



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS
RECURSOS NO RENOVABLES

“SOLUCIONES PARA LA CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS”

Tesis de Grado previa a la Obtención del Título de Diploma Superior
en Gestión Energética

REALIZADO POR:

1859

Ing. Paúl Castillo J.

Ing. Daniel Espinoza E.

LOJA – ECUADOR

2010

CERTIFICACIÓN

Dr. Miguel Ángel Caraballo

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, durante el desarrollo de la investigación, bajo el tema “SOLUCIONES PARA LA CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS”, previo a la obtención del título de Diploma Superior en Gestión Energética, realizado por los ingenieros Paúl Castillo y Daniel Espinoza, la misma que cumple con la reglamentación correspondiente, por lo que autorizo su presentación.

Dr. Miguel Ángel Caraballo Núñez

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Ingenieros Paúl Castillo y Daniel Espinoza asumimos la responsabilidad de los contenidos, resultados y criterios expuestos en el presente trabajo y certificamos el patrimonio de la misma a la Universidad Nacional de Loja.

Ing. Paúl Castillo J. Ing. Daniel Espinoza E.

DEDICATORIA

A Dios, a mi esposa Paola y mis hijos Paúl Andrés y Ana Paula, por su apoyo incondicional, comprensión, ya que ellos son la razón de mi vida.

Paúl

A mi esposa Elisa y a mis hijos Danny, Carlitos y Emily, por su invaluable apoyo para concluir con esta etapa de estudio, pues su tolerancia, comprensión y afecto, rinden ahora el fruto deseado y a la vez se constituyen en semilla para su preparación futura.

Daniel

AGRADECIMIENTO

Nuestro especial agradecimiento a Dios todopoderoso, fuente inspiradora de nuestras vidas.

A todas las autoridades de la Universidad Nacional de Loja por permitir prepararnos en este campo de estudio.

A nuestros profesores cubanos por su invaluable dedicación, de manera especial al Dr. Orlys Torres y Miguel Ángel Caraballo, por su desinteresada labor en guiarnos a la consecución de nuestros anhelados objetivos.

a.- TITULO:**“SOLUCIONES PARA LA CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LAS
LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS”****b.- RESUMEN**

El Gobierno Nacional consideró necesario optimizar el consumo de energía eléctrica en el sector residencial, por tanto, a través de Ministerio de Electricidad y Energía Renovable emprendió en el Proyecto de sustitución de seis millones de focos incandescentes por lámparas fluorescentes compactas (LFCs) de veinte vatios, con el objeto de reducir aproximadamente 200 megavatios de demanda en horas pico, en las cuales el sistema requiere gran cantidad de generación.

La LFC es un dispositivo electrónico, de comportamiento no lineal, el cual es un emisor de perturbaciones electromagnéticas que afectan a la forma de onda. El fenómeno que se presenta, es la distorsión de la onda fundamental, provocado por la presencia de armónicas, que no son más que ondas que tienen una frecuencia que es múltiplo de ésta.

La contaminación armónica puede provocar efectos nocivos en los sistemas de potencia, tales como: posibilidad de amplificación de algunos armónicos como consecuencia de resonancias, reducción del rendimiento de los sistemas de transporte y utilización de energía eléctrica, envejecimiento prematuro de los aislamientos de otros elementos eléctricos que comparten la red, errores de medición, entre otros.

La investigación se realizó en sectores rurales y urbanos marginales, los cuales tienen mayor incidencia de cargas por iluminación.

El presente estudio proporciona el grado de contaminación individual de los focos ahorradores y la contaminación con otras cargas.

Se proponen también, algunas de las posibles soluciones para hacer frente a este tipo de fenómenos o se plantean alternativas que conlleven a obtener similar ahorro de energía con otro tipo de iluminación, pero con menor grado contaminación.

SUMMARY

The National Government considered necessary to optimize the consumption of electrical energy in the residential sector, therefore, through Ministry of Electricity and Renewable Energy undertook in the Project of substitution of six million incandescent lamp by Compact Fluorescent Lamps (LFCs) of twenty watts, with the intention of reduce approximately 200 megawatts of peak demand, in which the system requires large amount of generation.

The LFC is an electronic device with a non-linear behavior, which is an emitter of electromagnetic disturbances that affect the waveform. The phenomenon that occurs is the fundamental wave distortion, caused by the presence of harmonics, which are waves having a frequency which is a multiple of them.

The harmonic contamination can cause adverse effects on power systems, such as: possibility of amplification of some harmonics due to resonance, reduced performance of transport systems and electricity use, premature aging of the isolations from other electrical components that sharing the same network, measurement errors, etc.

The research was conducted in marginal rural and urban sectors, which have higher incidence of lighting loads.

This paper provides the individual degree of contamination of the economizer lamp and the contamination with other loads.

It also proposes, some possible solutions to face this type of phenomena or considering alternatives involving to obtain similar energy saving with another type of lighting, but a lower degree of contamination.

ÍNDICE

c.-	Introducción	10
c.1.-	Objetivos	13
	Objetivo General	13
	Objetivos Específicos	13
d.-	Revisión Literaria	14
	d.1.- Generalidades	14
	d.2.- Distorsión armónica	14
	d.3.- Efectos de las componentes armónicas	16
	d.3.1.- Resonancia	17
	d.3.2.- Capacitores	20
	d.3.3.- Conductores	21
	d.3.4.- Transformadores	22
	d.3.5.- Medidores	22
	d.4.- Normas aplicables	23
	d.5.- Otras experiencias	26
e.-	Materiales y Métodos.....	26
f.-	Resultados y Discusión	28
f.1.-	Soluciones a la contaminación	34
g.-	Conclusiones	36
h.-	Recomendaciones	37
i.-	Bibliografía	38
j.-	Anexos	39

c.- INTRODUCCIÓN:

Un objetivo primordial del Gobierno Central es reducir la demanda de energía eléctrica en horas pico, debido a que se requiere una gran cantidad de generación; por tanto, a través de Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.- MEER se emprendió en un Proyecto de conversión tecnológica de la iluminación residencial, mediante la sustitución de seis millones de focos incandescentes por fluorescentes compactos (LFC o focos ahorradores) de veinte vatios.

