REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA

EVALUACIÓN TÉCNICA – ECONÓMICA DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

EDISON RAÚL MOPOSITA MOYA

eddymoposita@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. GABRIEL EDUARDO CAZCO CASTELLI.

eduardo.cazco@conelec.gob.ec

Quito, Enero 2012.

DECLARACIÓN

Yo, Edison Raúl Moposita Moya declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Edison Raúl Moposita Moya

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme vivir a plenitud las etapas de mi vida.

A mi Abuela, por sus sabios consejos y su guía para ser un hombre de bien. Mamá, muchas gracias por estar allí siempre dando palabras de aliento, así como fuerza y razones para querer seguir adelante.

A mi querido padre, por su apoyo incondicional, estar siempre pendiente de mí demostrando el amor a sus hijos, ejemplo de trabajo y constancia. Padre, en ti siempre encontré una palabra o gesto alentador en cada momento en que lo necesité.

A mi madre por enseñarme el valor del amor a Dios; a dejar cualquier situación adversa en sus manos y prestarme la ayuda que siempre encontré en usted. !Muchas gracias¡

A mi esposa por su amor y apoyo, compañera para toda la vida.

A toda mi familia (hermanos, tíos, tíos políticos, primos) por hacerme saber que siempre podré contar con ellos para lo que necesite.

Un reconocimiento y agradecimiento especial al ingeniero EDUARDO CAZCO, director del proyecto por su ayuda y paciencia.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a la memoria de mi abuelito quien me enseñó a trabajar con ahínco. Papaito, puedo decir que te debo gran parte de la persona que soy. ¡Dios se lo pague! y a mi hija Danielita que ilumina mi vida con su cariño y amor.

CONTENIDO

1 CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN TEÓRICA 18

1.1 INTRODUCCIÓN. 18

1.2 LÁMPARAS INCANDESCENTES. 18

1.2.1 Elementos de una lámpara incandescente. 18

1.2.2 Funcionamiento de una lámpara incandescente. 19

1.2.3 Evolución de las lámparas incandescentes. 20

1.3 LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS (LFC). 21

1.3.1 Elementos constitutivos de una lámpara fluorescente compacta. 22

1.3.2 Funcionamiento de las lámparas fluorescentes compactas. 24

1.3.3 Equivalencia entre lámparas incandescentes y lámparas ahorradoras según su potencia y flujo luminoso. 25

1.3.4 El color y la luz en una lfc. 26

1.3.4.1 *Clasificación de los colores según el diagrama cromático.* 26

1.3.4.2 *La temperatura de color* 28

1.3.4.3 *Índice De Rendimiento De Color (I.RC).* 28

1.3.4.4 *Las curvas de Kruithof para determinar el confort visual.* 29

1.4 CONCEPTOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA. 31

1.4.1 Calidad del servicio eléctrico. 31

1.4.2 Armónicos. 32

1.4.2.1 *Causas de los armónicos.* 34

1.4.2.2 *Efectos de los armónicos.* 35

1.4.3 Indicadores de calidad. 40

1.4.3.1 *Índices de Distorsión Armónica*. 40

1.4.4 Normativa a estudiarse. 42

1.4.4.1 IEEE-519-1992. 43

1.4.4.2 IEC 61000-3-2. 45

1.4.5 Normativa ecuatoriana 47

1.4.5.1 *Regulación – 004/01* 47

1.4.5.2 *Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN* 53

1.4.6 Técnicas de control de armónicos. 54

1.4.6.1 *Soluciones dirigidas a los equipos que son fuentes de distorsión armónica.* 54

1.4.6.2 *Soluciones que proponen la modificación de la red de distribución.* 54

1.4.6.3 *Soluciones que proponen la incorporación de equipos mitigadores de los componentes armónicos.* 56

2 CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS LFC`S. 58

2.1 CLASES Y TIPOS DE LFC`S EXISTENTES EN EL MERCADO NACIONAL. 58
2.1.1 Criterios para la selección de la muestra de lámparas a estudiarse. 59

2.2 PRUEBAS REALIZADAS. 62
2.2.1 Descripción de las pruebas realizadas. 62
2.2.1.1 *Valores y formas de Onda de corriente y voltaje.* 62
2.2.1.2 *Medición de las potencias.* 62
2.2.1.3 *Medición del factor de potencia.* 63
2.2.1.4 *Medición de la Tasa de distorsión armónica de corriente y voltaje.* 63

2.3 EQUIPO UTILIZADO.- 63
2.3.1 Circuito formado. 65
2.3.2 Primer circuito. 66
2.3.2.1 *Formas de onda.* 68
2.3.2.2 *Valores de potencia medidos.* 68
2.3.3 Segundo circuito. 70
2.3.3.1 *Formas de onda* 71
2.3.3.2 *Valores de potencias medidas.* 72
2.3.4 Tercer circuito. 73
2.3.4.1 *Formas de onda.* 74
2.3.4.2 *Valores de potencia medidas.* 74
2.3.5 Cuarto circuito. 75
2.3.5.1 *Formas de onda.* 76
2.3.5.2 *Valores de potencia medidos.* 77
2.3.6 Circuito 5 formado con 6 focos ahorradores. 78
2.3.6.1 *Formas de onda.* 79
2.3.6.2 *Valores de potencia obtenidos.* 80
2.3.6.3 *Tasa de distorsión del neutro.* 80
2.3.7 Variación de las potencia totales y corriente del neutro medida en los diferentes circuitos de estudio. 82

2.4 CONSUMO ELÉCTRICO DE LAS LÁMPARAS EN EL MOMENTO DEL ENCENDIDO. 83
2.4.1 Arranque de lámpara de incandescencia. 83
2.4.2 Arranque de lámpara de bajo consumo de 20 w. 84
2.4.3 Conclusión. 85
2.4.4 Aclaración 85

2.5 ESTUDIO DE DE LA CALIDAD DE LA LUZ DE LAS LFCS. 86
2.5.1 Proceso de medición de el nivel de iluminación (e). 88
2.5.1.1 *Datos Obtenidos.* 88
2.5.1.2 *Cálculo del Flujo Luminoso.* 89
2.5.1.3 *Calculo de la Eficiencia Luminosa.* 91

2.6 DISMINUCIÓN DE LA VIDA UTIL DE LA LAMPARA DEBIDO AL ENCENDIDO Y APAGADO. 93

3 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS LFC`S. 95

3.1 INTRODUCCIÓN. 95

3.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA. 95

3.2.1 Fundamentos de matemática financiera. 96

3.2.1.1 *Tasa de descuento.* 97

3.2.1.2 *Vida útil del equipamiento y período de análisis.* 98

3.2.1.3 *Flujo de caja.* 98

3.2.1.4 *Valor actual.* 99

3.2.2 Indicadores comparativos. 101

3.2.2.1 *Costo anualizado total (CAT).* 102

3.2.3 Ejemplos de análisis de la rentabilidad de la iluminación eficiente en el sector residencial. 105

3.2.3.1 *Cálculo de la vida útil de las lámparas y el factor de recuperación del capital (FRC).* 107

3.2.3.2 *Análisis mediante el Costo Anualizado Total (CAT).* 107

3.2.3.3 *Parámetros que influyen la rentabilidad.* 108

3.2.3.4 *Vida útil de las LFC.* 114

3.2.4 Sector comercial y público. 115

3.2.5 Análisis económico de la iluminación eficiente para los clientes residenciales. 117

3.2.6 Cálculo del ahorro de potencia demandada. 117

3.2.7 Cálculo del ahorro de energía demandada. 120

3.3 EVALUACIÓN AMBIENTAL. 122

3.3.1 El mercurio en el ambiente. 123

3.3.1.1 *Efectos del mercurio en los animales.* 124

3.3.1.2 *Exposición y efectos sobre la salud humana.* 124

3.3.2 El mercurio en las lamparas fluorescentes compactas. 125

3.3.3 Impacto ambiental debido al mercurio de las lámparas fluorescentes compactas. 126

3.3.3.1 *Producción de materias primas.* 126

3.3.3.2 *Fabricación de las lámparas.* 127

3.3.3.3 *Uso de las lámparas.* 128

3.3.3.4 *Disposición al final de la vida útil.* 129

3.3.4 Impacto ambiental de las lámparas fluorescentes compactas en la reducción de la contaminación por generación eléctrica. 133

3.3.4.1 *Las LFC's y la salud humana.* 135

3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS LFC`S EN COMPARACIÓN CON LAS LÁMPARAS INCANDESCENTES. 136

3.4.1 Impactos ambientales positivos. 136

3.4.2 Impactos ambientales negativos 137

4 ANÁLISIS DEL PLAN GUBERNAMENTAL. 139

4.1 INTRODUCCIÓN. 139

4.2 DESCRIPCIÓN DEL PLAN DE GOBIERNO NACIONAL. 140

4.2.1 Justificación para el proyecto. 140

4.2.2 Objetivos planteados en el proyecto. 141

4.2.3 Beneficiarios del proyecto 142

4.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS FOCOS AHORRADORES. 143

4.4 CRONOGRAMA DE SUSTITUCIÓN. 144

4.5 IMPACTO AMBIENTAL OBTENIDO POR LA SUSTITUCIÓN. 147

4.6 COSTO ECONÓMICO Y DATOS DE DEMANDA. 148

4.7 ANÁLISIS DE LOS DATOS PRESENTADOS. 149

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 152

5.1 CONCLUSIONES. 152

RECOMENDACIONES. 156

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 159

7 ANEXOS. 161

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1-1.Equivalencias entre lámparas incandescentes y LFC recomendadas por los fabricantes. 25
Tabla 1-2. Apariencia del color según su temperatura. 28
Tabla 1-3. IRC para algunas fuentes luminosas. 29
Tabla 1-4. Secuencia de armónicos en sistemas trifásicos balanceados. 34
Tabla 1-5.Límites de distorsión armónica pra tensión. IEEE 519-1992 44
Tabla 1-6. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de distribución en general (120 V a 69 kV). IEEE 519-1992. 44
Tabla 1-7. Límites de emisión de corriente armónica pr equipos con corriente < A conectados a 230/400 V según IEC 61000 3-2. 46
Tabla 1-8. Límites establecidos para la variación en el nivel del voltaje (Reg. Conelec. 004/01)... 48
Tabla 1-9. Porcentaje de Tolerancias conn respecto al control de armónicos. 52
Tabla 1-10.. Ejemplo de armónicos en equipos electrónicos 54

CAPÍTULO 2

Tabla 2-1.Características Eléctricas de las Lámparas Fluorescentes. (Publicadas por los fabricantes). 61
Tabla 2-2.Valores de Potencias Medidos . 68
Tabla 2-3. Valores de distorsión de onda. 69
Tabla 2-4.Tabla de valores de potencia medidos en el segundo circuito. 72
Tabla 2-5.Tabla de valores de potencia medidos. Tercer circuito. 74
Tabla 2-6.Tabla de valores de potencia medidos Cuarto circuito. 77
Tabla 2-7. Características Eléctricas medidas en las luminarias de prueba. 81
Tabla 2-8.Lámparas fluorescentes compactas con balasto integrado (Sin envolvente) 87
Tabla 2-9.Lámparas fluorescentes compactas con balasto integrado (Con envolvente) 87
Tabla 2-10.Medición del nivel de iluminación de las LFC`S 88
Tabla 2-11. Cálculo del flujo luminoso. 90
Tabla 2-12. Porcentaje de reducción del flujo luminoso. 91
Tabla 2-13. Comparación de las eficiencias luminosas declarada y publicada. 92

CAPÍTULO 3

Tabla 3-1.Cálculo de los precios de las LFC equiparando el costo de la incandescente. 111
Tabla 3-2.Período de recuperación de rediseño de iluminación. 116
Tabla 3-3.Rentabilidad del rediseño de iluminación. 116
Tabla 3-4. Distribución de iluminación en la vivienda. 118
Tabla 3-5. Cuadro de cargas y demanda de una vivienda 118
Tabla 3-6. Cuadro de cargas con LFC`S 119
Tabla 3-7. Consumo de energía para una vivienda común y costo económico. 120
Tabla 3-8. Cálculo del consumo de energía cuando se ha realizado la sustitución de las LFC`s. . 120
Tabla 3-9. Calculo estimado de ahorro de energía y ahorro económico. 121

Tabla 3-10.Cálculo estimado de ahorro de energía y ahorro económico estimación del número de clientes..... 121

CAPÍTULO 4

Tabla 4-1.Características eléctricas de los focos ahorradores utilizados en el plan de sustitución masiva 143
Tabla 4-2.Tabla para el proceso de recambio en focos de otras marcas comerciales. 146
Tabla 4-3.Datos de ahorros provocados por la sustitución 5 millones de focos en guayaquil. Comisión de Focos Ahorradores - MEER..... 148
Tabla 4-5.Reducción del crecimiento de demanda. Fuente Cenace, 2008. 149

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1-1.Elementos Constitutivos de la lámpara incandescente. 19
Figura 1-2. Tipos de Lámparas Fluorescentes compactas. 21
Figura 1-3. Circuito interno del balastro electrónico de una LFC. 23
Figura 1-4. Elementos Constitutivos de las Lámparas Fluorescentes Compactas. 24
Figura 1-5. Diagrama cromático en forma de triángulo. 27
Figura 1-6. Curva de Kruithof. 30
Figura 1-7. Objetivos y Atributos del servicio eléctrico. 32
Figura 1-8. Onda distorsionada. 33
Figura 1-9. Flujo Normal de Corrientes Armónicas. 33
Figura 1-10. Condiciones de resonancia. 39
Figura 1-11.Procedimiento general para realizar estudios de contaminación armónica. 45
Figura 1-12.Curva de derrateo de transformadores según el factor k de la carga. 55

CAPÍTULO 2

Figura 2-1.Montaje de los equipos para realizar las pruebas. 65
Figura 2-2.Dibujo esquemático de la conexión del equipo. 66
Figura 2-3.Primer circuito formado únicamente por lámparas incandescentes. 67
Figura 2-4. Valores medidos en las fases, para un circuito formado por lámparas incandescentes. 67
Figura 2-5. Formas de Onda de voltaje y corriente en las tres fases (Circuito formado por tres lámparas incandescentes). 68
Figura 2-6.Tasa de distorsión armónica del primer circuito. 69
Figura 2-7. Tasa de distorsión armónica en el neutro. (Primer circuito). 70
Figura 2-8.Circuito formado con 2 lámparas incandescentes y una lámpara fluorescente compacta. 71
Figura 2-9.Valores medidos en las 3 fases de un circuito formado por 2 lámparas incandescentes y una fluorescente compacta. 71
Figura 2-10.Formas de onda de voltaje y corriente trifásica de un circuito formado por dos lámparas incandescentes y una lámpara fluorescente. 72
Figura 2-11.Tasa de distorsión armónica del conductor neutro. 72
Figura 2-12.Circuito formado con 1 lámparas incandescentes y 2 lámparas fluorescentes compacta. 73
Figura 2-13.Valores medidos en las fases. Tercer circuito. 73
Figura 2-14.Formas de onda de voltaje y corriente trifásica de un circuito formado por dos lámparas fluorescentes y una lámpara incandescente. 74
Figura 2-15.Tasa de distorsión armónica del conductor neutro. Tercer circuito. 75
Figura 2-16.Circuito formado con 3 lámparas fluorescentes compactas. 76
Figura 2-17.Valores medidos en las fases; cuarto circuito. 76
Figura 2-18.Formas de onda de voltaje y corriente trifásica de un circuito formado por tres lámparas fluorescentes compactas. 77
Figura 2-19.Forma de Onda y Tasa de distorsión armónica del conductor neutro. 77
Figura 2-20.Circuito formado con 6 lámparas fluorescentes compacta. 78
Figura 2-21.Valores medidos en las fases 79
Figura 2-22. Formas de onda de I y V en un circuito compuesto por 6 luminarias. 79

Figura 2-23. Tasa de distorión armónica en el conductor neutro, para un circuito formado por 6 luminarias LFC`s. 80
Figura 2-24.Ejemplos de lámparas envoltura simple 86
Figura 2-25.Ejemplos de lámparas doble envoltura: 86
Figura 2-26. Circuito de prueba. 93

CAPÍTULO 3

Figura 3-1.El precio máximo que el usuario puede pagar para una LFC de 20W que reemplaza una incandescente de 60 W, con una hora de encendido diario, como función de la vida útil de la LFC. Tarifa: 0,08 $/kWh. 111
Figura 3-2. Costo anualizado total para la compra y operación de LFC, según horas de encendido diario. Los precios corresponden a la gráfica anterior. 112
Figura 3-3. El precio máximo que el usuario puede pagar para una LFC de 20W que reemplaza una incandescente de 75W, con 0,5 hora de encendido diario, como función de la vida útil de la LFC. (Tarifa: $0,1 2/kWh) 113
Figura 3-4. Reducción del contenido de mercurio en lámparas fluorescentes en EEUU. (Fuente: Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas) 128
Figura 3-5.Evolución de la eficiencia de la lámpara. (Fuente: Brugnoni & Ibarne) 129

CAPÍTULO 4

Figura 4-1.Usos de la energía en el sector residencial. Fuente MEER. 141
Figura 4-2.Graficas de los valores de distorsión armónica en los focos del plan de sustitución. fuente:meer. 144
Figura 4-3.Procedimiento para la sustitución de LFC’s. Fuente MEER 2008. 146

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

A	Amperios.
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CONELEC	Consejo Nacional de Electrificación.
FEDT	Frecuencia Equivalente de Desviación de Tensión
h	Orden de la componente armónica
Icc	Corriente de Cortocircuito
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
kA	Kilo Amperios
kV	Kilo Voltios
kVA	Kilo Voltio Amperios
kW	Kilo Vatios
kWh	Kilo Vatios Hora
LFC`s	Lámparas Fluorescentes Compactas
Lm	Lúmenes
MT / BT	Media Tensión / Baja Tensión
MW	Mega Vatios
PCC	Punto de Acople Común
TDD	Distorsión Total de Demanda
THDi	Distorsión armónica total de la onda de corriente
THDv	Distorsión armónica total la onda de tensión

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo realizar un estudio técnico de las características eléctricas de las lámparas fluorescentes compactas (LFC`s), su comportamiento individual y su influencia en las redes eléctricas; además de determinar si es conveniente realizar una inversión económica para realizar una sustitución por las lámparas incandescentes en un plan de sustitución masiva.

En el primer capítulo se presenta una descripción detallada de los conceptos teóricos relacionados con la estructura, el funcionamiento y la normativa relacionada con las lámparas fluorescentes compactas y las incandescentes. Asimismo se repasa los conceptos sobre calidad de la energía (Indicadores de calidad, Armónicos y las técnicas de control de armónicos).

En el segundo capítulo se realiza el estudio técnico de las lámparas fluorescentes compactas mediante la realización de pruebas orientadas a determinar dos puntos importantes:

1. Sus características eléctricas (Formas de onda, Valores de voltaje, corriente, potencia, factor de potencia, distorsión armónica) para verificar; por un lado, si cumplen la normativa establecida y por otro, el efecto que producen en la calidad de la energía. y

2. Su calidad de luz, mediante mediciones y cálculos que llevan como guía las normas que establecen el grado de confort para el usuario.

En el tercer capítulo se incluyen: el análisis económico iniciando con una revisión de los conceptos básicos de matemática financiera para después establecer el estudio utilizando el Costo Anualizado Total (CAT) basado en los precios referenciales actuales. Y, el estudio de impacto ambiental donde se exponen los factores positivos y negativos ligados a las LFC’s desde su fabricación hasta su disposición al final de la vida útil.

En el cuarto capítulo se hace un análisis del actual proyecto de sustitución masiva que lleva a cabo el gobierno a través del Ministerio de Electricidad y Energía

Renovable. Luego se enuncia recomendaciones que se considera harían falta para llevarlo cabo de la mejor manera.

El capítulo cinco denominado conclusiones y recomendaciones, da un diagnóstico de las condiciones actuales de las LFC`s fundamentándose en las ventajas y desventajas, su beneficio económico y recomendaciones orientadas a mejorar dicha situación.

PRESENTACIÓN

Con el crecimiento actual de la población, junto al desarrollo económico y tecnológico que han impulsado el crecimiento de la industria y el comercio a nivel global, el consumo de energía eléctrica ha crecido sostenidamente. Este panorama lleva consigo dos problemas, la elevación de los precios de los recursos no renovables (derivados del petróleo) para generación eléctrica, y por otro lado el actual deterioro ambiental, entre ellos se destaca el calentamiento global y el deterioro de las fuentes de agua.

Varios gobiernos se han encaminado a la búsqueda de soluciones responsables, prioritariamente las de efecto inmediato como por ejemplo medidas de eficiencia energética entre las cuales se halla la sustitución masiva de lámparas incandescentes por las lámparas fluorescentes compactas.

El presente trabajo tiene por objeto realizar un estudio técnico y económico para determinar las ventajas y desventajas de las LFC`s y evaluar la conveniencia de invertir recursos en un plan de sustitución masiva de estas lámparas. Junto a ello se realiza un análisis de impacto ambiental identificando los principales problemas que puedan darse con este tipo de lámparas denominadas de “tecnología eficiente”.

1 CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN TEÓRICA

1.1 INTRODUCCIÓN.

El presente capítulo muestra una descripción teórica de los conceptos fundamentales, que se tratan en la presente tesis. Se compone de 3 partes: en la primera y la segunda, se introducen los conceptos referentes a los elementos constitutivos y funcionamiento de las lámparas incandescentes y fluorescentes compactas.

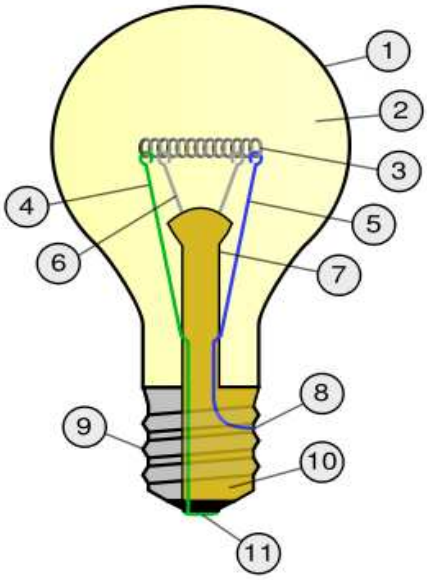
Por último en la tercera parte se menciona la normativa existente tanto nacional como internacional que rige sobre el control de la calidad técnica de la energía.

1.2 LÁMPARAS INCANDESCENTES.

Conocidas típicamente como bombillas, son las lámparas que predominan el mercado de la iluminación a nivel residencial; representan el primer dispositivo eléctrico de iluminación artificial que permitió la comercialización de la energía eléctrica. Este dispositivo fue desarrollado simultáneamente por el británico Sir Joseph Swan y por el inventor norteamericano Thomas Alva Edison, aunque la patente de invención se le otorgó a este último en el año 1878.

1.2.1 ELEMENTOS DE UNA LÁMPARA INCANDESCENTE.

Estas lámparas poseen una estructura bastante sencilla, consta de un casquillo metálico con rosca (en algunos casos liso, tipo bayoneta) y un borne en su extremo, aislado del casquillo. Tanto el casquillo como el borne permiten la conexión a los polos negativo y positivo de una fuente de corriente eléctrica. Lo más común es conectar la parte del casquillo al polo negativo y el borne al polo positivo de la fuente. Figura -1.1.



1.	Envoltura- ampolla de vidrio – bulbo.
2.	Gas Inerte.
3.	Filamento de wolframio.
4.	Hilo de contacto (va al pie).
5.	Hilo de contacto (va a la base).
6.	Alambre(s) de sujeción y disipación de calor del filamento
7.	Conducto de refrigeración y soporte interno del filamento.
8.	Base de contacto.
9.	Casquillo metálico.
10.	Aislamiento eléctrico.
11.	Pie de contacto eléctrico

Figura 1-1.Elementos Constitutivos de la lámpara incandescente.

Al casquillo metálico con rosca y al borne situado en su extremo se encuentran soldados dos alambres de cobre que se insertan después por el interior de un tubo hueco de cristal ubicado internamente en la parte central de una ampolla del mismo material y de la cual forma parte.

Cerca del extremo cerrado de ese tubo hueco los dos alambres lo atraviesan y a sus puntas se sueldan los extremos del filamento de tungsteno, conocido también como wolframio (W). La bombilla de cristal se sella al vacío y en su interior se inyecta un gas inerte como, por ejemplo, argón (Ar), que ayuda a prolongar la vida del filamento.

1.2.2 FUNCIONAMIENTO DE UNA LÁMPARA INCANDESCENTE.

Al accionar el interruptor de una lámpara incandescente las cargas eléctricas comienzan a fluir a través del filamento de tungsteno, este filamento al ser extremadamente delgado ofrece gran resistencia al paso de las cargas eléctricas, de esta manera se incrementa la fricción entre las cargas que encuentran mayor

obstáculo para moverse y al chocar unas contra otras provocan que aumente la temperatura considerablemente. Cuando las cargas eléctricas atraviesan atropelladamente el metal del filamento de una lámpara incandescente, provocan que la temperatura del alambre se eleve a 2.500 ºC aproximadamente. A esa temperatura tan alta los electrones que fluyen por el metal de tungsteno comienzan a emitir fotones de luz blanca visible, produciéndose el fenómeno físico de la incandescencia.

Este tipo de lámpara es poco eficiente, pues junto con las radiaciones de luz visible emiten también radiaciones infrarrojas en forma de calor, que incrementan el consumo eléctrico. Sólo el 15% de la energía eléctrica consumida por una lámpara incandescente se convierte en luz visible, ya que el 85% restante se disipa al medio ambiente en forma de calor.

1.2.3 EVOLUCIÓN DE LAS LÁMPARAS INCANDESCENTES.

El científico francés Georges Claude inventó la bombilla de neón, gas que había sido descubierto en 1898 por los químicos británicos William Ramsay y Morris M. Travers, al introducir dentro de un tubo de vidrio dicho elemento y someterlo a una baja presión. El neón se hacía luminoso al aplicar alguna fuente energética en el interior del recipiente.

Ahora, han pasado más de 130 años desde que se inventó la bombilla eléctrica y su principio básico apenas ha cambiado desde su invención. Lo que sí ha variado son las formas de las bombillas. Por ello, las posibilidades de iluminación son innumerables; por ejemplo, si una persona quiere un ambiente cálido, frío o limpio tiene que saber qué tipo de lámparas (focos) poner y para ello tiene que tener cierto conocimiento sobre las familias en las que se dividen. Esencialmente las bombillas se dividen en cuatro grupos generales: Incandescentes, halógenas, fluorescentes, leds y de descarga.

1.3 LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS (LFC).

Conocidas como CFL, por su nombre en inglés (Compact Fluorescent Lamps – Lámpara Fluorescente Compacta (LFC)), son una variación de las lámparas de tubos fluorescentes que fueron presentadas por primera vez en el año 1939 y que siguen siendo utilizados en la actualidad.

Dichos tubos fluorescentes poseen un rendimiento 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. El inconveniente que presentan estas lámparas de tubos fluorescentes es su tamaño y peso lo cual les resta manejabilidad.

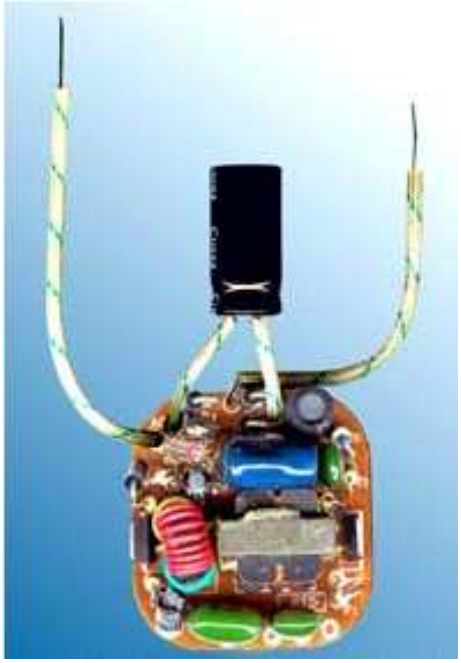
En el año 1976 el ingeniero Edward Hammer de la empresa norteamericana General Electric, creó una lámpara fluorescente compuesta por un tubo de vidrio alargado y de reducido diámetro, que dobló en forma de espiral para reducir sus dimensiones. Así construyó una lámpara fluorescente del tamaño aproximado de una bombilla común, cuyas propiedades de iluminación eran muy similares a la de una lámpara incandescente, pero con un consumo mucho menor y prácticamente sin disipación de calor al medio ambiente. En aquel momento la tecnología no permitía la fabricación en serie de una espiral con un vidrio tan frágil como el requerido por estas lámparas en aquel momento. 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.

Figura 1-2. Tipos de Lámparas Fluorescentes compactas.

1.3.1 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA.

Las lámparas LFC, llamadas también ahorradoras constan de las siguientes partes:

Tubo Fluorescente. Tubo de unos seis mm de diámetro aproximadamente, se encuentra doblado en forma de espiral o de “U” invertida cuya longitud depende de la potencia en vatios que posea la lámpara. En todas las lámparas CFL existen siempre dos filamentos de tungsteno o wolframio (W) alojados en los extremos libres del tubo con el propósito de calentar los gases inertes que se encuentran dentro del tubo, estos gases son principalmente neón (Ne), criptón (Kr) o argón (Ar). Junto con los gases inertes también se encuentra vapor de mercurio (Hg) encargado de producir el efecto de fluorescencia. Las paredes internas del tubo se encuentran recubiertas de una fina capa de fósforo (P).



Balasto Electrónico. Para tener un encendido rápido estas lámparas requieren un balasto electrónico en miniatura, el cual se encuentra encerrado en la base de la lámpara entre el tubo y la rosca de metal, este balasto se encarga de suministrar la tensión necesaria para encender el tubo de la lámpara y de regular posteriormente la intensidad de corriente que circula por el tubo luego de encendido. El balasto se compone de un circuito oscilador, compuesto fundamentalmente por un circuito transistorizado en función de amplificador de corriente. Seguidamente, un enrollado o transformador (reactancia inductiva), un capacitor (reactancia capacitiva) y un circuito rectificador diodo de onda completa encargado de elevar la frecuencia de la corriente de trabajo de la lámpara entre 20 mil y 60 mil Hz(Fig .1-3). 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.

Para el alumbrado general el efecto estroboscópico es prácticamente imperceptible, pero en una industria donde existe maquinaria funcionando, impulsadas por motores eléctricos, 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 lámparas 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.

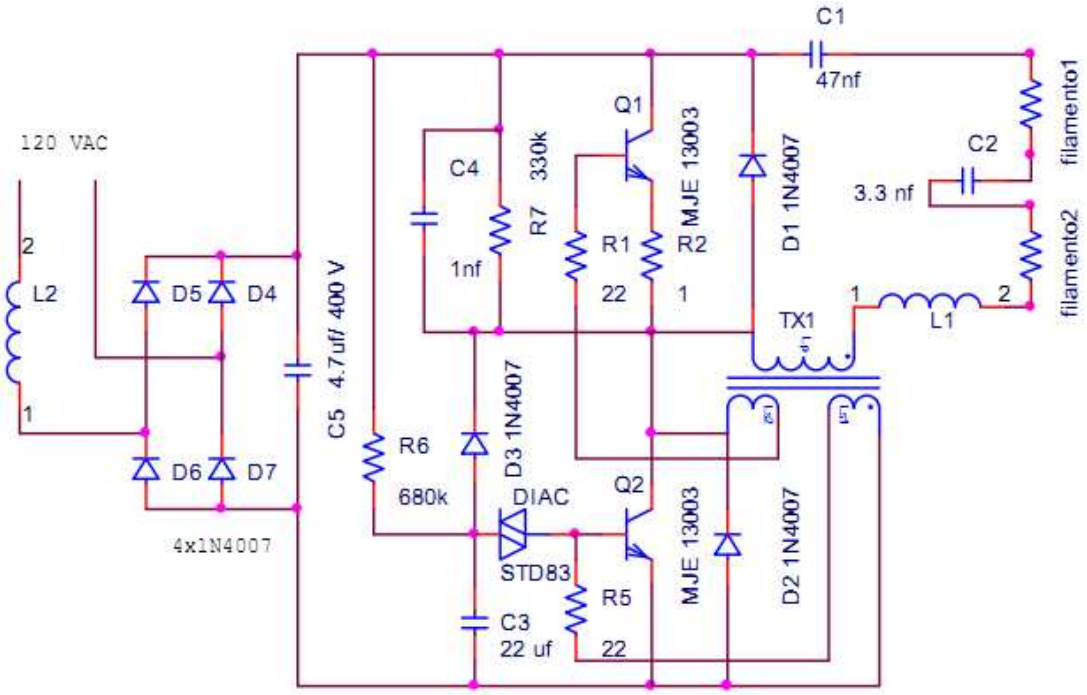


Figura 1-3. Circuito interno del balastro electrónico de una LFC.

Base. Se compone de un receptáculo de plástico en cuyo interior se aloja el balasto electrónico, éste se encuentra unido a un casquillo con rosca normal E-27 (mejor conocido como rosca Edison), ésta es la misma rosca que utilizan la mayoría de las lámparas incandescentes.

1.3.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS.

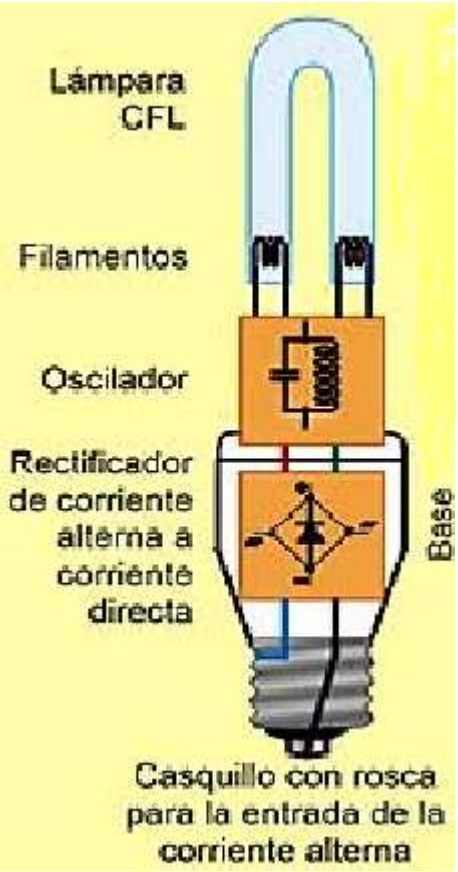


Figura 1-4. Elementos Constitutivos de las Lámparas Fluorescentes Compactas.

Al accionar el interruptor la corriente alterna fluye hacia el balasto electrónico donde un rectificador diodo de onda completa se encarga de convertirla en corriente directa y mejorar, a su vez, el factor de potencia de la lámpara.

Desde el mismo momento en que los filamentos de una lámpara 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 balasto 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 para que el mismo mantenga 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 del 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.

1.3.3 EQUIVALENCIA ENTRE LÁMPARAS INCANDESCENTES Y LÁMPARAS AHORRADORAS SEGÚN SU POTENCIA Y FLUJO LUMINOSO.

Al momento de realizar un proyecto de iluminación o de realizar mejoras en un sistema de iluminación es importante tener en cuenta que lo que va a instalarse posea mayor calidad, en cuanto a iluminación, que lo que se tiene en la actualidad, además que debe representar una buena inversión en términos de horas de vida útil, inversión inicial, consumo de energía, etc.

