34. **Aumento del factor de potencia cuando se agrega carga inductiva a las LFC**



Fuente: elaboración propia.

Es evidente, que el factor de potencia mejora cuando se conectan simultáneamente una lámpara fluorescente compacta con un tubo fluorescente lo cual se muestra en la categoría 1 de la gráfica anterior, pero al aumentar el número de LFC el valor de factor de potencia también aumenta, en la categoría 3 de la figura 34 podemos ver el factor de potencia de 3 lámparas fluorescentes compactas con balastro electrónico y 1 tubo fluorescente con balastro magnético conectadas al mismo tiempo, este valor es de 0.945 (columna roja) y es muy superior al valor de 0.478 (columna azul) cuando solo están conectadas las 3 LFC.

Las tasas de los armónicos de corriente de las diferentes combinaciones de lámparas conectadas simultáneamente se pueden observar en la siguiente tabla, también se encuentran los valores de la distorsión armónica total de corriente (DATi%).

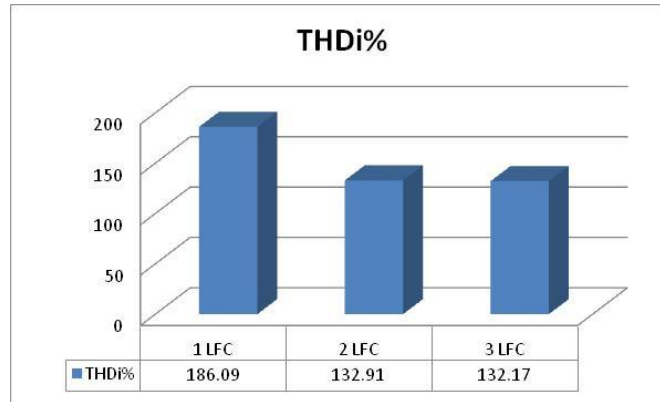
Tabla 7. Tasa de armónicas y THD de corriente de lámparas combinadas

n	TF	LI	2 LFC	3 LFC	LFC y TF	2 LFC y TF	3 LFC y TF	LI y TF	LI y LFC	LI y 2 LFC
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	4,93	0,26	0,13	0,69	2,77	1,66	1,49	0,83	0,34	0,13
3	16,86	5,53	74,79	74,44	56,04	65,65	67,49	4,41	14,27	24,82
4	0,81	0,21	1,22	0,87	0,55	0,76	0,37	0,22	0,43	0,18
5	1,10	4,71	45,39	46,72	35,07	39,44	40,32	4,37	15,66	19,77
6	2,11	0,24	0,74	0,91	2,36	0,98	0,68	0,10	0,41	0,41
7	2,39	0,04	41,05	41,57	31,66	36,08	37,45	0,64	10,58	15,91
8	0,69	0,18	1,10	0,83	1,68	0,95	0,49	0,14	0,36	0,36
9	1,20	0,70	40,10	39,62	28,94	34,95	36,33	0,30	10,65	16,39
10	0,80	0,19	1,19	0,86	1,24	1,12	0,62	0,12	0,36	0,21
11	0,30	0,35	31,62	30,86	24,33	28,14	29,13	0,31	8,35	13,22
12	0,46	0,16	1,04	0,78	1,41	0,87	0,43	0,09	0,42	0,31
13	0,53	0,33	24,84	23,53	18,87	22,45	23,53	0,06	6,35	10,75
14	0,68	0,17	1,29	0,63	1,68	1,26	0,67	0,17	0,42	0,40
15	0,39	0,17	18,53	18,33	14,55	17,38	18,62	0,17	4,74	8,54
16	0,22	0,09	0,76	0,63	1,59	0,87	0,56	0,07	0,47	0,34
17	0,51	0,11	13,33	13,18	10,89	12,98	13,82	0,18	3,50	6,42
18	0,46	0,17	1,19	0,62	1,37	1,11	0,63	0,10	0,50	0,23
19	0,62	0,17	9,79	9,69	8,78	10,50	11,66	0,12	2,92	5,38
20	0,53	0,15	0,64	0,64	1,34	0,95	0,65	0,14	0,51	0,38
21	0,61	0,07	6,29	5,77	6,91	7,42	8,84	0,28	2,07	4,04
22	0,59	0,16	1,19	0,74	1,44	0,92	0,62	0,12	0,50	0,42
23	0,54	0,16	3,22	2,46	5,31	4,84	6,10	0,11	1,84	2,82
24	0,49	0,11	0,99	0,83	1,41	1,05	0,63	0,10	0,50	0,32
25	0,48	0,09	4,44	3,94	6,20	5,34	6,58	0,16	2,18	2,94
26	0,52	0,14	1,12	0,85	1,41	0,86	0,58	0,11	0,51	0,33
27	0,45	0,15	4,39	3,78	6,48	5,76	6,25	0,11	2,23	2,86
28	0,48	0,15	0,97	0,73	1,36	1,00	0,54	0,11	0,50	0,43
29	0,45	0,12	2,76	3,21	5,41	4,03	4,85	0,16	1,81	2,46
THD%	3,28	0,54	132,91	132,17	77,88	104,37	112,07	0,40	8,51	20,11