El Programa está dirigido a aquellos hogares que registren un consumo de energía eléctrica mensual inferior a 110 kWh en la zona Sierra y 130 kWh en la zona Costa, Amazonía y Galápagos, a quienes se entregarán en promedio 3 focos ahorradores.

Particularmente, para el área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A.- EERSSA, que comprende las provincias de Loja, Zamora Chinchipe y el cantón Gualaquiza de la provincia de Morona Santiago, se asignaron 280,800 focos ahorradores, los cuales serán distribuidos en forma gratuita a todos los clientes que estén dentro de estos rangos de consumo.

Con las premisas dadas por el Gobierno Nacional a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, la EERSSA, en la campaña realizada durante el período de Enero – Agosto de 2009, sustituyó en su área de concesión, la cantidad de 158,962 focos ahorradores, que fueron cambiados por focos incandescentes de 40, 60 o 100 W, beneficiando a 46,034 familias cuyos rangos de consumo se ubicaron entre 1 y 130 kWh, y bajo el siguiente esquema:

1 – 10 kWh	2 focos
11 – 50 kWh	3 focos
51 – 130 kWh	4 focos

El ahorro estimado en potencia y energía, considerando un factor de coincidencia de 0.7 y un uso de 3 horas diarias es el siguiente:

Mes	No. de Focos Sustituidos 2009	Potencia promedio ahorrada (MW)	Energía mensual ahorrada (MWh/mes)
Enero	26,541	0.74	66.88
Febrero	21,324	1.34	120.62
Marzo	24,763	2.03	183.02
Abril	9,929	2.31	208.04
Mayo	17,669	2.81	252.57
Junio	15,843	3.25	292.49
Julio	559	3.27	293.90
Agosto	42,334	4.45	400.58

Tabla 1.- Ahorro estimado de potencia y energía de Enero a Agosto de 2009

El foco ahorrador empleado en el Proyecto, es un dispositivo electrónico, de comportamiento no lineal, el cual es un emisor de perturbaciones electromagnéticas que afectan a la forma de onda. El fenómeno que se presenta, es la distorsión de la onda fundamental, provocado por la presencia de armónicas, que no son más que ondas que tienen una frecuencia que es múltiplo de ésta y que dan como resultado valores no reales, es decir, las armónicas se superponen a la fundamental. El efecto final es el deterioro de todos los componentes eléctricos de un sistema.

El uso de focos ahorradores disminuye el consumo de energía eléctrica al reducir la potencia instalada, sin embargo no se conoce el grado de influencia de las armónicas producidas por las LFCs a las redes eléctricas, mismo que va en deterioro de la calidad de la energía.

Por otro lado, el Consejo Nacional de Electricidad.- CONELEC, organismo regulador del sector eléctrico ecuatoriano, supervisa los parámetros que

afectan la calidad de energía, entre los cuales se menciona la distorsión armónica, por tanto es necesario conocer o cuantificar su grado de afectación.

De verificarse que el grado de contaminación esta fuera de los rangos permitidos, en relación a los valores establecidos por la IEEE, será necesario determinar cuáles serían las posibles soluciones para hacer frente a este tipo de perturbaciones.

Por esta razón, se plantea el siguiente Problema Científico: ***“El uso de Lámparas fluorescentes compactas en el sector residencial urbano - marginal, provoca una reducción sensible en la calidad de la energía por la presencia de armónicas”***.

Los Focos ahorradores reducen el consumo eléctrico, no obstante el grado de contaminación que ellos introducen puede provocar una serie de efectos nocivos en los sistemas de potencia, tales como: posibilidad de amplificación de algunos armónicos como consecuencia de resonancias, reducción del rendimiento de los sistemas de transporte y utilización de energía eléctrica y envejecimiento prematuro de los aislamientos de otros elementos eléctricos que comparten la red.

La investigación proporcionará el grado de contaminación individual de los focos existentes en el mercado nacional, conjuntamente con aquel distribuido por el Gobierno Nacional y sus repercusiones en redes y transformadores de baja tensión de sectores rurales y urbanos – marginales, con predominio de cargas residenciales, donde la iluminación juega un papel preponderante.

Por otro lado, se investigarán posibles soluciones para hacer frente a este tipo de perturbaciones o se plantearán alternativas que conlleven a obtener similar ahorro con otro tipo de iluminación, pero con menor contaminación.

En forma secundaria, se determinará el orden del armónico que produce mayor distorsión a objeto de establecer el error de medición en el consumo energético.

c.1.- OBJETIVOS:

OBJETIVO GENERAL.-

Determinar las medidas técnicas y económicas para reducir el nivel de contaminación producida por los focos ahorradores, asegurando los índices de calidad de energía.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.-

- ✓ Estudiar el nivel de contaminación armónica producida por el foco ahorrador, su impacto en los sistemas eléctricos de distribución en los sectores urbano – marginales y las experiencias de casos similares presentadas en otros países y el Ecuador.
- ✓ Realizar mediciones de diferentes focos ahorradores existentes en las viviendas urbano - marginales con el fin de determinar el nivel de contaminación que producen.
- ✓ Realizar mediciones generales a nivel de viviendas.
- ✓ Establecer el impacto que producen los focos ahorradores.
- ✓ Seleccionar las mejores alternativas de solución al problema de la contaminación armónica.
- ✓ Proponer una solución a la EERSSA para controlar el efecto de las armónicas producido por los focos ahorradores.

d.- REVISIÓN DE LITERATURA:**d.1.- GENERALIDADES.-**

Por versión de expertos del Centro Nacional de Control de Energía.- CENACE (Nota periodística), se calcula que el 20% de la energía que se produce en el planeta está destinada a la iluminación pública y domiciliaria. La sustitución masiva de focos incandescentes por focos ahorradores es un excelente aliado para afrontar el calentamiento global y la contaminación ambiental, tomando en cuenta que un foco ahorrador de 20W proporciona similar iluminación que un foco incandescente de 100W, produciendo un ahorro del 80% en el consumo de energía eléctrica.