La tabla 1-1 muestra las equivalencias aproximadas de potencia de consumo en watt entre las lámparas fluorescentes LFC de uso más generalizado y las incandescentes comunes.

Tabla 1-1.Equivalencias entre lámparas incandescentes y LFC recomendadas por los fabricantes[1].

Lámpara Incandescente			LFC Equivalente			Diferencias	
Potencia (W)	Flujo Luminoso (Lm)	Eficacia (Lm/W)	Potencia (W)	Flujo Luminoso (Lm)	Eficacia (Lm/W)	Diferencia de potencia (W)	Diferencia de flujo luminoso (Lm)
25	260	10,40	5	180	36	-20	-80
40	490	12,25	8	360	45	-32	-130
60	820	13,67	11	600	54,55	-49	-220
75	1070	14,27	14	810	57,86	-61	-260
80	1120	14	15	870	58	-65	-250
100	1560	15,60	18	1100	61,11	-82	-460
150	2200	14,67	20	1400	70	-130	-800
250	3400	13,60	28	1680	60	-222	-1720

[1] Ref. Osram. Guía de reemplazo de luminarias incandescentes por lámparas ahorradoras

1.3.4 EL COLOR Y LA LUZ EN UNA LFC.

La tonalidad de la luz que emiten las lámparas está determinada por su temperatura de color correlacionada. Se distinguen tres grados de apariencia según la tonalidad de la luz:

- Cálida para las que tienen un tono blanco rojizo.
- Neutro para las que dan luz blanca.
- Fría para las que tienen un tono blanco azulado

El sentido de la vista no analiza individualmente cada radiación o sensación cromática. A cada radiación le corresponde una denominación de color, según la clasificación del espectro de frecuencias. Cabe indicar que se distingue los objetos por el color asignado según sus propiedades ópticas, pero en ellos ni se produce ni tienen color. Lo que sí tienen son propiedades ópticas de reflejar, refractar y absorber los colores de la luz que reciben, es decir: el conjunto de sensaciones monocromáticas aditivas que nuestro cerebro interpreta como color de un objeto depende de la composición espectral de la luz con que se ilumina y de las propiedades ópticas que posea el objeto para reflejarla, refractarla o absorberla.

1.3.4.1 Clasificación de los colores según el diagrama cromático.

La evaluación subjetiva de las superficies de los objetos, tal y como son percibidas por el ojo, se interpretan en función de los atributos o cualidades del color. Éstas son:

i. *Claridad o esplendor:* Radiación luminosa que recibimos según la iluminancia que posea el objeto. Un objeto es más claro cuanto más se aleja su color del negro en la escala de grises. Hace referencia a la intensidad.

ii. *Tono o matiz*: Nombre común del color (rojo, amarillo, verde, etc.). Hace referencia a la longitud de onda.

iii. c) *Pureza o saturación*: La proporción en que un color está mezclado con el blanco. Hace referencia a la pureza espectral.

Todos los colores están ordenados según tres coordenadas cromáticas, x, y, z, cuya suma es siempre la unidad (x + y + z = 1) y cuando cada una de ellas vale 0.33 corresponde al color blanco. Estas tres coordenadas se obtienen a partir de las potencias específicas para cada longitud de onda. Se fundamenta en el hecho de que al mezclar tres radiaciones procedentes de tres fuentes de distinta composición espectral se puede obtener una radiación equivalente a otra de distinto valor. El resultado es el triángulo mostrado en la figura 1-5, en el que con dos coordenadas cualesquiera es suficiente para determinar el color de la radiación resultante formada por la mezcla aditiva de tres componentes.

Para evitar la evaluación subjetiva del color existe el diagrama cromático en forma de triángulo, aprobado por la C.I.E., que se emplea para tratar cuantitativamente las fuentes de luz, las superficies coloreadas, las pinturas, los filtros luminosos, etc. En este diagrama se ha dibujado la curva que representa el color que emite el cuerpo negro en función de su temperatura. Se llama curva de temperatura de color del cuerpo negro, Tc.

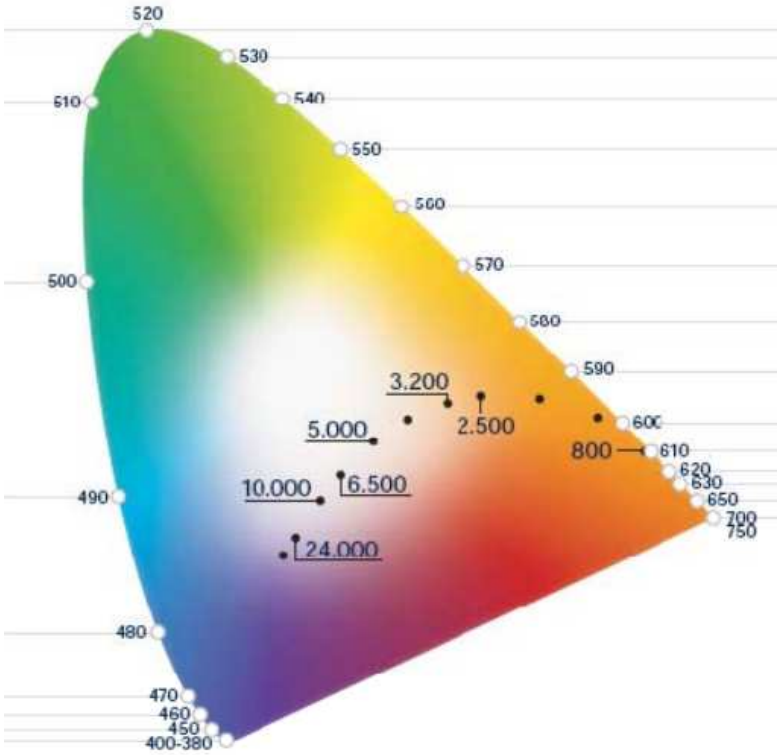


Figura 1-5. Diagrama cromático en forma de triángulo[2].

[2] Ref. Apuntes de iluminación y luminotecnia. www.elprisma.com Juan Álamos. 2010.

1.3.4.2 La temperatura de color

Es una expresión que se utiliza para indicar el color de una fuente de luz por comparación de ésta con el color del cuerpo negro, o sea del “radiante perfecto teórico” (objeto cuya emisión de luz es debida únicamente a su temperatura). Como cualquier otro cuerpo incandescente, el cuerpo negro cambia de color a medida que aumenta su temperatura, adquiriendo al principio, el tono de un rojo sin brillo, para luego alcanzar el rojo claro, el naranja, el amarillo y finalmente el blanco, el blanco azulado y el azul.

Por ejemplo el color de la llama de una vela, es similar al de un cuerpo negro calentado a unos 1.800 K*, y la llama se dice entonces, que tiene una “temperatura de color” de 1.800 K. Las lámparas incandescentes tienen una temperatura de color comprendida entre los 2.700 y 3.200 K, según el tipo, por lo que su punto de color determinado por las correspondientes coordenadas queda situado prácticamente sobre la curva del cuerpo negro. Esta temperatura no tiene relación alguna con la del filamento incandescente.
Por lo tanto la temperatura de color no es en realidad una medida de temperatura. Define sólo color y sólo puede ser aplicada a fluentes de luz que tengan una gran semejanza de color con el cuerpo negro.

La equivalencia práctica entre apariencia de color y temperatura de color, se establece convencionalmente según la tabla 1-2.

Tabla 1-2. Apariencia del color según su temperatura[3].

Grupo De Apariencia De Color	Apariencia De Color	Temperatura De Color (K)
1	Cálida	Por Debajo De 3.300
2	Intermedio	De 3.300 A 3500
3	Frio	Por Encima De 5.300

1.3.4.3 Índice De Rendimiento De Color (I.RC).

La temperatura de color se refiere únicamente al color de la luz, pero no a su composición espectral que resulta decisiva para la reproducción de colores. Así,

[3] Ref. Apuntes de iluminación y luminotecnia. www.elprisma.com Juan Álamos. 2010.

dos fuentes de luz pueden tener un color muy parecido y poseer al mismo tiempo unas propiedades de reproducción cromática muy diferentes.

El índice de reproducción cromática (IRC), caracteriza la capacidad de reproducción cromática de los objetos iluminados con una fuente de luz. El IRC ofrece una indicación de la capacidad de la fuente de la luz para reproducir colores normalizados, en comparación con la reproducción proporcionada por una luz patrón de referencia.

Tabla 1-3. IRC para algunas fuentes luminosas[4].

Fuentes Luminosas	Tc (°K)	IRC
Cielo azul……	10.000 a 30.000	85 a 100 (grupo 1)
Cielo nublado ……	7.000	85 a 100 (grupo 1)
Luz solar día	6.000	85 a 100 (grupo 1)
Lámparas de descarga (excepto Na)…		
Luz día (halogenuros)……	6.000	96 a 100 (grupo 1)
Blanco neutral…….	3.000 a 5.000	70 a 84 (grupo 2)
Blanco cálido……	Menos de 3.00	40 a 69 (grupo 3)
Lámpara de de descarga (Na)……..	2.900	Menos de 40
Lámpara incandescente……	2.100 a 3.200	85 a 100 (grupo 1)
Lámpara fotográfica…….	3.400	85 a 100 (grupo 1)
Llama de vela o bujía ……..	1.800	40 a 69 (grupo 3)

1.3.4.4 Las curvas de Kruithof para determinar el confort visual.

La actividad laboral, para que pueda desarrollarse de una forma eficaz, precisa que la luz y la visión se complementen, ya que se considera que el 50% de la información sensorial que recibe el hombre es de tipo visual, es decir, tiene como origen primario la luz. Un tratamiento adecuado del ambiente visual permite incidir en los aspectos de seguridad, confort, productividad.

La Temperatura de Color (Tc) tiene una notable influencia sobre el ambiente creado en cuanto a sus sensaciones de frío o calor, al tiempo que potencia o atenúa la cromacidad de los objetos en ese mismo sentido. Además, el término Tc no se puede manejar de un modo independiente, sino que se debe combinar de forma adecuada con la Iluminancia para que no se produzcan efectos

[4] Ref. Apuntes de iluminación y luminotecnia. www.elprisma.com Juan Álamos. 2010.

distorsionadores de la percepción visual. Las curvas de Kruithof delimitan las posibles combinaciones entre Tc y la Iluminancia de cálculo o medición.

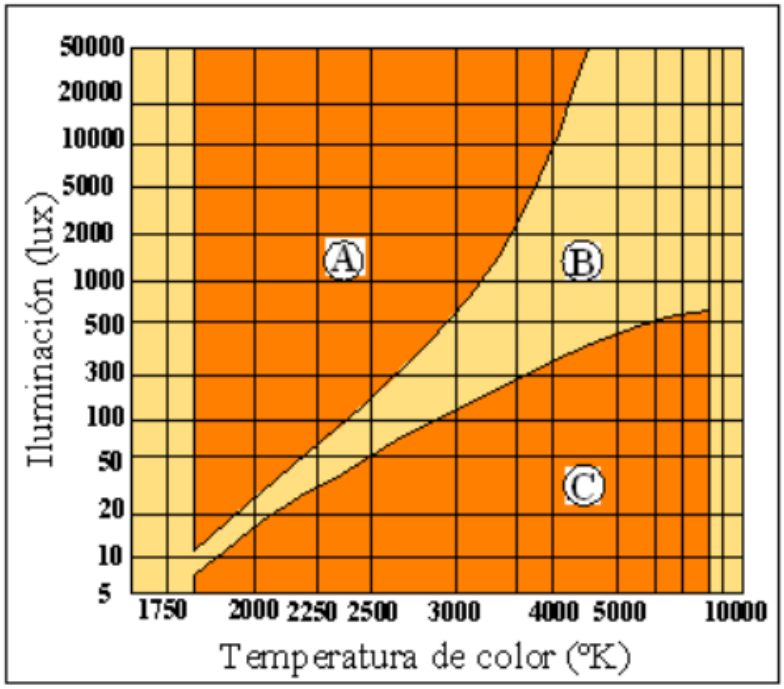


Figura 1-6. Curva de Kruithof[5].

Una fuente luminosa tendrá un buen rendimiento del color en la medida en que emite radiaciones próximas a la sensibilidad máxima del ojo a los colores, situadas en el entorno de los 450 nm para el azul, 540 nm para el verde y 611 nm para el rojo. Dado que el color de la luz influye directamente sobre nuestra percepción de los colores de los objetos, también actúa de manera importante sobre la sensación de confort visual asociada.

El color de la luz debe adaptarse al nivel de iluminación. Cuando el nivel de iluminación se eleva, la temperatura de color de la luz debe elevarse también. El diagrama de Kruithof aporta a estos efectos, los valores temperatura de color en función de la iluminación.

Solamente la zona B corresponde a la zona de confort. La persona que se encuentre en la zona A, percibirá un ambiente luminoso irreal, demasiado cálido; la temperatura de color es demasiado baja para el nivel de iluminación considerado. En la zona C, el ambiente luminoso, de tipo crepuscular, es demasiado frío; la temperatura de color de la fuente es demasiado importante en

[5] Ref. Apuntes de iluminación y luminotecnia. www.elprisma.com Juan Álamos. 2010.

relación al nivel de iluminación alcanzado. El empleo de fuentes luminosas cuya temperatura de color es muy elevada influye favorablemente sobre el ambiente luminoso de un local y sobre las condiciones de visión, ampliando así la zona de percepción agradable limitada por las curvas de Kruithof.

1.4 CONCEPTOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

En los estudios de Calidad de la Energía, se justifica la necesidad de revisar conceptos relacionados con, efectos relevantes como variaciones de voltaje que se presentan y afectan, sobre todo en el caso de variaciones rápidas, los dispositivos con microelectrónica.

Otros problemas son, por supuesto, las distorsiones de onda de voltaje y corriente (armónicas), los transitorios de sobretensiones y los de parpadeo o flicker en las instalaciones.

1.4.1 CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO.

La Calidad del Servicio Eléctrico se define como el conjunto de características técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico, exigibles por los consumidores y por los entes reguladores; está conformada por:

- **Calidad del Producto Técnico.** Referente a las características de la onda de tensión.
- **Calidad del Servicio Técnico.** Referente al número y duración de las interrupciones del suministro.
- **Calidad del Servicio Comercial.** Referente a la buena atención y relación con el cliente.

En los últimos años el término Calidad del servicio eléctrico se ha venido refiriendo cada vez más hacia el aspecto de la Calidad del Producto Técnico, esto se debe a la incorporación masiva de electrónica de potencia y de cargas no lineales al sistema.

El término **Calidad del Producto Técnico** es utilizado para referirse al estándar de calidad que debe tener el suministro eléctrico de las instalaciones, en términos de tensión constante y de forma sinusoidal, frecuencia de oscilación constante y

mínimas perturbaciones (armónicos, parpadeos, etc.). Estos atributos y objetivos se muestran en la figura 1- 7.

Figura 1-7. Objetivos y Atributos del servicio eléctrico.

El cumplimiento o no de los patrones anteriores es lo que determina que el suministro sea de calidad. Algunos de los factores que pueden degradar la calidad de la onda son:

- Perturbaciones de origen externo del sistema eléctrico.
- Perturbaciones por fallas en componentes del sistema.
- Perturbaciones por maniobras en el sistema de suministro.
- Cambios en el estado del funcionamiento del sistema.
- El funcionamiento de cargas cuya operación normal distorsiona las ondas de corriente y tensión.

1.4.2 ARMÓNICOS.

Un armónico se define como un componente sinusoidal de una onda periódica, cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Pueden presentarse armónicos tanto en el voltaje como en la corriente de un sistema eléctrico y son designados según el número armónico; para una frecuencia fundamental de 60 Hz el segundo armónico será dos veces el fundamental o lo que es igual a 120 Hz, el tercero será tres veces el fundamental, es decir, 180 Hz y así sucesivamente. La figura 1-8 muestra una onda con contaminación armónica.

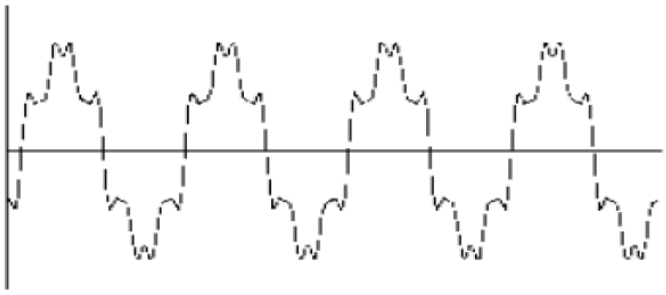


Figura 1-8. Onda distorsionada.

En general:

$$f(t) \approx Fo + \sum_{k=1}^{n} \sqrt{2} F_k cos(kwt - \emptyset_k) =$$
$$Fo + \sqrt{2}F_1 cos(wt - \emptyset_1) + \cdots + \sqrt{2}F_n cos(nwt - \emptyset_n)$$

Ecuación 1

Donde:

Fo: es la componente de corriente continua.

F1: la componente de frecuencia fundamental (valor rms).

F2, F3,…,Fn: las componentes armónicos (valores rms).

ϕ_K: Desfasaje de las componentes.

La distorsión armónica de corriente y de tensión aparece principalmente en presencia de cargas de comportamiento no lineal presentes en el sistema. Las cargas no lineales son aquellas en las cuales la corriente no es proporcional a la tensión aplicada. La figura 1-9 muestra un ejemplo de la circulación de las corrientes armónicas.

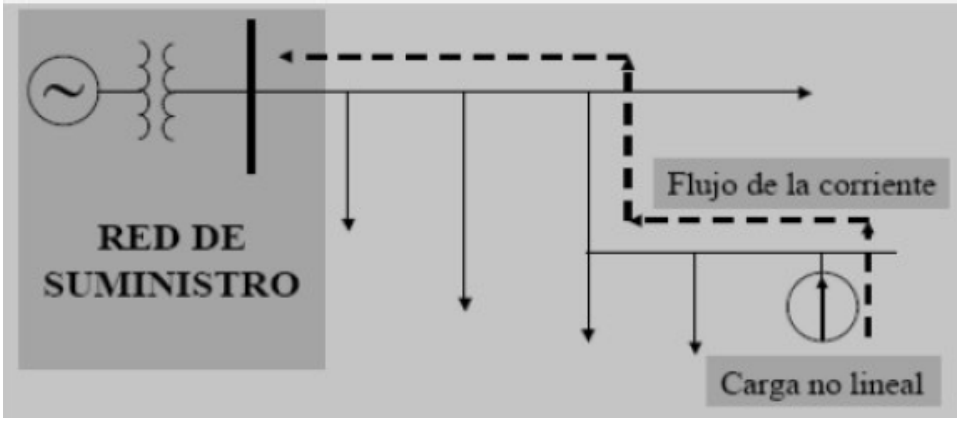


Figura 1-9. Flujo Normal de Corrientes Armónicas.

Se puede observar como el flujo normal de las corrientes armónicas, sin bancos de condensadores, va desde la carga no lineal hacía le red de suministro, ello porque estas fluyen hacia donde se encuentran las impedancias más bajas.

Si pensamos en sistemas trifásicos balanceados, cada componente armónica puede ser representada como un fasor. De esta manera cada componente tendrá una secuencia bien definida y esta corresponde a la mostrada en la tabla 1-4.

Tabla 1-4. Secuencia de armónicos en sistemas trifásicos balanceados.

Orden de la Armónica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	…

1.4.2.1 Causas de los armónicos.

La naturaleza no lineal de un dispositivo genera ondas de corriente que no siguen la onda de voltaje. Se estima que el 60% de los equipos eléctricos operan con corrientes no lineales, los equipos electrónicos son un buen ejemplo; aunque esta categoría abarca una gran variedad de equipos todos ellos poseen una característica en común, dependen de una fuente de potencia CC interna para su funcionamiento.

Los armónicos son causados por la sección de entrada diodo-capacitor, presente en estos equipos, la cual rectifica la señal CA en una señal CC, el circuito toma corriente de la línea solamente durante los picos de la onda de voltaje para cargar el condensador, el cual se encarga de alimentar al equipo, de esta manera la onda de la corriente se distorsiona.

El tópico de distorsión de corriente armónica y los convertidores estáticos son con frecuencia aplicados sólo a sistemas de potencia industriales donde los grandes convertidores de potencia son usados para accionamiento de motores, calentadores eléctricos, etc. Sin embargo, con la aplicación de la electrónica a casi todas las cargas eléctricas, desde los electrodomésticos hasta los controles de procesos industriales, una multitud de convertidores de potencia estáticos

están presentes en cada tipo de sistema de potencia (residencial, comercial e industrial), conduciendo a un interés individual acerca de la distorsión de corriente armónica.

Las principales fuentes de armónicos son las siguientes:

- Equipos de cómputo: computadores personales, mini computadores, estaciones de trabajo, disk drivers, impresoras láser, equipos de comunicaciones.
- Sistemas de potencia ininterrumpida (UPS).
- Equipos médicos.
- Accionamientos de frecuencia variable (VFDs).
- Controladores electrónicos de ascensores.
- Convertidores de frecuencia para motores síncronos y de inducción.
- Rectificadores de estado sólido.
- Hornos de arco y de inducción.
- Transformadores saturados.
- Lámparas fluorescentes (y su accionador electrónico).
- Televisores y lámparas de descarga.

En general, cualquier equipo cuya base de funcionamiento sea electrónico es sospechoso de producir armónicos.

1.4.2.2 Efectos de los armónicos[6].

Los principales efectos producidos por los armónicos se pueden resumir de la siguiente manera:

- *Sobre los Conductores.* El aumento de las I_{RMS} ocasionado por las intensidades armónicas producen disparos intempestivos de las protecciones; por otro lado el efecto pelicular reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia ocasionando calentamiento excesivo.

[6] **Ref.** Schneider Electric. Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos.

- *Sobre el Conductor de Neutro.* Cuando existen cargas trifásicas balanceadas con un neutro común y estas cargas producen armónicos impares múltiplos de tres, la corriente de estos armónicos se concentra sobre el neutro ocasionando calentamiento y sobrecargas del neutro.

- *Sobre Transformadores y Motores.* El aumento de la I_{RMS} produce calentamiento excesivo de los devanados por el efecto joule, a su vez las perdidas por Foucault y por histéresis se ven incrementadas por ser proporcionales a la frecuencia, ésto se traduce en un aumento de las pérdidas en el hierro. Adicionalmente en los motores se produce un campo adicional al principal, lo cual ocasiona pérdida del rendimiento.

- *Sobre los Condensadores.* El aumento de la frecuencia produce una disminución en la impedancia de los condensadores, esto ocasiona envejecimiento prematuro de los condensadores y amplificación de los armónicos existentes.

- *Sobre Ordenadores y en Electrónica de Potencia.* Provocan perturbaciones funcionales que generan pérdidas de datos o funcionamiento defectuoso de equipos de control que dependen de una onda sinusoidal de tensión para su buen funcionamiento, conmutación, sincronización etc.

1.4.2.2.1 Efectos de los armónicos sobre los transformadores.

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:

- *Pérdidas en el cobre:* Son las pérdidas por efecto joule, se calculan en función de la magnitud de la corriente armónica y la resistencia equivalente del transformador

$$\mathbf{Pjoule = Ih^2 * R} \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

Donde:
Ih: Componente armónica total de corriente.
R: Resistencia equivalente del transformador.

- *Pérdidas por flujos dispersos:* Son las pérdidas debidas a la circulación de corrientes parásitas por la dispersión del flujo electromagnético en los devanados, núcleo, abrazaderas del núcleo, paredes del tanque, y otras partes estructurales del transformador.

$$\boldsymbol{Peddy = P_{e,R} * \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{Ih}{Ir}\right)^2 * h^2} \qquad \textbf{Ecuación 3}$$

Donde:
$P_{e,R}$: Pérdidas de eddy a corriente y frecuencia nominal.
Ih: Componente armónica de corriente.
Ir: Corriente nominal.
h: Número del armónico.
$h_{máx}$: Armónico máximo definido según el criterio o norma utilizada.
Peddy: Pérdidas por flujos dispersos.

- *Pérdidas adicionales:* Estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se incrementan ante la presencia de corrientes armónicas según la siguiente ecuación:

$$Padd = P_{addf} * \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{Ih}{Ir}\right)^2 * h^{\,2} \qquad \textbf{Ecuación 4}$$

Donde:

Padd: Pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal.

Ih: Componente armónica de corriente.

Ir: Corriente nominal.

h: Número del armónico.

$h_{máx}$: Armónico máximo definido según el criterio o norma utilizada.

1.4.2.2.2 Problemas de resonancia.

En todo el sistema eléctrico existe una frecuencia de resonancia a la cual el valor de reactancia de un banco de capacitores coincide con la reactancia del equivalente de Thévenin del sistema de alimentación. Si esa frecuencia coincide con la frecuencia de alguna armónica, esta producirá resonancia y se verá amplificada produciendo altos voltajes y altas corrientes a la frecuencia correspondiente, provocando daños a los bancos de capacitores.

Para obtener la frecuencia de resonancia del sistema, podemos emplear la siguiente ecuación:

$$h = \sqrt{\frac{Xc}{Xs}} \qquad \textbf{Ecuación 5}$$

Donde:

Xc: impedancia de los capacitores.

Xs: impedancia de Thévenin.

Este fenómeno se puede presentar de las siguientes formas:

- *Resonancia en Serie.* Como se muestra en la figura 1-10a, si el banco de capacitores se encuentra en serie con la reactancia del sistema y crea un camino de baja impedancia a la corriente armónica se está en presencia de una condición de resonancia serie. Esta condición puede causar altos niveles

de distorsión en la tensión entre la inductancia y el capacitor del circuito debido a la corriente armónica concentrada en el bajo camino de impedancia. Esta resonancia hace que falle el capacitor o el fusible por efecto de la sobretensión.

- *Resonancia en Paralelo.* La figura 1-10b muestra la topología del circuito en la cual puede ocurrir la resonancia paralelo. La resonancia paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva del sistema, que están en paralelo, tienen una cierta frecuencia que está presente en el sistema, esta combinación en paralelo es vista por la fuente como una impedancia muy grande. Esta frecuencia, para la cual la impedancia es muy grande, es precisamente la frecuencia de resonancia. Esta resonancia produce distorsión en la tensión y amplificación en la corriente de manera significativa. La tensión distorsionada produce el flujo de corriente distorsionada en los ramales adyacentes.

  Finalmente, estas corrientes amplificadas producen el fallo del equipo.

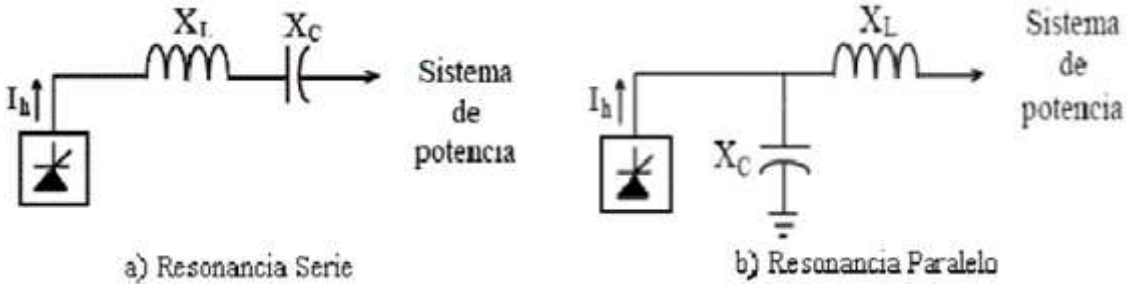


Figura 1-10. Condiciones de resonancia.

Existen muchas soluciones para el problema de resonancia, la más fácil de ellas es la instalación de un reactor en serie con el banco de capacitores, esto constituye un filtro de rechazo, el cual debe ser sintonizado de manera que la frecuencia de la armónica que entra en resonancia no sea amplificada

1.4.3 INDICADORES DE CALIDAD[7].

1.4.3.1 Índices de Distorsión Armónica.

Para cuantificar la distorsión existente en una señal es preciso definir parámetros e índices que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados. En la literatura se presentan los siguientes índices:

1.4.3.1.1 Distorsión Total Armónica de Tensión y Corriente (THD).

El THD, por sus siglas en inglés (Total Harmonic Distorsion), representa el porcentaje de importancia del total de la distorsión respecto al valor de la fundamental. Ésta puede ser calculada tanto para la corriente como para la tensión. La THD se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las magnitudes de las componentes armónicas individuales dividido entre la magnitud de la componente fundamental:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h{}^2}}{I_1} \qquad \textbf{Ecuación 6}$$

o

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h{}^2}}{V_1} \qquad \textbf{Ecuación 7}$$

Donde:

Ih o *Vh*: Componente armónica de corriente o voltaje respectivamente.

h: Número del armónico.

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

I_1 o V_1: Componente fundamental de corriente o voltaje respectivamente.

THD_I o THD_V: Tasa de distorsión total de corriente o voltaje respectivamente.

---

[7] **REF:** Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución (Regulación No. CONELEC 004/01).Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC). 2001.

1.4.3.1.2 Distorsión Total de Demanda.

TDD por sus siglas en inglés (Total Demand Distorsion), es un índice utilizado para medir la distorsión de una onda periódica de corriente con respecto a la demanda máxima. Cuando se realizan mediciones de armónicos es común encontrar valores de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define la TDD.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} Ih^2}}{I_{1max}} \qquad \textbf{Ecuación 8}$$

Donde:

Ih: Componente armónica de corriente.

h: Número del armónico.

$h_{máx}$: Armónico máximo definido según el criterio o norma utilizada.

$I_{1máx}$: Componente fundamental de la corriente de demanda máxima del período de medición.

1.4.3.1.3 Distorsión Armónica Individual.

Mide la relación entre la componente armónica "n" de una onda periódica de tensión o corriente y la componente fundamental de la misma onda.

$$IHD_I = \frac{I_h}{I_1} \qquad \textbf{Ecuación 9}$$

O

$$IHD_V = \frac{V_h}{V_1} \qquad \textbf{Ecuación 10}$$

Donde:

I_h o V_h: Componente armónica de corriente o voltaje respectivamente.

h: Número del armónico

I_1 o V_1: Componente fundamental de corriente o voltaje respectivamente.

IHD_I o IHD_V: Tasa de distorsión individual de corriente o voltaje respectivamente.

1.4.3.1.4 Factor K (Factor de derrateo)

Este factor considera los efectos de la frecuencia de las componentes armónicas, es muy importante, ya que las pérdidas por flujos dispersos y adicionales en los transformadores son proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Se utiliza para definir la carga máxima a la cual puede someterse un banco de transformación que alimente cargas no lineales y se obtiene de la siguiente forma:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} Ih^2 * h^2}{\sum_{h=1}^{hmax} Ih^2}$$ **Ecuación 11**

Donde:

Ih: Componente armónica de corriente.

h: Número del armónico.

$h_{máx}$: Armónico máximo definido según el criterio o norma utilizada.

K: Factor de derrateo.

1.4.4 NORMATIVA A ESTUDIARSE.

Ante la ausencia de una única norma o recomendación internacional acerca de la limitación de corrientes armónicas es común el cuestionarse cuál será la norma adecuada para utilizar.

Actualmente se está trabajando en lograr un convenio al respecto a nivel internacional, sin embargo 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; 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).**

1.4.4.1 IEEE-519-1992.

Según esta norma del Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas (IEEE), los límites permitidos dependen del nivel de tensión al cual está conectado el usuario, del tamaño relativo de la carga respecto al sistema y del orden de los armónicos. Esta norma fija límites con respecto a la tasa de distorsión individual (IHD) de corrientes y la tasa de distorsión total (THD) de corriente y tensión.

Las mediciones de distorsión armónica deben realizarse en el punto en que el usuario se conecta con la red pública y en el cual es factible conectar otros usuarios, este punto es llamado *punto de acople común* (PCC) y puede encontrarse en el primario del transformador principal de alimentación (lado de AT) o en el secundario del mismo (lado de BT).

Para tomar en cuenta el tamaño de la carga con respecto al sistema se debe calcular una relación denominada *relación de cortocircuito*.

$$SCR = \frac{Icc}{I_{1max}} \qquad \textbf{Ecuación 12}$$

Donde:
Icc: Corriente de cortocircuito en el PCC.
$I_{1máx}$: Corriente a frecuencia fundamental de la carga del usuario en el PCC.
Si esta relación es alta entonces la carga es relativamente pequeña y los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es más baja.

1.4.4.1.1 Límites establecidos por la IEEE 519-1992.

Las tablas 1- 5 y 1- 6 muestran los límites recomendados por la IEEE para la distorsión armónica durante operación continua. Durante procesos de arranque o situaciones de operación inusuales con duración no mayor a una hora, los límites pueden excederse en un 50%.

Tabla 1-5.Límites de distorsión armónica para tensión. IEEE 519-1992

Voltaje en el PCC	Distorsión individual de voltaje IHD_V (%)	Distorsión total de voltaje THD (%)
V < 69 Kv	3	5
69,001kV < V < 161kV	1,5	2,5
161 kV < V	1	1,5

Tabla 1-6. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de distribución en general (120 V a 69 kV). IEEE 519-1992.

Distorsión Máxima de Corriente Armónica en Porcentaje de IL						
	Orden Individual del Armónico					
I_{CC} / I_{1max}	h < 11	11 ≤ h ≤ 17	17 ≤ h ≤ 22	22 ≤ h ≤ 35	35 ≤ h	TDD
< 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

I_{CC} = Máxima corriente de cortocircuito en el PCC.

I_{1max} = Máxima corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el PCC.

A su vez esta norma establece un procedimiento general para el estudio de contaminación armónica en sistemas eléctricos de potencia el cual se muestra en la figura 1- 11.