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4 se encuentra que el máximo valor de THD de corriente para una sola LFC es de 186.09, y en la tabla 7 se obtienen los valores para 2 y 3 LFC conectadas simultáneamente los cuales son 132.91 y 132.17; esto significa que a mayor número de LFC conectadas el THD de corriente disminuye levemente.

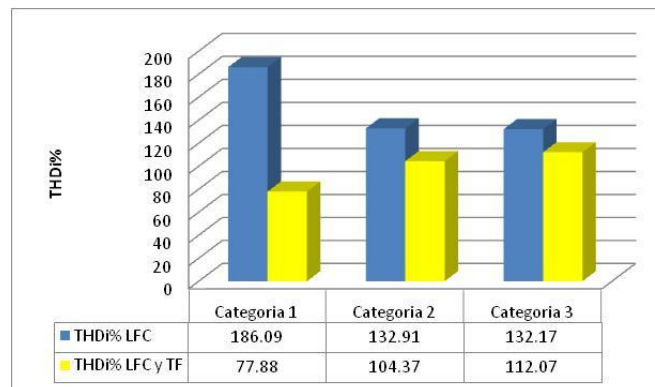
Figura 35. **Valores de THDi% de varias LFC conectadas simultáneamente**



Fuente: elaboración propia.

Nuevamente, los valores de distorsión armónica total del circuito, cuando se conectan simultáneamente a las LFC un tubo fluorescente con características eléctricas inductivas, los resultados se muestran en la siguiente grafica.

Figura 36. **Comportamiento de THDi% cuando se conecta un TF con las LFC**



Fuente: elaboración propia.

5.7 Efectos de las lámparas fluorescentes compactas

El efecto más notable sobre las redes de distribución eléctrica debido al uso de lámparas fluorescentes compactas, es la modificación del contenido armónico de las corrientes. Los efectos que causan las armónicas en las redes eléctricas han sido analizados durante muchos años y en diferentes situaciones, no obstante en algunos casos es muy difícil cuantificarlos en forma específica puesto que dependen de muchos factores. Las referencias más comunes de los efectos de los armónicos de tensión y corriente sobre los sistemas de distribución son las siguientes:

- Aumento de la corriente de neutro
- Recalentamiento de cables y transformadores
- Impacto sobre los equipos de protección y maniobra
- Incertidumbre en la medición de la energía
- Desmejoramiento en la calidad de la energía

Además, se presenta un incremento en los costos de operación como resultado de algunos factores ligados a la generación de armónicas. La contaminación armónica de las redes, es una preocupación creciente de las empresas distribuidoras de energía eléctrica en nuestro país.

Las partes más notables de un circuito que forma parte de una red de distribución son sus bancos de transformadores y cables, el aumento de armónicas en la red los afecta elevando su temperatura en comparación con una operación puramente sinusoidal.

5.7.1 Transformadores

En el caso de los transformadores de distribución si las cargas que alimenta son solamente LFC, aumentan las armónicas de corriente y esto causa dos efectos, incrementan las pérdidas en el cobre y pérdidas de flujos dispersos.