La aparición y uso de cargas no lineales o no sinusoidales, principalmente de tipo electrónico, como es el caso de las lámparas fluorescentes compactas (focos ahorradores), en las instalaciones eléctricas va en aumento y cada vez es más difícil encontrar cargas netamente lineales. En el caso del sector residencial, la mayoría de las lámparas incandescentes han sido sustituidas por este tipo de lámparas fluorescentes compactas; además, existe una gran cantidad de equipos electrónicos como por ejemplo: televisores, computadores, equipos de sonido, etc., que basan su funcionamiento en circuitos electrónicos, los cuales colaboran notablemente a la reducción de la demanda, no obstante presentan características fuertemente alineales, las mismas que contribuyen al aumento de la contaminación armónica en las redes de distribución de energía eléctrica.

d.2.- DISTORSIÓN ARMÓNICA.-

Se llama carga no sinusoidal a aquella cuya característica $V - I$ no es una línea recta, la cual corresponde a una carga resistiva, o bien, una elipse que corresponde a una carga inductiva – resistiva o capacitiva. Este tipo de cargas

son alimentadas con voltajes casi sinusoidales, pero la corriente que extraen es no sinusoidal y de ahí que la característica $V - I$ sea no lineal.

Las herramientas matemáticas empleadas en el análisis de la contaminación armónica son las leyes y transformadas de FOURIER.

Se define un armónico como la componente sinusoidal de una onda periódica, cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Cada armónico está caracterizado por una componente de secuencia y por tanto, aunque el sistema esté balanceado, las armónicas poseerán componentes de secuencia.

SECUENCIA	1	2	0	1	2	0	1	2
ARMÓNICO	1	2	3	4	5	6	7	8

Existe una característica muy interesante o una relación que permite determinar la componente de secuencia de cada armónica y consiste en que va cambiando la secuencia según el orden del armónico. El primer armónico es de secuencia positiva, el segundo es de secuencia negativa, el tercero es de secuencia cero, entonces el cuarto vuelve a ser de secuencia positiva, y así se repite la secuencia, lo cual determina que los terceros armónicos y sus múltiplos viajan por el neutro. “Torres, Orly. Armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia. Loja, Ecuador. 2009”.

En un sistema eléctrico pueden también aparecer interarmónicos que no son más que componentes sinusoidales con frecuencias que no son múltiplos enteros de la fundamental.

En general:

$$f(t) \cong F_0 + \sum_{k=1}^n \sqrt{2}x F_k x \cos(k\omega t - \varphi_k)$$

$$= F_0 + \sqrt{2}x F_1 x \cos(\omega t - \varphi_1) + \dots + \sqrt{2}x F_n x \cos(n\omega t - \varphi_n)$$

Donde:

F_0 : componente de corriente continua.

F_1 : componente de frecuencia fundamental (valor rms).

F_2, F_3, \dots, F_n : componentes armónicos (valores rms).

φ_k : desfase de las componentes.

Por lo tanto, la aparición de cargas no lineales ha provocado alteraciones en la calidad del sistema eléctrico, además de complicar el análisis de flujos de potencia que tiene lugar en esos sistemas. Las corrientes que consumen estas cargas pueden influir en la deformación de la onda de tensión lo cual puede afectar a las propias cargas no lineales, siendo necesaria para su estudio su formulación a través de las correspondientes componentes armónicas. “Ángel Civantos Torres. Definición y Estudio de Armónicos”.

d.3.- EFECTOS DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS.-

El efecto de las componentes armónicas sobre el equipamiento electrónico de regulación, medición, protección y control es frecuentemente la causa de serios problemas en los sistemas eléctricos, entre los cuales podemos citar los siguientes: posibilidad de amplificación de algunos armónicos como consecuencia de resonancias serie/paralelo, envejecimiento del aislamiento de los componentes de la red y por tanto reducción de su vida útil, incorrecto funcionamiento del sistema o de alguno de sus componentes como transformadores, condensadores ó máquinas rotatorias. “López Jacinto. Conviviendo con los armónicos”.

También, se observa un creciente aumento de la corriente por el conductor neutro, más allá de lo que sugieren posibles desequilibrios de las cargas pudiendo provocar el disparo inadecuado de protecciones o el sobrecalentamiento del conductor.

d.3.1 RESONANCIA.-

Cuando se tienen cargas que consumen potencia reactiva (motores, reactores y transformadores), el factor de potencia es pobre y se corrige con capacitores.

Al tener una combinación de cargas que toman corriente con distorsión y cargas que consumen reactivos de desplazamiento, la corrección del factor de potencia con bancos de capacitores puede dar lugar a una resonancia paralelo excitada. Esta condición se manifiesta con el disparo de los interruptores termo magnéticos o la apertura de los fusibles que protegen a los capacitores.

Al colocar capacitores, el factor de potencia que se corrige es el de desplazamiento, no el de distorsión, pero a cambio de esto lo que se logra es bajar la frecuencia de resonancia del sistema a niveles donde esta pueda ser excitada por las cargas no lineales que el sistema alimenta.

A través de esta corrección en realidad se está construyendo un circuito que es conocido como circuito tanque, el cual visto desde la carga (la combinación no lineal e inductiva) nos representa la condición de resonancia paralelo, la cual muestra distorsión elevada en los voltajes y sobrecorrientes en los capacitores, por eso es que operan las protecciones.

Se dice que un circuito que tenga inductancia y capacitancia está en resonancia cuando el voltaje y la corriente están en fase a una frecuencia dada, esto es, cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva se anulan provocando un aumento excesivo en la magnitud de la corriente.

La figura 1 muestra un diagrama unifilar muy simplificado de un sistema de potencia típico que alimenta a una carga que consume corriente no lineal en paralelo con un banco de capacitores para corregir el factor de potencia.

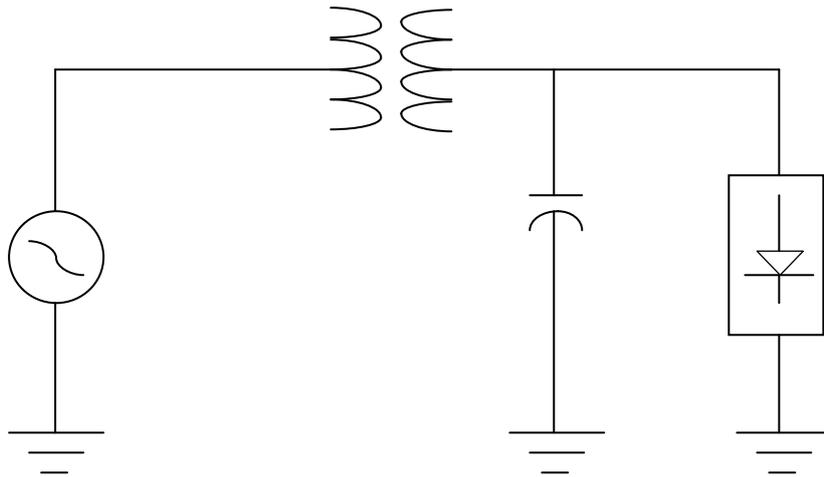


Figura 1. Diagrama unifilar de un sistema de potencia que alimenta a una carga no lineal

En la figura 2 se muestra la representación de este sistema de potencia en un circuito eléctrico equivalente. Las cargas no lineales se pueden representar como fuentes de corriente en paralelo, cada una operando a distinta frecuencia. La suma de estas corrientes nos da como resultado la corriente total que es consumida por la carga no sinusoidal.