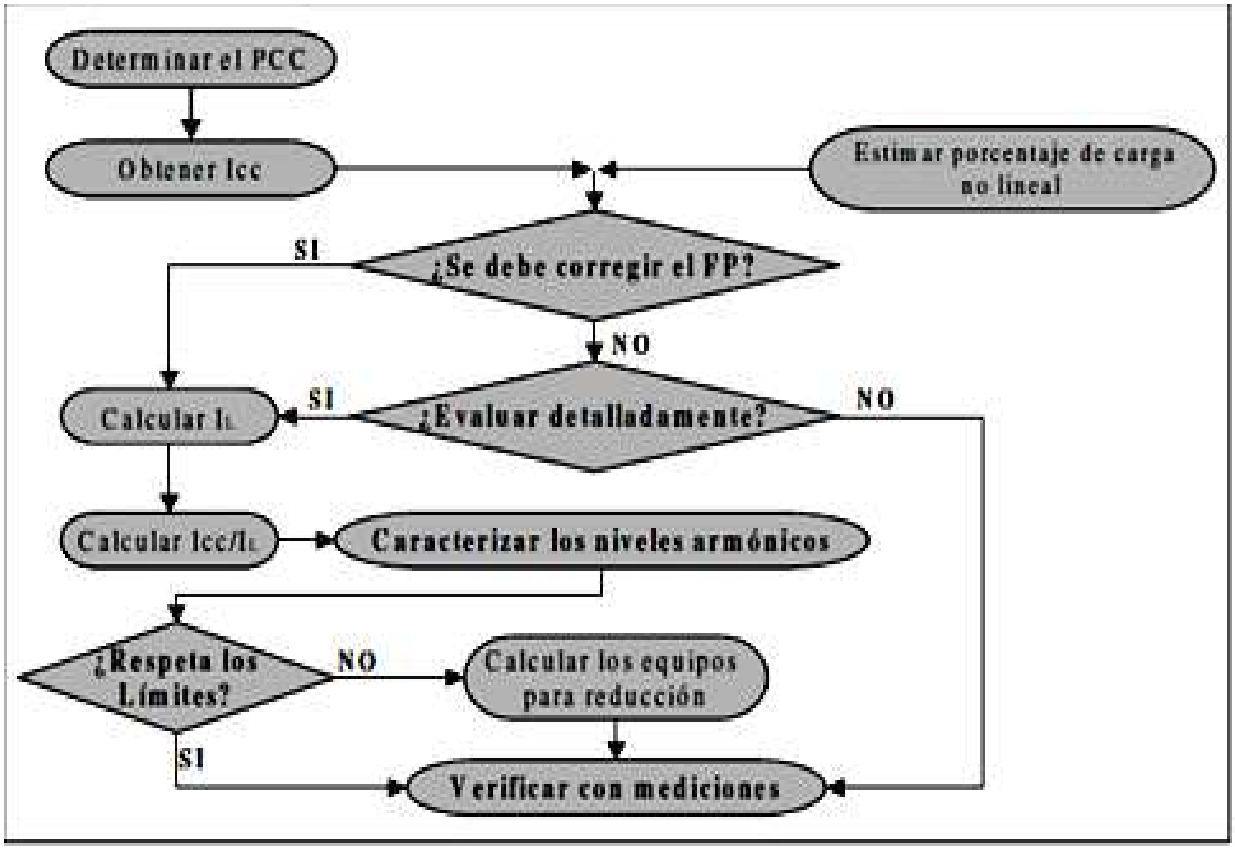


Figura 1-11.Procedimiento general para realizar estudios de contaminación armónica.

1.4.4.2 IEC 61000-3-2.

La norma IEC 61000-3-2 dictada por el IEC (Comité Internacional de Electrotecnia) establece los límites para las emisiones de corriente aplicables a equipos eléctricos y electrónicos con corriente de entrada menor o igual a 16 A por fase y diseñados para ser conectados a la red de distribución en baja tensión.

Para establecer los límites de emisiones de corrientes armónicas, esta norma clasifica los equipos eléctricos de acuerdo a las siguientes clases:

- *Clase A.* Equipos trifásicos balanceados, electrodomésticos no pertenecientes a la clase D, herramientas no portátiles, reguladores de luz de lámparas incandescentes, equipos de audio y los equipos no especificados en ninguna de las otras clases.

- *Clase B.* Herramientas portátiles y equipos de soldadura por arco que no sean equipos profesionales.

- *Clase C.* Equipos de iluminación cuya potencia activa de entrada sea superior a 25W.

- *Clase D.* Ordenadores personales, pantallas de ordenadores personales y receptores de televisión; todos estos equipos con potencias especificadas iguales o menores a 600W.

La tabla 1-7 muestra un resumen de los límites para los equipos en función de su clase. Debe tenerse en cuenta que para la Clase C, los límites se determinan en función de su potencia activa de entrada: si la misma es superior a 25 W, no deben sobrepasar los límites indicados para la Clase C; en caso contrario se deben respetar los límites por vatio de la clase D o bien deben controlarse sus componentes armónicas de tercer y quinto orden para que, expresadas como porcentaje de la corriente fundamental, no sobrepasen el 86% y el 61% respectivamente.

También es importante dejar claro que los valores de la tabla 1-5 se refieren a corriente de línea y neutro para todos los tipos de conexión del equipo. Esta norma aplica a equipos a conectarse a sistemas de voltaje de 50 a 60 Hz en 220/380V, 230/400V ó 240/415V. Si los voltajes de suministro difieren de estos valores los límites deben multiplicarse por un valor igual al voltaje de prueba (real) dividido por 230 ó 400V según corresponda.

Tabla 1-7. Límites de emisión de corriente armónica para equipos con corriente < A conectados a 230/400 V según IEC 61000 3-2.

Orden del Armónico	Clase				
	A	B	C	D	
	Corriente Armónica Admisible				
n	(A)	(A)	(%)	(mA/W)	A
Impares					
3	2,3	3,45	30*FP	3,4	2,3
5	1,14	1,71	10	1,9	1,14
7	0,77	1,155	7	1	0,77

9	0,4	0,6	5	0,5	0,4
11	0,33	0,495	3	0,35	0,33
13	0,21	0,315	3	0,296	0,21
15≤n≤39	2,25/n	3,375/n	3	3,85/n	2,25/n
Pares					
2	1,8	1,62	2	-	-
4	0,43	0,645	-	-	-
6	0,3	0,45	-	-	-
8≤n≤40	1,84/n	2,76/n	-	-	-

1.4.5 NORMATIVA ECUATORIANA

1.4.5.1 Regulación – 004/01

Emitidas por el CONELEC que es el ente regulador en el país, son un conjunto de normas que deben cumplir los agentes que desarrollen la actividad de distribución de energía eléctrica para garantizar a los usuarios un servicio eléctrico que cumpla las normas de calidad y que vaya acorde a sus requerimientos y al menor costo posible.

Según esta regulación, la calidad del servicio esta medida en función a tres aspectos:

- **Calidad del Producto:**

En el área de Calidad del Servicio Técnico considera dos aspectos, uno referente a la frecuencia de interrupciones y otro a la duración de las mismas. Nivel de tensión y otro a las perturbaciones de la onda.

1.4.5.1.1 Nivel de voltaje

1.4.5.1.1.1 Índice de Calidad

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \qquad \textbf{Ecuación 13}$$

Donde:

ΔV_k: variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos.

V_k : voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos.

V_n : voltaje nominal en el punto de medición.

1.4.5.1.1.2 Límites

El Distribuidor no cumple con el nivel de voltaje en el punto de medición respectivo, cuando durante un 5% o más del período de medición de 7 días continuos, en cada mes, el servicio lo suministra incumpliendo los límites de voltaje.

Las variaciones de voltaje admitidas con respecto al valor del voltaje nominal se señalan a continuación en la Tabla 1-8.

Tabla 1-8. Límites establecidos para la variación en el nivel del voltaje[8].

	Subetapa 1	Subetapa 2
Alto Voltaje	± 7,0 %	± 5,0 %
Medio Voltaje	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo Voltaje. Urbanas	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo Voltaje. Rurales	± 13,0 %	± 10,0 %

1.4.5.1.2 Perturbaciones de voltaje

1.4.5.1.2.1 Parpadeo (Flicker)

Para efectos de la evaluación de la calidad, en cuanto al flicker, se considerará el Indice de Severidad por Flicker de Corta Duración (P_{st}), en intervalos de medición de 10 minutos, definida de acuerdo

[8] **REF**: Reg. Conelec. 004/01.

a las normas IEC; misma que es determinado mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}}}$$

Ecuación 14

Donde:

P_{st}: Indice de severidad de flicker de corta duración.

$P_{0.1}$, P_1,P_3,P_{10},P_{50}: Niveles de efecto “flicker” que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del periodo de observación.

1.4.5.1.2.2 Límites

El índice de severidad del Flicker P_{st} en el punto de medición respectivo, no debe superar la unidad. Se considera el límite P_{st} = 1 como el tope de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede soportar sin molestia el ojo humano en una muestra específica de población.

Se considerará que el suministro de electricidad no cumple con el límite admisible arriba señalado, en cada punto de medición, si las perturbaciones se encuentran fuera del rango de tolerancia establecido en este numeral, por un tiempo superior al 5 % del período de medición de 7 días continuos.

1.4.5.1.3 Factor de Potencia

1.4.5.1.3.1 Índice de Calidad

Para efectos de la evaluación de la calidad, en cuanto al factor de potencia, si en el 5% o más del período evaluado el valor del factor de potencia es inferior a los límites, el Consumidor está incumpliendo con el índice de calidad.

1.4.5.1.3.2 Límite

El valor mínimo es de 0,92.

1.4.5.1.4 Armónicos

Con respecto al Control de Armónicos (ondas sinusoidales de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de 60 Hz) establece los índices de calidad así como su medición y límites establecidos:

1.4.5.1.4.1 Índice de Calidad

$$V_i' = \left(\frac{V_i}{V_n}\right) * 100$$

Ecuación 15

$$THD = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n}\right) * 100$$

Ecuación 16

Donde:

V_i': factor de distorsión armónica individual de voltaje.

THD: factor de distorsión total por armónicos, expresado en porcentaje

V_i: valor eficaz (rms) del voltaje armónico "i" (para i = 2... 40) expresado en voltios.

V_n: voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios.

1.4.5.1.4.2 Mediciones

El Distribuidor deberá realizar mensualmente lo siguiente:

1. Un registro en cada uno de los puntos de medición, en un número equivalente al 0,15% de los transformadores de distribución, en los bornes de bajo voltaje, no menos de 5.

2. Para la selección de los puntos se considerarán los niveles de voltaje, el tipo de zona (urbana, rural), y la topología de la red, a

fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema. Una vez realizada la selección de los puntos, la Empresa Distribuidora debe notificar al CONELEC, por lo menos 2 meses antes de efectuar las mediciones.

3. Simultáneamente con este registro se deberá medir la energía entregada a efectos de conocer la que resulta suministrada en malas condiciones de calidad.

4. En cada punto de medición, para cada mes, el registro se efectuará durante un período no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos.

Las mediciones se deben realizar con un medidor de distorsiones armónicas de voltaje de acuerdo a los procedimientos especificados en la norma IEC 61000-4-7.

Con la finalidad de ubicar de una manera más eficiente los medidores de distorsiones armónicas, se efectuarán mediciones de monitoreo de armónicas, de manera simultánea con las mediciones de voltaje indicadas anteriormente; por lo que los medidores de voltaje deberán estar equipados para realizar tales mediciones de monitoreo.

1.4.5.1.4.3 Límites

En la Tabla 1- 9, se consideran hasta las armónicas de orden >25, los valores eficaces (rms) de los voltajes armónicos individuales (V_i') y los THD, expresados como porcentaje del voltaje nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i´ y THD´) señalados a continuación. Para efectos de esta regulación se consideran los armónicos comprendidos entre la segunda y la cuadragésima, ambas inclusive.

Tabla 1-9. Porcentaje de Tolerancias con respecto al control de armónicos.

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	TOLERANCIA $\lvert V_i' \rvert$ o $\lvert THD' \rvert$ (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 kV (otros puntos)	V ≤ 40 kV (trafos de distribución)
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
> 25	0.1 + 0.6*25/n	0.2 + 1.3*25/n
Impares múltiplos de tres		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores a 12	0.2	0.5
THD	**3**	**8**

1.4.5.2 Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN

El Instituto Ecuatoriano de Normalización emitió el **Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 036** con respecto al tema **"Eficiencia energética. Lámparas fluorescentes compactas. Rangos de desempeño energético y etiquetado"**, sean de fabricación nacional o importada, que se comercialicen en la República del Ecuador:

Este Reglamento Técnico Ecuatoriano establece la (eficiencia energética) eficacia mínima energética y las características de la etiqueta informativa en cuanto a la eficacia (luminosa) energética de las lámparas fluorescentes compactas de construcción modular, para uso con balastos electrónicos o electromagnéticos, y a las lámparas fluorescentes compactas de construcción integral para uso con balasto electrónico. Adicionalmente especifica el contenido de la etiqueta de consumo de energía, a fin de prevenir los riesgos para la seguridad, la salud, el medio ambiente y prácticas que pueden inducir a error a los usuarios de la energía eléctrica.

Este Reglamento se aplica a:

- Lámparas fluorescentes compactas de construcción modular, para uso con balastos electrónicos o electromagnéticos, con potencia hasta 60 W, voltaje de red entre 110 V y 277 V, frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz, bases rosca Edison.

- Lámparas fluorescentes compactas de construcción integral para uso con balasto electrónico con potencia hasta 60 W, voltaje de red entre 110 V y 277 V, frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz, bases rosca Edison.

Para los propósitos de este Reglamento, se aplican las definiciones dadas en las NTE INEN IEC 901, 968 y 969 y las citadas a continuación:

1.4.6 TÉCNICAS DE CONTROL DE ARMÓNICOS.

Existen numerosas técnicas para el control de 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, 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.

1.4.6.1 Soluciones dirigidas a los equipos que son fuentes de distorsión armónica.

1.4.6.1.1 Multifaseado de los equipos convertidores.

Aumentando el número de pulsos por ciclo en los convertidores se logra un funcionamiento que produce menores niveles de contaminación ya que elimina la presencia de las componentes armónicas más bajas que son las que tienden a tener mayor amplitud como se puede ver en la tabla 1-10.

Tabla 1-10.Ejemplo de armónicos en equipos electrónicos

Convertidor	N° de pulsos	Armónicos presentes
Rectificador de media onda	1	2,3,4,5,6,7,...
Rectificador de onda completa	2	3,5,7,9,…
Rectificador trifásico de onda completa	6	5,7,11,13,17,19,…
	12	11,13,23,25,35,37,…

1.4.6.2 Soluciones que proponen la modificación de la red de distribución.

1.4.6.2.1 Reconfiguración de los bancos de capacitores

Se usa para evitar los posibles problemas de resonancia, en ocasiones se logra con cambiar la ubicación de los bancos o la capacidad del mismo, para una configuración óptima se suelen usar herramientas de simulación.

1.4.6.2.2 Aumento del nivel de cortocircuito

El incremento de la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de carga es una forma de reducir los efectos de la distorsión armónica en el punto de acople común.

1.4.6.2.3 Balanceo de las fases

Con esto lo que se desea es anular, por anulación algebraica, la circulación de corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa en el conductor de neutro de manera que sólo circulen las componentes de secuencia cero y evitar la sobrecarga del mismo.

1.4.6.2.4 Factor K y los Transformadores

Se puede derratear o desclasificar el transformador disminuyendo su capacidad nominal según el contenido de corrientes armónicas que circulen a través del mismo, esto se realiza obteniendo el factor K de la carga y luego observando la reducción de la capacidad según la figura 1-9.

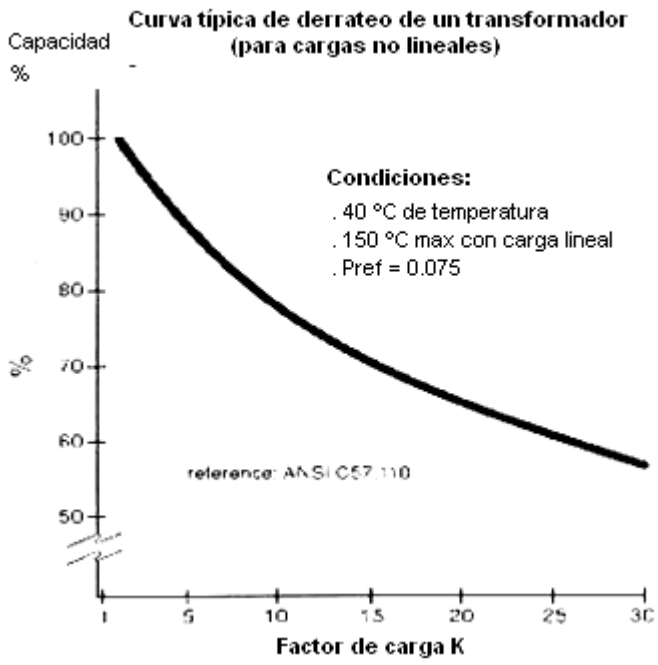


Figura 1-12.Curva de derrateo de transformadores según el factor k de la carga[9].

[9] **REF:** Arias Blanco, Edward. "Estudio de armónicos en la red de distribución de Eleggua". Universidad Simón Bolívar. Venezuela. Diciembre 2003.

A su vez existen transformadores diseñados específicamente para soportar cargas no lineales, estos son los transformadores con especificación K, los cuales operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas, entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales están:

a. El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas de secuencia cero circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.
b. Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado.
c. Se utilizan conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

1.4.6.3 Soluciones que proponen la incorporación de equipos mitigadores de los componentes armónicos.

Consisten en el uso de elementos pasivos (Condensadores, inductancias y resistencias) de manera de colocados en el sistema eléctrico para crear caminos de baja impedancia para la corriente armónica. De esta manera la configuración de estos elementos se comporta como un sumidero de corriente a la frecuencia a la cual estén sintonizados. Para esto se calculan los valores de la capacitancia e inductancia para que se comporten como un cortocircuito a la frecuencia deseada.

Ventajas:

- Costo relativamente bajo.
- Se pueden usar los condensadores usados para la corrección del factor de potencia.
- Buen rendimiento energético (pocas pérdidas).
- En general, exigen poco mantenimiento.

Desventajas:

- Por lo general pueden ser sintonizados a una sola frecuencia.
- Pueden resultar de capacidad nominal muy alta.
- Pueden causar condiciones de resonancia con la fuente y de esta manera amplificar corrientes armónicas de la misma.
- Modifican la respuesta en frecuencia del sistema.

1.4.6.3.1 Filtros activos

El principio de funcionamiento de estos filtros se basa en crear en el sistema eléctrico corrientes o tensiones armónicas que se cancelen con las componentes armónicas de las cargas no lineales, es decir, basándose en el uso de electrónica de potencia (elementos semiconductores) se coloca una fuente que suministre los armónicos necesarios para corregir la onda de la red.

Ventajas:

- Flexibilidad, dentro de ciertos límites, se pueden adaptar a diferentes frecuencias a filtrar.
- Pueden compensar corrientes o tensiones armónicas, a diferencia de los pasivos que solo sirven para drenar corrientes.
- Compensan armónicos independientemente de la potencia reactiva fundamental.
- No introduce la posibilidad de resonancia en el sistema.

Desventajas:

- Necesitan un mantenimiento especial.
- Es necesario el uso de protecciones especiales para el filtro.
- Tienen un costo relativamente alto en comparación con los filtros pasivos.

1.4.6.3.2 Filtros Combinados

Otra alternativa para la corrección de armónicos es combinar filtros pasivos y activos con la finalidad de obtener la mejor combinación de ventajas y desventajas de ambos, principalmente en disminuir los costos de la utilización de filtros activos.

2 CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS LFC`S.

El presente capítulo se orienta a evaluar las características eléctricas y calidad de luz de las LFC`S, mediante pruebas realizadas a las diferentes tipos y marcas de lámparas que se encuentran en el mercado nacional con la asistencia de equipos pertenecientes al laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional.

Una vez realizadas las pruebas en el laboratorio, se analiza y compara los resultados obtenidos para poder establecer conclusiones apoyadas en aspectos técnicos y tener una visión más clara y concisa del impacto de la sustitución de las lámparas incandescentes por LFC's

El capítulo se halla organizado en tres partes principales. En la primera se muestran los resultados de las pruebas para determinar las características eléctricas y además se observan las formas de onda obtenidas.

En la segunda parte se analizan la calidad de luz de las LFC's y se mencionan aspectos teóricos en las cuales se sustentan estas pruebas.
Por último, se expone un estudio realizado en otra tesis acerca de la influencia de las LFC's en otros dispositivos electrónicos.

2.1 CLASES Y TIPOS DE LFC`S EXISTENTES EN EL MERCADO NACIONAL.

Para el presente estudio se ha tomado una muestra de 10 lámparas que se expenden en los centros comerciales (Supermaxi, Despensa AKI, Comercial Santa María, Magda.).

Estos lugares son los escogidos debido a que están ubicados estratégicamente donde existe la mayor circulación de potenciales consumidores.

Para el estudio se escogió las lámparas de 20 W a las que establecen los fabricantes como reemplazo de los focos incandescentes de 100W usados por la población en general.

Se identificó a las lámparas con distintas letras del alfabeto, y que se utiliza en adelante en cada una de las tablas que muestran los resultados[10].

- MARCA A
- MARCA B
- MARCA C
- MARCA D
- MARCA E
- MARCA F
- MARCA G
- MARCA H

Y las entregadas por el gobierno en su plan de eficiencia energética:

- MARCA I
- MARCA J

2.1.1 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA MUESTRA DE LÁMPARAS A ESTUDIARSE.

Con el objeto de estructurar la muestra, se consideraron algunos criterios entre los cuales están:

- Lámparas fluorescentes con casquillo E27 (rosca Edison), el cual es utilizado por las lámparas incandescentes que están destinadas a ser reemplazadas, y a donde está enfocado el proyecto de sustitución masiva.

- Se selecciona una muestra de lámparas incandescentes que tengan una potencia de 100 W y aquellas Lámparas Fluorescentes Compactas que

[10] Esta identificación se la realiza debido a que si bien las lámparas fueron escogidas aleatoriamente, el resultado obtenido en las pruebas no se puede generalizar a todas las lámparas de esa marca y los resultados no reflejan la calidad de esa marca. Vale la pena mencionar que el objetivo planteado fue determinar las características eléctricas de estas lámparas.

establecen los fabricantes como su reemplazo, con una potencia equivalente de 20W.

- Se considera una frecuencia de trabajo promedio de 60Hz para todas las lámparas, valor de frecuencia suministrada por la empresa distribuidora (Empresa Eléctrica Quito S.A), en donde se realiza el estudio.

Con estos criterios se selecciona un total de 12 lámparas[11], tres de las cuales son incandescentes y las siete restantes, lámparas fluorescentes compactas.

11 Se tomo como base 12 lámparas debido a que son las de fácil adquisición y son de mayor distribución en locales comerciales y pequeños despensas.

En la Tabla 2-1 se realiza un resumen de cada una de las características técnicas especificadas por el fabricante de la muestra recolectada, estos datos servirán para compararla con la norma establecida por las entidades y que serán corroboradas por el estudio de laboratorio.

Tabla 2-1.Características Eléctricas de las Lámparas Fluorescentes. (Publicadas por los fabricantes).

Marca	Color de Luz ºK	Emisión de luz (lm)	P. (W)	Volt. (V)	Eficiencia (lm/W)	Vida útil	F.P
Marca A LFC	NO	NO	20	110-130	NO	8000	NO
Marca B LFC	6400	1250	20	124	62	8000	0.5
Marca C LFC	6400	1400	20	125	53	8000	NO
Marca D LFC	NO	1560	18	124	NO	NO	NO
Marca E LFC	6500	1152	20	110-130	57	6 000	0.5
Marca F LFC	6400	NO	20	110-130	NO	6000	NO
Marca G LFC	6400	1080	20	110-120	53	6000	0.6
Marca H LFC	2700	1080	21	120	60	8000	0.5
Marca I LFC	NO	NO	18	90-130	NO	8000	NO
Marca J LFC	NO	NO	20	110-125	55	8000	NO
Marca K	Incandescentes	1400	100	120	NO	1000	NO
Marca L	Incandescentes	1400	100	120	14	1000	NO

Debe aclararse que la vida útil mencionada, se ha tomado de las presentaciones de las lámparas en la que constan indicaciones como:

"6 años de duración con un consumo promedio de 4 horas al día sin variaciones de voltaje."

2.2 PRUEBAS REALIZADAS.

Se dispone de una muestra de lámparas tanto incandescentes y fluorescentes compactas, de las cuales se toma en cuenta los precios de venta, características del producto y además la información contenida en el rotulado del empaque, ésta actividad se la realiza en lámparas adquiridas en los diferentes supermercados que tienen mayor afluencia de población.

Las pruebas realizadas van orientadas a tomar medidas relacionadas con potencia, corriente, distorsión de la forma de onda de corriente por contenido armónico, voltaje, y una prueba referencial del nivel de iluminación que proporcionan esas lámparas; tomando en cuenta la parte teórica plateada en el capítulo anterior requerida para este estudio.

De esta manera al final se puede elaborar un cuadro comparativo con respecto al desempeño energético de las diferentes marcas de LFC`S.

2.2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.

Se presenta una descripción de las pruebas realizadas y la justificación para ejecutarlas:

2.2.1.1 Valores y formas de Onda de corriente y voltaje.

Esta prueba se la realiza con los siguientes objetivos:

- Observar las formas de onda de corriente (línea, neutro) y voltaje; estudiar la relación entre estas formas de onda (analizar el ángulo de desfasaje).
- Medir el voltaje y la corriente que circula por cada una de las lámparas con el fin de tener una noción del consumo de corriente que tienen dichas lámparas.
- Mediante las gráficas obtenidas, observar la distorsión de la forma de onda que se produce causa de armónicos.

2.2.1.2 Medición de las potencias.

Se realiza una medición de todas las potencias.

- Activa (P).
- Reactiva (Q).
- Aparente (S)

Con el fin de determinar las potencias consumidas por cada lámpara, compararlas con el valor descrito por parte de los fabricantes en los empaques y analizar su comportamiento por medio de los valores medidos y establecidos según norma técnica.

2.2.1.3 Medición del factor de potencia.

Se la realiza con el fin de comparar con los valores descritos en los empaques que existan de las LFC`S, por parte de los fabricantes.

Adicionalmente a esto, el valor obtenido permite establecer si está por debajo de los valores establecidos por la norma técnica.

2.2.1.4 Medición de la Tasa de distorsión armónica de corriente y voltaje.

Esta prueba se la realiza para verificar la existencia de armónicos en las fases, generados por las LFC`S.
Conjuntamente se establece el porcentaje de distorsión de la onda fundamental, tanto de corriente (THDi), como de voltaje (THDv).
Todas estas pruebas son realizadas bajo la norma técnica establecida en lo que tiene que ver a rangos de voltaje, valores de frecuencia, explicadas en el capítulo anterior.

2.3 EQUIPO UTILIZADO.-

- Registrador de potencia Fluke 1735.
- Lámparas ahorradoras disponibles en los diferentes supermercados.
- Tableros de pruebas (Laboratorio de Circuitos Eléctricos).
- Mesón de pruebas eléctricas del laboratorio de máquinas eléctricas.
- Medidor de luz. Luxómetro Proskit Mt-4017.

Las pruebas se realizan para tensión referencial (125 V) de operación. En el caso de las lámparas facilitadas por el gobierno, tenían un uso de aproximadamente cien (100) horas, consideradas según la Norma INEN 329 como “lámparas maduradas”.

Inicialmente se aborda el estudio de la influencia de las LFC´S, con un circuito formado únicamente por lámparas incandescentes; como siguiente paso, se

reemplaza cada lámpara incandescente por una fluorescente compacta y mediante el analizador de potencia, se toman datos y se observa el efecto producido sobre las diferentes variables eléctricas a causa de dicho reemplazo.

Este procedimiento se realiza para cada uno de los circuitos con el fin de analizar el efecto que se produce al ir efectuando el reemplazo; al final se presenta un cuadro resumen de los datos medidos en cada lámpara junto con sus respectivos gráficos de forma de onda.

Concluidas las pruebas sobre calidad de energía, se realiza las pruebas para determinar la calidad de luz que ofrecen las LFC`S y las lámparas incandescentes; el objetivo de estas pruebas es verificar el cumplimiento de la norma establecida por el INEN, y comparar con los datos que los fabricantes expresan en las presentaciones de los productos que ofrecen.

2.3.1 CIRCUITO FORMADO.

Para realizar la medición de las variables eléctricas establecidas anteriormente; se forma un circuito en configuración Estrella (Y) con conexión de neutro, esta configuración permite realizar un estudio fase por fase.

La conexión del equipo que realiza la medición para todos los circuitos, es la misma que está establecida en la figura 2.2[12], y se procede de la siguiente manera:

Figura 2-1.Montaje de los equipos para realizar las pruebas.

Voltaje:

Línea de la red eléctrica	Conductores de prueba
A (L1)	A (L1)
B (L2)	B (L2)
C (L3)	C (L3)
N	N

[12] Tomado del manual que provee el fabricante.

Corriente:

Línea de la red eléctrica	Conductores de prueba
A (L1)	A (L1)
B (L2)	B (L2)
C (L3)	C (L3)
N	N

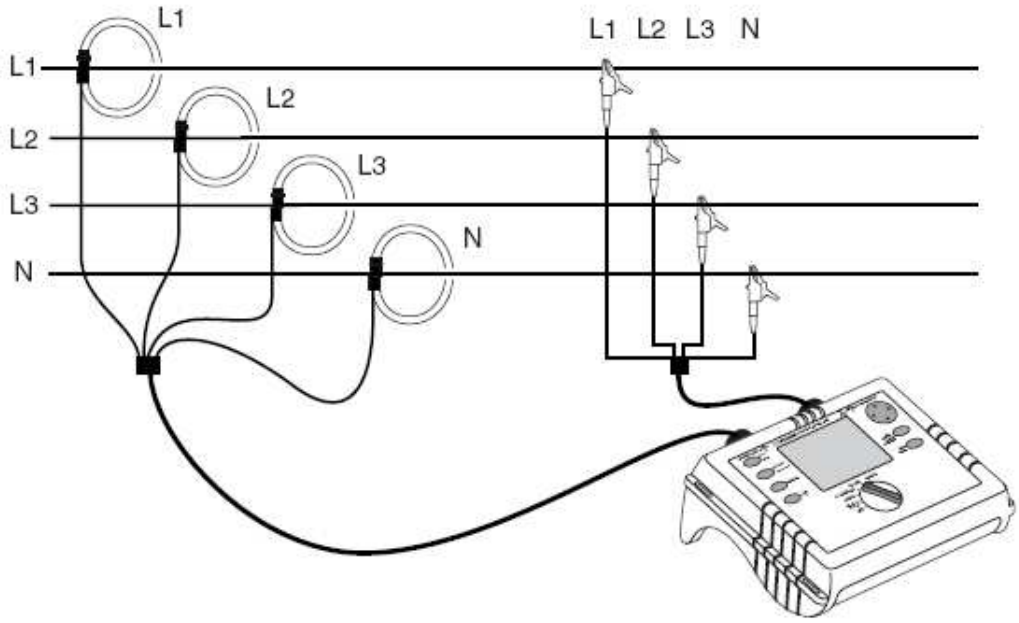


Figura 2-2.Dibujo esquemático de la conexión del equipo.

2.3.2 PRIMER CIRCUITO.

Formado únicamente por lámparas incandescentes, se registra y analiza los diferentes valores medidos.

En la primera fase (fase A) y la fase C se ubicaron focos de la marca K de 100W, con un voltaje de trabajo de 120V; en la fase A se ubicó un foco de la marca L de 100W con un voltaje de trabajo de 120 V.

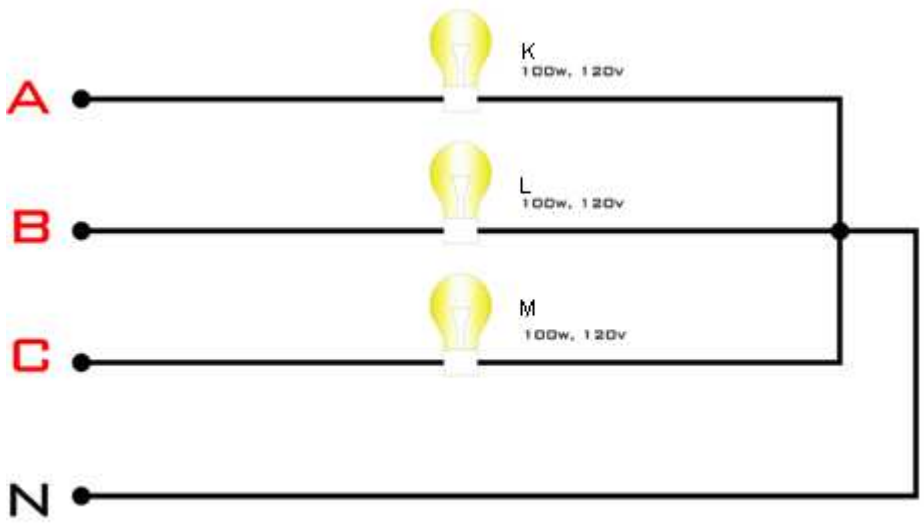


Figura 2-3.Primer circuito formado únicamente por lámparas incandescentes.

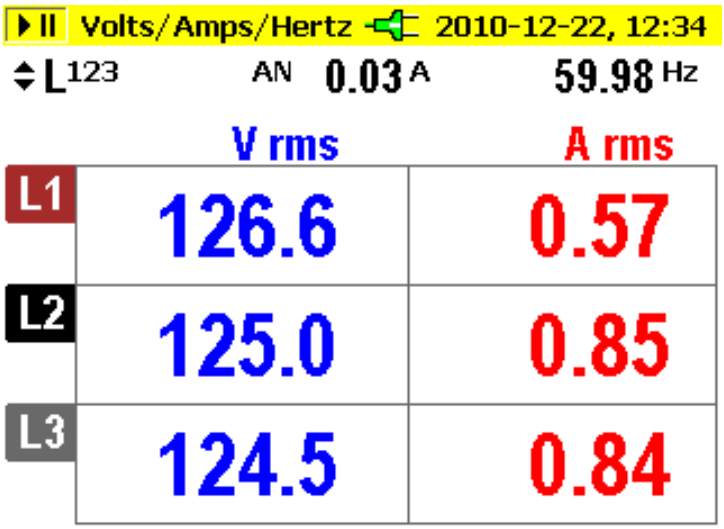


Figura 2-4. Valores medidos en las fases, para un circuito formado por lámparas incandescentes.

Análisis de los datos obtenidos.

Se observa en los valores de voltaje, que existe una variación del 5%; que se encuentra dentro del rango de variación establecida por la norma[13]. En el caso de la corriente se puede observar un valor considerablemente alto. Así también el valor de corriente en el neutro no representa un valor significativo por lo cual no

13 Límites establecidos para la variación en el nivel de bajo voltaje en zonas urbanas (REG. CONELEC. 004/01).

puede ocasionar problemas considerables de distorsión en la forma de onda ni armónicos en la red; esto se puede visualizar en las formas de onda obtenidas.

2.3.2.1 Formas de onda.

Mediante el analizador trifásico, se establece un valor de muestreo para obtener las formas de onda de las tres líneas de alimentación, en la figura 2.6 se presenta las tres formas de onda obtenidas.

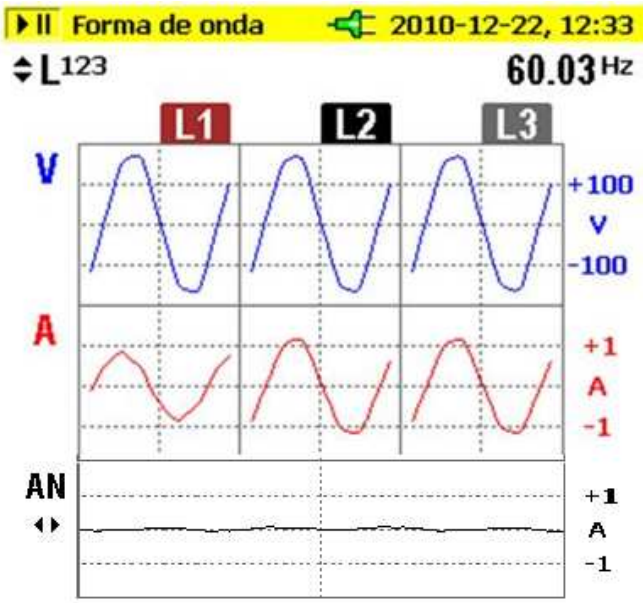


Figura 2-5. Formas de Onda de voltaje y corriente en las tres fases (Circuito formado por tres lámparas incandescentes).