Las pérdidas por corrientes de Eddy también se ven afectadas, estas son corrientes de Eddy debido al flujo electromagnético perdido en el devanado, núcleo, abrazadera del núcleo, campo magnético, pared del tanque y otras partes de la estructura del transformador. La temperatura aumentará en las partes estructurales por las corrientes de Eddy, aproximadamente al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia.

El calentamiento adicional en los devanados de los transformadores, es debido al incremento en las pérdidas causadas por las corrientes de Eddy, hace que se deba considerar su capacidad en forma reducida con respecto a su nominal, cuando alimenta cargas no lineales de acuerdo al estándar ANSI/IEEE C.57.110.

Esta situación explica, los incrementos considerables en la temperatura de los transformadores que alimentan cargas no lineales, aun cuando la corriente de carga este por debajo de su capacidad nominal, exponiéndose a fallas prematuras en el sistema aislante del transformador.

También interesa saber el comportamiento de las armónicas en las residencias ya que estas afectan directamente los bancos de transformadores. Utilizando las medidas eléctricas de las LFC y el programa *Wavemaker* se simula la onda de corriente, el espectro de armónicas y la distorsión armónica

total de corrientes para tres posibles escenarios de carga en una casa residencial.

Como primer escenario se tiene una casa la cual tiene conectadas únicamente lámparas fluorescentes compactas, se toman las 8 lámparas que se encuentran en la tabla 3, este escenario se cataloga como el caso crítico; el segundo escenario se da cuando además de la conexión de las LFC se conectan simultáneamente varios aparatos electrónicos de uso residencial que no superan los 200W de potencia, estos se pueden observar en la tabla 8 y están ordenados en forma ascendente, según su valor de potencia; el tercer escenario se da cuando se suman dos cargas más a las ya mencionadas anteriormente, estas cargas son de mayor potencia que las demás y una tiene características fuertemente lineales, las dos cargas mencionadas también se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8. **Aparatos eléctricos utilizados en simulación de armónicos en una casa residencial.**

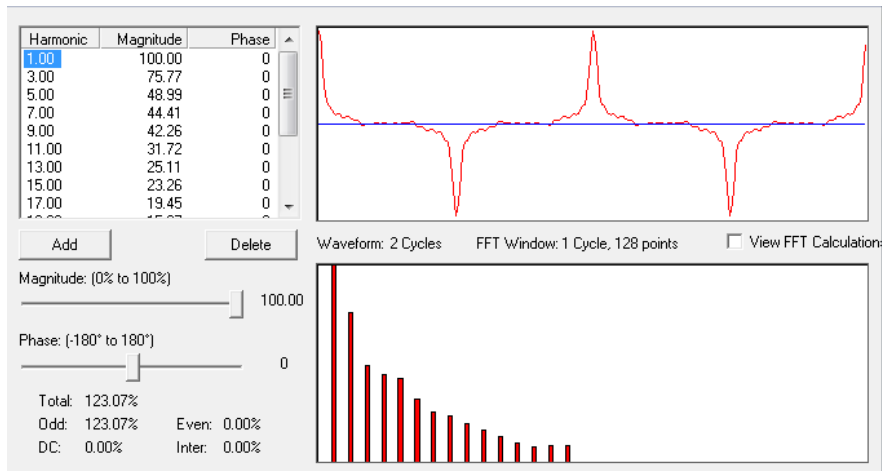
Aparato eléctrico	V [V]	P [W]	I [A]	F.P.
Reproductor de DVD	120,00	12,00	0,17	0,60
Minicomponente	120,00	75,00	0,91	0,69
T.V. 20 pulgadas	120,00	100,00	1,11	0,75
Computadora	120,00	110,00	1,58	0,58
Refrigeradora	120,00	140,00	1,85	0,63
Horno microondas	120,00	980,00	8,51	0,96
Ducha eléctrica	120,00	5 200,00	43,33	1,00

Fuente: elaboración propia.