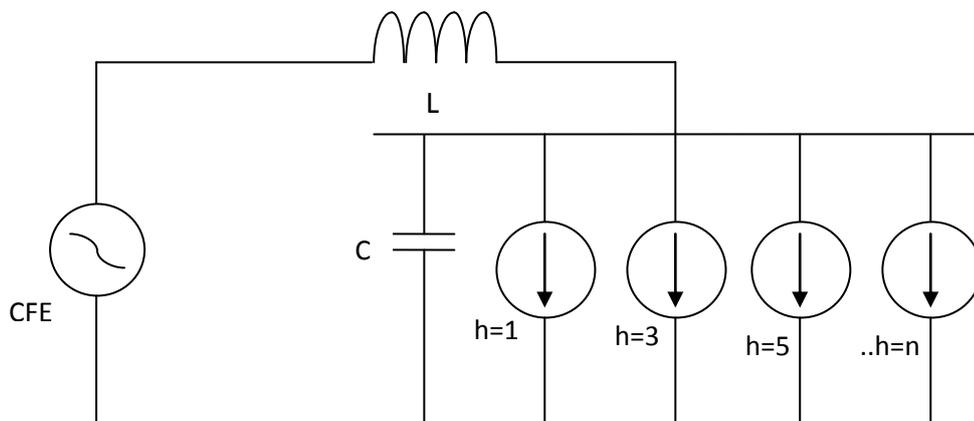


Figura 2. Circuito eléctrico equivalente del sistema de potencia de la figura 1

Dado que este circuito tiene fuentes de corriente que operan a distintas frecuencias, podemos aplicar el teorema de superposición y resolverlo para cada frecuencia. Así, para la frecuencia de 60 Hz, tenemos que nuestro circuito contiene una fuente de voltaje, una fuente de corriente, la inductancia y la capacitancia. La figura 3 muestra como quedan interconectados todos estos elementos a la frecuencia de 60 Hz.

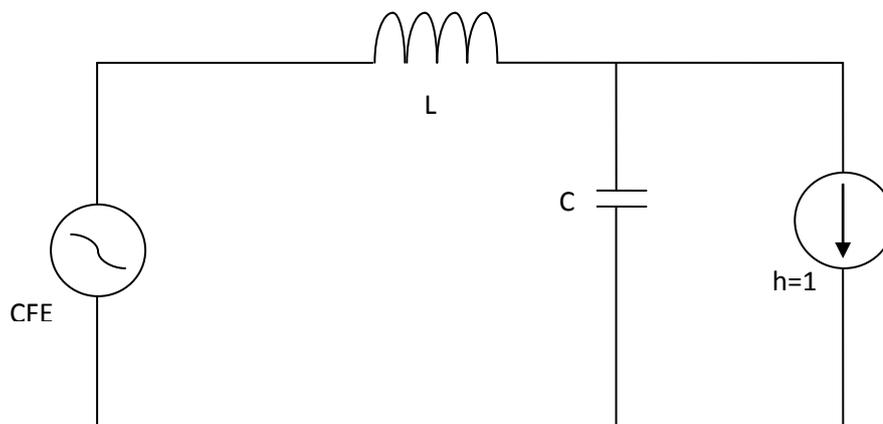


Figura 3. Circuito eléctrico equivalente para una frecuencia de 60 Hz

La figura 4 muestra los elementos a frecuencias distintas de 60 Hz. Se tiene ahora a la inductancia, la capacitancia y la fuente de corriente de interés, todos en paralelo. Este es un circuito tanque como ya se había mencionado y presenta una frecuencia de resonancia la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

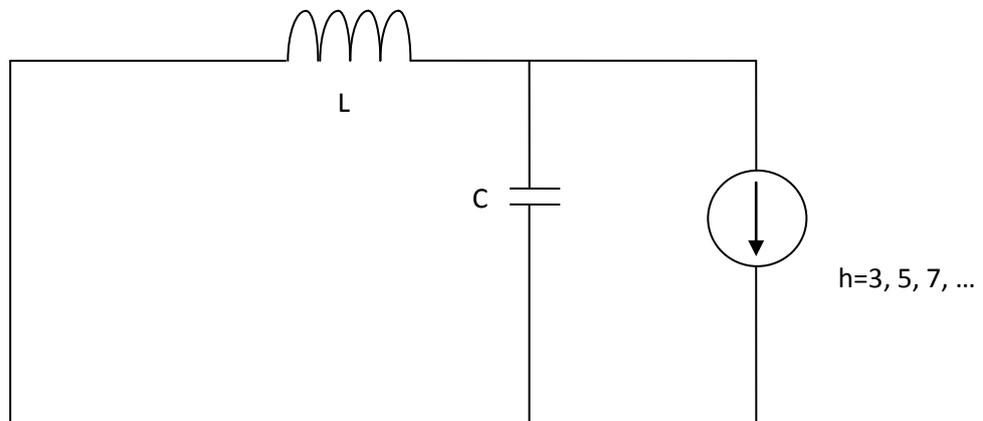


Figura 4.- Circuito equivalente para frecuencias distintas de la fuente de voltaje

d.3.2 CAPACITORES.-

Para obtener la corriente del capacitor se aplica la técnica de división de corriente y queda:

$$I_c = I_h \times \frac{\omega L}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}$$

Se observa que, conforme se varíe la frecuencia ω , va a llegar un momento en que el denominador de dicha ecuación se haga cero o casi cero, lo cual va traer como consecuencia un aumento considerable en la corriente que circula por el capacitor. De esta forma, no es necesario estar exactamente en la frecuencia de resonancia para obtener corrientes elevadas en el capacitor, sino que basta con estar un poco cerca.