Se puede visualizar que no existen efectos de distorsión en las formas de onda, debido a ello la presencia de armónicos es prácticamente nula; cabe mencionar que se observa una ligera distorsión en la forma de onda en el foco de marca SYLVANIA (fase A), de donde se puede concluir que no es puramente resistivo.

2.3.2.2 Valores de potencia medidos.

Tabla 2-2.Valores de Potencias Medidos[14] .

Circuito formado por lámparas incandescentes	P (w)	Q (VAR)	S (VA)	FP
TOTALES MEDIDOS	260	- 40	270	0.93

[14] Debe aclararse que en los valores medidos, existió un porcentaje de variación del 10%, el analizador permite determinar el valor mínimo, máximo y promedio de los valores medidos en un intervalo de tiempo. En las tablas se presenta el valor promedio obtenido durante el intervalo de medición.

En este punto se puede notar que no todas las lámparas incandescentes presentan un comportamiento resistivo, una de ellas registra un valor de potencia reactiva, esto se debe a las características de los materiales del filamento de la lámpara sin embargo esta propiedad no puede generalizarse a todas las lámparas de dicha marca ya que no representa una muestra significativa de dicho grupo.
Con respecto al factor de potencia este valor no amerita mayor análisis ya que esta en el rango considerado como alto.

2.3.2.2.1 Tasa de distorsión armónica (THD).

Este valor permite definir la importancia del contenido armónico de la señal (corriente y voltaje); producida por la no linealidad de las cargas, en este caso por tratarse de focos incandescentes se espera una tasa de distorsión baja pero al ir efectuando el cambio se verá el aumento progresivo de este valor.

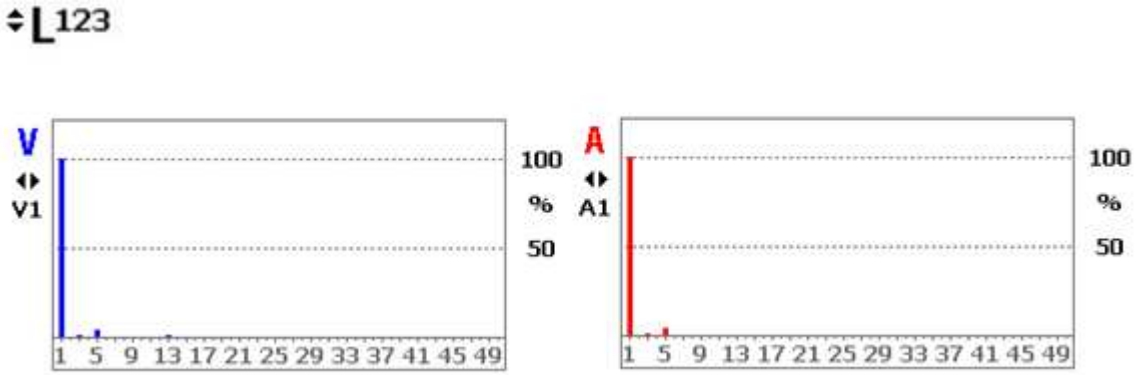


Figura 2-6.Tasa de distorsión armónica del primer circuito.

Tabla 2-3. Valores de distorsión de onda.

Circuito formado por lámparas incandescentes	THDv (%)	THDi (%)
TOTAL	3.9	3.9

Se presentan valores de distorsión de corriente igual al 4% que corresponde a la tercera armónica sin embargo como conclusión se puede decir que no presentan mayor problema en cuanto al cumplimiento de la norma.

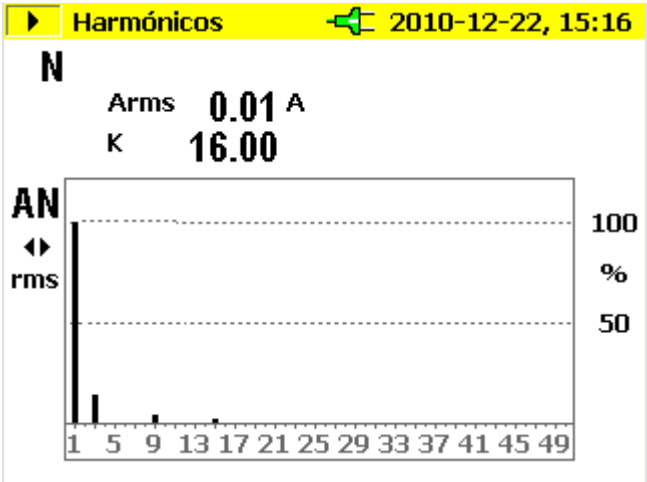


Figura 2-7. Tasa de distorsión armónica en el neutro. (Primer circuito).

Como se puede apreciar en la figura existe un valor mínimo de corriente circulando por el neutro, aparecen la 3º y 9º armónica pero no generan una distorsión considerable. Estos valores se deben a la lámpara que registraba la presencia de potencia reactiva. El factor K relaciona el efecto de calentamiento de una intensidad distorsionada con una intensidad sinusoidal de idéntico valor rms. El término fue empleado, por primera vez, para definir la capacidad de un transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder sus límites de temperatura.

2.3.3 SEGUNDO CIRCUITO.

Una vez realizado el estudio del circuito implementado solo por lámparas incandescentes; se realiza el cambio de una de las luminarias, ubicando en la segunda fase una LFC del grupo de muestras. Se sigue el mismo procedimiento que el circuito anterior registrando los valores a medir de las variables eléctricas establecidas, con el fin de observar y analizar el cambio producido.

En las fases A y C se mantienen los mismos focos incandescentes de 100W, con un voltaje de trabajo de 120V; en la fase B una LFC de la marca establecida como F de 20W declarados en la presentación del foco y un voltaje de trabajo de 110 - 130 V.

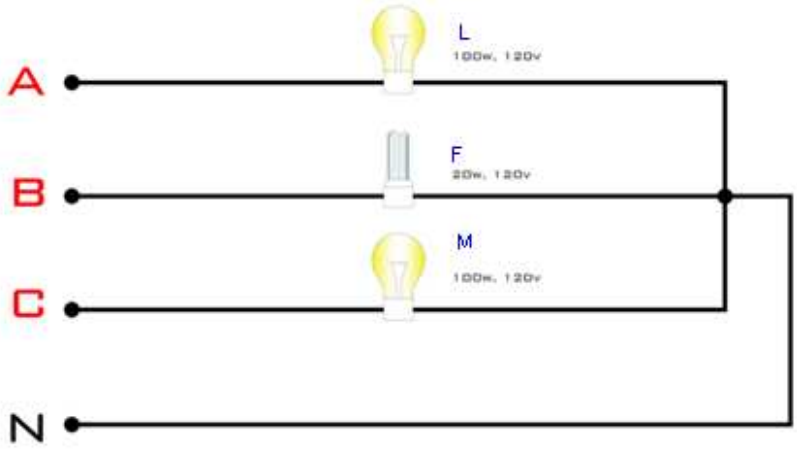


Figura 2-8.Circuito formado con 2 lámparas incandescentes y una lámpara fluorescente compacta.

L123 AN 0.69 A 59.97 Hz

	V rms	A rms
L1	126.3	0.58
L2	125.0	0.31
L3	123.9	0.83

Figura 2-9.Valores medidos en las 3 fases de un circuito formado por 2 lámparas incandescentes y una fluorescente compacta.

ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS.

No existe mayor variación en los valores de voltaje, mayor al 5%. En el caso de la fase B en donde se ubicó la LFC se observa una disminución aproximadamente del 63% en su valor de corriente de fase (de 0.85 A → 0.31A). En contraparte el valor de corriente en el neutro aumentó su valor en aproximadamente más del 200%(0.03 A → 0.69 A).

2.3.3.1 Formas de onda

En la figura 2.10 se presenta las tres formas de onda del circuito formado por 2 lámparas incandescentes y una LFC en donde ya se puede apreciar una distorsión en la forma de onda de corriente de la fase donde se realizó el cambio, y además se presenta la distorsión en la forma de onda del neutro.

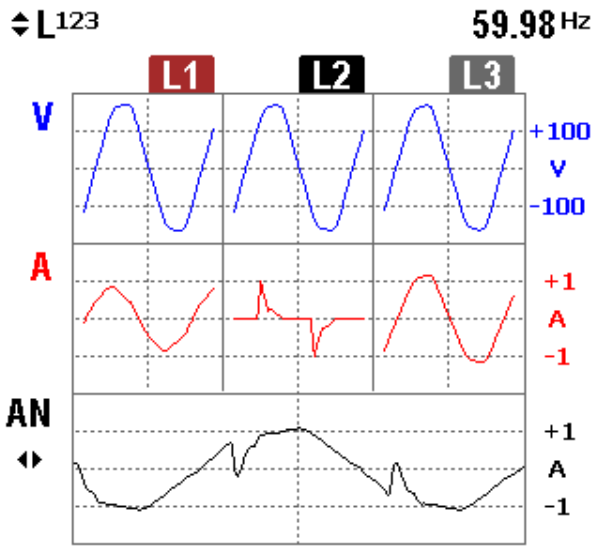


Figura 2-10.Formas de onda de voltaje y corriente trifásica de un circuito formado por dos lámparas incandescentes y una lámpara fluorescente.

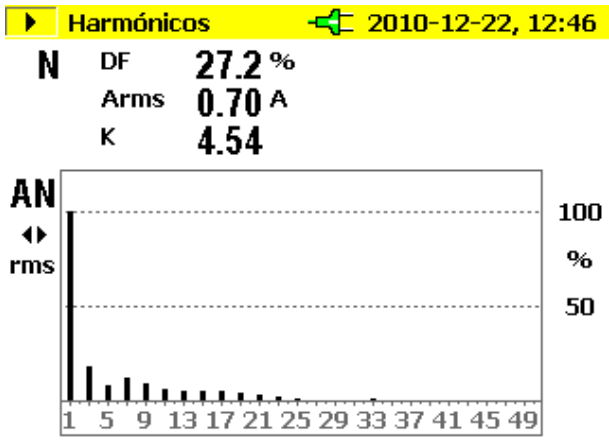
2.3.3.2 Valores de potencias medidas.

Tabla 2-4.Tabla de valores de potencia medidos en el segundo circuito.

Circuito formado por 2 lámparas incandescentes y una LFC	P (w)	Q (VAR)	S (VA)	FP
TOTAL	180	- 40	210	0.8

Se evidencia una disminución en los valores de potencia con respecto al circuito anterior (alrededor de 60 VA), sin embargo el factor de potencia también disminuyó (0.95 a 0.8), lo que indica la presencia de potencia reactivas.

2.3.3.2.1 Tasa de distorsión armónica (THD).



.-

Figura 2-11.Tasa de distorsión armónica del conductor neutro.

Con respecto al anterior circuito ya se puede notar la presencia de armónicos impares en el espectro de frecuencia hasta de orden 25º. Así también el valor de la constante k disminuyó, la consecuencia de ello sería que no exista sobrecalentamiento del conductor.

2.3.4 TERCER CIRCUITO.

Formado por dos LFC`s y un foco incandescente; se reemplaza el foco incandescente de la fase A por otra LFC y se continúa con el mismo procedimiento que los circuitos anteriores.

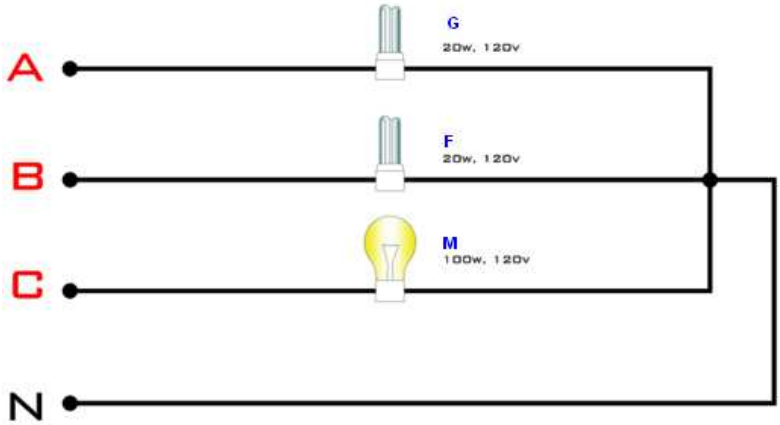


Figura 2-12.Circuito formado con 1 lámparas incandescentes y 2 lámparas fluorescentes compacta.

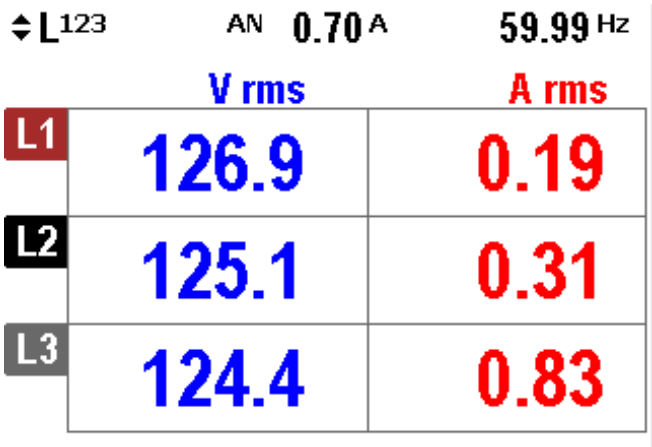


Figura 2-13.Valores medidos en las fases. Tercer circuito.

Análisis de los datos obtenidos.

Al comparar los resultados obtenidos en el circuito 2 (dos focos incandescentes y foco fluorescente) con el circuito 3 (dos focos fluorescentes y un foco

incandescente), se observa una disminución en la corriente de fase (0.58 A → 0.19 A) que representa el 67%. El foco reemplazado presenta un valor menor de corriente que el otro LFC cabe mencionar que este segundo LFC es de mayor costo y que presenta toda la información requerida por la Norma 329 mientras que el primer LFC cumple apenas con la información básica en su presentación.

2.3.4.1 Formas de onda.

En la figura 2-14 se presenta las tres formas de onda de corriente y voltaje. La distorsión de la forma de onda de corriente en las dos LFC`s es más evidente.

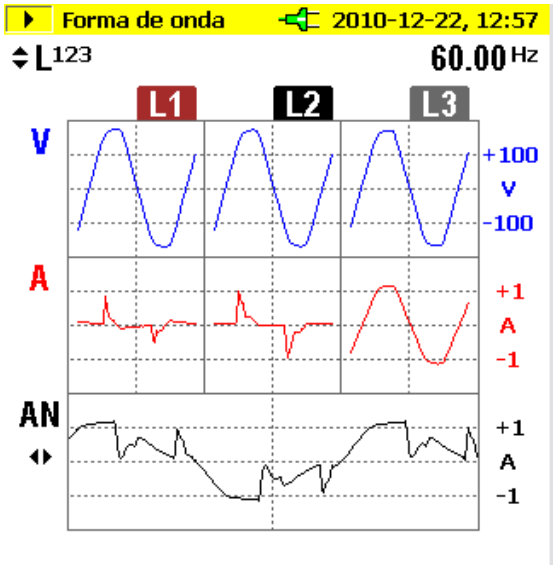


Figura 2-14.Formas de onda de voltaje y corriente trifásica de un circuito formado por dos lámparas fluorescentes y una lámpara incandescente.

La distorsión de la forma de onda del neutro es más evidente, debido a la presencia de las dos lámparas fluorescentes compactas.

2.3.4.2 Valores de potencia medidas.

En la tabla 2-5 se presenta un cuadro resumen de las variables eléctricas medidas.

Tabla 2-5.Tabla de valores de potencia medidos. Tercer circuito.

Circuito formado por 1 lámparas incandescentes y 2 LFC	P (w)	Q (VAR)	S (VA)	FP
TOTAL	130	-10	160	0.64

La disminución de los valores de potencia es más evidente de 210 VA a 160VA, sin embargo el factor de potencia va a la par pero todavía se encuentra dentro de un rango aceptable.

2.3.4.2.1 Tasa de distorsión armónica (THD).

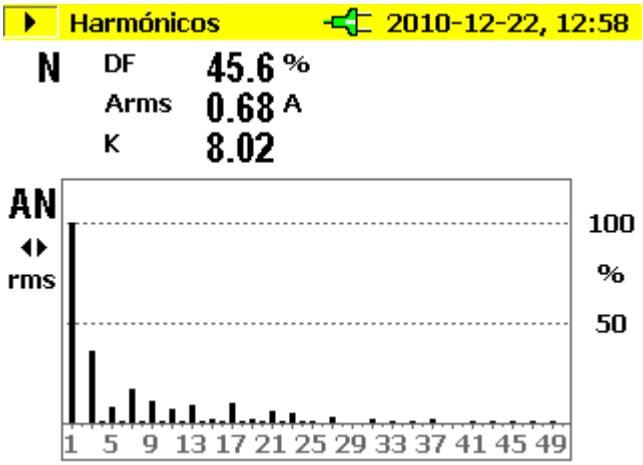


Figura 2-15.Tasa de distorsión armónica del conductor neutro. Tercer circuito.

Se concluye que existe un aumento el factor K igual al doble del valor obtenido anteriormente, sin embargo el valor de corriente que circula por el neutro se mantiene constante. .

2.3.5 CUARTO CIRCUITO.

Formado exclusivamente con focos ahorradores.- para este caso ya solo intervienen las lámparas fluorescentes compactas, se ha realizado el reemplazo de todos los focos incandescentes.

En la primera y segunda fase se mantienen las LFC que se uso en el anterior circuito, lámparas de 20W, con un voltaje de trabajo de 110 - 130V; en la fase C se realiza el último reemplazo con la lámpara ahorradora de marca C de 20W de potencia y un voltaje de trabajo de 120 - 127 V.

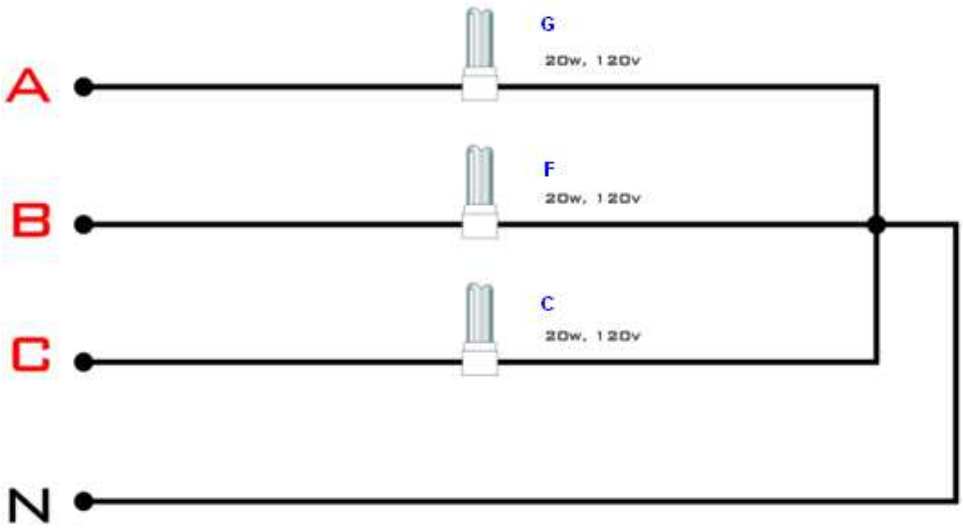


Figura 2-16.Circuito formado con 3 lámparas fluorescentes compactas.

L123 AN 0.43 A 60.00 Hz

	V rms	A rms
L1	125.7	0.18
L2	124.2	0.30
L3	123.7	0.24

Figura 2-17.Valores medidos en las fases; cuarto circuito.

Análisis de los datos obtenidos.

No existe variación en el valor del voltaje con respecto al valor medido en el circuito anterior. Los valores de corriente presentan una disminución en sus valores. Los diferentes valores se dan debido a que son lámparas de diferente marca; por último presenta una disminución en la corriente del neutro.

2.3.5.1 Formas de onda.

En la figura 2-18 se presenta las tres formas de onda de corriente y voltaje. En donde la distorsión de la forma de onda de corriente es evidente.

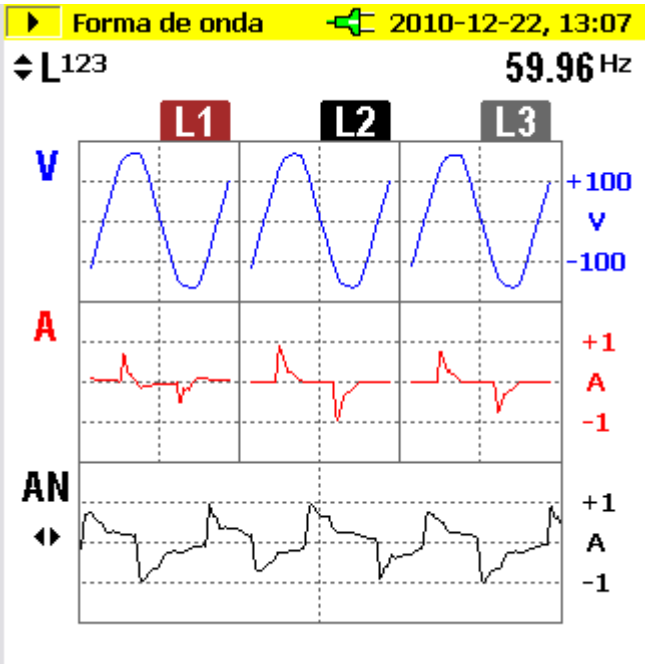


Figura 2-18.Formas de onda de voltaje y corriente trifásica de un circuito formado por tres lámparas fluorescentes compactas.

2.3.5.2 Valores de potencia medidos.

En la tabla 2-8 se presenta un cuadro resumen de las variables eléctricas medidas..

Tabla 2-6.Tabla de valores de potencia medidos Cuarto circuito.

Circuito formado solo por LFC`s	P (w)	Q (VAR)	S (VA)	FP
TOTAL	50	-10	90	0.53

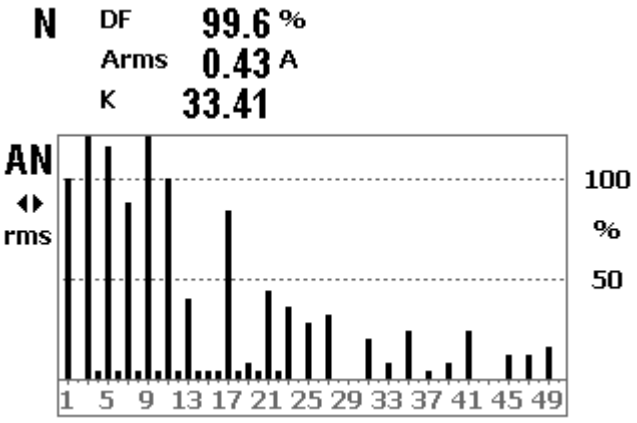


Figura 2-19.Forma de Onda y Tasa de distorsión armónica del conductor neutro.

La presencia de armónicas que sobrepasan a la fundamental se da en las de 3º, 5º y 9º armónica mientras en las de 7º y 13º se aproximan a la fundamental que determina la deformación de la onda de corriente del neutro.

2.3.6 CIRCUITO 5 FORMADO CON 6 FOCOS AHORRADORES.

Se incluye este circuito para realizar una simulación del consumo de corriente y potencia en una vivienda que usa 6 luminarias que representaría a los hogares de pequeñas familias, se analizan las variables y se saca conclusiones.

Se arma dos circuitos en estrella conectados como se indica en la figura 2-20. Se utiliza las luminarias que provee el gobierno nacional en su plan de sustitución masiva de focos incandescentes. Las características son: Potencia: 18W Voltaje de trabajo: 110 – 125 V.

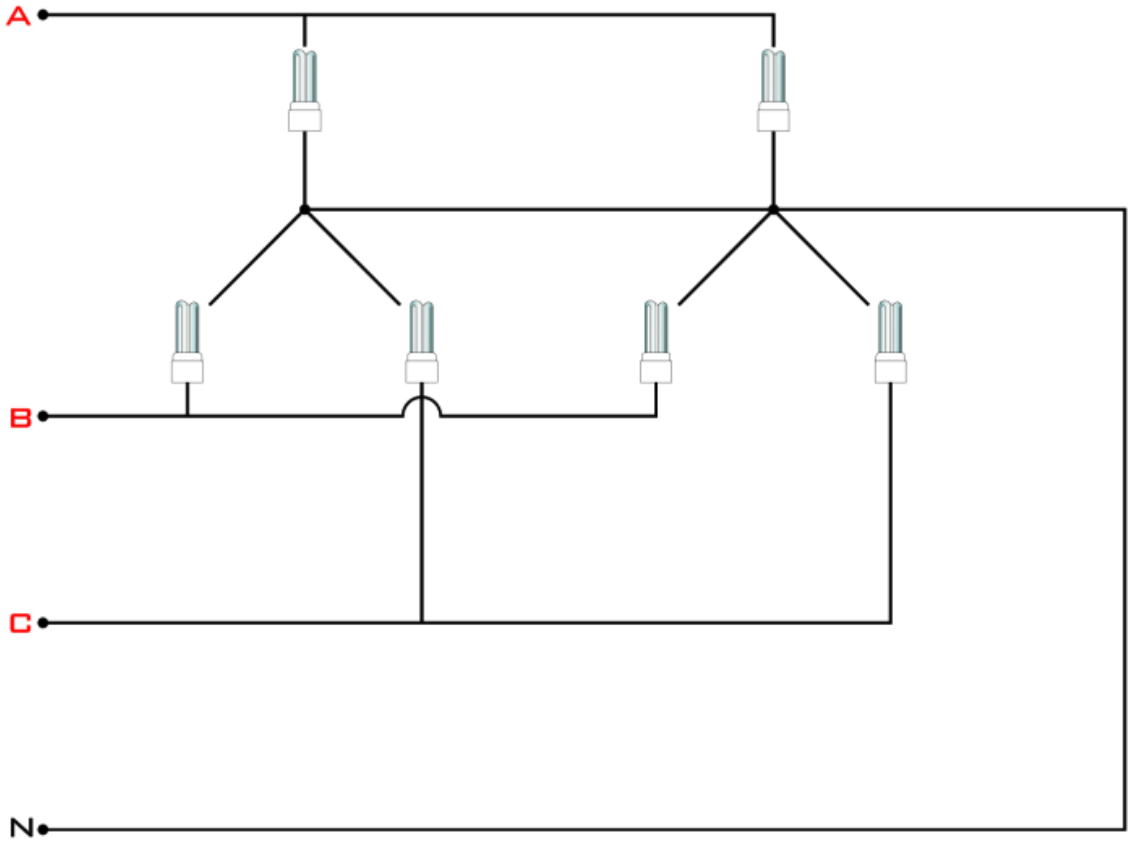


Figura 2-20.Circuito formado con 6 lámparas fluorescentes compacta.

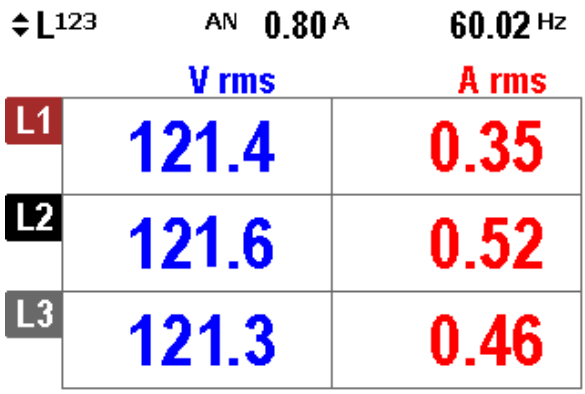


Figura 2-21.Valores medidos en las fases

Análisis de los datos obtenidos.

Se observa uniformidad en cuanto a los valores de voltaje, no existe mayor variación en los valores. En cuanto a corrientes se produjo una disminución con respecto a los valores obtenidos con lámparas incandescentes. La diferencia entre estos valores se debe al uso y a la calidad de la lámpara.

2.3.6.1 Formas de onda.

En la figura se presenta las tres formas de onda de corriente y voltaje.

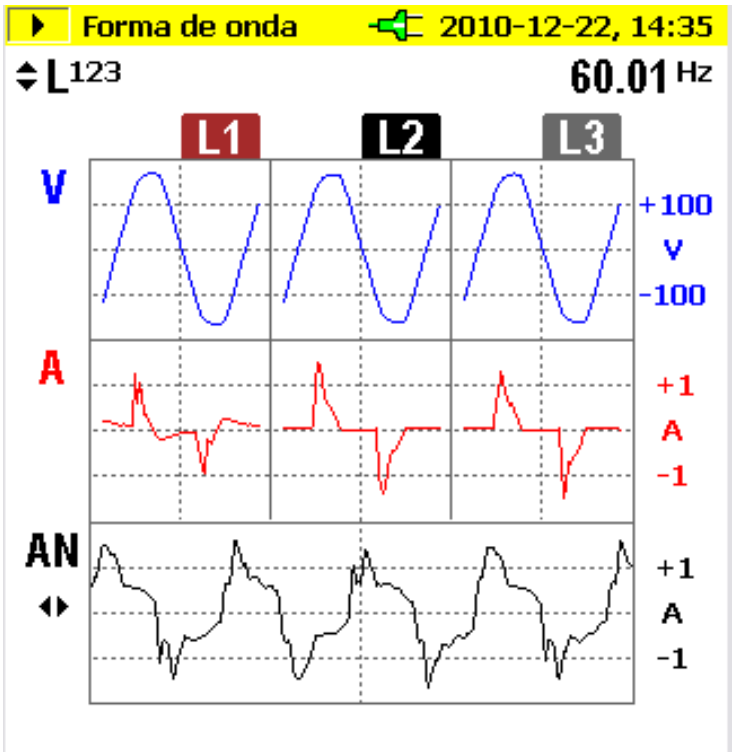


Figura 2-22. Formas de onda de I y V en un circuito compuesto por 6 luminarias.

2.3.6.2 Valores de potencia obtenidos.

Tabla de valores de potencia medidos

Circuito formado solo por 6 LFC`s	P (w)	Q (VAR)	S (VA)	FP
TOTAL	90	-30	170	0.57

Se registra un menor valor de potencia, en comparación con el circuito formado por tres lámparas incandescentes. El factor de potencia es bajo pero se mantiene "en los valores considerados normales".

2.3.6.3 Tasa de distorsión del neutro.

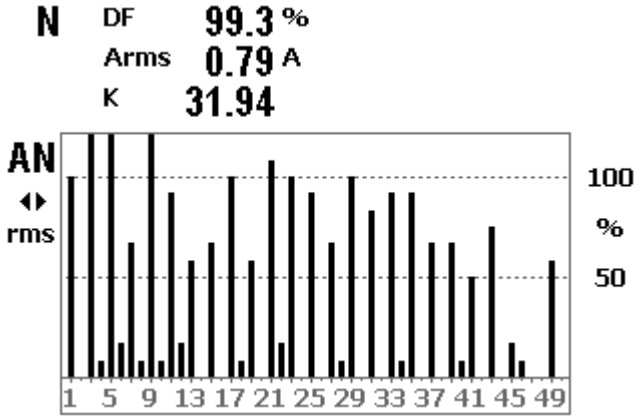


Figura 2-23. Tasa de distorsión armónica en el conductor neutro, para un circuito formado por 6 luminarias LFC`s.

La presencia de armónicos es notoria, entre las que se destacan la 3º, 5º y 9º armónica que sobrepasan el 100% de la fundamental aunque la corriente presenta el mismo valor que el circuito con tres luminarias LFC. Existe un aumento considerable del factor k que indica el aumento de temperatura por el conductor neutro.

Se presentan 3 cuadros resúmenes; la tabla 2-7 tiene que ver con un resumen de las característica medidas en cada luminaria y su comparación con los valores registrados por los fabricantes.

En el segundo cuadro se muestra un resumen de la variación de los valores de las potencias en los diferentes circuitos estudiados.

Por último se muestra un cuadro que resume la variación de la corriente del neutro en los diferentes circuitos.

Tabla 2-7. Características Eléctricas medidas en las luminarias de prueba.

MARCA	P (W)	Q (VAR)	S (VA)	FP	THDv %	THDi %	I A
A	20	0	30	0.61	3.9	100	0.26
B	17.8	20.4	26.4	0.61	3.5	100	0.18
C	20	0	30	0.6	3.5	97.9	0.24
D	19.8	10.8	31	0.53	4.1	107	0.12
E	20	0	30	0.64	3.6	100	0.25
F	20	-40	40	0.58	3.9	96.8	0.31
G	18	0	20	0.4	3.7	99.8	0.19
H	19	-10	30	0.22	3.2	100	0.21
I	20	0	30	0.62	3.6	100	0.25
J	16.4	17.2	22.5	0.62	5.3	153	0.15
K	100	0	100	1	3.8	3.1	0.57
L	60	-40	70	0.8	3.9	3.9	0.85
M	100	0	100	1	4.0	3.1	0.84

Potencia.- con respecto a esta característica, la norma indica que el valor medido bajo ensayo, no debe variar más del 15% de la potencia declarada esto es ± 3W. No existe problema en la mayoría de lámparas, únicamente la luminaria (cabe indicar) que fueron entregadas por el gobierno en la primera etapa del plan de sustitución, no cumple con esta norma.

Los valores de potencia reactiva y aparente junto con el factor de potencia demuestran la calidad de cada lámpara, aparte de la potencia activa declarada hay valores de potencia reactiva y pérdidas en cada lámpara reflejados en el consumo de potencia aparente.

Factor de potencia.- La norma INEN RTE 396 establece que el factor de potencia mínimo para este tipo de lámparas debe ser de 0.6 Igualmente con excepción de dos lámparas estos valores cumplen con la norma establecida. En el caso de las lámparas que no cumplen con la norma al usarse en conjunto provocan la circulación de más corriente por la red causando la sobrecarga de los transformadores.

Tasa de distorsión.- con respecto a los valores de distorsión de voltaje no hay problema ya que los valores registrados se encuentran dentro de la norma establecida (≤ 5%).

En los valores de distorsión de corriente la norma establece que el total de armónicos medidos estará en un rango máximo del 120 % del valor de la fundamental. Sin embargo tampoco existe un problema con estos valores ya que se encuentran dentro de la norma.

2.3.7 VARIACIÓN DE LAS POTENCIA TOTALES Y CORRIENTE DEL NEUTRO MEDIDA EN LOS DIFERENTES CIRCUITOS DE ESTUDIO.

Circuito	P_T	Q_T	S_T	FP_T	I_N	K
3 Focos	260	-40	270	0.93	0.03	2.94
2 Focos, 1 LFC	180	-40	210	0.80	0.70	4.54
1 Foco, 2 LFC	130	-10	160	0.64	0.68	8.02
3 LFC	50	-10	90	0.53	0.43	33.41
6 LFC	90	-30	170	0.57	0.79	31.94

2.4 CONSUMO ELÉCTRICO DE LAS LÁMPARAS EN EL MOMENTO DEL ENCENDIDO.

El objetivo del presente estudio es analizar el consumo de las LFCs durante el encendido y comprobar si resulta mejor dejarlas encendidas incluso en tiempos relativamente largos.