La simulación de armónicas en el programa *Wavemaker* proporcionó los siguientes resultados: para el escenario 1 se obtuvo un valor de distorsión armónica de 123.07%; para el escenario 2 se obtuvo un THD de 36.71% y para

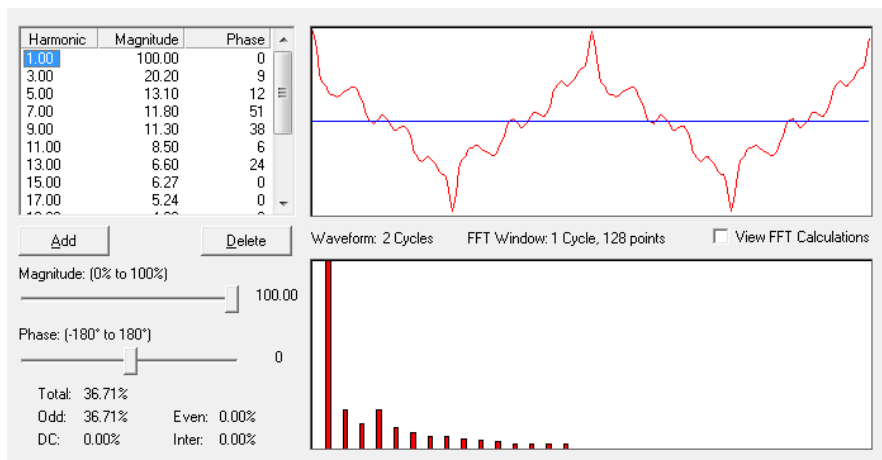
el escenario 3 un valor de 4.28%. Las gráficas de ondas de corriente y el espectro de armónicas se pueden observar en las siguientes figuras.

Figura 37. Escenario 1 (caso crítico, todas las cargas son LFC)



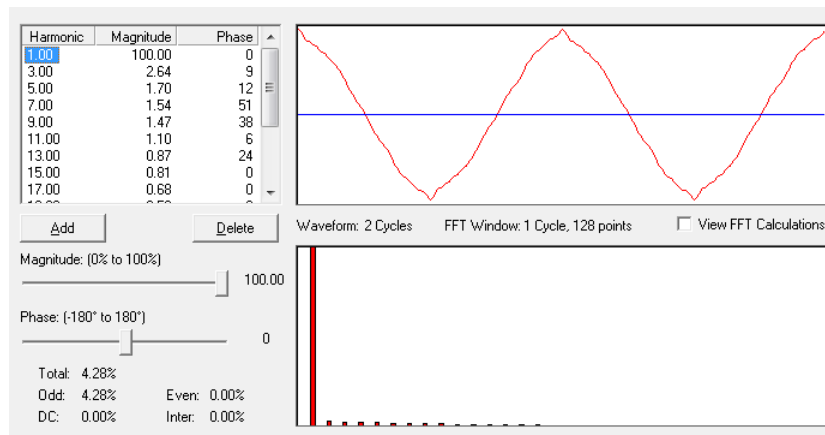
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Escenario 2 (LFC y aparatos eléctricos)



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Escenario 3 (carga predominantemente lineal)**



Fuente: elaboración propia.

En las figuras anteriores se observa que los niveles de armónicas, disminuyen cuando se conectan otras cargas con diferentes características eléctricas. Cuando varias cargas son alimentadas por un mismo transformador, el contenido de armónicos resultante es el fasor suma de las corrientes armónicas individuales, con la posibilidad de que los niveles de distorsión armónica se reduzcan por la diversidad del ángulo de fase en el espectro de armónicos.

En zonas urbanas, donde predominan las cargas de tipo residencial, vamos a suponer, que una casa tiene en promedio una carga de 1 kW. Un transformador típico de una zona urbana y residencial tiene una capacidad de 25 KVA al 80%, suponiendo que cuenta con treinta servicios vamos a tener una carga de 30KW. Si tomamos el mínimo valor de factor de potencia permisible para usuarios con cargas menores a 11 KW, el cual es de 0.85, entonces, obtenemos que nuestra carga, es de 35.3 KVA, ahora bien, si consideramos un factor de coincidencia con valor de 0.65. La carga es de 22.94 KVA y por lo tanto el transformador se encuentra trabajando dentro de su capacidad.