En un sistema de potencia real, la corriente no se va hacer infinita o excesivamente grande ya que los conductores y las uniones presentan una resistencia inherente la cual limita en cierta medida la corriente. El circuito simplificado indica que si los valores de capacitancia y de inductancia dan lugar

a una resonancia que coincida con una de las armónicas presentes en la carga no lineal el voltaje en el capacitor se haría infinito, obviamente esto no es posible. No olvidemos que la carga no está formada por fuentes sino por elementos pasivos. Si la impedancia del sistema de alimentación y el banco de capacitores bloquea la corriente de cierta armónica, entonces el valor de la fuente de corriente que representa a dicha armónica se haría pequeño. “Jorge de los Reyes y Armando Llamas. IEEE. Departamento de Ingeniería Eléctrica. México”.

d.3.3 CONDUCTORES.-

La distribución uniforme de la densidad de corriente en la sección de un conductor, solo se presenta en corriente continua, en corriente alterna tiende a circular hacia la periferia de los conductores; así, en conductores circulares, la densidad de corriente aumenta desde el centro a la superficie. Este fenómeno denominado efecto pelicular, se torna más evidente para altas frecuencias. “Mario S. F. Brugnoli. Efecto de las cargas distorsivas en las Redes de Distribución Eléctrica”.

En el caso de las Lámparas Fluorescentes Compactas, dan lugar a corrientes armónicas impares de magnitud importante, por ejemplo al conectar varias lámparas de este tipo, el tercer armónico puede superar el 10% con respecto a la frecuencia fundamental. “J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut y C. Agüero. Argentina. IEEE. Vol. 3, No. 5. Diciembre de 2005”.

Debido a la presencia de los terceros armónicos en el conductor del neutro, éste tendrá que diseñarse con una sección igual o mayor a las de las fases con el fin de soportar las corrientes que por él circulan y evitar su sobrecalentamiento.

d.3.4 TRANSFORMADORES.-

El aumento de la corriente produce calentamiento excesivo de los devanados de un transformador, por el efecto joule, a su vez las pérdidas por Foucault y por histéresis se ven incrementadas por ser proporcionales a la frecuencia, esto se traduce en un aumento de las pérdidas en el hierro.

En general, la circulación de corrientes armónicas se traduce en un incremento de la temperatura normal de operación de los transformadores. Esto representa una disminución de la vida útil y reducción de la capacidad nominal de carga del mismo. Las pérdidas que producen este calentamiento adicional se pueden cuantificar y son dependientes de la magnitud y frecuencia de la corriente armónica.

Los transformadores de potencia normales no pueden tolerar más de un 5% de distorsión armónica total de corriente dado que las temperaturas del hierro y los devanados se incrementan intolerablemente.

d.3.5 MEDIDORES.-

La presencia de armónicas afecta severamente la lectura de los instrumentos, lo que implica tomar en cuenta diversas precauciones al realizar una lectura.

Para el caso de los medidores, se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas.

En el país y en el área de concesión de la EERSSA, se encuentran instalados en forma masiva medidores electromecánicos, los cuales están diseñados para trabajar con ondas sinusoidales puras, y la distorsión provocada por la presencia de armónicas no es detectada por estos instrumentos.

Estudios realizados reportan errores cercanos al 3% en condiciones de $I_h = 20\%$ y $V_h = 10\%$ para ondas compuestas de la fundamental y una sola armónica. “Baldwin Girgis. IEEE. TIA. Julio/Agosto de 1990”.

Paulatinamente, se va cambiando de tecnología a medidores electrónicos que basan su funcionamiento en la toma de señales de voltaje y corriente por medio de transductores. El error de medición se encuentra fundamentalmente en estos transductores.

d.4.- NORMAS APLICABLES.-

La Calidad de Energía incluye todo lo relacionado con los disturbios que se generan en los sistemas eléctricos y que alteran la forma de onda de voltaje, la forma de onda de la corriente o la frecuencia, resultando en fallas de los sistemas, daños en equipos, operaciones erráticas de las protecciones y desperdicio de energía. “Armónicos – Los Invitados de Piedra. José Eduardo Muñoz. Chile”.

Para poder establecer este tipo de contaminación, es necesario determinar el factor de distorsión total e individual de los armónicos (THD e IHD), para cual se aplicarán diferentes tipos de metodologías.

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, bancos de condensadores, motores, computadoras, etc.), además de los problemas de calentamiento que originan en las líneas y transformadores de distribución.

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:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \times 100\%$$

Donde:

k = número de armónica

I_1 = valor eficaz de la onda fundamental de corriente

I_k = valor eficaz de la corriente del armónico k

De forma similar se expresa la distorsión en la tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \times 100\%$$

J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut y C. Agüero. Argentina. IEEE. Vol. 3, No. 5. Diciembre de 2005.

En procura de que las Distribuidoras de Energía Eléctrica mantengan índices de calidad apropiados, los diferentes países en el mundo aplican distintas normas, no siendo la excepción Ecuador, que mediante el Consejo Nacional de Electricidad.- CONELEC ha tratado de normalizar lo referente a la distorsión armónica.

Sus regulaciones, tanto para la transmisión, como para la distribución se basan en recomendaciones de la IEEE.

Existen dos conjuntos de recomendaciones que son tomados, en la mayoría de los casos, como referencia a la hora de fijar límites para armónicos en sistemas

eléctricos de potencia: la primera de ellas es la recomendación práctica IEEE-519: IEEE “Prácticas y requerimientos recomendados para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia”, publicada en el año 1992; y, la segunda es la norma IEC 61000-3-2 “Límites para emisión de corriente armónica (equipos con corrientes nominales menores a 16 A por fase)”.