2.4.1 ARRANQUE DE LÁMPARA DE INCANDESCENCIA.

En el caso de lámparas de incandescencia convencionales (60 W de potencia nominal en este caso y una intensidad de 0,24 A) se tiene un pico de corriente considerable, que dura aproximadamente un milisegundo; esto es debido a que el filamento justo en el momento del arranque está a temperatura ambiente, en definitiva a una temperatura muy baja con respecto a su funcionamiento continuado.

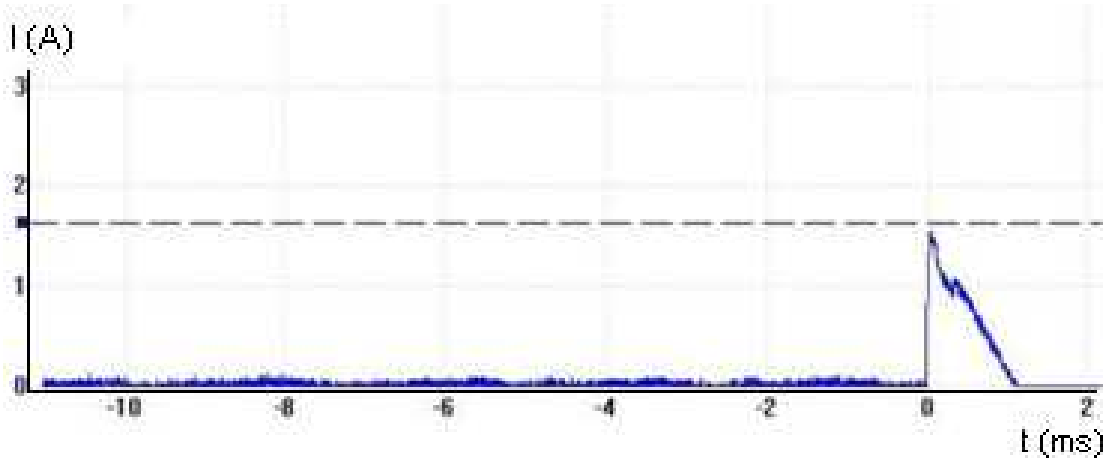
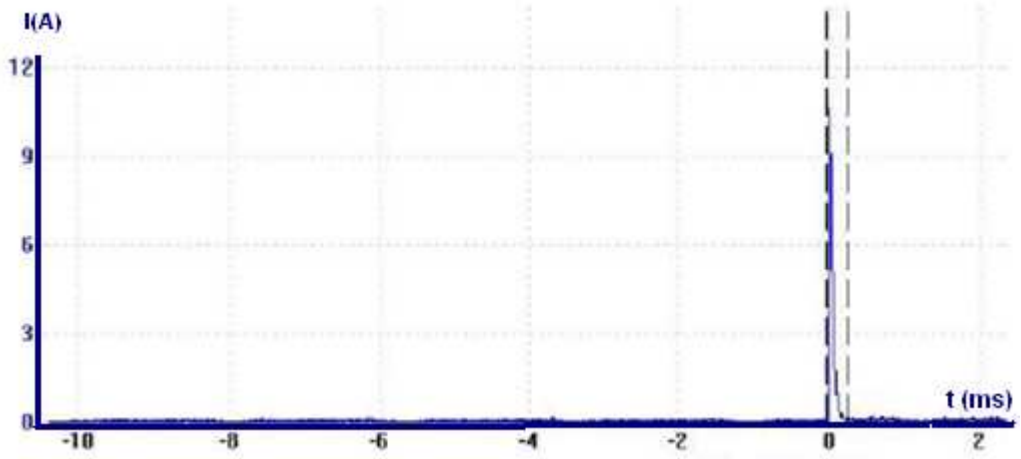
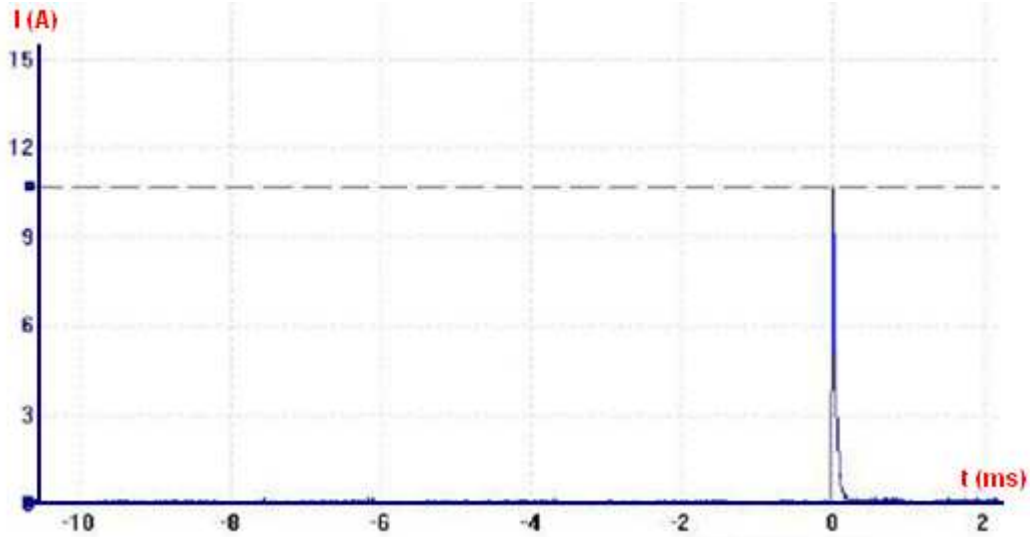


Figura 2-24. Consumo de corriente de una lámpara incandescente durante el encendido.

2.4.2 ARRANQUE DE LÁMPARA DE BAJO CONSUMO DE 20 W.



Se tiene también picos altos de corriente en esta lámpara de bajo consumo de 20W y una tonalidad de color de 4200 K, pero al igual que en el caso de los tubos fluorescente el tiempo es casi despreciable, estamos hablando de 0,23 milisegundos. Su intensidad nominal es de 0,05A.



2.4.3 CONCLUSIÓN.

Después de analizar los ensayos podemos llegar a la conclusión que no se debe dejar encendida las lámparas, pues en estos casos y, de manera genérica, aunque el consumo sea al inicio notable, éste es de una duración mínima e insignificante, por lo que no se considera necesario mantener energizada las fuentes de luz cuando no se las requieran.

2.4.4 ACLARACIÓN

En este estudio sólo se ha valorado el ahorro del consumo de electricidad. Pero se debe tener en cuenta que, excepto las de incandescencia, todas las demás lámparas necesitan un equipo de arranque, equipo que tiene un número máximo de maniobras dependiendo de las condiciones ambientales, tipo de fabricante, calidad de los componentes, tolerancias, etc. y que en este caso no ha sido tratado.

2.5 ESTUDIO DE DE LA CALIDAD DE LA LUZ DE LAS LFCS.

Se aborda este tema con la medición del flujo luminoso con la ayuda del luxómetro para luego con los datos medidos de potencia, evaluar la eficiencia de la lámpara. Por último se ubica este valor en las curvas mencionadas y se determina el grado de confort visual que se tiene.

Es importante mencionar que se ha tomado como guía las normas técnicas emitidas por el INEN que son usadas para certificar rangos de desempeño lumínico y etiquetado a nivel nacional.

La norma técnica ecuatoriana RTE INEN 036 expresa estándares para lámparas fluorescentes compactas en cuanto a eficacia o eficiencia lumínica, es decir describe rangos de potencia que corresponden a valores de eficiencia lumínica para lámparas fluorescentes con envolvente y sin envolvente.

Figura 2-25.Ejemplos de lámparas envoltura simple

Figura 2-26.Ejemplos de lámparas doble envoltura:

Tabla 2-8.Lámparas fluorescentes compactas con balasto integrado (Sin envolvente)[15]

Rangos de Potencia	Eficacia mínima (lm/W)
Menor o igual a 7 W	41
Mayor de 7 W y menor o igual a 10 W	45
Mayor de 10 W y menor o igual a 14 W	46
Mayor de 14 W y menor o igual a 18 W	48
Mayor de 18 W y menor o igual a 22 W	52
Mayor de 22 W	57

Tabla 2-9.Lámparas fluorescentes compactas con balasto integrado (Con envolvente)

Rangos de Potencia	Eficacia mínima (lm/W)
Menor o igual a 7 W	31
Mayor de 7 W y menor o igual a 10 W	35
Mayor de 10 W y menor o igual a 14 W	36
Mayor de 14 W y menor o igual a 18 W	41
Mayor de 18 W y menor o igual a 22 W	45
Mayor de 22 W	45

Equipo Utilizado

- Se realiza la prueba con la asistencia de un luxómetro Proskit Mt-4017.
- Una lámpara.
- Mesón de pruebas.

[15] Valores tomado de la norma emitida por REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 036:2008

2.5.1 PROCESO DE MEDICIÓN DE EL NIVEL DE ILUMINACIÓN (E).

Se trabaja con las mismas lámparas utilizadas en el estudio de la prueba anterior (características eléctricas), para llevar a cabo esta prueba se toma como guía la norma ecuatoriana NTE INEN-IEC 969 en la que se establece que "*Las lámparas deben haber sido envejecidas por un período de 100h de funcionamiento normal*" y se procede como se indica en la figura.

2.5.1.1 Datos Obtenidos.

Una vez realizada la medición para todas las lámparas se realiza una tabla resumen de los valores obtenidos. Estos valores servirán posteriormente para establecer el valor del Flujo luminoso.

La potencia de todas las lámparas es de 20 W.

Tabla 2-10.Medición del nivel de iluminación de las LFC`S

Marca	Tipo	Nivel de Iluminación (lux)
A	LFC	1770
B	LFC	1620
C	LFC	700
D	LFC	550
E	LFC	1790
F	LFC	850
G	LFC	1375

MEDICIÓN DEL NIVEL DE ILUMINACIÓN DE LAS LFC`S		
H	LFC	1560
I	LFC	1060
J	LFC	770
K	Incandescente	1660
L	Incandescente	1660

2.5.1.2 Cálculo del Flujo Luminoso.

Una vez obtenidos los valores de nivel de iluminación, se calcula el flujo aplicando la relación de flujo luminoso; que es igual al nivel de iluminación (lux) que incide sobre una superficie por cada metro cuadrado, para luego comparar este valor con el valor declarado por el fabricante.

$$\emptyset = E.S \qquad \text{(Ec. 1.1)}$$

$1\ lm = 1\ lux.m^2$

Donde:

ϕ: Flujo lumínico.

E: Nivel de iluminación (lux).

S: Superficie m^2.

Vale aclarar que se tomó como valor de S, el área del mesón de pruebas igual a un metro cuadrado.

Las mediciones se realizaron una vez que las lámparas funcionaron alrededor de cinco minutos que se considera el tiempo mínimo para que proporcionen la mayor cantidad de luz.

Se aplica la Ecuación 1.1.

Con los datos obtenidos del nivel de iluminación se determina el flujo lumínico, que se reúne en la siguiente tabla.

Tabla 2-11. Cálculo del flujo luminoso.

Marca	Tipo	Flujo Luminoso (lum)
A	LFC	910
B	LFC	973
C	LFC	700
D	LFC	305
E	LFC	661
F	LFC	850
G	LFC	973
H	LFC	1385
I	LFC	736
J	LFC	770
K	Incandescente	1705
L	Incandescente	1660

Análisis de Resultados.

Según los valores obtenidos en las mediciones se puede ver que existe una notable diferencia entre el flujo luminoso de las lámparas incandescentes con respecto al de las LFC, con lo que se evidencia la desproporción existente.

En la tabla 2-12 se muestran los datos obtenidos así como los datos que resultan de aplicar la norma NTE INEN-IEC 969. Según la norma aplicada el flujo luminoso mínimo medido en cualquier unidad de las muestras de lámparas fluorescentes compactas, inmediatamente después del periodo de envejecimiento (100 h), no debe ser menor al 90 % del flujo nominal declarado por el fabricante. En nuestro caso se evalúa el porcentaje de reducción del flujo luminoso.

Tabla 2-12. Porcentaje de reducción del flujo luminoso.

Marca	Tipo	Lumen Declarado	Lumen calculado	% de reducción del flujo luminoso
Marca A	LFC	NO	910	-
Marca B	LFC	1560	973	37
Marca C	LFC	1400	700	50
Marca D	LFC	1560	305	80
Marca E	LFC	1152	661	42
Marca F	LFC	NO	850	-
Marca G	LFC	1080	973	10
Marca H	LFC	1385	1385	-
Marca I	LFC	NO	736	-
Marca J	LFC	NO	770	-

Con los datos obtenidos, se puede verificar la diferencia del flujo luminoso que existe en los dos tipos de lámparas, por lo que se puede decir que la equivalencia que se hace entre una lámpara incandescente de 100W y una LFC de 20W no es comparable en lo que respecta al flujo luminoso, ya que en el mejor de los casos existe una diferencia de hasta 200 lumen pero en otros hay diferencias uy considerables. Lo que también indica por otra parte que en muchas de las muestras la información proporcionada por el fabricante no es real.

2.5.1.3 Calculo de la Eficiencia Luminosa.

Para la obtención del flujo luminoso se definen las magnitudes de la energía de entrada y la energía de salida para hacer la relación de la siguiente formula.

$$\eta = \frac{Flujo\ Luminoso}{Potencia\ electrica} = \frac{Lumen}{Watt} \qquad \text{(Ec 2.2)}$$

Para esto se utiliza los datos medidos de flujo luminoso calculado en la tabla anterior y se procede a calcular la eficiencia aplicando la relación ya descrita. El dato de eficiencia luminosa también es declarado por algunos fabricantes por lo que es posible también hacer una comparación entre estos valores.

Tras aplicar la relación lumen /watt la eficiencia luminosa que se obtiene se ubica en la columna denominada como calculada de la siguiente tabla. También Los datos proporcionados por el fabricante son ubicados dentro de esta en la columna con el nombre declarada. En el caso de que no se declarada simplemente dejamos el espacio con un NO.

Tabla 2-13. Comparación de las eficiencias luminosas declarada y publicada.

Marca	Tipo	Eficiencia declarada (lm/W)	Eficiencia calculada
Marca A	LFC	NO	NO
Marca B	LFC	51.5	50.98
Marca C	LFC	NO	NO
Marca D	LFC	55	56.82
Marca E	LFC	57	56.82
Marca F	LFC	NO	NO
Marca G	LFC	53	46.43
Marca H	LFC	60	52.15
Marca I	LFC	NO	NO
Marca J	LFC	55	44.89
Marca K	Incandescente	NO	NO
Marca L	Incandescente	14	16.85

Análisis de los resultados obtenidos.

Como se puede apreciar en la tabla existe una gran diferencia entre los valores de eficiencia lumínica de las lámparas incandescentes frente al de las LFC's tanto los valores declarados como los calculados.

Otro dato que se puede visualizar es la diferencia entre la eficiencia de las lámparas incandescentes en comparación con las fluorescentes notablemente poseen una eficiencia superior que de las lámpara incandescentes.

Se puede concluir que las lámparas fluorescente presentan un alto valor de eficiencia luminosa en comparación con las incandescentes, su rendimiento se traduce en un notable aprovechamiento de la energía en un porcentaje no menor del 75% en contraparte las luminarias incandescentes demuestran un bajo aprovechamiento de la energía consumida corroborando así que las lámparas incandescentes utilizan solo un 20% de la energía consumida para producir luz lo demás son perdidas disipadas en calor.

2.6 DISMINUCIÓN DE LA VIDA UTIL DE LA LAMPARA DEBIDO AL ENCENDIDO Y APAGADO.

El objetivo establecido en esta prueba es el de verificar la disminución del nivel de iluminación de lámpara debido a una cantidad de encendidos y apagados establecida.

Para realizar esta prueba se utiliza un tablero de pruebas que dispone de un interruptor con una boquilla para colocar la lámpara fluorescente compacta; un reloj, y un contador de eventos.

El proceso a seguir es de encender y apagar cada lámpara en intervalos de 1 minuto entre encendido y apagado.
El número de encendidos y apagados es de (10% de la lámpara de mayor vida útil) 100 veces.

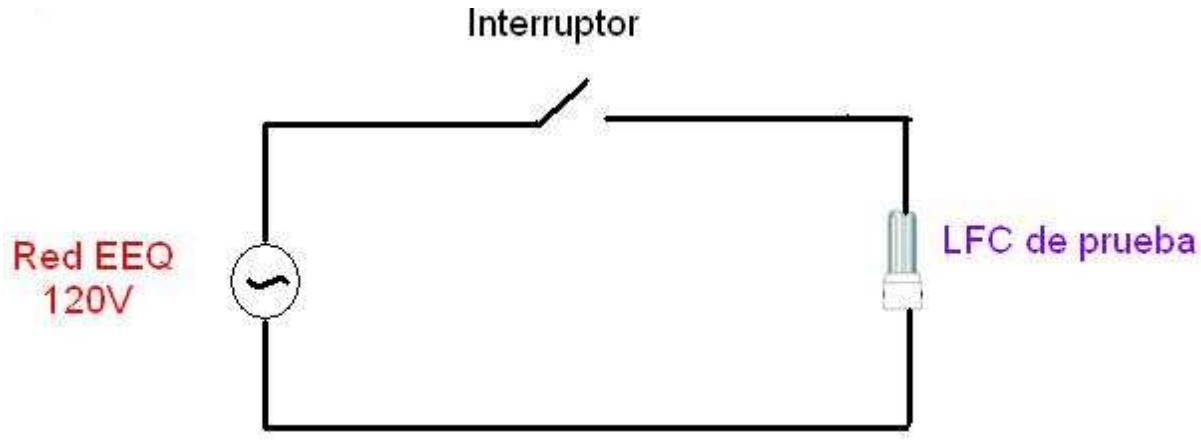


Figura 2-27. Circuito de prueba.

Como resultado obtenido se establece que después de los 100 encendidos, las lámparas de mejor desempeño lumínico presentan una disminución del 30% en su flujo luminoso, en tanto que las lámparas que no informan en su presentación los datos requeridos por la Norma INEN presentaron una reducción de mas del 40% en su flujo luminoso.

En este punto vale mencionar que las lámparas que pertenecen al grupo de menor valor monetario, se quemaron y por lo tanto no cumplen con su vida útil.

3 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS LFC`S.

3.1 INTRODUCCIÓN.

El presente capítulo se encuentra organizado en dos partes principales; un análisis económico y otro ambiental relacionado con la implementación de las lámparas fluorescentes compactas.

Para mejor comprensión del tema económico, se aborda el estudio iniciando con una revisión de los conceptos básicos de matemática financiera (tasa de descuento, valor actual del dinero, etc.) para después establecer el estudio utilizando el Costo Anualizado Total (CAT), al final en los anexos se presentan un estudio bien detallado sobre los demás indicadores económicos comparativos (Valor Actualizado Neto, el Período Simple de Repago, la Tasa Interna de Retorno y el Costo Anualizado Total).

Como segundo punto se analiza el tema del factor ambiental relacionado con este proyecto de sustitución, cabe recalcar que este tema está ligado del análisis económico debido a que el costo o ahorro económico está inmerso en el daño ecológico que pueda causar el proyecto de una sustitución masiva, por lo tanto no se podría concluir que existe un beneficio si existe de por medio un daño al medio ambiente.

3.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA.

El objetivo del análisis económico que se desarrolla en este capítulo, es el decidir la conveniencia, o no, de efectuar una inversión económica en este tipo de lámparas denominadas de tecnología eficiente; valiéndose para ello de los métodos de evaluación que se ajusten a este proyecto y que provean la información necesaria para dicha decisión.

Para realizar el cálculo completo de los distintos indicadores económicos se necesita, entre otros datos, conocer las inversiones, impuestos, considerar los costos directos (costo de la energía, costo de la potencia) y los indirectos (costo de operación & mantenimiento, etc.) y estimar la magnitud del ahorro de energía, la vida útil de las lámparas e incorporar un factor que relacione los beneficios a

producirse en el futuro (ahorro energético y otros) con la inversión efectuada en el presente.

Existen varios procedimientos para valorar la rentabilidad de los proyectos de inversión y diferentes perspectivas desde donde realizarlo: la de la distribuidora, la de la sociedad, la del usuario, etc.[16] Este capítulo se presenta un estudio visto desde la perspectiva del usuario como un proyecto de inversión en tecnología eficiente, con el objetivo de saber la inversión por persona que debe hacerse en este proyecto. Luego se hace un análisis somero desde el punto de vista de una distribuidora.

A continuación, se hace un repaso de temas financieros que aclaran los conceptos a tratarse en este estudio.

3.2.1 FUNDAMENTOS DE MATEMÁTICA FINANCIERA.

La determinación de la conveniencia, o no, de llevar a cabo una inversión en uso de lámparas fluorescentes compactas o saber cuál es la mejor alternativa entre un grupo de opciones, podría realizarse simplemente efectuando la sumatoria de los costos y los beneficios en que se incurre en un determinado proyecto, aceptándose si los últimos son mayores que los primeros. Si bien este procedimiento, caracterizado por su simpleza, se aplica frecuentemente, no contempla el hecho de que el dinero tiene distinto valor según se lo invierta (o se lo perciba) hoy o en el futuro.

Para efectuar una comparación entre la inversión actual y los beneficios desplazados en el tiempo se debe considerar un valor temporal del dinero. Un dólar recibido hoy es más valioso que un dólar a ser recibido dentro de, por ejemplo, seis meses o un año, porque el dólar que se tenga hoy puede ser invertido, por ejemplo, en un banco y acumular intereses durante todo ese tiempo. Viceversa, un dólar a recibirse en el futuro vale menos que uno en el presente, pues se pierde la oportunidad de invertirlo y obtener intereses.

[16] Texto tomado de “Análisis de Iluminación Eficiente”. Sepliarsky&Rossi. Buenos Aires. Argentina 2002.

3.2.1.1 Tasa de descuento.

Para tener en cuenta el valor temporal del dinero se utiliza la tasa de descuento, *i,* la cual puede interpretarse así:

$$\textit{Un dólar ahora vale } (1+i) \textit{ dólares en un año.} \qquad (1)$$

Técnicamente, esta tasa se denomina ‘tasa real de descuento’. En algunos casos puede considerarse una tasa que tenga en cuenta los efectos de la inflación, que se denomina ‘tasa nominal de descuento’.

Para el presente estudio, se considerará la tasa nominal de descuento a la que se denominará por facilidad simplemente tasa de descuento.

3.2.1.1.1 Consideraciones sobre la elección de la tasa de descuento.

Teniendo en cuenta que la tasa de descuento es una medida del valor temporal del dinero, se percibe que no es necesariamente la misma para distintos inversores. La tasa de descuento podrá estar influenciada o determinada por una amplia gama de factores que actuarán en forma distinta sobre los diferentes inversores, de provincia a provincia, de sector a sector, de empresa a empresa, etc. No existe una cifra definitiva de la tasa de descuento, la cual deberá determinarse según las circunstancias.

Para el sector privado no hay lineamientos apropiados para la evaluación de la tasa de descuento. Algunos expertos recomiendan para el comercio y la industria una tasa de descuento igual a la del costo de oportunidad del capital. Siendo el costo de oportunidad del capital la tasa de retorno de la mejor alternativa de inversión posible. Si una gran empresa p.ej. una industria siderúrgica — define una tasa de descuento para la evaluación de sus proyectos de inversión, puede utilizar la misma tasa para sus inversiones en el uso eficiente de la energía.

Para un consumidor pequeño, por ejemplo un usuario residencial, se puede considerar las oportunidades alternativas de inversión (plazo fijo en un banco, por ejemplo), y calcular una tasa de descuento. Para el pequeño inversor, actualmente se calcula la tasa de descuento entre 3% y 5%. El inversor puede utilizar otra cifra si tiene otras posibilidades de inversión.

Cualquiera sea el caso, para una inversión racional y rentable, el valor de la tasa de descuento, i, tiene que igualar o superar a la tasa de interés o equivalente de una inversión alternativa.

Ejemplo

Se supone el caso de un inversor que decide invertir en el uso eficiente de la energía. Si no lo invierte en este proyecto podría depositarlo en un banco. Según los datos proporcionados por el Banco Central en su página web, en el año 2011 la tasa de interés en una cuenta de plazo fijo fue de alrededor de 5% anual y la inflación anual hasta Agosto del 2011, 4.84%. En este caso, se considera la tasa de descuento nominal como 9% aproximadamente.

3.2.1.2 Vida útil del equipamiento y período de análisis.

3.2.1.2.1 Vida útil del equipamiento.

Es el tiempo (en años) durante el cual las instalaciones estarían en uso óptimo. La determinación de este valor resulta crítica en nuestro análisis, y para su obtención puede recurrirse a la experiencia en otros proyectos, fabricantes de equipos, y fuentes varias. En el caso particular de las lámparas fluorescentes compactas, la vida útil se expresa en horas de uso considerando una cierta cantidad de encendidos. Esta misma vida útil puede disminuir si se sobrepasa el número de encendidos recomendado por el fabricante.

3.2.1.2.2 Período de análisis.

Es el período de tiempo dentro del cual se realiza la evaluación. Puede o no coincidir con la vida útil del equipamiento y depende de la tasa de descuento. Para valores por ejemplo del 20%; no tiene sentido considerar ingresos y egresos más allá del año 20, dado que su valor actual sería casi nulo (ver Sec. 3.2.1.4 Valor actual). Para la evaluación de la eficiencia energética, suelen coincidir el período de análisis con la vida útil del equipamiento.

3.2.1.3 Flujo de caja.

El flujo de caja está constituido por los ingresos y egresos incurridos por el proyecto durante sucesivos intervalos a lo largo del período de análisis. Los intervalos de análisis pueden ser mensuales o anuales. Para los análisis a

efectuarse en este capítulo resulta inútil realizar grandes esfuerzos para precisar el momento durante el intervalo en que ocurren estos movimientos de caja. Comúnmente los ingresos y egresos que suceden dentro de un intervalo se agrupan y suman al comienzo, mitad o final del intervalo de análisis.

En este capítulo se asumirá la práctica más común que es la de considerarlos agrupados al final de cada intervalo. Para la evaluación de rentabilidad de inversiones de eficiencia energética, generalmente se trabaja con intervalos de análisis de un año, por lo cual la actualización de los valores de los movimientos se realizará utilizando tasas de descuento anuales.

3.2.1.4 Valor actual.

Una vez decidida la tasa de descuento se puede comparar una inversión en el presente con beneficios a producirse en el futuro introduciendo el concepto de valor actual. El valor actual es la medida del valor al día de hoy (año cero) de los costos y los beneficios a incurrir en el presente y en el futuro. Debido a la importancia de este concepto, se describirá con cierto detalle.

El valor actual, *P*, de un dólar que ingresa o sale de caja en el futuro puede calcularse multiplicándolo por un factor que dependerá de la tasa de descuento, *i*, y del año en que se produzca el movimiento.

$$P = F_n * \frac{1}{(1+i)^n} \qquad (2)$$

Donde: *P*: valor actual

n: años en el futuro

Fn: movimiento de caja n años en el futuro

i: tasa anual de descuento

3.2.1.4.1 Caso con movimientos de caja distintos.

Extendiendo estos conceptos, a partir de la expresión básica dada por la fórmula (2), se puede evaluar el valor actual del movimiento de caja a producirse en cualquier período en el futuro. En estos casos el valor actual, *P*, quedará

determinado por la suma de todos los valores actuales de los movimientos de caja, *Fn*, producidos en cada año, *n*.

$$P = \sum_n \frac{F_n}{(1+i)^n} \qquad (3)$$

3.2.1.4.2 Caso con movimientos de caja iguales.

En los ejemplos anteriores para el cálculo del valor actual se hizo necesaria la aplicación de las expresiones (2) y (3).

Ahora bien, como ocurre comúnmente en la práctica y en los ejemplos que daremos más adelante, para el caso en particular en que los valores de los movimientos de caja en los distintos años sean iguales y ocurran en forma regular durante un número N de intervalos (años), el valor actual se calcula con la siguiente expresión:

$$P = F * \frac{[(1+i)^N - 1]}{i*(1+i)^N} \qquad (4)$$

donde P es el valor presente de un flujo de caja de F anuales durante N años.

En algunas ocasiones como ya se verá, nos interesará realizar el proceso inverso, es decir, distribuir una cantidad de dinero P a lo largo de N años y conocer el valor de F.

Para estas situaciones la expresión a aplicar surge despejando de (4):

$$F = P * \left[\frac{i * (1+i)^N}{(1+i)^N - 1}\right] = P * FRC \qquad (5)$$

De donde se observa la expresión $FRC = \left[\frac{1*(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}\right]$ **(6)**

se la conoce como Factor de Recuperación del Capital y representa el valor anual F durante N años, equivalente a una cantidad P en el presente, a una tasa de descuento dada.

Dicho en otras palabras, si P es el capital invertido ahora, su recuperación requiere de un “ingreso” anual de F, dado por la Ec. (5).

Debido a que el factor de recuperación de capital depende de i y N, se lo representará como:

$$FRC = FRC\ (i, N)$$

La Tabla 2 muestra valores de FRC para distintas tasas de descuento (i) y para diferentes vidas útiles (N) del equipamiento que comprende la inversión.

Tabla 3-1.Factor de recupero de capital para valores de N de 3 a 15 años y tasas de descuento de 0.03 a 0.15.

INTERÉS	VIDA ÚTIL DEL EQUIPAMIENTO, N, AÑOS												
%	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	0.354	0.269	0.218	0.185	0.161	0.142	0.128	0.117	0.108	0.100	0.094	0.089	0.084
6	0.374	0.289	0.237	0.203	0.179	0.161	0.147	0.136	0.127	0.119	0.113	0.108	0.103
9	0.395	0.309	0.257	0.223	0.199	0.181	0.167	0.156	0.147	0.140	0.134	0.128	0.124
12	0.416	0.329	0.277	0.243	0.219	0.201	0.188	0.177	0.168	0.161	0.156	0.151	0.147
15	0.438	0.350	0.298	0.264	0.240	0.223	0.210	0.199	0.191	0.184	0.179	0.175	0.171

De la Tabla 2, para i = 0,12 y N= 6 años, se tiene que FRC (i, N)=0,243. Así, una inversión actual de $1.000 es equivalente al pago anual (F) de $243 durante 6 años para la tasa indicada.

3.2.2 INDICADORES COMPARATIVOS.

A partir de los conceptos de tasa de descuento y factor de recuperación de capital, se puede definir algunos indicadores útiles para evaluar la rentabilidad de las inversiones en el uso eficiente de energía. Estos indicadores permiten evaluar la conveniencia económica, o no, de utilizar tecnologías eficientes.

La elección del indicador a utilizar para realizar la evaluación dependerá del caso particular bajo estudio, de los datos disponibles, de la profundidad con que quiera procederse, etc. Los distintos indicadores se expresan en diversas unidades, que posibilitan varios enfoques en el análisis. En algunos estudios puede convenir, incluso, calcular más de un indicador para obtener una

apreciación más completa del problema analizado, por ejemplo para comparación con otra alternativa de inversión u otro propósito.

Generalmente las instalaciones de iluminación eficientes requieren una mayor inversión inicial debido a que este tipo de tecnologías son más caras. Sin embargo y a lo largo de la vida útil de la instalación, se verá una reducción en los costos operativos energéticos y posiblemente también del mantenimiento de las instalaciones. La evaluación económica consiste en apreciar si la mayor inversión adicional se justifica en términos de los ahorros futuros de energía y mantenimiento.

A continuación, se desarrolla las características del indicador seleccionado (Costo Anualizado Total) para realizar el estudio económico, la nomenclatura utilizada para realizar los cálculos y las razones para la selección de dicho indicador. Sin embargo en el anexo 1 se encuentra una revisión muy detallada de los otros indicadores para realizar la evaluación de la rentabilidad de proyectos.

3.2.2.1 Costo anualizado total (CAT).

Los proyectos de iluminación eficiente requieren, usualmente, de una inversión inicial y de las inversiones necesarias para reponer aquellos elementos con menor vida útil que el resto de la instalación. Generalmente se tiene que considerar la reposición de lámparas y equipos auxiliares durante la vida útil de las luminarias y elementos de fijación (brazos, columnas, etc.) que comprenden la instalación. También suelen haber varias combinaciones de lámparas, balastos, luminarias, etc. para llegar a una instalación completa. La comparación de las alternativas y la evaluación económica de la óptima es fácil utilizando el costo anualizado total.

El costo anualizado total (CAT) es la suma del valor anualizado de las inversiones necesarias y de los costos de operación y mantenimiento de la instalación.

Para una comparación simple entre una tecnología convencional y una eficiente, ambas con la misma vida útil (L años) se calcula el CAT *para cada alternativa.*

Para la alternativa convencional, el CAT está dado por:

$$CATC = CC * FRC(i, L) + PE * EC + CMC$$

utilizando la misma notación que en el subcapítulo anterior.

Para la alternativa eficiente, el CAT está dado por:

$$CATE = CE * FRC(i, L) + PE * EE + CME$$

La alternativa eficiente es económicamente rentable, cuando CATE es menor a CATC.

Tal como se señaló, este método puede aplicarse para comparaciones entre más de dos alternativas, cada una compuesta por distintos elementos con distintas vida útil.

Las *inversiones necesarias* corresponderán a cada alternativa analizada (l) y dentro de cada alternativa los distintos elementos, a saber: instalación, lámparas, equipos auxiliares (balastos, etc.), etc. A cada elemento puede identificárselo con el subíndice (j) y tendrá a su vez una vida útil característica N_j. El valor anualizado de las inversiones es la suma de valor anualizado de cada componente:

$$Costo\ anualizado\ inversiones\ (alternativa\ l) = \sum_{i=1}^{L} I_{i,j} * FRC(i, N_{i,j}) \qquad (13)$$

donde,

l: subíndice que señala alternativa l.

j: subíndice aplicado a los distintos elementos que componen la alternativa l: lámparas, luminarias, balastos, etc.

$I_{l,\,j}$: costo del elemento j correspondiente a la alternativa l.

FRC (i, Nj): Factor de recuperación de capital, correspondiente a cada elemento j, teniendo en cuenta su vida útil Nj y considerando una tasa de descuento i.

Los *costos de operación y mantenimiento* (O&M) se pueden computar fácilmente en forma anual, por lo que no es necesario anualizarlos, la expresión para calcularlos se muestra en la expresión (14):

$$Costo\ anual\ O\&M = \sum_{k=1}^{K} O\&M_{l,k} \qquad (14)$$

donde:

l: subíndice que señala alternativa *l*.

k: subíndice aplicado a los distintos elementos que componen el costo de O&M. Energía, potencia, etc.

$O\&M_{l,k}$: costos *k* de operación y mantenimiento, correspondientes a la alternativa *l*.

Finalmente sumando (13) y (14) se obtiene la fórmula (15) que permite computar el CAT:

$$CAT_l = \sum_{l=1}^{L} I_{l,j} * FRC(i, N_{l,j}) + \sum_{k=1}^{K} O\&M_{l,k} \qquad (15)$$

donde:

CAT_j: Costo anualizado total de la alternativa *l*.