Para un banco de transformación cuya carga de clientes sean mayormente residenciales, se han de revisar si las tasas de armónicas de corriente aumentan significativamente. Estudios realizados en Argentina, México y Venezuela han demostrado que el uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas, no causa efectos severos en el factor de potencia y en los valores de armónicas en los bancos de transformación. Ante la circulación de corrientes armónicas, si se desea proteger los bancos de transformación y los conductores, la solución debe ser dirigida a encontrar el factor K de la carga, en cuyo caso se necesita un equipo que encuentre los componentes armónicos individuales.

Verdeber y colaboradores, han realizado un estudio sobre la problemática que se origina, cuando se sustituyen, en un edificio las lámparas incandescentes por fluorescentes compactas. En la tabla 9 se indica la tasa de la distorsión armónica de la corriente (THDi), factor de potencia (FP), porcentaje de lámparas fluorescentes compactas en relación a la carga del transformador (LFC/CT), y tasa de distorsión armónica de la tensión (THDv) en función del porcentaje entre el número de lámparas compactas en relación con la carga total de iluminación (LFC/CI).

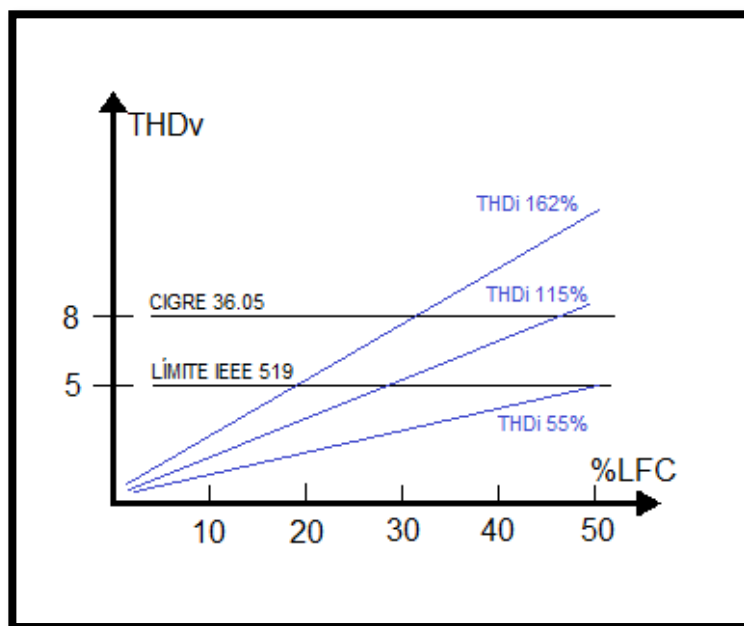
Tabla 9. **Valores de distintas magnitudes, en función del porcentaje de lámparas compactas.**

LFC/CI (%)	10	25	50	100
THDi (%)	1,7	4,5	9,8	23,5
FP	0,84	0,82	0,78	0,65
LFC/CT (%)	1,5	4,1	9,4	26,3
THDv (%)	0,3	0,7	1,5	4,4

Fuente: VERDEVER, R.; MORSE, O.; ALLING, W. *Harmonics from compact fluorescent lamps*

La figura 40 muestra la variación del THD de la tensión de alimentación en función del porcentaje de lámparas compactas en relación a la carga total del transformador, para tres lámparas de diferente tasa de distorsión armónica total de corriente. Se observa, que si se supera el 28% de las lámparas fluorescentes compactas con 115% de THDi, también se supera la distorsión de tensión que permite la norma IEEE 519 y la NTSD.

Figura 40. **Variación THDv en función del % de LFC en relación a la carga total del transformador.**



Fuente: VERDEVER, R.; MORSE, O.; ALLING, W. *Harmonics from compact fluorescent lamps*

En la tabla 4 se observa que los valores de THDi de las LFC compradas en la ciudad capital oscilan entre 115% a 186%, observándose entonces que es muy factible que los resultados de la figura 37 se obtengan también con las LFC estudiadas ya que sus valores de distorsión armónica se encuentran dentro del rango de la gráfica anterior y en algunos casos lo supera.