VOLTAJE EN EL PCC	DISTORSIÓN INDIVIDUAL DE VOLTAJE IHD _V (%)	DISTORSIÓN TOTAL DE VOLTAJE THD (%)
V < 69 kV	3	5
69,001 kV < V < 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1	1.5

Tabla 1.- Límites de distorsión armónica para tensión. IEEE 519-1992

DISTORSIÓN MÁXIMA DE CORRIENTE ARMÓNICA EN % DE IL						
I _{CC} /I _{1máx}	ORDEN INDIVIDUAL DEL ARMÓNICO					TDD
	h<11	11≤h<17	17≤h<22	22≤h<35	35<h	
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 – 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 – 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100–1000	12	5.5	5	2	1	15
1000 <	15	7	6	2.5	1.4	20

Tabla 2.- Límites de distorsión armónica para corrientes (120 V a 69 kV). IEEE 519-1992

En base a lo manifestado, el presente estudio pretende determinar e identificar que armónicas inciden en mayor grado, cuales son los niveles de contaminación armónica producida por la introducción de las LFC en el sector residencial; y, si esta contaminación se encuentra dentro de los límites permitidos por la Regulación No. 004/01, que establece el CONELEC.

d.5.- OTRAS EXPERIENCIAS.-

Estudios similares se han realizado en países vecinos como Venezuela, Colombia y Argentina; investigaciones que definen el comportamiento de las lámparas fluorescentes compactas y su incidencia en las redes eléctricas.

e.- MATERIALES Y MÉTODOS:

Sobre la base de la incorporación de tal cantidad de focos ahorradores en el sistema eléctrico regional de la EERSSA y dado que principalmente el tipo de cliente beneficiado se ubica en sectores urbano – marginales y rurales, se realizó la investigación en dos sectores periféricos de la ciudad de Loja, específicamente en el Barrio Carigán, donde se realizó la sustitución en todas las viviendas.

Previamente, se realizaron encuestas del tipo de electrodomésticos instalados en los domicilios, el período de uso, número de ambientes, etc., lo que llevó a definir una vivienda modelo para realizar las pruebas respectivas.

Al realizar la caracterización de la carga en este tipo de residencias, se pudo verificar que el 30% de carga instalada es no-lineal.

Con el análisis de las encuestas y para cumplir con los objetivos propuestos, se procedió, en primer lugar, a la construcción de un banco de ensayos, compuesto por puntos de iluminación y tomas de fuerza, con lo cual se realizó la simulación de una vivienda.

El banco de ensayos consta de: 5 boquillas E27, 5 interruptores, 1 tomacorriente doble, cables de conexión de cobre tipo TW – 12 AWG, tabla de playwood de 40x40 cm; en tanto que, los equipos de análisis de calidad son los siguientes:

- Analizador portátil, marca ZERA (Alemania), modelo MT310, Clase 0.1, 85-132 VAC/170-265 VAC, 47...63 Hz; rango de medición de voltaje 100 mV...300V; rango de medición de intensidad 1mA...12A (modo directo), 5mA...120A (con pinzas).
- Analizador de calidad, marca FLUKE (USA), modelo 1744, 88 VAC/660 VAC, 50-60 Hz, 15 A / 150 A / 1500 A / 3000 A ac.

El esquema de conexión se muestra a continuación:



Figura 5.- Esquema de conexión para las pruebas

Se realizaron diferentes ensayos con lámparas fluorescentes compactas de 20 vatios disponibles en el mercado, tanto en forma individual como colectiva, así como en combinación con otras cargas tales como: televisor, computador y lámpara fluorescente con balasto electromagnético.

Seguidamente se describen las pruebas realizadas para determinar el grado de contaminación que introducen las diferentes cargas:

1. Los focos ahorradores distribuidos por el Gobierno Nacional.
2. Focos ahorradores existentes en el mercado local.
3. Cada equipo electrodoméstico utilizado en la vivienda.
4. Con la combinación de cargas.
5. En lámparas fluorescentes con balasto electromagnético.

Además, se procedió a instalar un equipo de prueba en tres viviendas para determinar el grado de contaminación que producen diferentes tipos de electrodomésticos en conjunto con la iluminación, así como definir los errores de medición que se producen en un período tiempo determinado.

Luego de obtener el grado de contaminación de las diferentes cargas no-lineales, se pudo definir el comportamiento y la distorsión armónica introducida por los focos ahorradores en combinación con otras cargas.

f.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

Inicialmente se realizó una prueba sin ninguna carga para establecer el grado de contaminación en la onda de tensión que existe en la red, dando como resultado un THD_V de 1.71%, valor que está dentro de los límites permitidos por la norma.

De las pruebas realizadas a todas las cargas no-lineales se comprueba que éstas no afectan en significativamente a la forma de onda de tensión que suministra el sistema, entendiéndose por éste hasta el transformador de distribución.

En lo que tiene que ver con la onda de corriente, ésta se distorsiona notablemente con la presencia de las diferentes cargas contaminantes, llegando a alcanzar TH_I de alrededor del 212%.

En cuanto a la iluminación basada en lámparas fluorescentes compactas, existe una Distorsión armónica total de corriente entre el 88% al 112%, dependiendo de la marca. La lámpara sustituida por el gobierno nacional alcanza el 98%, debiéndose destacar también que la lámpara que produce menor distorsión (88%) es de la marca PHILIPS y la que produce mayor distorsión es la DAY LIGHT (112%).

Los cuadros anexos contienen datos de contaminación armónica de los diferentes equipos en forma individual y combinados, para armónicas de orden 2 hasta la 40.

Procesada la información y graficado el espectro armónico, se llega a definir que los impares aportan mayor contaminación al sistema, y de ellos se destaca el tercero con un porcentaje superior, los otros van decreciendo con el orden del armónico.

De otro lado, al momento de combinar cargas contaminantes se verificó una disminución de la distorsión total, debido a que cada armónico tiene diferente ángulo de desfase, y por tanto su superposición da como resultado la suma y resta de valores que implica en la onda final, una disminución en la distorsión.