Con los indicadores anteriores el conjunto de alternativas (si éstas eran más que dos) debían ser ordenadas apropiadamente por inversión requerida y energía ahorrada, y comparadas entre pares adyacentes, empezando con las alternativas con menores requerimientos de capital. Este proceso se olvida a menudo con el resultado de seleccionar inversiones no económicas.

En el caso del CAT, a diferencia de los demás indicadores anteriores, la evaluación se hace por cada alternativa y no comparando sólo entre dos distintas. Esto simplifica el proceso de análisis cuando haya varias alternativas. La alternativa más conveniente quedará determinada por aquella que tenga el CAT menor.

En el caso de este indicador, deberá colocarse especial atención en la obtención de los $I_{l,j}$: costo del elemento *j* correspondiente a la alternativa *l* que **no** resultan de hacer la diferencia entre dos alternativas (ver fórmula (6)) y de los valores

$O\&M_{l,\,k}$: costos *k* de operación y mantenimiento, correspondientes a la alternativa *l*, que tampoco surgen como una diferencia (ver fórmula (7)).

Este indicador es ideal para establecer un orden entre muchas alternativas, situación muy común en proyectos de iluminación eficiente. El CAT, adicionalmente, proporciona otras ventajas: se puede adaptar la metodología con facilidad para comparar alternativas o sistemas que incluyan componentes de diferente vida útil y b) es posible también comparar la utilidad de reemplazar un aparato todavía con vida por otro más eficiente el llamado *"retiro prematuro"* de un aparato en funcionamiento. Si bien es cierto que los otros índices -VAN, TIR- también pueden ser adaptados para estos casos, su cálculo se hace mucho más complicado, fundamentalmente en aquellos casos en donde se tienen muchas opciones para analizar.

3.2.3 EJEMPLOS DE ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DE LA ILUMINACIÓN EFICIENTE EN EL SECTOR RESIDENCIAL.

En los ejemplos que se darán a continuación, deberán considerarse una serie de elementos importantes a la hora de definir apropiadamente las características de las inversiones.

- Deberá recordarse que los resultados obtenidos en una determinada evaluación dependen fuertemente de los costos de operación y mantenimiento, por lo que deberá evitarse extender las conclusiones obtenidas para una determinada localidad hacia otras. Una medida o proyecto inconveniente en la ciudad, por ejemplo, puede resultar provechoso en otra región, en donde los costos por potencia y energía sean mayores, o viceversa. Asimismo, deberá considerarse el tema del momento (año) en que fue realizada la evaluación los costos de operación y mantenimiento como los de la inversión inicial, que en la actualidad varían sensiblemente año tras año.

- Vida útil de la instalación y componentes.- Si bien la vida de los componentes es de varios años, extendiéndose en el caso de las lámparas cada vez más, puede ocurrir que la instalación difícilmente se mantenga por un lapso de 20 años como lo indica la vida de alguno de los elementos

que la componen. El número de encendidos diarios es también un factor que determina la vida útil en las lámparas de descarga. A mayor número de encendidos, menor vida útil. Por lo tanto si bien una instalación, por ejemplo de pasillos con automático, puede estar encendida un número de horas diarias que haría conveniente el reemplazo de incandescentes por LFC`S, no se recomienda la medida (al menos con las tecnologías actuales) debido al deterioro que causa el frecuente encendido y apagado sobre las lámparas.

En lo que respecta al sector residencial, la opción tecnológica de iluminación eficiente más común es el reemplazo de una lámpara incandescente por una lámpara fluorescente compacta (LFC). Estas lámparas a rosca incorporan el balasto, por lo cual pueden ser instaladas en los mismos portalámparas que colocan a las incandescentes.

Las LFC tienen una vida útil declarada por el fabricante de entre las 3.000 y 10.000 horas. Hay modelos que no alcanzan la vida declarada. Las normas demandan una vida declarada de 6.000 horas como mínimo[17], junto con otras especificaciones para asegurar la calidad, seguridad y eficiencia de las LFC.

En el estudio realizado, se expresan los precios con los valores vigentes en los años 2010-2011.

Se considera el reemplazo de una lámpara incandescente de 60 W por una LFC de 20 w en un ambiente donde se la halla encendida un promedio de 5h diarias (2 horas en la mañana y 3 horas en la noche).

El precio promedio de la lámpara incandescente es de $0.80, y el de la LFC de 20 W (equivalente) de $5[18].

La vida útil de la lámpara incandescente es de 1 000 h y el promedio de vida útil de la LFC 6 000 h[19].

Tomamos como precio de la energía en el país, la tarifa que es de $0,09 por kWh.

[17] La vida media de una LFC no debe ser menor a 6000 horas (Norma RTE INEN 036).
[18] Este valor se aplica a lámparas que cumplen satisfactoriamente las pruebas de las normas INEN.
[19] Se establece este valor de vida útil medio, obtenido de las pruebas realizadas en laboratorio para un valor establecido por el fabricante de 8000 h con 4 horas diarias de uso.

La tasa de descuento utilizada será del 10% (*i* = 0,1)

3.2.3.1 Cálculo de la vida útil de las lámparas y el factor de recuperación del capital (FRC).

La vida útil de la LFC (con 5 horas de encendido por día) es:

$$N = \frac{6000\,(h)}{[5\left(\frac{h}{día}\right) * 365\left(\frac{días}{año}\right)]} = 3\ años$$

Análogamente, para la lámpara incandescente, la vida útil será de 0.5 años (6 meses).

$$N = \frac{1000\,(h)}{[5\left(\frac{h}{día}\right) * 365\left(\frac{días}{año}\right)]} = 0.5\ años$$

El FRC está dado por la ecuación (6):

Para la lámpara incandescente, (vida útil) N = 0.5 años y considerando una tasa de descuento real de i= 0,1 se obtiene:

$$FRC = \left[\frac{0.1 * (1+0.1)^{0.5}}{(1+0.1)^{0.5} - 1}\right]$$

FRC (incandescente) = 2.14

De la misma manera: FRC (LFC) = 0,40

3.2.3.2 Análisis mediante el Costo Anualizado Total (CAT).

Según la explicación efectuada en el numeral 3.2.2.1, a continuación se realiza el cálculo económico para los dos tipos de luminaria: la LFC y la incandescente.

Para la lámpara incandescente según el cálculo anterior, la vida útil (N = 0.5 años), considerando una tasa de descuento de i= 10% y

FRC (incandescente) = 2.14

CAT (incandescente)= $0.80*2.14 $/año + 0,09 $/kWh* 109.5 kWh/año = $ 11.56

Para la lámpara fluorescente compacta, N = 3 años; la tasa de descuento es la misma, por lo cual,

FRC (LFC) = 0,40

CAT (LFC) = $ 5 * 0,40 / año + 0,09 $/kWh * 36.5 kWh/año = $ 5.30

Es decir, el costo anual de inversión y del pago del consumo energético de la lámpara incandescente es de $11.56; mientras que para la lámpara fluorescente compacta es de $ 5.30 En consecuencia, bajo las suposiciones del ejemplo, el uso de la lámpara fluorescente compacta es desde el punto de vista económico la alternativa más conveniente.[20]

3.2.3.3 Parámetros que influyen la rentabilidad.

La rentabilidad del proyecto de sustitución depende de varios aspectos como por ejemplo de las *horas de encendido* y las *horas de vida útil* de las incandescentes y de la LFC, *el precio de cada lámpara*, *el número de encendidos, la tarifa eléctrica* y la *tasa de descuento*. Y en ambos casos aspectos como la calidad del servicio y la calidad de las instalaciones eléctricas residenciales; estos últimos se los considera fuera del estudio debido a que son factores externos; es decir en el caso de las instalaciones deben estar realizadas correctamente y en el servicio recibido corre por cuenta de la distribuidora.

La dependencia de la rentabilidad sobre estos parámetros se ilustra a continuación.

Se analiza el caso de la sustitución de una incandescente de 60 W por una LFC de 20 W[21] y se establecen dos casos de valores tarifarios de energía.

---

[20]Se considera este valor calculado en instalaciones eléctricas óptimas de las viviendas realizadas por profesionales y apegándose a las normas requeridas ya que es un factor que incide en la vida útil.

[21] Se escogió el valor de 60 w debido a que es un valor promedio de potencia de focos incandescentes (60w a 100w) usados en su mayoría en los hogares ecuatorianos.

Típicamente, los fabricantes de las LFC han reclamado, mediante información en el envase de sus productos que la relación de potencia entre una incandescente y una LFC es de cinco a uno, es decir se puede reemplazar una incandescente de 100 W con una LFC de 20 W. Mediciones en condiciones reales de uso han revelado que una substitución con esta relación de potencia, la iluminancia con las LFC es notablemente inferior a aquella de la incandescente, generando rechazo por parte del usuario. Por ello, el Programa ELI en Argentina recomienda una relación de potencia de cuatro a uno. Atento al mismo, la normativa ELI a nivel mundial incluye exigencias respecto a las equivalencias de potencia entre las LFC y las incandescentes.

Para este estudio, se parte con los siguientes valores:

Vida útil de lámpara incandescente 1000 horas;

Precio de la lámpara incandescente $0,80;

Tasa de descuento real 10%, o sea 0,10 anual.

Caso1. Tarifa eléctrica de 0, 08 $/kWh.

Se considera primero una tarifa eléctrica de $0,08 por kWh. Es decir, el usuario paga 8 ctvs por cada kWh de consumo, incluyendo todos los impuestos. De esta manera, el cálculo se refiere a la perspectiva del usuario.

La rentabilidad en el uso de la LFC se aumenta con las horas de encendido diario. Para el presente estudio se considera una lámpara con sólo una hora de encendido.

En estas circunstancias, una incandescente de $ 0,80 que dura 1000 horas de encendido duraría 2,74 años.

$$N = \frac{1000\ h}{1\frac{h}{dia} * 365\frac{dias}{año}} = 2.74\ años$$

El costo anualizado de compra (considerando la tasa de descuento de 10%) es $0,35. Es decir el precio inicial de $0,80 es equivalente a un pago anual de $0,35 durante la vida útil de la lámpara (2,74 años).

$$FRC = \left[\frac{0.1 * (1+0.1)^{2.74}}{(1+0.1)^{2.74} - 1}\right] = 0.44$$

Costo anualizado = CC * FRC

Costo anualizado = 0.80 * 0.44 = <u>$ 0.35.</u>

Cada año, esta lámpara consume 60 * 365 wat horas de electricidad, o sea 21.9 kWh, por un costo de $1.75.

EE = 0.06 kW * 365 días/año * 1 hora/día = 21.9 kWh/año.

Costo = 21.9 kWh/año * 0.08 = $1.75

De esta manera, el costo anualizado de compra y operación total de la lámpara está dado por la suma de $0.35 y $1.75, es decir $2.10.

La pregunta planteada es: ¿Cuál es el precio máximo que el usuario puede pagar para una LFC que provee la misma cantidad de luz que la incandescente de 60 W? A este precio "máximo", debe igualarse el costo anualizado total de utilizar la incandescente y la LFC; en este caso $2.10.

Se ha establecido que una LFC de 20 W provee la misma cantidad de luz que una lámpara incandescente de 60 W. El costo anual de electricidad de la LFC, suponiendo una hora de encendido, es $0,58.

Costo anual = 0.02 kW* 365 días/año*1 hora/día*0.08 $/kWh = $ 0.58

Para igualar el costo anualizado total de la incandescente, el costo anualizado de la compra de la LFC debe ser $2,10 - $0,58, es decir $1,52.

Para encontrar este valor se establece la pregunta: ¿Cuál es el precio de la LFC equivalente a este costo anual? Dicho precio depende de la vida útil de la LFC.

Se considera el valor establecido por las normas y obtenido en laboratorio mediante pruebas que es con una vida útil de 6 000 horas.

$$N = \frac{6000\ h}{1\frac{h}{día} * 365\frac{días}{año}} = 16.4\ años.$$

$$FRC = \frac{0.1 * (1+0.1)^{16.4}}{(1+0.1)^{16.4} - 1} = 0.1265$$

De la ecuación CAT = CE * FRC despejamos el costo de la LFC (CE).

$$CE = \frac{\$1.52}{0.1265} = \$12.02$$

Por lo tanto se concluye que esta LFC manteniéndola encendida una hora diaria duraría 16,4 años y el precio máximo a pagar es $12.02.

Tabla 3-1.Cálculo de los precios de las LFC equiparando el costo de la incandescente.

HORAS	VIDA (N)	FRC	Costo Anualizado	PE*EC	CAT	Precios
3000	16.44	0.13	1.07	0.44	1.51	8.48
5000	27.40	0.11	1.07	0.44	1.51	9.93
6000	32.88	0.10	1.07	0.44	1.51	10.25
8000	43.84	0.10	1.07	0.44	1.51	10.56
10000	54.79	0.10	1.07	0.44	1.51	10.66
15000	82.19	0.10	1.07	0.44	1.51	10.72
1000	5.48	0.25	0.20	1.31	1.51	0.80

A continuación se grafica el precio máximo a pagar para una LFC con encendido diario de una hora, según la vida útil de la misma.

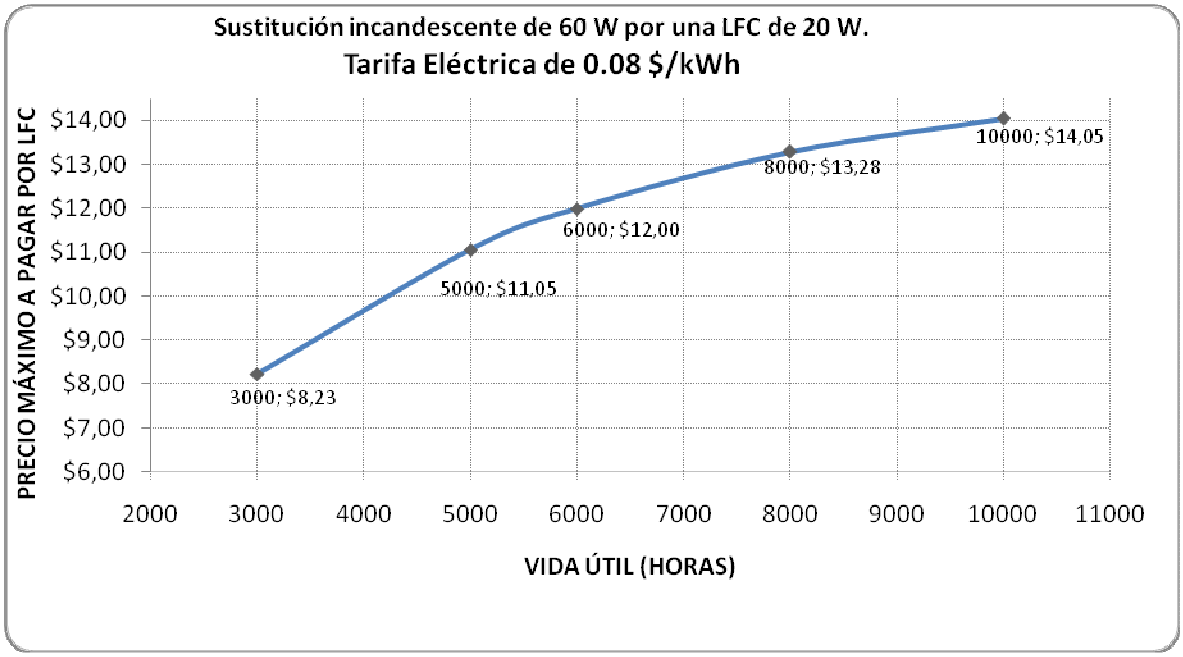


Figura 3-1.El precio máximo que el usuario puede pagar para una LFC de 20W que reemplaza una incandescente de 60 W, con una hora de encendido diario, como función de la vida útil de la LFC. Tarifa: 0,08 $/kWh.

Al precio máximo calculado y graficado arriba, al usuario no le es atractiva la substitución de lámparas. Se verán ahorros en la medida de que el precio de la LFC es menor que el precio máximo calculado. También se verán ahorros positivos con encendidos mayores a una hora por día.

Por ejemplo, si una LFC de 6.000 horas cuesta $5, el ahorro neto (valor presente) sería $7,02. ($12.02 – $5) Si otra lámpara fluorescente compacta de 10.000 horas costara $10, el ahorro neto se reduciría a $4,05.

El ahorro neto también aumenta con las horas de encendido diario. Tomando los precios máximos calculados, la gráfica abajo ilustra el costo anualizado total como función de horas de encendido de una incandescente y LFC con distintas vida útil.

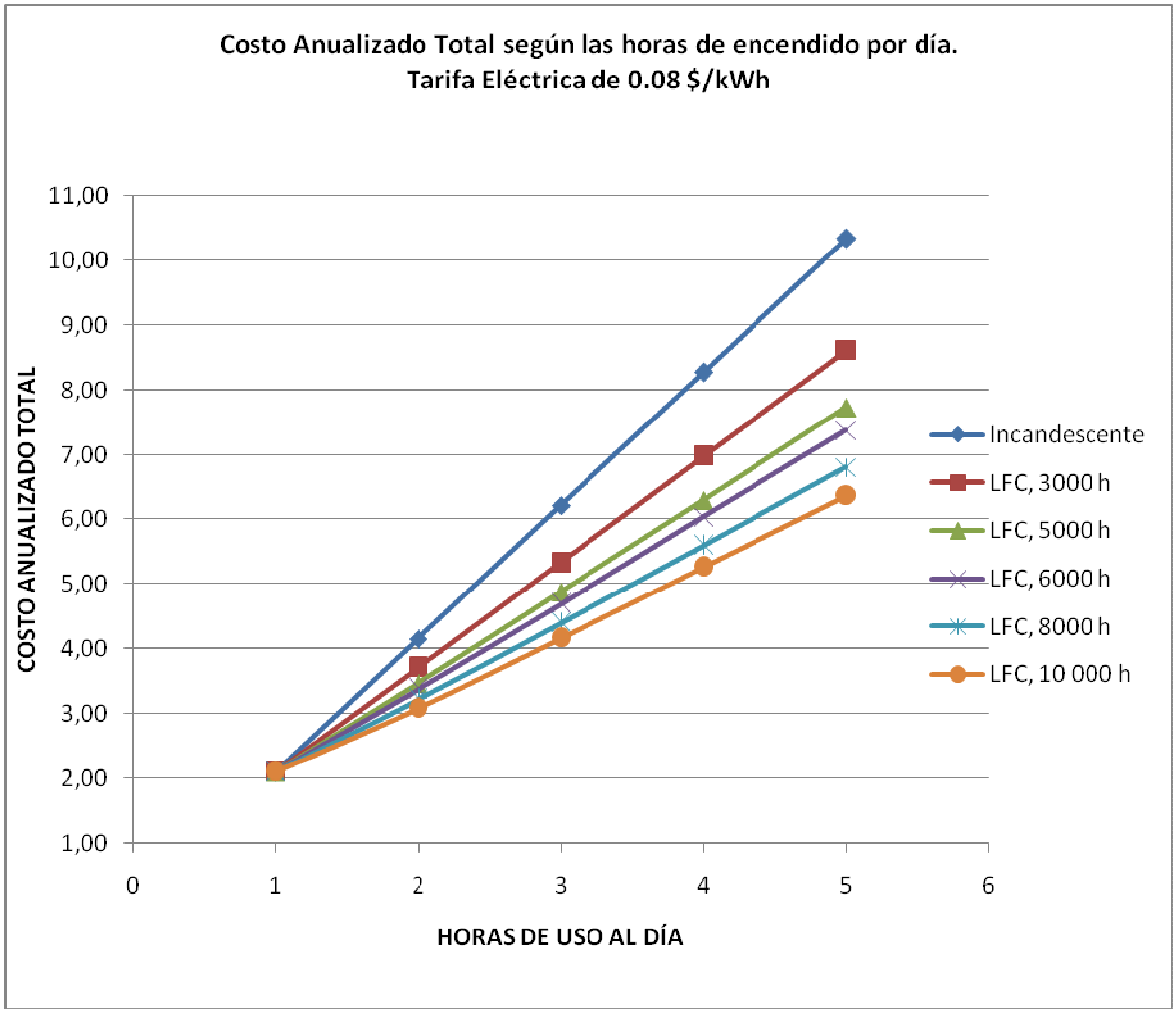


Figura 3-2. Costo anualizado total para la compra y operación de LFC, según horas de encendido diario. Los precios corresponden a la gráfica anterior.

3.2.3.3.1 Tarifa eléctrica de $0,12/kWh.

Se repite los cálculos para una tarifa de 0,12 $/kWh. Las tarifas en los dos ejemplos corresponden aproximadamente a las tarifas residenciales aplicadas en los últimos 5 años, por lo tanto, se concluye que mientras más alta sea la tarifa residencial; las LFC son aún más rentables.

En este caso, se considera un encendido diario de 0,5 horas por día, se ha establecido este valor debido a que la LFC es más rentable con una tarifa mayor como se concluyó anteriormente. Se determinó el valor de 0,5 horas para igualar el precio máximo a pagar para LFC de 10.000 horas.

Las demás suposiciones se mantienen sin cambios. A continuación se presenta el precio máximo a pagar por una LFC, según la vida útil de las mismas.

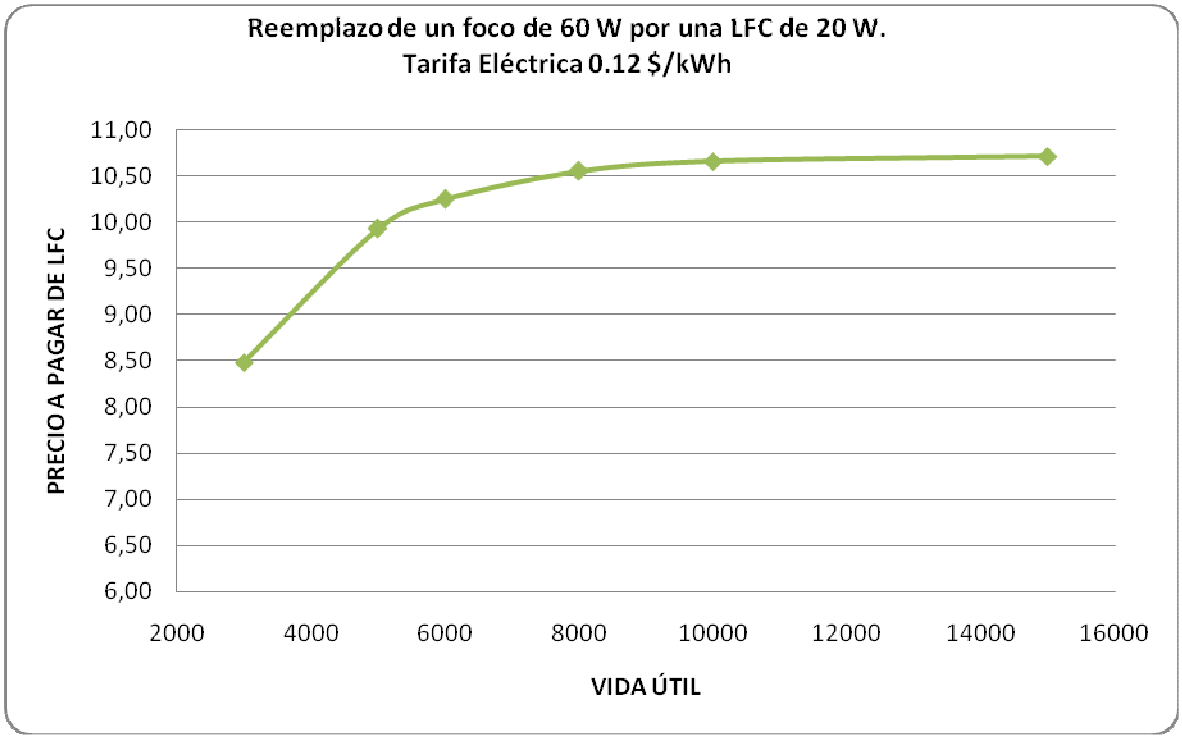


Figura 3-3. El precio máximo que el usuario puede pagar para una LFC de 20W que reemplaza una incandescente de 75W, con 0,5 hora de encendido diario, como función de la vida útil de la LFC. (Tarifa: $0,1 2/kWh)

Finalmente en las figuras 1 y 3 indican precios máximos a pagar para LFC de distintas vida útil correspondientes a dos tarifas eléctricas. Se observa una saturación del precio máximo a pagar para LFC de larga vida. El precio de LFC en el mercado nacional demuestra una variación mayor con respecto a la vida útil. Aquellas de larga vida (10.000 horas o más) superan los $10 por unidad, mientras que modelos con vida de 6000 horas se comercializan por alrededor de $5. Para el tiempo de encendido de estos ejemplos, las LFC de larga vida no son rentables, mientras que las de 6000 rinden ahorros netos; así mismos aquellas LFC con valores de 3 000h de vida útil no presentan gran rentabilidad frente a las incandescentes adicionando que incumplen las normas que establece el INEN.

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) exige una vida útil mínima de 6.000 horas, un valor que parece razonable, desde una perspectiva económica, considerando los costos y beneficios de las LFC como función de la vida útil.

3.2.3.4 Vida útil de las LFC.

La vida útil de la mayoría de, las lámparas fluorescentes compactas depende de la cantidad de encendidos. (Un fabricante de lámparas declara que su línea larga vida de LFC resiste cientos de miles de encendidos.)

Algunos fabricantes definen la vida nominal de lámparas con ciclos de encendido de 4 horas por ejemplo. Sin embargo, en un estudio realizado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, determina que la mayoría de viviendas en el país tienen varios encendidos con lapsos de menos de 3 horas entre cada uno. Por ello, la vida útil de las lámparas fluorescentes compactas se reduciría substancialmente respecto al valor nominal.

En los ejemplos de cálculos económicos, se tomaron la vida útil de las LFC igual que su valor nominal, aun considerando una hora o menos de encendido por día.

Por ejemplo, una LFC de vida nominal de 6.000 h utilizada una hora por día con un solo encendido (y apagado) por día duraría 6.000 días (según la vida útil); suponiendo que la LFC resiste su vida nominal con el doble de encendidos (12000). En este caso, la vida útil estará determinada por el primer criterio, es decir 6.000 días.

La misma LFC con una hora de uso en cada encendido, y con cinco encendidos por día tendría 30.000 encendidos en 6.000 horas o 6000 días. En este caso la vida útil se acortará por la cantidad de encendidos, es decir duraría 12.000 encendidos equivalente a 2.400 días (6.6 años).

Y según se aumenta las horas de uso; la vida útil de las lámparas disminuye considerablemente con el número de encendidos (aproximadamente 66.7% en lámparas de baja eficiencia). Por ejemplo con dos horas de uso, y cinco encendidos por día disminuye su vida útil a la mitad que es 3 años aproximadamente.

3.2.4 SECTOR COMERCIAL Y PÚBLICO.

En este sector se hace necesario puntualizar que abarca diversidad de edificios con distintas funciones, por lo cual las opciones tecnológicas de iluminación eficientes son múltiples. Se generaliza el uso de los tubos fluorescentes como opción predominante en cuanto a opciones de tecnologías de iluminación eficiente. Para cubrir este tema se presenta un estudio acerca de "Incorporación de la eficiencia y sistemas de ahorro de energía" realizado en el edificio de la EEQ ubicado en la Avenida 10 de Agosto y Mariana de Jesús.

El tema fue estudiado por la Ingeniera Verenice Taimal, y los resultados que presentan provienen de su informe[22]. Las opciones técnicas siguen válidas y los valores económicos corresponden al año 2008. Por tal motivo, el ejemplo es ilustrativo y las conclusiones son muy valederas.

Situación actual. El edificio cuenta con tubos fluorescentes lineales T12 con balastos electromagnéticos comunes colocados en luminarias sencillas sin ningún tipo de control del flujo luminoso.

Equipos alternativos considerados. La idea del análisis económico es comparar las distintas alternativas para determinar la combinación óptima que cumplen con los requerimientos luminotécnicos. La luminaria elegida es el tubo T8 con capa trifósforo que aumenta su eficiencia y reduce su diámetro además de su mejor rendimiento lumínico (93 lm/W). Se eligió una luminaria cuya potencia sea de 32 W y 20 000h de vida útil.

Balastos. Se considera balastos electrónicos que cumplen con normas de calidad y seguridad con lo cual se reduce la demanda y energía entre un 20% y 25%.

Se sugiere el reemplazo de dos tubos fluorescentes con reflector de baja eficiencia y balastro magnético normal por un tubo fluorescente, un reflector eficiente y un balastro electrónico,

Para determinar si esta opción tecnológica es rentable se calcula VAN, TIR, Costo Beneficio C/B y el tiempo en que se recupera la inversión.

---

[22] V. Taimal, 2008. "Incorporación de la eficiencia y sistemas de ahorro de energía en el edificio Mariana de Jesús y 10 de Agosto de la EEQ", Carrera de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Se utiliza tasa de descuento del 12% anual y 1% mensual y la vida útil del proyecto de 15 años.

De acuerdo al cálculo realizado de ahorro de energía, en el rediseño de iluminación se tiene un ahorro mensual por consumo y demanda.

Tabla 3-2.Período de recuperación de rediseño de iluminación.

Alternativa de ahorro	Inversión Incremental (USD)	kWh / mes Reducidos	Ingresos por kWh y/o kW Reducidos (USD)	Tiempo de Recuperación Inversión (meses)
Rediseño de Iluminación	9 196	5 722.81	597.27	16

De acuerdo a los valores de flujos calculados se obtiene:

Tabla 3-3.Rentabilidad del rediseño de iluminación.

Métodos de evaluación	Datos Obtenidos
VAN	2 269.24
TIR	3.29%
B/C	1.39

VAN es mayor que cero significará que existe una ganancia, con base en una cierta tasa de interés del i=1% mensual.

Si TIR > i Significa que el proyecto tiene una rentabilidad asociada mayor que la tasa de mercado (tasa de descuento del 1% mensual), por lo tanto es más conveniente.

B/C > 1 implica que los ingresos son mayores que los egresos, entonces el proyecto es aconsejable.

3.2.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA ILUMINACIÓN EFICIENTE PARA LOS CLIENTES RESIDENCIALES.

El presente análisis se centra en determinar el ahorro que se produce en la potencia demandada para una distribuidora. Para ello se utiliza los precios con que se trabajó en el ejemplo anterior (Análisis para el sector residencial) y luego se hace un estudio de una vivienda promedio y su consumo mensual, se determina el costo económico.

Se trabaja con un voltaje monofásico (120V) y el tiempo de uso de las lámparas es de 5 horas distribuidas entre la mañana y la noche que se considera las horas promedio de uso de iluminación en todo el país. La curva de demanda no presenta mayor variación durante el año.

Se realiza el cálculo del ahorro de energía y potencia demandada usando la tarifa referencial para determinar el valor monetario que representa la potencia y energía que se ha dejado de usar. Se muestra la variación de la demanda de potencia en una vivienda tras realizar dicha sustitución y de paso se justifique el uso del factor de coincidencia.

3.2.6 CÁLCULO DEL AHORRO DE POTENCIA DEMANDADA.

Un tema muy importante es considerar un factor de coincidencia dado que todos los usuarios no usarán al mismo tiempo las lámparas, similar al factor cuando se realiza diseño de las instalaciones eléctricas de una vivienda.

Con el fin de mostrar el comportamiento de la demanda antes y después de la sustitución toma como ejemplo una vivienda típica (1 piso distribuido en sala, comedor, cocina, estudio y dos dormitorios además de un baño) de la cual se analiza los circuitos de iluminación.

Los circuitos mencionados se muestras como resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3-4. Distribución de iluminación en la vivienda.

Nº de circuito	Aplicación	Ambiente
1	Iluminación	Sala Comedor Cocina Baño
2	Iluminación	Dormitorio 1 Dormitorio 2 Patio

Tabla 3-5. Cuadro de cargas y demanda de una vivienda

Circuito 1	**Tipo**	**Factor de coincidencia**	**Carga Instalada (W)**	**Demanda (W)**
1	Focos 1	0.8	220	176
2	Focos 2	0.8	300	240
TOTAL				416

Demanda máxima total = 416W

Considerando un factor de simultaneidad igual a 0.7 entre circuitos tenemos que:

Demanda máxima total (simultánea) 416 w x 0.7 = 291. 2 (w)

Finalmente se toma en cuenta la existencia de cargas inductivas en la vivienda por lo que se considera un factor de potencia igual a 0.9.

Demanda máxima total. = 291.2 x 0,9 (w) = 262.08 VA

Como siguiente pasos se realiza el cálculo de la demanda tomando en cuenta la sustitución de los focos incandescentes por las LFC`S.

Tabla 3-6. Cuadro de cargas con LFC`S

Circuito 1	Tipo	Factor de coincidencia	Carga Instalada (W)	Demanda (W)
1	LFC 1	0.8	80	64
2	LFC 2	0.8	60	48
TOTAL				112

Para este caso se tiene que: Demanda máxima total 112 (w)

Al considerar un factor de simultaneidad de 0.7 entre circuitos tenemos que nuestra demanda máximas es

Demanda máxima total (Simultánea) = 112 x 0.7 = 78.4 (w)

Considerando un factor de potencia igual a 0.9, la demanda máxima es.

Demanda máxima total. = 78.4 x 0,9 = 70.56 (VA)

Se puede apreciar que existe una reducción del 26.9 % en cuanto a la demanda de potencia de potencia y nos permite visualizar el comportamiento de la misma después de realizar la sustitución de las lámparas incandescentes por las lámpara fluorescentes compactas. Estos cálculos se obtienen considerando los factores de coincidencia.

Por lo tanto se podría hacer una aproximación de este análisis para el orden macro (ciudad) y serviría para tener una aproximación muy superficial de una idea de la tendencia de la demanda. Para tener una idea más certera se necesita los datos de demanda tomados en tiempo real (demanda vs tiempo) de una empresa distribuidora y con los datos exactos aproximar a una función y observar la tendencia.

3.2.7 CÁLCULO DEL AHORRO DE ENERGÍA DEMANDADA.

Siguiendo la metodología descrita para determinar el ahorro de potencia demandada; se calcula el ahorro de la energía consumida con los datos de la vivienda propuesta anteriormente.

Tabla 3-7. Consumo de energía para una vivienda común y costo económico.

Artefacto	Potencia (W)	Potencia (kW)	Horas de uso	Días de uso al mes	Total kWh/mes	Costo mensual
Sala	100	0.1	5	30	15	1.2
Comedor	60	0.06	5	30	9	0.72
Cocina	60	0.06	5	30	9	0.72
Baño	60	0.06	3	30	5.4	0.432
Fachada o patio	100	0.1	11	30	33	2.64
Dormitorio 1	100	0.1	4	30	12	0.96
Dormitorio 2	100	0.1	3	30	9	0.72
CONSUMO TOTAL ENERGÍA kWh					92.4	
COSTO MENSUAL USD						7.392

Este análisis sirve para aproximar lo que sucedería en una vivienda común antes y después de la sustitución. Se puede concluir claramente que el consumo mensual de utilizar diariamente los equipos, artefactos eléctricos además de la iluminación incandescente según las horas de uso diario expuesto, es de 92.4 kWh que representa un costo económico de $ 7.392 para una tarifa de $ 0.08.