5.7.2 Conductores

El efecto que las LFC causa en los conductores de las redes de distribución es la conducción de corrientes armónicas, debido a que se trata de una corriente no sinusoidal se produce un calentamiento adicional superior al que se esperaría para el valor rms de la forma de onda. Esto se debe a dos fenómenos conocidos como “efecto piel” y “efecto proximidad”, los cuales varían en función de la frecuencia así como también del tamaño y calibre del conductor.

La corriente alterna tiende a circular hacia la periferia de los conductores, en conductores circulares la densidad de corriente aumenta del centro a la superficie, este fenómeno es conocido como “efecto piel”.

La distribución de densidad de corriente en la sección de un conductor, también, se ve afectada por los campos magnéticos debidos a la presencia de otros conductores vecinos, lo cual se conoce con el nombre de “efecto proximidad”.

Estos fenómenos se vuelven significativos a altas frecuencias, causando pérdidas adicionales por calentamiento y esto se debe a que el incremento de resistencia es proporcional al cuadrado de la frecuencia.

5.7.3 Otras consideraciones

Otros efectos ligados a la generación de armónicas de las LFC son la disminución del factor de potencia y el aumento excesivo de la potencia aparente respecto la potencia activa.

Pero no todos los efectos que causan las LFC son negativos, también reducen el valor eficaz de la corriente que circula por los alimentadores y el transformador, este efecto presenta un apreciable beneficio para las redes, la disminución de la corriente se produce en coincidencia con el pico de la demanda permitiendo, de esta forma, un mayor aprovechamiento de la capacidad instalada, esto se da en el caso de reemplazo de lámparas incandescentes por LFC que provean un flujo luminoso equivalente y cuando se encuentran conectadas simultáneamente con cargas que tienen diferentes características eléctricas, como se ha visto ciertos armónicos suelen cancelarse.

Hasta ahora parece ser que el uso masivo de LFC causa más efectos nocivos que benéficos en las redes de distribución, pero no se debe olvidar que, si el diseño del balastro electrónico realizará la corrección del factor de potencia y el filtrado de los armónicos, no existiría ningún problema con las redes de distribución. Por otro lado, para los fabricantes de las LFC esto no es rentable ya que aumentaría el costo de producción.

En un país como Guatemala, el ahorro de energía es de suma importancia, tanto para los usuarios como para los distribuidores y una de las alternativas más simples para ahorrar energía a nivel nacional es la sustitución de las bombillas incandescentes por lámparas fluorescentes compactas, desde el punto de vista del usuario residencial es la solución más factible. Una medida que puede influir positivamente en el uso eficiente de las LFC en Guatemala, es la creación de una normativa que regule las especificaciones técnicas que deben tener las lámparas fluorescentes compactas que se importan al país, porque como se ha podido observar no todos los fabricantes cumplen con las especificaciones que imprimen en los empaques, por lo tanto los clientes compran un producto menos eficiente.

La creación de una normativa que regule el uso de las LFC es de suma importancia porque las que se venden actualmente, según los valores que especifican en su empaque no son aptas para el uso masivo en las redes de distribución, también se recomienda crear un etiquetado de eficiencia energética obligatorio para la comercialización de aquellos artefactos que cumplan con las funciones de iluminación, de esta manera se están cuidando tanto los intereses de los usuarios de la energía como de las empresas distribuidoras.

El uso de la etiqueta de eficiencia permite que el consumidor cuente con un elemento adicional que le ayude, a la hora de decidir la compra del artefacto eléctrico, a optimizar su compra por comparación, considerando la variable eficiencia energética del equipo.