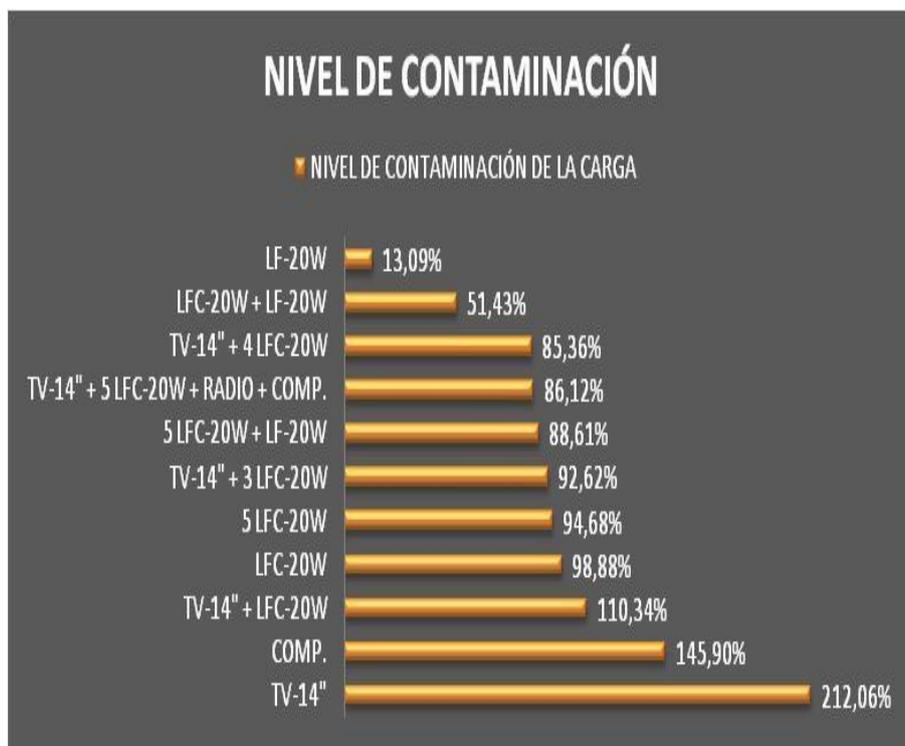


Figura 5.- Nivel de contaminación de diferentes cargas combinadas

A continuación se muestran varios ejemplos de distorsiones producidas por diferentes cargas contaminantes:



Figura 6.- Señal de corriente contaminada de un Foco ahorrador de 20W



Figura 7.- Espectro armónico del Foco ahorrador de 20W



Figura 8.- Señal de corriente contaminada con combinación de cargas



Figura 9.- Espectro armónico de la combinación de cargas



Figura 10.- Señal de corriente contaminada de una lámpara fluorescente de 20W



Figura 11.- Espectro armónico de la lámpara fluorescente de 20W

Durante las pruebas se pudo observar que se presentan grandes picos de corriente en el instante en que se rectifica la onda con el funcionamiento de los aparatos electrónicos.

Con la instalación en forma individual de las cargas, se pudo advertir que el valor mínimo THD_I corresponde a la lámpara fluorescente con balasto electromagnético alcanzando el 13.09%, y el máximo, pertenece a un televisor con un valor de 212.06%; en tanto que, al combinar diferentes tipos de cargas se obtuvo un THD_I cercano al 88 %.

En cuanto se refiere a las mediciones realizadas en las viviendas se comprobó que la contaminación máxima alcanza un valor del 92%.

Como resultado de esta investigación debemos indicar que para el diseño y dimensionamiento de los diferentes componentes del sistema eléctrico se deben considerar los efectos máximos provocados por los armónicos, a fin de que estos equipos no sean susceptibles a la presencia de los armónicos.

Una característica importante es que los mayores problemas que se presentan con la instalación de cargas no lineales en las viviendas es el riesgo de provocar una sobrecarga en el conductor neutro. Normalmente, la corriente a través del neutro suele ser baja y en consecuencia sus conductores no son protegidos mediante por ejemplo el uso de fusibles.

En lo referente a los sistemas de medición, y tomando en cuenta que en el país la tecnología electromecánica se encuentra presente en forma significativa, se producen pérdidas por el registro de consumo, ya que este tipo de contador de energía está diseñado tan solo para registrar la onda fundamental.

Con la incorporación de medición estática, se deberá tener especial cuidado en su escogitamiento, debiéndose adquirir medidores que registren los diferentes armónicos e interarmónicos que se presentan en la red.

En las pruebas realizadas en las viviendas con contadores electromecánicos se verificó que existe una diferencia en el registro de consumo eléctrico de hasta el 4%, en comparación con los equipos de medición antes indicados; en tanto que en los electrónicos no existe mayor diferencia. Es preciso indicar que el error producido con la medición electromecánica no es tan real, debido a que éstos no contienen dígitos decimales.

Finalmente, se debe indicar, que si bien los focos ahorradores introducen una alta contaminación armónica en la onda de corriente, la combinación con otras cargas de mayor potencia hace que esta contaminación sea pequeña en comparación con la carga total, lo que puede dar lugar más bien a una disminución de la distorsión total.

Los resultados demuestran que la instalación de unos pocos focos ahorradores en una vivienda no crea problemas de sobrecarga dentro de las casas, sin embargo la suma de varios de éstos, que corresponden a todas las viviendas de un sector, pueden causar problemas en la red y el transformador.

Las experiencias obtenidas en países vecinos, dan cuenta de que existe una implicación en la calidad de energía, sin embargo no existe una conclusión adecuada del porque se provoca una disminución de la contaminación armónica cuando se presenta una combinación de cargas no lineales.

De la investigación se puede citar como causa de disminución en el ángulo de fase, a la conexión en paralelo y la simultaneidad en el uso de diferentes cargas no lineales, definido como Factor de Diversidad; así como también, el Factor de Atenuación que es provocado por la propia impedancia del sistema de potencia y por la correspondiente distorsión de tensión que tiende a reducir las corrientes armónicas en la red producida por cargas no lineales.

f.1.- SOLUCIONES A LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA:

Existen numerosas técnicas para el control de los armónicos en los sistemas eléctricos. Para un mejor entendimiento de estas técnicas se puede decir que las podemos diferenciar, según la naturaleza de la misma, en tres grupos: las soluciones que están dirigidas a los equipos emisores de distorsión armónica (cambiar la carga contaminante o combinarla con cargas menos contaminantes), las soluciones que proponen la incorporación de equipos mitigadores de las componentes armónicas y, por último, soluciones que proponen la modificación o reconfiguración de la red de distribución, sin embargo es preciso analizar los costos que involucre las soluciones planteadas.

Para el caso de transformadores, se diseñan aquellos conocidos como transformadores de relación K (Factor de derrateo). A estos se le añaden bobinas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas y campos electrostáticos para reducir los flujos en el núcleo. Se construyen con el primario en delta y dos y más neutros.

Los factores K oscilan entre 4 y 13.