Tabla 3-8. Cálculo del consumo de energía cuando se ha realizado la sustitución de las LFC`s.

Artefacto	Potencia (W)	Potencia (kW)	Horas de uso	Días de uso al mes	Total kWh/mes	Costo mensual
Sala	20	0.02	5	30	3	0.24
Comedor	20	0.02	5	30	3	0.24
Cocina	20	0.02	5	30	3	0.24
Baño	20	0.02	3	30	1.8	0.144
Fachada o patio	20	0.02	11	30	6.6	0.528
Dormitorio 1	20	0.02	4	30	2.4	0.192
Dormitorio 2	20	0.02	3	30	1.8	0.144
CONSUMO TOTAL ENERGÍA kWh					21.6	
COSTO MENSUAL USD						1.728

Como se puede observar claramente existe una disminución en valor monetario de $ 5.664 que equivale a 70.8 kWh por mes ahorrados.

Se realiza una comparación entre los valores de consumo totales mensuales con lámparas incandescentes y LFC`S se realiza el cálculo para un año obteniéndose la presente tabla:

Tabla 3-9. Calculo estimado de ahorro de energía y ahorro económico.

Iluminación	Consumo anual kWh	Costo anual USD
Incandescentes	1108.8	88.70
Fluorescentes	259.2	20.74
Ahorro	849.6	67.96

En donde se obtiene un ahorro en el consumo de energía es del 76.6 %, equivalente al mismo porcentaje en ahorro económico. Cabe recalcar que el ahorro se ha dado exclusivamente por el cambio de luminarias.

Según datos de las estadísticas del CONELEC sobre el promedio de clientes regulados de las empresas distribuidoras alcanzó un valor de 3`430.433 en el primer semestre del 2008.

Calculando la demanda el consumo anual (kWh) y el costo anual (USD) con la estimación del número de clientes arroja los siguientes resultados:

Tabla 3-10.Cálculo estimado de ahorro de energía y ahorro económico estimación del número de clientes.

Iluminación	Consumo anual (kWh) vs clientes	Costo anual (USD) vs clientes
Incandescentes	3.803` 664 110	304`279 407
Fluorescentes	889` 168 233	71`147 180
Ahorro	2.914` 495 876	233`132 226

Se puede concluir que el porcentaje de ahorro previsto con valores reales se mantiene 76.6% equivalente al mismo valor antes obtenido.

Por último podemos mencionar que este estudio nos permite mencionar algunas de las ventajas que se daría a las empresas distribuidoras como el alargamiento de la vida útil de las estaciones transformadoras ya que al reducirse la demanda en la hora pico hablamos que disminuirá la carga y con esto el calentamiento de cada de transformador, por lo tanto aumenta su vida útil siempre y cuando exista un control de armónico en las lámparas.

Un beneficio que obtendrá las empresas distribuidoras por parte de las generadoras sería una remuneración por concepto de potencia de reserva, es decir la potencia que cada generador tiene para cubrir la demanda máxima del sistema en una cierta hora.

3.3 EVALUACIÓN AMBIENTAL.

Actualmente las lámparas fluorescentes son una de las opciones más elegidas como fuentes de iluminación eficientes en el uso de la energía. Sin embargo, al contener pequeñas cantidades de mercurio en forma de gas, se hace necesario considerar el posible efecto nocivo que pueda generar este gas al romperse la lámpara y más aún cuando se desecha. Numerosas infraestructuras (instituciones públicas, privadas, domicilios, centros educativos, etc.) usan este tipo de lámparas y por lo tanto generan recurrentemente un gran número de residuos de lámparas fluorescentes con contenido de mercurio (Hg).

Los tubos de lámparas fluorescentes al romperse liberan de su interior vapores de mercurio (mezclado con argón) los cual debido a su alta toxicidad afectan a la salud humana y al ambiente; con la posibilidad de contaminación de los cuerpos de agua, superficial y subterránea (mediante la infiltración de lixiviados en los botaderos de basura), del suelo, aire y seres vivos. Los elementos más frecuentes de contaminación de suelos provocados por la mala disposición final de los residuos de lámparas fluorescentes, son los metales como el mercurio, zinc, níquel, cadmio, plomo y manganeso[23]. Estos residuos de lámparas fluorescentes tienen un origen domiciliario y son considerados como peligrosos por sus características.

[23] Cabe recalcar que estos residuos se encuentran también en las placas de los circuitos que conforman los televisores, pilas y otros aparatos de uso domiciliario.

3.3.1 EL MERCURIO EN EL AMBIENTE.

A diferencia de otros metales, el mercurio tiene un ciclo de recirculación propio, lo que le permite estar continuamente re-circulando en el medio lo que implica su metilación a través de procesos biológicos y su bioacumulación en diferentes organismos vivos.

El mercurio se genera de manera natural en el medio ambiente y se encuentra en distintas formas. Se trata de un metal pesado que en su forma pura se le conoce como mercurio “elemental” o “metálico” (de color plateado y líquido) usado comúnmente en los termómetros; en forma de gas usado en la fabricación de las lámparas fluorescente o también se lo encuentra combinado con otros elementos formando sales orgánicas o compuestos orgánicos entre los más conocidos el metilmercurio o el fenilmercurio. Ciertos microorganismos y procesos naturales pueden hacer que el mercurio en el medio ambiente pase de una forma a otra.

Ya que se le encuentra normalmente en la naturaleza y existen múltiples fuentes antropogénicas que lo emiten al ambiente, todos podemos llegar a exponernos a bajas concentraciones de mercurio a través del aire (inhalación), el agua y los alimentos (ingestión).La absorción del mercurio depende de su forma química, por ejemplo, el metilmercurio se absorbe en 90% y el cloruro de mercurio sólo en 2%.

La contaminación del suelo y de los cultivos agrícolas ocurre tanto por el depósito de las partículas del aire, como de la irrigación de cultivos o su fertilización con aguas o con lodos de plantas de tratamiento de agua residual conteniendo concentraciones elevadas de mercurios de origen industrial.

El mercurio, en contacto con el agua, se transforma en un potente veneno cuyo efecto tarda unos 50 años en desaparecer. Afecta a animales y plantas, y, por la cadena alimenticia, también al hombre. Según el Programa Internacional de Seguridad Química (PSIQ) de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la forma más riesgosa de exposición deriva de la ingestión de pescado conteniendo niveles elevados de metil mercurio.

Los elementos más frecuentes de contaminación de suelos provocados por la mala disposición final de los residuos de lámparas fluorescentes son los metales como el mercurio, zinc, níquel, cadmio, plomo, y manganeso.

3.3.1.1 Efectos del mercurio en los animales.

Al parecer, los peces adhieren con fuerza el metilmercurio; casi el 100% del mercurio que se bioacumula en peces depredadores es metilmercurio. Por lo tanto, el mercurio es transferido y acumulado a través de varios niveles tróficos[24].

Los estudios muestran que el mercurio se transmite a través de los efectos de la exposición de corta y larga duración a través del agua, de los alimentos o de la inhalación de polvo. Estos estudios muestran que por vía oral el mercurio inorgánico puede ocasionar daño renal, efectos en la presión sanguínea y el estómago, así como reacciones autoinmunes y alteraciones en el sistema nervioso. Por su parte, la exposición a corto plazo afecta a fetos. El mercurio orgánico en exposiciones a largo plazo provoca daño renal, estomacal, intestinal, alteraciones en la presión sanguínea, efectos adversos en el feto, esperma y órganos reproductivos masculinos, además de abortos espontáneos y muertes al nacer; el sistema nervioso es más sensible que los otros órganos a los efectos tóxicos de estos compuestos; también hay indicios de que pudiera ocasionar cáncer renal.

3.3.1.2 Exposición y efectos sobre la salud humana.

Para determinar la exposición humana, es preciso tomar en cuenta el ingreso diario de mercurio al organismo por distintas vías (por ejemplo ingestión de alimentos), la forma particular de mercurio que ingresa (por ej. el metilmercurio) y el tiempo de retención dentro del organismo.

La exposición a concentraciones elevadas del mercurio puede provocar daños permanentes en el cerebro, los riñones y en los fetos en desarrollo[25], los niños son especialmente vulnerables a los efectos del mercurio ya que pasa más a su cerebro que en el adulto e interfiere con su desarrollo.

En particular, el sistema nervioso es muy sensible a los efectos del mercurio, los cuales se manifiestan por distintos tipos de desórdenes que son más severos conforme la exposición aumenta: irritabilidad, nerviosismo, temblor, cambios en la

---

[24] Niveles tróficos.- Son los lugares que ocupan los distintos seres vivos en las cadenas alimenticias.

[25] Como ejemplos podemos mencionar el caso de una población de Guatemala que ingirió semillas tratadas con mercurio que presentaron los problemas mencionados, o también los habitantes de Minamata en Japón que ingirieron pescado contaminado con mercurio.

visión y audición, problemas de memoria. Sumado a lo anterior, exposiciones de corta duración a vapores conteniendo concentraciones elevadas de mercurio metálico, así como exposiciones continuas por largos periodos a concentraciones menores, pueden dañar los pulmones, causa náusea, vómito o diarrea, elevar la presión sanguínea y causar irritación de la piel y de los ojos.

También puede darse la exposición a partir del consumo de medicamentos y cosméticos que contengan mercurio y del contacto con otros productos descritos previamente, en todos los casos, la magnitud de la exposición puede variar grandemente.

3.3.2 EL MERCURIO EN LAS LAMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia, a principio del siglo XX, se comenzó a estudiar la posibilidad de utilizar el fenómeno de ionización de los gases, para la producción de luz, dando lugar a las lámparas de descarga. Con las primeras lámparas se obtuvo una mejora en el rendimiento, pero con poco éxito en cuanto a las temperaturas de color que se lograron. Intentando mejorar este problema se observó que la radiación ultravioleta que se origina en una lámpara de descarga se convierte en radiación visible al incidir sobre “fósforo”. La aplicación de este fenómeno dio lugar, en 1938, a la aparición de las lámparas fluorescentes.

Una lámpara fluorescente típica está constituida por un tubo de vidrio, previamente evacuado, que se llena con un gas inerte (habitualmente argón) y una cierta cantidad de mercurio líquido. En cada uno de sus extremos se dispone una espiral doble o triple de tungsteno recubierto de una sustancia emisora de electrones, como óxido de bario o de estroncio.

Conectada la lámpara, los electrodos se calientan eléctricamente hasta la incandescencia y comienzan a emitir electrones procedentes de la pasta que los recubre. Esta primera descarga produce la inflamación del gas noble suministrando el calor necesario para la vaporización del mercurio. Un dispositivo arrancador controla el precalentamiento de los electrodos y genera el impulso de tensión de encendido.

Durante el funcionamiento, estas lámparas de descarga poseen una atmósfera que contiene vapor de mercurio a baja presión. Dentro de este plasma, los

electrones libres acelerados, por la aplicación de una diferencia de potencial entre los extremos de del tubo, colisionan con los átomos del vapor contenido en el tubo de descarga. En este proceso, los choques producen la excitación de los electrones de los átomos del vapor, que pasan a ocupar orbitales de mayor energía. Cuando dichos electrones retornan a su órbita natural, los átomos de mercurio emiten radiación ultravioleta de onda corta (254 nm). Los fotones del ultravioleta tienen la capacidad de excitar al polvo fluorescente – normalmente un derivado fosforado - con el que está cubierto el tubo internamente. Como resultado éste emite radiación visible. Mediante una adecuada selección del material fluorescente se puede variar el color de la luz.

3.3.3 IMPACTO AMBIENTAL DEBIDO AL MERCURIO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS.

Los impactos ambientales de las lámparas fluorescentes compactas se producen a través de todo su período de vida, en este sentido deben distinguirse las distintas fases:

- Producción de materias primas.
- Fabricación de las lámparas.
- Uso de las lámparas.
- Disposición al final de la vida útil.

3.3.3.1 Producción de materias primas.

El impacto ambiental que reviste mayor interés al considerar las fuentes de provisión de materias primas para la fabricación de LFC’s es el asociado a las emisiones de mercurio al ambiente provenientes tanto de la producción primaria de mercurio, como de la producción secundaria. Un reporte de 1973 (Anderson, 1973) daba un factor de emisión de 0.171 kg de mercurio emitido por cada tonelada de mineral de mercurio extraído. Sin embargo, de acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, este factor de emisión no podría ser usado para las emisiones de mercurio a partir de la minería del oro.

La producción secundaria de mercurio (reciclaje) involucra el procesamiento de productos de descarte conteniendo mercurio, residuos industriales y scrap. Las mayores fuentes de mercurio reciclado incluyen amalgamas dentales, scrap de la

fabricación de instrumentos y materiales eléctricos, residuos y barros provenientes de laboratorios y plantas de refinación electrolítica, y pilas de mercurio.

El reciclaje de mercurio puede ser llevado a cabo, en general, por dos métodos: tratamiento químico o tratamiento térmico. El método más común de reciclaje de mercurio metálico es a través del tratamiento térmico. Generalmente, el scrap conteniendo mercurio sufre una reducción de tamaño y es calentado en retortas o hornos a aproximadamente 538ºC para vaporizar el mercurio. Los vapores de mercurio son condensados por enfriamiento y colectados (Reisdorf and D'Orlando, 1984; U.S. EPA, 1984).

Las operaciones involucradas con la producción de mercurio secundario son potenciales fuentes generadoras de emisiones al ambiente, por lo cual deberían contar con equipamiento para el control de esas emisiones y con medidas que provean a la seguridad del ambiente laboral.

En Ecuador no existen datos acerca de empresas dedicadas al reciclaje de mercurio a partir de ninguna de las fuentes mencionadas. Desde el punto de vista global, y en relación a la fabricación de lámparas, es de resaltar que el mercurio usado en el proceso de manufactura y que no está contenido en las lámparas es retornado a destiladores de mercurio para su purificación y reuso. De acuerdo a NEMA (National Electrical Manufacturers Association), actualmente menos del 50% del mercurio utilizado por los fabricantes aparece como contenido en lámparas, y todo el mercurio utilizado es secundario.

3.3.3.2 Fabricación de las lámparas.

Cuando se discuten los aspectos ambientales de los materiales usados en la construcción de lámparas se debe considerar principalmente las sustancias que son percibidas como causantes de un significativo impacto ambiental, sin embargo esas sustancias están íntimamente ligadas a un óptimo rendimiento durante el ciclo de vida y a una máxima eficiencia energética. Por ejemplo, hay estudios que demuestran que una lámpara fluorescente sin mercurio consumiría aproximadamente tres veces más energía que una conteniendo mercurio para producir la misma iluminación.

A través de los años los esfuerzos han sido dirigidos a lograr un óptimo rendimiento a la vez que minimizar el uso de sustancias que han sido identificadas como peligrosas tales como el mercurio contenido en lámparas de descarga. Avances técnicos en los procesos productivos y en los materiales aplicados permitieron reducir la cantidad de mercurio utilizada sin comprometer la eficiencia lumínica o la vida útil de la lámpara en su totalidad.

Año	Tipo de Lámparas	Producción (millones)	Contenido Hg/unidad	Contenido Total de Hg (kg)	Producción Nacional (%)
1996	Fluorescentes	22	40 mg	880	100
	Compactas (112/T8)	4	10 mg	40	20
1997	Fluorescentes	25	40 mg	1000	95
	Compactas (112/T8)	5	10 mg	50	20
1998	Fluorescentes	27	35 mg	945	80
	Compactas (112/T8)	6	10 mg	60	20
1999	Fluorescentes	30	30 mg	900	75
	Compactas (112/T8)	7	5 mg	35	20

Figura 3-4. Reducción del contenido de mercurio en lámparas fluorescentes en EEUU. (Fuente: Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas)

Según la Secretaría del Interior de Estados Unidos, la industria luminotécnica redujo el uso de mercurio de 57 toneladas en 1984 a 32 toneladas en 1997. Durante el proceso de fabricación de LFC's, el mercurio puede ser emitido durante el manipuleo, en la operación de inyección de mercurio; y a partir de lámparas rotas, derrames y materiales residuales.

3.3.3.3 Uso de las lámparas.

La utilización de LFC's está asociada a la implementación de políticas relativas al uso eficiente de energía, estrechamente relacionadas con una utilización racional de los recursos energéticos y de los recursos naturales en general. De acuerdo a los fabricantes, comparadas con las lámparas incandescentes, las fluorescentes compactas proporcionan un ahorro del 60% - 75% de energía.

Figura 3-5.Evolución de la eficiencia de la lámpara. (Fuente: Brugnoni & Ibarne)

La figura muestra las mejoras logradas en términos de eficiencia para diferentes tipos de lámparas a través del tiempo expresadas en lúmenes/watt.

3.3.3.4 Disposición al final de la vida útil.

El mayor inconveniente que se presenta con las lámparas fluorescentes compactas es el impacto ambiental relacionado con los elementos y sustancias que las componen una vez que llegan al final de su vida útil.

La rotura de lámparas es una fuente de emisiones de mercurio que se adicionan al ciclo global, y aunque el contenido de mercurio por lámpara es muy pequeño, la tendencia a un consumo cada vez mayor de ellas está asociada a la generación de mayores volúmenes de residuos a tratar.

Por un lado la fragilidad de las lámparas las hace susceptibles de rotura en las distintas etapas de recolección, transporte, transferencia, procesamiento, y disposición; por otro lado la dispersión en la generación resulta un desafío a la hora de diseñar sistemas de recolección diferenciada. Esta probabilidad de rotura de lámparas, en cualquier etapa de manipuleo y antes de llegar a su destino final, implica cierta emisión de mercurio a la atmósfera. Cuánto mercurio será emitido a la atmósfera a partir de la rotura de lámparas fluorescentes ha sido objeto de debates. La cantidad emitida parece estar en función de distintas variables,

especialmente la temperatura. Aunque no existen descripciones exactas, existen datos de que a medida que el bulbo envejece una creciente cantidad de mercurio líquido elemental es convertido en compuestos sólidos de mercurio (principalmente HgO) y una cierta cantidad del mercurio elemental presente originariamente se unirá al vidrio.

En un experimento diseñado para recrear un típico escenario de gestión de residuos (Departamento de Protección Ambiental de New Jersey), con rotura durante el manipuleo y almacenamiento temporal en contenedor descubierto antes de su disposición final, se encontró que la tasa a la que el mercurio es emitido varía proporcionalmente con la temperatura, lo cual era esperable debido a la mayor volatilidad del mercurio a altas temperaturas.

También las tasas de emisión son consistentes con estimaciones anteriores (Lindberg et al) las cuales sugieren que aproximadamente el 18% del mercurio contenido en lámparas fluorescentes es emitido en un período de 8 horas durante las operaciones de trituración. El estudio indica que a temperaturas entre 4 y 30ºC, aproximadamente entre el 17 y el 40% del mercurio contenido en lámparas fluorescentes rotas será emitido durante un período de dos semanas, con mayores tasas de volatilización correspondientes a mayores temperaturas. Un tercio de esas emisiones ocurrirán durante las primeras 8 horas después de la rotura. El patrón de emisión inicia con una rápida emisión inicial para luego declinar a una tasa lentamente decreciente, sugiere que por lo menos algo del mercurio en las lámparas está en una forma que puede vaporizarse rápidamente, tal como pequeñas gotas de mercurio elemental. Si este es el caso, el movimiento de piezas rotas podría causar el aumento de emisiones. El lento decrecimiento de la tasa de emisión después de las primeras 8 horas puede reflejar la gradual emisión de formas de mercurio menos volátiles, tales como las adsorbidas en las superficies internas del bulbo. También es posible que la declinación en la emisión refleje la oxidación del mercurio. Si significativas cantidades de mercurio son oxidadas en el tiempo, la mezcla de lámparas rotas con otros residuos podría reducir la tasa de emisión del mercurio.

Las extrapolaciones a partir de este estudio tienen sus limitaciones ya que persisten muchas incertidumbres, por ejemplo sobre contenido de mercurio por

lámpara o sobre los procedimientos de gestión de residuos. Sin embargo, el estudio sugiere que pueden existir elevadas concentraciones de mercurio (excediendo la concentración de referencia dada por la EPA de 300 ng/m3) en la atmósfera cercana a lámparas rotas recientemente.

Internacionalmente, los destinos de los residuos sólidos urbanos vienen siendo la disposición en tierra, la combustión, y el reciclaje. La disposición apropiada de residuos sólidos en el suelo, resulta de la implementación del sistema de vertederos, construidos según las reglas del arte, y provistos de sistemas de captación y tratamiento de gases, y de recolección y tratamiento de lixiviados. Los lixiviados, provenientes de los procesos químicos, físicos y biológicos ocurridos dentro de la masa de residuos a través de las distintas etapas de la vida del vertedero, si el vertedero no cuenta con la adecuada aislación son una potencial fuente de contaminación para suelos y aguas subterráneas como consecuencia de su migración. En 1980, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) determinó que el mercurio puede migrar desde un vertedero de residuos sólidos municipales en concentraciones significativas en el lixiviado, hasta alcanzar los acuíferos, proveedores de agua de consumo humano. Esta conclusión llevó a regular a las lámparas conteniendo mercurio como residuos peligrosos.

El reciclaje de lámparas fluorescentes involucra la separación de vidrios, partes metálicas y polvo fluorescente (en el cual se encuentra la mayor parte del mercurio contenido en una lámpara usada). Existen tecnologías para destruir las lámparas y separar los materiales de manera efectiva para ser reincorporados al mercado. Después de la extracción del mercurio, el vidrio recuperado se vende a fabricantes de fibra de vidrio, los metales se envían a fundición, y el polvo de fósforo y el mercurio (después de ser destilado) pueden reinsertarse nuevamente en el proceso de fabricación de lámparas.

Aún sin contar con tecnología para el reciclaje, la trituración de las lámparas resulta una buena opción para reducir el volumen de residuos a manejar. Los equipos trituradores modernos cuentan con sistemas para el control de emisiones de mercurio. La trituración reduce los costos de transporte y almacenamiento, a la vez que minimiza las emisiones provenientes de roturas accidentales. El material

triturado puede ser embalado en condiciones de seguridad hasta que las instalaciones para el reciclaje estén disponibles localmente, o bien para ser transportado hacia otros mercados consumidores.

Debido a que, en el mercado, el valor de los productos recuperados es bajo, el reciclaje de LFC's no resulta económicamente rentable por lo cual los usuarios o el sector gubernamental deben pagar por el apropiado tratamiento de estos residuos.

En Ecuador, aunque existe un marco normativo que respaldaría la gestión ambiental compatible de residuos sólidos domiciliarios, las prácticas se mantienen muy por debajo de los objetivos esperables. La existencia, en algunas ciudades importantes, de "rellenos sanitarios" no implica que en su construcción se hayan utilizado las más eficientes medidas de aislamiento, ni que se hayan instalado las tecnologías de control de emisiones (líquidas y gaseosas) necesarias. La proliferación de basurales a cielo abierto es muy común.

Los sistemas de recolección y transferencia presentan una calidad desigual por regiones, desestimándose las medidas de higiene y seguridad laboral pertinentes. Sea por la no existencia de procedimientos para la manipulación, o por la utilización de vehículos compactadores, la rotura de lámparas se da mucho antes de que estas lleguen a su destino final. Es necesario mencionar también que en los rellenos sanitarios debe hacerse previsiones para la incineración de residuos cuidando las emisiones de mercurio. En el caso de las LFC's es indispensable su separación de cualquier práctica de combustión.

Un factor importante es la carencia de información entre los ciudadanos debido a que propicia la falta de cuidados a la hora de manipular residuos domiciliarios en general, y de lámparas fluorescentes en particular. Los usuarios de lámparas fluorescentes deberían ser alertados sobre la conducta a seguir en caso de rotura accidental, y sobre el manipuleo de lámparas como residuo en otros países se advierte sobre ello y se han implementado hojas informativas que vienen con el producto en su compra (ver Anexo 2).

La implementación de programas de recolección diferenciada con el fin de separar a las LFC's agotadas del resto de residuos, es una opción viable si

existen “gestores ambientales” que cuenten con instalaciones de trituración y empaque y/o de reciclaje, sea a nivel local o a distancias que no resulten muy distantes. De otra forma, existe el riesgo de acopiar importantes volúmenes de residuos peligrosos con destino incierto[26].

Cobrando cada día mayor importancia en la gestión integral de residuos sólidos se encuentra la reducción en la generación de los residuos. Esta reducción comienza en el diseño del producto, a través de la reducción de cantidades de materiales utilizados para su elaboración, de la reducción del contenido o la sustitución de sustancias tóxicas, y del logro de una mayor durabilidad. En el caso de las lámparas fluorescentes compactas, las principales industrias del sector han venido obteniendo éxitos en el desarrollo de modelos más pequeños y livianos, con decrecientes contenidos de mercurio, y con vidas útiles más largas. Sin embargo, una eficaz reducción requiere que el consumidor esté en capacidad de premiar esos esfuerzos a la hora de tomar la decisión de compra (encarece su precio pero favorece al ambiente). En el manejo de desechos con mercurio a nivel internacional existen convenciones y reglamentos que podemos tomar en cuenta como por ejemplo en Estados Unidos mediante su agencia de protección al ambiente (EPA US).

3.3.4 IMPACTO AMBIENTAL DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS EN LA REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR GENERACIÓN ELÉCTRICA.

Al utilizar lámparas fluorescentes compactas en reemplazo de lámparas incandescentes, teóricamente se lograría reducir proporcionalmente la generación de energía debido a que la LFC asocia su mayor nivel de eficiencia en la transformación de energía eléctrica en luz, por lo tanto los potenciales beneficios del ahorro energético se traducen en términos de disminución de emisiones de los denominados gases invernadero, de conservación de recursos naturales, y de disminución de emisiones de mercurio que, en menor o mayor me

[26] Cabe recalcar que esta recolección separada de residuos no solo debe hacerse con las LFC’s sino con toda las lámparas que utilizan vapor de mercurio o en general los productos que tengan mercurio en su constitución. Un informe de la comisión europea señala que los residuos de mercurio de las LFC’s representa apenas un 10% del total de residuos que contiene mercurio y que se comercializan en al continente.

dida, se producen asociadas a las distintas fuentes de generación principalmente la de origen térmica cuyo principio se traduce en la combustión de combustibles fósiles o no. Los combustibles fósiles usados para la generación de electricidad emiten distintas cantidades de contaminantes (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, material particulado y dióxido de carbono) siendo los primeros precursores de lluvia ácida, y el último el principal responsable del calentamiento global.

"La utilización de menos energía por unidad de producto o servicio se traduce en un menor deterioro del medio ambiente, ya sea porque disminuye la necesidad —o al menos la posterga— en cuanto a la construcción de centrales eléctricas y refinerías de petróleo o el desarrollo de yacimientos carboníferos y de hidrocarburos, o bien porque reduce las emisiones de gases contaminantes, de gases de efecto invernadero y de partículas resultantes de la combustión". (Brugnoni & Ibarne, 2006:94)

Sin embargo en el país, no se dispone todavía de un inventario preciso sobre la generación de residuos que contengan mercurio, y por lo tanto no son medidas o cuantificadas. Por otro lado el consumo de combustibles para generación eléctrica al igual que otros países sumado las épocas de estiaje hace necesario que exista un plan de ahorro energético.

La quema de combustibles fósiles utilizadas para la generación eléctrica libera los óxidos de azufre y nitrógeno, material particulado y el dióxido de carbono. Las emisiones de los distintos gases contaminantes se determinan a través de muestreos en las chimeneas de las plantas generadoras y la de CO_2 a partir del contenido de carbono en los combustibles utilizados y la eficiencia de la generación eléctrica. La magnitud de las emisiones normalizadas por la energía generada se llama factor de emisión para el contaminante en cuestión

Las lámparas fluorescentes compactas provocarían un impacto ambiental positivo que se traduce en la disminución de gases invernadero emanados por las chimeneas de las centrales térmicas. Existe un impacto ambiental nocivo incluso con la generación hidroeléctrica debido a varios factores como por ejemplo la construcción de la presa, la calidad del agua que es almacenada y luego turbinada que no es de calidad para la reproducción de los peces, etc.

La electricidad utilizada para la iluminación se relaciona con la electricidad generada de la siguiente manera. Para cada kWh disipada en la instalación de luz, unos 1,15 a 1,20 debe ser generada, si uno toma en cuenta las pérdidas por transmisión y distribución

Finiquitando el tema podemos mencionar un estudio que se realizo en Australia donde se analizaron la cantidad de mercurio y plomo que se libera al ambiente debido a las lámparas fluorescentes y se los comparó con las emisiones provocadas por una central térmica que usaba carbón como combustible; y se determinó que se libera más mercurio por parte de la central térmica en el orden de 5 a 1 que por parte de las lámparas fluorescentes compactas; por lo tanto existe un balance negativo entre las emisiones de mercurio producido por la rotura de las LFC usadas, y la reducción de las emisiones de mercurio de las centrales térmicas.

3.3.4.1 Las LFC's y la salud humana.

Según un estudio publicado por los ingenieros Assaf Dutt y Tanides [2002], las radiaciones asociadas a la iluminación pueden provocar efectos biológicos nocivos sobre las personas y sobre los ecosistemas

Sobre las personas.- bajo ciertos casos puntuales como por ejemplo mesas de cirugía, lugares de internación, trabajos de soldadura, etc. Para todos los demás casos de la vida cotidiana los niveles de intensidad luminosa de las instalaciones de iluminación comunes, cualquiera sea el tiempo de exposición, están lejos de la dosis umbral de las enfermedades mencionadas, no siendo éste un tema que preocupe. Entre las enfermedades mencionadas tenemos: fotoqueratoconjuntivitis, cataratas por radiación U.V., efectos retardados sobre la piel por radiación U.V., queratitis por radiación UV., catarata térmica por radiación J.R., daño térmico de retina por radiación IR., daño térmico sobre la piel, eritema y queratitis por radiación IR. (termoqueratitis), fotoretinitis por luz azul.

Esas dolencias son provocadas por radiaciones ultravioleta o infrarroja, salvo el caso de la fotoretinitis por luz azul, que es una radiación comprendida dentro del espectro visible.

Sin embargo no es desatinado que el diseñador realice la verificación de las instalaciones proyectadas. Para la comprobación de una instalación debe considerarse el valor de dosis umbral (intensidad de la radiación por el tiempo de exposición) es decir, aquella dosis a partir de la cual se puede producir daño sobre el organismo.

Sobre ecosistemas. En esta categoría, la atracción de insectos voladores es un fenómeno a tener en cuenta. Se presenta especialmente en las zonas rurales o en espacios con vegetación abundante, extendiéndose la acción sobre muchos kilómetros a la redonda en entornos poco iluminados. Esto ocasiona no sólo molestias a las personas e inconvenientes en el mantenimiento de las luminarias, sino también alteraciones ecológicas en la zona de influencia [Schmid, 1993]. La característica espectral de la atracción de insectos no ha sido aún debidamente establecida, aunque se conoce que el fenómeno tiene su máxima sensibilidad en las longitudes de onda de los 400 nm.

3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS LFC`S EN COMPARACIÓN CON LAS LÁMPARAS INCANDESCENTES.

3.4.1 IMPACTOS AMBIENTALES POSITIVOS.

El principal impacto ambiental positivo producido por el uso de lámparas fluorescentes compactas (LFCs) está asociado a su mayor nivel de eficiencia en la transformación de energía eléctrica en luz; esto en detrimento de la disipación calorífica característica de las lámparas incandescentes.

Tomando como indicador de eficiencia al rendimiento luminoso (lm/W) o coeficiente de eficacia luminosa, las LFCs muestran valores de entre 2 a 4 veces superiores a las de las incandescentes, a las cuales pueden sustituir.

Los potenciales beneficios del ahorro energético se traducen en términos de disminución de emisiones de los denominados gases invernadero, de conservación de recursos naturales, y de disminución de emisiones de mercurio que, en menor o mayor medida, se producen asociadas a las distintas fuentes de generación.

Al analizar los beneficios provenientes del uso de lámparas eficientes, y en relación al contenido de mercurio en los combustibles fósiles, es importante recalcar que los contenidos del metal varían de acuerdo al tipo de combustible, siendo las diferentes variedades de carbón las que presentan los más altos niveles de mercurio, mientras que en el gas natural se encuentran las menores concentraciones. Entre estos dos extremos se encuentran valores intermedios correspondientes a los contenidos de mercurio de los diferentes combustibles líquidos derivados del petróleo. Los contenidos de mercurio también varían, para un determinado tipo de combustible, en función del origen geográfico de ese combustible. Por otra parte el mercurio contenido en petróleo y gas natural puede emitirse, debido a su alta volatilidad, durante las operaciones de extracción, conducción y procesamiento, así como convertirse a distintas especies a lo largo del proceso, lo que dificulta la obtención de un inventario de emisiones durante el ciclo.

Otro impacto ambiental positivo dado por el uso de las más “modernas” lámparasfluorescentes compactas está referido a su situación como residuos y representado por los éxitos logrados por los fabricantes en términos de reducción o prevención. Esto es así ya que en los últimos años se han logrado importantes disminuciones en la toxicidad, a partir de la utilización de menores contenidos de mercurio, tanto como reducciones de peso y volumen por unidad; y fundamentalmente productos más durables. Hasta ahora se han considerado los impactos positivos en relación al ambiente y en términos de las fuentes de energía convencionales. Una evaluación más completa debería considerar que al analizar la adopción de sistemas de energías renovables, de importantes impactos ambientales positivos per se, los mayores valores de rendimiento luminoso se encuentran en relación biunívoca con los mejores niveles de costo/eficiencia.

3.4.2 IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS

El contenido de mercurio de las LFCs se asocia con los impactos negativos relacionados con peligros para la salud humana y para el ambiente a través del ciclo de vida de la lámpara.

Como se mencionó anteriormente los efectos tóxicos sobre los seres humanos, la capacidad de bioacumularse en la cadena alimenticia, la alta volatilidad del mercurio elemental y su alta permanencia en la atmósfera, la capacidad para migrar con el lixiviado de los vertederos de residuos hacia las fuentes de agua subterránea, han generado constantes esfuerzos, sobre todo en los países desarrollados, para ubicar y controlar las fuentes de mercurio. En el caso de las LFCs los mayores riesgos se encuentran asociados a su etapa como residuo, ya que ésta resulta una fuente difícil de controlar, en términos de manipulación, transporte, y almacenamiento, debido a su dispersión, tanto como a la fragilidad del residuo que facilita que se produzca la rotura accidental en cualquier fase de la gestión de residuos, con la consecuente emisión al medio cercano.

Estas consideraciones han llevado a los esfuerzos, ya comentados, para reducir la cantidad de mercurio contenido en las lámparas de descarga Sin embargo, la reducción del contenido de mercurio parece estar acotada debido a que, según los fabricantes, un nivel de mercurio insuficiente resultaría en un prematuro agotamiento de una lámpara fluorescente ("mercury starvation"), y desde una perspectiva del ciclo de vida, esto implicaría mayores impactos ambientales. El reemplazo temprano de esa lámpara, que de otra forma podría operar por muchas horas, resultaría en un mayor consumo de los materiales que la forman (incluido el propio mercurio), un mayor consumo de energía para producir y transportar más cantidad de lámparas, y mayor cantidad de contaminantes emitidos asociados con los procesos de fabricación y transporte y de gestión de residuos. También se halla en discusión la eliminación del mercurio, pero aunque distintos experimentos han mostrado que las lámparas de descarga pueden ser construidas usando elementos distintos del mercurio, esos elementos también son perjudiciales para el ambiente (ej. cadmio) y significativamente menos eficientes.