CONCLUSIONES

1. Los efectos negativos más notables que se presentan en las redes de distribución debido al uso de lámparas fluorescentes compactas son: disminución del factor de potencia y aumento de la distorsión armónica total en las ondas de corriente.
2. El balastro electrónico de una lámpara fluorescente compacta se encarga de suministrar la tensión o voltaje necesario para encender el tubo de la lámpara y regular, posteriormente, la intensidad de corriente que circula por dentro del propio tubo después de encendido.
3. Es muy difícil cuantificar los cambios que se presentan en el factor de potencia y la distorsión armónica total, debido a que dependen de muchos factores pero en general estos dos parámetros de medición se ven afectados negativamente.
4. Las lámparas fluorescentes compactas se comportan como cargas eléctricas no lineales con características levemente capacitivas.
5. En un circuito donde las únicas cargas conectadas son LFC se observa que el factor de potencia aumenta moderadamente a mayor número de lámparas conectadas.
6. En un circuito donde las únicas cargas conectadas son LFC se observa que la distorsión armónica total de corriente disminuye a mayor número de lámparas conectadas.

7. Debido a que el uso de LFC aumentan los niveles de distorsión armónica total de corriente en la red, existe una elevación de temperatura en bancos de transformadores y conductores.

8. Una medida que puede influir positivamente en el uso eficiente de las LFC en Guatemala, es la creación de una normativa que regule las especificaciones técnicas que deben tener las lámparas fluorescentes compactas que se importan al país, y de esta manera garantizar que los fabricantes cumplan con las especificaciones que imprimen en los empaques.

RECOMENDACIONES

1. Para obtener resultados más representativos se deben sustituir las lámparas incandescentes por LFC en un circuito para comprobar si la demanda disminuye significativamente varios ramales secundarios que alimenten cargas residenciales y evaluar los bancos de transformación con cargas cuyos clientes son mayormente residenciales, para verificar que los parámetros de la calidad de la energía no se vean afectados drásticamente.
2. Crear una política de gobierno cuya finalidad sea el ahorro energético en usuarios residenciales, la cual incluya a las empresas distribuidoras del país para poder elaborar estudios más completos sobre el impacto de las lámparas fluorescentes compactas en los sistemas de distribución y en la calidad del servicio eléctrico.
3. Realizar más pruebas eléctricas a las lámparas fluorescentes compactas importadas al país, para crear una normativa que regule las características eléctricas que deben tener.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARRILLAGA, J.; EGUÍLUZ, L.I. *Armónicos en sistemas de potencia*. España: Ediciones Universidad de Cantabria, 1994. ISBN 978-84-8102-085-4. 368 p.
2. BRUGNONI, Mario S.F.; IRIBARNE, Rosana. *Estudio de impactos en redes de distribución y medio ambiente debido al uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas* [en línea]. Argentina: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, 2006. [ref. de julio de 2009]. Disponible en Web:
<<http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=2523>>
3. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas del servicio de distribución –NTSD–*. Resolución CNEE No. -09-99. Guatemala: abril de 1999. 23 p.
4. FINK, Donald G.; BEATY, H. Wayne. *Manual de ingeniería eléctrica*. 13ª ed. (Tomo I y II). México: McGraw-Hill interamericana, 1996. ISBN 970-10-0871-5.
5. GARCÍA ÁLVAREZ, José Antonio. “Así funcionan las lámparas ahorradoras CFL”. *Así funciona* [en línea]. Abril de 2007 [Consulta: enero de 2009]. <http://www.asifunciona.com>.

6. GRAINGER, John J.; STEVENSON, William D. Jr. *Análisis de sistemas de potencia*. México: McGraw-Hill/interamericana de México, S.A. de C.V., 1996. ISBN 0-07-061293-5. 730 p.
7. IEEE. *Recomendaciones prácticas y requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia*. ANSI/IEEE std. 519-1992. Estados Unidos de America: IEEE, 1992. 98 p.
8. Procobre - Chile. *Calidad de la energía* [En línea]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas, 1999. [Ref. de junio de 2009]. Disponible en Web: <http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst_electricas_calidad.pdf>
9. RAMÍREZ VÁSQUEZ, D. José. *Luminotecnia enciclopedia CEAC de electricidad*. 8ª ed. Perú: ediciones CEAC S.A., 1993. ISBN 84-329-6011-X.
10. WILSON, Jerry D. *Física*. Segunda edición. México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1996. ISBN 968-880-660-9. 766 p.