Transformadores de este tipo tienen la capacidad para soportar o tolerar la contaminación armónica de la señal de corriente.

En relación con la recomendación IEEE C57.110-1998 y la norma NFC 52-114 el factor K viene dado por las siguientes expresiones:

$$\begin{array}{cc}
 \text{IEEE C57.110-1998} & \text{Norma NFC 52-114} \\
 K = \sum_{h=1}^N \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2 & K = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \sum_{h=1}^N \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{1.6}}}
 \end{array}$$

Donde:

Ih: Componente armónica de corriente.

h: Número del armónico.

N: Armónico máximo definido según el criterio o norma utilizada.

g.- CONCLUSIONES:

- ✓ El desarrollo de la electrónica de potencia permite bajar los consumos, pero en contrapartida se disminuye la calidad de energía con la presencia de armónicos; principalmente, se empobrece el factor de potencia.
- ✓ La presencia de cargas no lineales no afecta significativamente a la onda de tensión, no así la onda de corriente cuya distorsión, por la presencia de cargas individuales, puede llegar hasta el 212%.
- ✓ Los armónicos que introducen las lámparas fluorescentes compactas constituyen una pequeña parte del total de armónicos de corriente, en tanto que los mayores contaminantes son otro tipo de cargas, tales como: televisores, DVDs, Computadores y otro equipamiento electrónico, sin embargo es importante recalcar que con su presencia se está acelerando el deterioro de los componentes del sistema eléctrico.
- ✓ Cuando existe combinación de cargas no lineales la distorsión se ve disminuida por el diferente ángulo de defase de cada armónico que presenta cada carga.
- ✓ Los terceros armónicos juegan un papel importante en la distorsión lo que conlleva a que el dimensionamiento del conductor neutro sea considerado con precaución.
- ✓ La introducción de armónicos por la presencia de cargas no lineales provoca un registro erróneo de consumos en los medidores

electromecánicos. La nueva tecnología de medición estática incluye la capacidad de registro en presencia de armónicos de cualquier orden.

- ✓ De los cálculos realizados para diferentes grados de contaminación se demuestra que la cargabilidad del transformador se disminuye en presencia de los armónicos (Ver anexo 2).
- ✓ Un problema grave, no tomado en cuenta hasta el momento, es la eliminación de desechos tóxicos producto de los focos ahorradores en mal estado, dado que principalmente tiene un contenido de mercurio, además de sus componentes electrónicos.

h.- RECOMENDACIONES:

- ✓ El organismo regulador deberá considerar en el cálculo de tarifas, la presencia de los armónicos, ya que éstas modifican o alteran el factor de potencia.
- ✓ El CONELEC, así como tiene definido el nivel de contaminación producida por cada uno de los armónicos con respecto al voltaje, deberá emitir o regular los niveles de contaminación mínima de la onda de corriente.
- ✓ Se deberá normar, en el diseño de proyectos eléctricos los efectos de las armónicas, especialmente para el caso del conductor neutro, camino apropiado para el armónico de orden 3.
- ✓ Se debe promover la utilización combinada de las lámparas fluorescentes compactas con lámparas fluorescentes con balasto electromagnético con el fin de reducir el nivel de contaminación, ya que estas últimas tienen un nivel de contaminación de alrededor del 13%.
- ✓ En la adquisición de contadores de energía debe incluirse como un parámetro técnico adicional de escogitamiento, que el medidor pueda registrar el consumo eléctrico en presencia de armónicos, debiéndose

tomar en cuenta que la información técnica del medidor indique hasta que grado de armónico e interarmónico puede registrar.

- ✓ La Empresas Eléctricas de Distribución deberán también continuar con el cambio progresivo de sus sistemas de medición electromecánicos a estáticos con registro de armónicos.
- ✓ Los costos que representa la fabricación de transformadores más robustos contra la contaminación (transformadores tipo K), podrían compensarse con transformadores que tengan la suficiente reserva para hacer frente a esta contaminación.
- ✓ El CONELEC como organismo regulador o el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable deberán emitir una Regulación que contenga la forma más adecuada de eliminar los desechos de los focos ahorradores en mal estado.

i.- **BIBLIOGRAFÍA:**

1. Baldwin Girgis. IEEE. TIA. Julio/Agosto de 1990.
2. Brugnoli, Mario. Los componentes armónicos de la demanda y sus efectos sobre la distribución eléctrica. Buenos Aires, Argentina.
3. Brugnoli, Mario e Iribarne Rosana. Estudio de Impactos en Redes de Distribución (I) y Medio Ambiente (II) debidos al Uso Intensivo de Lámparas Fluorescentes Compactas. Secretaría de Energía. Buenos Aires, Argentina. 2006.
4. CONELEC, Conclusiones y Recomendaciones sobre estudios de armónicas. Quito, Ecuador.
5. Hanzelka, Zbigniew y Bien Andrzej. Guía de calidad de la energía eléctrica. Armónicos e hinterarmónicos. Madrid, España. 2004.
6. López, Jacinto. Conviviendo con los armónicos.
7. Muñoz, José Eduardo. Armónicos – los invitados de piedra. Chile.

8. Schonek, Jacques. Las peculiaridades del tercer armónico. Cuaderno técnico Schneider. 2001.
9. Suarez, Juan Antonio; Di Mauro, Guillermo y Anaut, Daniel. Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. Mar del Plata, Argentina, 2.005.
10. Torres, Ángel. Armónicos: Definición y estudio basado en caso práctico. Minimización coste energía. Madrid, España. 1992.
11. Torres, Orly. Armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia. Loja, Ecuador. 2009.
12. Torrelles Ruda William Alfredo. Impacto del uso intensivo de Lámparas Ahorradoras sobre la calidad de la energía suministrada por la EDC, Universidad Simón Bolívar, Venezuela. 2008.

j.- **ANEXOS:**

- ANEXO 1.- Fotos de Pruebas en Laboratorio.
- ANEXO 2.- Pruebas de Laboratorio realizadas con la combinación de cargas.
- ANEXO 3.- Encuesta sobre el tipo de cargas empleadas en una vivienda.
- ANEXO 4.- Tabulación de las encuestas por tipo de cargas empleadas en una vivienda.
- ANEXO 5.- Resultados de las encuestas por tipo de cargas empleadas en una vivienda.
- ANEXO 6.- Diagramas de Pareto.