Dado que las emisiones de mercurio provenientes de las LFCs como residuo resultan más fácilmente controlables, a través de una gestión integral de los residuos, que las producidas a lo largo de la cadena de operaciones que involucran a los combustibles fósiles, en el mundo se viene fomentando su utilización como estrategia de uso eficiente de energía.

4 ANÁLISIS DEL PLAN GUBERNAMENTAL.

4.1 INTRODUCCIÓN.

En la actualidad se ha puesto mucho énfasis al tema del medio ambiente debido a los cambios climáticos extremos que se producen en el mundo, se han realizado convenciones con el fin de contrarrestar estos efectos con el fin de preservar los recursos naturales. Entre estas medidas están el desarrollo de programas energéticos que buscan el ahorro de estos recursos con la complementación de programas que involucran el uso de los recursos renovables (solar, eólica, etc.)

En el país el gobierno NACIONAL ha desarrollado planes que siguen esa línea como por ejemplo la construcción de centrales hidroeléctricas, la incursión de la energía solar térmica y fotovoltaica, el incentivo para la importación de vehículos de tecnología híbrida.

Además de lo señalado anteriormente se halla en ejecución un programa de sustitución de lámparas incandescentes por lámparas fluorescentes compactas denominadas comúnmente como “ahorradoras”. Este plan forma parte de las medidas principales para reducir los costos de generación eléctrica a través de la disminución de consumo de combustibles, especialmente derivados del petróleo, que se utilizan en las unidades de generación termoeléctrica; además de reducir las emisiones de gases de efectos invernadero que trae como consecuencia el calentamiento global.

El presente capítulo hace referencia a un análisis del plan implementado por el gobierno en sus distintas fases desde su importación, almacenamiento, distribución así como un monitoreo en la entrega al usuario al final se emitirá unas conclusiones y de ser necesario recomendaciones que se considera podrían ayudar a mejorar o corregir ciertas falencias que se pudieran presentar.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL PLAN DE GOBIERNO NACIONAL.

4.2.1 JUSTIFICACIÓN PARA EL PROYECTO.

Como justificativo para la aplicación del plan se puede mencionar la situación actual del sector eléctrico ecuatoriano el cual ha tenido un crecimiento muy bajo en los últimos años, este crecimiento ha sido principalmente en la generación térmica, lo que cubre con falencias la demanda de electricidad cuyo incremento (según el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable) es del 6% anual lo que provoca un déficit en la oferta y el incremento en los costos de generación eléctrica. Según datos del MEER, por ejemplo en el año 2006 el sector residencial consume aproximadamente el 35% de la energía total facturada en todo ese año (Ver Anexo 3).

Bajo este panorama, se busca opciones de ahorro como la implementación de programas y medidas de Administración de la demanda y uso eficiente de la energía, las cuales al ser de aplicación inmediata permite tratar mejor el problema y evitar como en años anteriores los racionamientos eléctricos. Estas medidas de ahorro fueron aplicadas a los sectores de consumo por lo cual el Gobierno impulsó un proyecto de sustitución de focos incandescentes por ahorradores en los hogares del país. Esta Medida va acompañada del reemplazo paulatino de otros electrodomésticos utilizados en el hogar para la refrigeración, ventilación, calentamiento de agua, etc. Incentivando así al aprovechamiento de fuentes alternativas como la solar.

Entre las razones técnicas para impulsar esta medida se puede mencionar los datos del sector eléctrico ecuatoriano cuya tasa de crecimiento es del 5.6%. Si la base de referencia es de 2700 MW para el año 2007, significa que en el año 2009 se requerirá de 160 MW para cubrir la demanda de potencia en horas pico. Esta energía es suministrada en gran medida por máquinas que consumen combustibles líquidos, los cuales son subsidiados por el estado para el uso en el sector eléctrico.[27]

En el sector de generación tenemos que la casi totalidad de los motores de combustión interna (MCI) de las centrales térmicas tienen más de 30 años de

[27] Perfil del Plan Piloto del Proyecto de Reconversión Tecnológica en Iluminación Residencial mediante la introducción masiva de Lámparas Fluorescentes Compactas, Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2007.

instalación, razón por la cual sus rendimientos y factores de planta son bajos, por lo que deberían salir de servicio en forma progresiva, desplazadas en el mercado por la incorporación de unidades de generación más eficientes.

Investigaciones similares relacionadas con este proyecto fueron realizadas por el ex INECEL en los años 1991 a 1994, la cual permitió conocer la influencia de iluminación en el sector residencial que concluyó con la recomendación, ya en esa época, de la sustitución de los focos incandescentes por los focos ahorradores, actividad cuya aplicación ha sido promovida en gran escala en el actual gobierno.[28]

4.2.2 OBJETIVOS PLANTEADOS EN EL PROYECTO.

Según el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, la implementación del proyecto de sustitución masiva de lámparas incandescentes por fluorescentes compactas, busca disminuir el crecimiento acelerado de la demanda eléctrica en horas picos, e indirectamente reducir el alto consumo de combustible que actualmente se utiliza para generación eléctrica, aunque es importante reconocer que la generación de energía eléctrica en nuestro país incurre en varias pérdidas tanto técnicas como no técnicas.

En el año 2006, la empresa eléctrica Centro Sur ya estudió el efecto que tiene la iluminación dentro de la matriz de usos de energía en el sector residencial (gráfico).

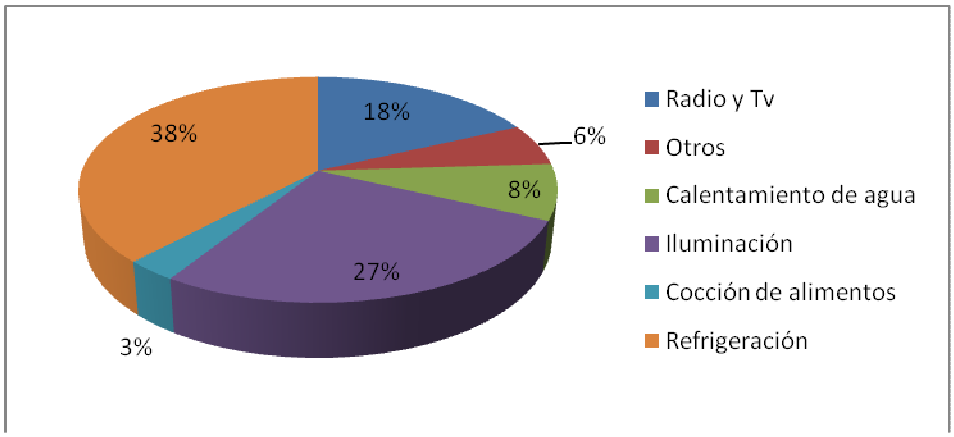


Figura 4-1.Usos de la energía en el sector residencial. Fuente MEER.

[28] Los usos finales de la Energía Eléctrica como un mecanismo para establecer políticas de eficiencia energética en el sector eléctrico, Ing. MSc. Luis Ayala, Abril 2008

Como se observa en el gráfico, la demanda de energía eléctrica para el año 2006, representa el 27%. Tomando como base la estadística del sector eléctrico del 2007, se concluye que el sector residencial consumió cerca de 986.626 MWh por concepto de iluminación. Sin embargo la participación de la iluminación en horas pico representa aproximadamente el 50% de la demanda del sector residencial, por lo que los resultados del proyecto deben cuantificarse por la disminución del pico de demanda entre las 18 y 22 horas. Este proyecto ayudaría a la reducción en la demanda de potencia en horas pico de hasta 300MW.

Partiendo de las justificaciones explicadas anteriormente se puede adicionar los siguientes objetivos:

- Lograr un ahorro energético para disminuir el consumo de combustible subsidiado para la generación térmica de eléctrica en horas pico.
- Prorrogar la necesidad de inversión en nuevos proyectos de generación térmica.
- Disminuir las emisiones de CO_2 al ambiente por la reducción de consumo de generación térmica por medio de combustibles fósiles.

4.2.3 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

El proyecto de sustitución fue declarado como prioritario por el SENPLADES el 13 de Agosto del 2007, con lo cual se viabilizó la adquisición de las LFC's; para la implementación del programa de sustitución de luminarias se dispuso entregar a las Empresas Eléctricas de Distribución y la CATEG mediante acuerdo ministerial el 19 de Agosto del 2008.

Inicialmente el proyecto está enfocado a todos los clientes residenciales que se encuentran principalmente dentro de los dos quintiles más pobres de la población y quienes consume un poco más de aquellos inmersos dentro de la tarifa de la dignidad (110/130 kWh/mes). El abonado promedio de estos quintiles se estima tiene en promedio 4 focos por vivienda. (Tres interiores: área social y dormitorio, y uno de iluminación exterior).

El proyecto por tanto propone reemplazar 6´000.000 de focos ahorradores en las residencias ecuatorianas, entregando hasta 4 focos en cada uno de los hogares,

por lo cual se calcula que la población directamente beneficiada es de 2 068 000 hogares a nivel nacional.

Adicionalmente se incluyeron a las escuelas fiscales, fiscomisionales, hospitales, entidades del sector público y privado además de centros de rehabilitación social previo registro y autorización del área respectiva del MEER.

4.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS FOCOS AHORRADORES.

Según los datos del MEER se tiene las siguientes características[29]

- *Nombre Técnico*: Luminarias Fluorescentes Compactas tipo Bare (desnudo)
- *Modelo*: Estándar.
- *Tipo*: 3U
- *Duración*: 8000 horas.
- *Potencia*: 20 W.
- *Mercurio*: ≤ 5 mg.
- *Tensión Nominal:* 120 voltios y una frecuencia de 60 Hz.
- Eficiencia luminosa: 55 lúmenes/vatio.

A continuación se presentan los datos obtenidos en las pruebas realizadas en los laboratorios del MEER a muestras seleccionadas de los focos ahorradores.

Tabla 4-1.Características eléctricas de los focos ahorradores utilizados en el plan de sustitución masiva .[30]

Voltaje (V)	Corriente (I)	Potencia (W)	Factor de potencia	Frecuencia	THDV (%)	THDI (%)
117,423	0,278	19,636	0,603	60	5,194	76,157

[29]Las demás características técnicas realizadas en laboratorio, se encuentran estudiadas en el capítulo 2 "Evaluación Técnica de las LFCS".
[30] Fuente: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.

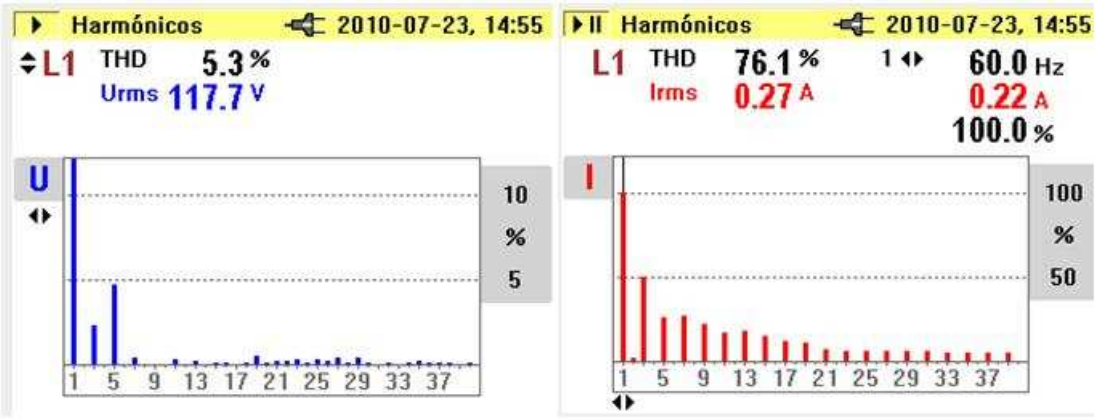


Figura 4-2.Graficas de los valores de distorsión armónica en los focos del plan de sustitución. Fuente: MEER.

4.4 CRONOGRAMA DE SUSTITUCIÓN.

El esquema de coordinación y monitoreo de avance de la sustitución de los focos ahorradores lo realizó el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, a través de la Dirección Nacional de Eficiencia Energética, entidad que se encarga de elaborar en resumen los siguientes procesos a ejecutarse:

- Importación
- Transporte y Bodegaje
- Distribución
- Evaluación y Monitoreo

El proyecto fue la principal alternativa para comenzar con programas de eficiencia energética en el país. El programa se ejecutó en 2 fases, la Primera Fase (Octubre 2008 – Octubre 2009), consideró la sustitución de 6 millones de focos incandescentes por luminarias fluorescentes compactas y fue ejecutado a través de las empresas eléctricas en coordinación con el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, sus beneficiarios fueron 2 068 000 usuarios en todo el territorio nacional.[31]

Esta fase se ejecutó en dos etapas, la primera de agosto hasta diciembre del 2008 y la segunda etapa desde el mes de abril del 2009 hasta el mes de octubre del 2009; estas etapas se debieron a la llegada de los focos en dos embarques, el

[31] Datos proporcionados por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Mayo 2009.

primer embarque con una cantidad de 2 400 000 focos y la segunda con 3 600 000 focos.

Posteriormente, en la Segunda Fase que consta de la sustitución de 10 millones de luminarias fluorescentes compactas, a fin de distribuirlas en el país en otros segmentos del sector residencial y otros sectores tales como comercial pequeño, entidades estatales, beneficio público y asistencia pública[32]. Este proyecto se ejecutó entre Noviembre del 2009 hasta Julio del 2011.

Esta fase se organizó en tres etapas de ejecución:

- 1era etapa: la sustitución de 350.000 focos ahorradores que el MEER adquirió localmente y fueron distribuidas por medio de la CATEG.
- 2da etapa: la sustitución de 5 188 480 focos ahorradores correspondientes a la donación de Venezuela; para el resto de país.
- 3era etapa: la sustitución de 4'500 000 focos adquiridos por el MEER fuera del mercado nacional y distribuidas de la siguiente manera:

  3 000 000 de focos ahorradores dirigidos para instituciones públicas, instituciones de salud, educación, comercio pequeño artesanal.

  1 500 000 focos ahorradores para recambio por focos ahorradores quemados y entrega a usuarios residenciales.

Merece especial tratamiento la Segunda fase de la Etapa III en donde se realiza el cambio de los focos se los realiza stands ubicados en las bodegas preestablecidas en Quito y Guayaquil, respetando políticas implantadas por la Dirección Nacional de Eficiencia Energética, siguiendo un cronograma de trabajo

El MEER entregará a través de un Convenio con las Empresas Eléctricas un valor económico que aporte a la implementación de los centros de atención a los clientes y financiar en parte los gastos de distribución, sustitución y fiscalización de la implementación de los procesos, según los procedimientos indicados más adelante; en esta Fase no existe sustitución en el campo, con excepción de las instituciones públicas.

El Ministerio ha realizado la asignación de los focos ahorradores para esta etapa sobre la base del número de usuarios existentes por empresas eléctricas en los sectores de asistencia social, beneficio público, entidades oficiales, industriales

[3232] Fuente: Anexo Técnico Sustitución de 10 millones de focos incandescentes por fluorescentes compactas.

artesanales; realizando asignaciones también para el recambio y para los usuarios no atendidos en las etapas anteriores. Siguiendo el esquema presentado.

Figura 4-3.Procedimiento para la sustitución de LFC's. Fuente MEER 2008.

Como se menciona anteriormente en esta etapa se realizará un proceso de recambio que consiste en el reemplazo de los focos ahorradores que han cumplido su vida útil (focos ahorradores quemados pero no rotos) por unidades nuevas, siempre y cuando los focos presentados para el "recambio" sean aquellos focos entregados en las etapas anteriores (aquellos que poseen el logotipo del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable o de la marca Dien Quang).

En el caso de focos ahorradores de otras marcas comerciales el ministerio establece un recambio de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 4-2.Tabla para el proceso de recambio en focos de otras marcas comerciales.

CANTIDAD DE FOCOS A ENTREGAR

Consumo kWh/mes	0 a 20	21-70	71-120	121 - 500
Cantidad de focos	1	2	3	4

Este proceso tiene una asignación de 500 000 de unidades, es decir foco ahorrador que ha cumplido su vida útil por foco ahorrador nuevo; esta actividad se realizará en los centros de atención a clientes de las empresas eléctricas con el debido control y registro del tipo de focos entregados, información que será

ingresada en la base de datos del área comercial. No se acepta focos ahorradores rotos, y el tiempo de ejecución de esta actividad será la de 1 año, pudiendo extenderse según la disponibilidad de existencia de focos en bodegas.

Por último se trata un punto de vital importancia que es el proceso de recolección de desechos en el cual el MEER en colaboración con las empresas eléctricas se encargará de impulsar un programa de manejo ambiental adecuado de los desechos producto del proceso global de recambio y sustitución (Anexo 4).

4.5 IMPACTO AMBIENTAL OBTENIDO POR LA SUSTITUCIÓN.

Según los datos proporcionados por el CENACE en su informe al 31 de Diciembre del 2009, el impacto ambiental obtenido hasta la culminación de la primera etapa (Octubre del 2008 a Octubre del 2009) es:

- ☞ Una reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera en aproximadamente 281282 toneladas al año.
- ☞ Se redujo el consumo de combustibles fósiles (diesel) hasta 41 millones de galones al mes[33].
- ☞ Se calcula que en el corto plazo provocará un impacto similar al que tendría la entrada en operación de una central hidroeléctrica de las características de Sopladora, que se construiría en un plazo no menos de 4 años[34].
- ☞ Haciendo una proyección se estima que la colocación de 6 millones de lámparas fluorescentes de lámparas fluorescentes compactas a nivel nacional permitirá una reducción de 316 523 tons. De CO_2 al año.

En el caso de la m manipulación del foco ahorrador, el Ministerio en su programa de canje de focos dañados o quemados en su última etapa de trabajo, dispone lo siguiente:

"En el caso de que el foco ahorrador se encuentre en estado de deterioro (roto, trisado o similar) deberá ser entregado dentro de una funda plástica hermética sellada en los centros de acopio o Agencias de las Empresas Eléctricas disponibles. (NO SE DEBERÁ CANJEAR FOCOS ROTOS POR NUEVOS)."

---

[33] Fuente: Informe presentado por el CENACE con fecha 31 de Diciembre del 2009.

[34] Focos Ahorradores, la nueva luz del Ecuador, revista emitida por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.

"Almacenar los focos ahorradores quemados temporalmente (no mayor a un año) hasta que un Gestor Ambiental autorizado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable se encargue de su disposición final."

El proyecto contempla también la implementación del procesamiento de los residuos de los focos incandescentes casquillo y vidrio (Ver figura) así como las alternativas y propuestas para la gestión integral de los focos ahorradores una vez que terminen su vida útil.

4.6 COSTO ECONÓMICO Y DATOS DE DEMANDA.

Para la realización de la evaluación de los ahorros de la demanda y su costo económico, se utiliza la información de la sustitución realizada en el área de concesión de la ex Categ; estos datos son corroborados por el Cenace y corresponden hasta el mes de septiembre donde se sustituyeron aproximadamente 980 000 focos, lo que permite reflejar la existencia de ahorros en la curva de carga del mes de Octubre del 2009 y del cuales e extrae los parámetros para calcular los ahorros energéticos.

Tabla 4-3.Datos de ahorros provocados por la sustitución 5 millones de focos en guayaquil. Comisión de Focos Ahorradores - MEER

Focos Sustituidos hasta el 30 de septiembre	5 666 022	Focos sustituidos
Disminución de la Demanda	239	MWh Pico
	45 128	MWh / mes
	541 531	MWh / año
Disminución de Consumo de Diesel	22 825	gal /h
	3 471 351	gal / mes
	41 625 214	gal / año
Ahorro Económico en subsidios	239 666	$ / día
	7 289 837	$ / mes
	87 478 049	$ / año
Disminución de CO_2	935	Ton CO_2 / día
	28 430	Ton CO_2 / mes
	341 164	Ton CO_2/ año
Usuarios beneficiados	1 933 796	Familias beneficiadas
Usuarios que ingresaron a la tarifa de la dignidad	236 084	Familias beneficiadas

En conclusión los efectos de la utilización de los focos ahorradores en el área de concesión de Categ, se evalúan con base a la estimación de la reducción del crecimiento de la demanda de electricidad del año 2008, con referencia al año anterior.

El registro de evolución de las demandas de potencia y energía de los años 2007 y 2008, se presenta en las siguientes tablas y gráficos:

Tabla 4-4.Reducción del crecimiento de demanda. Fuente Cenace, 2008.

Porcentual %	Energía MWh	Potencia (*) MW	Mes
- **0.49%**	1 660	- 10.7	Sep-2008
- **1.61 %**	- 5 491	- 36.6	Oct-2008
- **4.12 %**	- 13 630	- 87.9	Nov-2008

La estimación de la reducción de crecimiento y disminución de los consumos de potencia y energía en el Sistema Nacional Interconectado, se realiza en base a la diferencia de los crecimientos de agosto, septiembre, octubre y noviembre de 2008, considerando además de 5 horas de encendido promedio de los focos ahorradores, de 18:30 a 23:30 (*).

Por lo tanto se concluye que en el período de septiembre a noviembre del 2008 se produjo una reducción del consumo de energía eléctrica de 20 781 MWh, y una reducción de la demanda máxima de potencia de 87.9 MW.[35]

4.7 ANÁLISIS DE LOS DATOS PRESENTADOS.

En base a los datos del CONELEC sobre el promedio de clientes regulados de las empresas distribuidoras alcanzó un valor de 3´430.433 en el primer semestre del año 2008.

Se calcula la demanda el consumo anual (kWh) y el costo anual (USD) con la estimación del número de clientes, donde se obtiene los siguientes resultados:

[35] Informe Anual del CENACE , al 31 de Diciembre 2008

Lámparas incandescentes

Se obtiene 380´3664.110 (kWh) equivalente 304´279.407.1 (USD)

Con la utilización de LFC

889´168.233.6 (kWh) equivalente 71´147.180.42 (USD),

Se puede concluir que el porcentaje de ahorro previsto con valores reales es de 60%.

Un alto porcentaje de ahorro anual tanto de energía como del costo que genera, sin embargo durante las fases que existieron en esta campaña nacional se presentó ciertos puntos favorables y desfavorables

En la primera fase su inversión fue rentable para el Estado debido que tuvo una introducción de las LFC`S por medio de la donación pero la calidad de las lámparas presentaron características de baja vida útil y por ende su pronta eliminación al medio ambiente.

Tampoco se dio a conocer el tratamiento de estas lámparas en caso de rotura; los pasos a seguir por el usuario para una correcta eliminación, sin exponer su salud con el mercurio.

En una segunda fase la calidad de LFC, presentan características similares con marcas reconocidas, por otro lado se realizaron pruebas en el MEER que verifica la calidad de estas lámparas. En la fase tres la distribuidora Quito específicamente toma correctivos enviando folletos informativos sobre la manipulación de las lámparas en caso de rupturas y conocer la forma de desecharlas.

Una recomendación que se da en este proyecto, es que se trabaje conjuntamente con el ministerio del ambiente y con sus gestores en cada provincia para que se realice una eliminación correcta de las LFC, se recomienda una mayor vialidad de trabajo con planes de reciclaje al igual que las pilas alcalinas para disminuir el impacto ambiental.

A más de ello se debe llevar un registro de los valores de potencia de los focos incandescentes que fueron cambiados por LFC en esta campaña, ya que solamente con el registro de los casquillos se puede tener una apreciación aproximada de los cálculos de ahorro de energía.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES.

Al terminar el presente proyecto, se presenta las siguientes conclusiones:

1. Bajo ciertas hipótesis un plan de sustitución masiva es conveniente para el país. En referencia al actual proyecto de sustitución impulsado por el gobierno, arroja resultados positivos lo que a futuro merece ser apoyado. La substitución es más rentable para lámparas de mayor potencia, ya que el consumo y ahorro energéticos son proporcionales a la potencia, pero el precio de la LFC es casi independiente de la misma a partir de las 9000 horas.

2. Podemos extender el criterio de substitución a todas incandescentes que suman más de 200 wat horas por día. Es decir, una incandescente con más de 2 horas por día, una de 60 W con más de 3,33 horas por día y una de 40 W con más de 5 horas de encendido.

3. Sin embargo, se evidencia que este programa de sustitución ha logrado una disminución en cuanto a la incorporación de las centrales térmicas al parque generador y por ende una disminución en las emisiones de CO_2 a la atmósfera, además de una disminución en la demanda de energía y en beneficio económico al estado en la compra de combustible.

4. El principal inconveniente que se presenta es el cuidado en la disposición al final de su vida útil, debe realizarse una recolección por separado no solo de este tipo de desechos sino de todos aquellos que contienen elementos tóxicos y nocivos para la salud humana.

5. Se evidenció que algunas lámparas no cumplen con la norma establecida por el INEN, por ejemplo: presentan omisiones con respecto a datos sobre la calidad de la lámpara. Omisiones de información referida a parámetros básicos, tales como flujo lumínico, eficiencia luminosa y vida útil haciendo más difícil la elección por

parte del comprador en una comparación entre productos de características similares basada exclusivamente en el precio.

6. Otro punto a tomarse en cuenta es la información sobre la correcta manipulación de las lámparas y su cuidado si se llega a romper; por lo demás el proyecto es conveniente en el aspecto económico y ambiental.

7. Con respecto a las conclusiones en el aspecto técnico se presenta los siguiente:

    a. El análisis de las formas de onda de las LFC`s, obtenidas en el laboratorio da lugar a un espectro que sólo contiene armónicas impares entre las que se destaca la tercera armónica. Cabe indicar que las terceras armónicas que circulan por los conductores de línea y sus múltiplos “se potencian” o multiplican 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.

    b. Este punto es de preocupación creciente en las empresas distribuidoras que observan un sensible incremento de la corriente de neutro en cables dimensionados con el viejo criterio que, asignaba a éste una sección menor que la correspondiente a cada fase. Lo que ocasiona que utilicen recursos en el cambio de este conductor y en algunos casos cambios en los transformadores de distribución.

    c. A pesar de los bajos valores de factor de potencia, la corriente que circula por los balastos electrónicos sin filtro es levemente capacitiva. No tiene sentido, entonces, intentar corregir el factor de potencia con capacitores. La forma de mejorarlo sería con la incorporación de un filtro conduce a un sensible mejoramiento de la forma de onda de la corriente y con ello del factor de potencia.

8. Haciendo referencia a un estudio realizado por el Ing. Brugnoni, donde hace referencia a la corrección del factor de potencia, se estudia dos problemas en la corrección del factor de potencia en circuitos con alto contenido armónico. El primero tiene que ver con la calidad de energía, representada por la distorsión que presenta la onda de tensión. Si se quiere mejorar el FP conectando capacitores en paralelo habrá que tomar en cuenta que los capacitores conectados en paralelo con la carga actúan como amplificadores de los armónicos de tensión, lo que provocará una distorsión en la forma de onda de tensión provista por la distribuidora.

9. En resumen se puede decir que agregar capacitores, en circuitos con distorsión en la onda de corriente, sólo puede compensar el reactivo que aporta la primera armónica. Es decir, la correcta introducción de capacitores puede acercar, hasta colocar en fase, a las ondas de tensión y corriente de la fundamental. Es inútil tratar de mejorar la situación más allá de este límite ya que si persiste el bajo valor del FP esto se deberá a una fuerte distorsión la que determina un valor del factor de contracción lejano de la unidad.

10. Las mediciones realizadas han permitido verificar que las LFC`s conectadas sobre las fases en forma balanceada dan lugar a corrientes de neutro que superan en un 73% a las corrientes de línea

11. En referencia a los valores de distorsión; para un THD de la tensión cuyo valor no supera el 2% se obtiene una corriente con una distorsión total que se aproxima al 20% con un notable refuerzo de las armónicas superiores.

12. En el tema de calidad de la luz se comprobó que el número de encendidos reduce además de su vida útil, la calidad de la luz representada por una disminución en su nivel lumínico en aproximadamente un 30% a partir de los 5000 encendidos (Datos tomados de las lámparas expedidas en los supermercados y que son las de mayor distribución).

13. En el aspecto económico se puede concluir que la rentabilidad depende de varios parámetros. Un análisis económico riguroso no es posible debido a la incidencia de la cantidad de encendidos sobre la vida útil de las lámparas. Considerando una visión pesimista en cuanto a las posibilidades de substitución, podemos suponer que el reemplazo es rentable para todas las lámparas incandescentes de 60 w que suma 2,67 horas o más de encendido diario, es decir con un consumo diario de más de 200 wat-horas.

14. Considerando las incandescentes con consumo superior a los 200 watt horas diarios, se puede estimar el potencial de ahorro en la substitución de éstas por LFC. Este potencial es 50%.

15. En el país no se producen lámparas fluorescentes compactas por lo tanto prácticamente todas vienen de China, pero con muy distintos niveles de calidad. Es así que las primeras lámparas que vinieron para el programa de sustitución fueron de baja calidad debido a que fueron parte de una donación de otro país. Sin embargo en el caso de los focos adquiridos en el supermercado, la calidad va ligada al precio es decir lámparas con un valor promedio de USD 1.50 no resultan convenientes para el proyecto de sustitución debido a su pronto deterioro de su vida útil y baja calidad lumínica después de las 50 horas de uso.

16. Según un estudio realizado en un congreso llevado a cabo en Argentina sobre el tema de los LED`S, concluye que al igual que las LFC's, los LEDs tienen altos valores de THDde corriente y bajos factores de potencia, convirtiendo a los LEDs en un futuro problema dentro de los sistemas de distribución, sobre todo cuando esta nueva tecnología se propague y se use intensivamente.

5.2 RECOMENDACIONES.

1. Es muy importante que las lámparas que el Estado distribuya (y las que el consumidor adquiera) sean de buena calidad: si se queman enseguida o iluminan poco, el usuario va a descreer de la tecnología, siendo que, cuando la calidad es razonable. Es mejor escoger las lámparas ahorradoras de energía de marcas reconocidas, evitando adquirir productos que no presenten todos los datos requeridos por la norma INEN tales como vida útil, clasificación de calidad, vida útil, etc.

2. Se recomienda que el estado debe realizar un control sobre la calidad de las LFC's que llegan al país, dando preferencia a aquellas que tienen reducidos contenidos de mercurio por lámpara y mayor vida útil además de la incorporación de filtros al balasto electrónico.. Esto permitirá el mejoramiento de la forma de onda, cuyo efecto inmediato se traduce en una disminución del THD y un simultáneo mejoramiento del factor de potencia.

3. Dado que en la normativa ecuatoriana no se regula el número mínimo de encendidos que deba soportar una lámpara, como norma para poder ser comercializada dentro del país, se recomienda establecer una normativa al respecto por parte del INEN. Para el efecto se sugiere tomar referencias OTRAS NORMATIVAS donde establezca que una lámpara debe soportar un numero de encendidos igual al doble de su vida útil es decir una lámpara de 6000 horas debe soportar unos 12 000 encendidos.

4. La concientización sobre su efecto contaminante al medio ambiente y a la salud humana debe ser tratado y más que todo informado a todos los usuarios con el fin de reducir su impacto negativo y prevenir traspiés cometidos. Esto con relación al plan gubernamental en donde se hace necesario informar a los usuarios sobre su tratamiento y manipulación en caso de exista rotura de la lámpara. Como se indica en el presente trabajo

5. La mejor estrategia para minimizar esos riesgos resulta, entonces, diseñar una gestión específica para ese tipo de residuos. La implementación de un sistema de gestión para las lámparas fluorescentes compactas como residuos, requerirá de la planificación de las diferentes actividades de: manipuleo, almacenamiento, transporte, tratamiento, y disposición, tomando en consideración la peligrosidad de sus componentes, su fragilidad, y carácter disperso. Deberían definirse mecanismos que permitan asignar responsabilidades a los diferentes actores que intervienen a lo largo del ciclo de vida de las lámparas. La asignación de responsabilidades está asociada a la determinación obligaciones con respecto a la internalización de los costos de implementación del sistema (fabricante -pagador o usuario- pagador), pero también está relacionada con la definición de acciones que deberá llevar a cabo cada actor en cuestiones de adecuación del residuo, almacenamiento, devolución, transporte, etc.

6. Es necesario también que el estado realice y exija un control de las lámparas en cuanto a su contenido de mercurio. Generalmente, las mejores tecnologías disponibles de fabricación a nivel mundial exhiben productos con un contenido promedio de 5 mg por lámpara, y se caracterizan por generar fuentes luminosas con largas vidas útiles. Deben evitarse que existan en el mercado productos fabricados mediante viejas tecnologías asociables a los altos niveles de mercurio previos a los esfuerzos en reducción, con vidas útiles inferiores a las de las más moderna y eficientes (por ejemplo: 3000 horas vs 8000/10000 horas), y que resisten un número muy inferior de encendidos.

7. Se recomienda o se sugiere podría incorporarse en la presentación del producto un tipo de sello o leyenda certificable que avalé el cumplimiento de las normas INEN principalmente con la cantidad de mercurio del producto, facilitando la elección por parte del comprador.

8. Los usuarios necesitarán conocer cuáles productos cumplen con las especificaciones de eficiencia y compatibilidad ambiental generadas por los

planificadores de los programas de uso eficiente de energía y de gestión de residuos, para premiarlos con su decisión de compra. También, en el caso particular de las LFC's, los usuarios necesitarán conocer bajo qué condiciones conviene instalarlas (características de las luminarias, ciclos de encendidos, condiciones de temperatura ambiente y humedad) y deberán ser informados acerca de cómo lograr, a través de una mejor utilización, que la vida útil real de cada lámpara sea la indicada por el fabricante o aún mayor.

9. Aplicación de incentivos o desincentivos arancelarios para la importación de productos en función de su calidad; o Implementación de una campaña de información/educación para el público en general, y para distribuidores, vendedores, proyectistas, contratistas, y funcionarios públicos, en particular.

.

10. De suposiciones a priori, se puede concluir que existe un balance negativo entre las emisiones de mercurio producido por la rotura de las LFC usadas, y la reducción de las emisiones de mercurio de las centrales térmicas.

11. Que las lámparas incandescentes sean reemplazadas por la LFC de menor potencia (Watt) que cumpla con entregar igual o mayor cantidad de lúmenes. Lo recomendable es que el Plan reemplace lámparas que entreguen una cantidad semejante de lúmenes y con la mínima potencia posible. Esto es reemplazar lámparas incandescentes de 75W por lámparas fluorescentes compactas de 20W, o lámparas incandescentes de 60W por LFC de 15W. Si el Plan se implementara de este modo, ésta debiera ser una condición de aplicabilidad de la metodología que se proponga, sino esta condición debiera ser sólo una recomendación.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TEXTOS:

1. EDMINISTER Joseph, Circuitos Eléctricos.
2. ENRÍQUEZ Harper, Gilberto. El ABC de la calidad de la energía eléctrica. 2003.
3. Torres, Horacio. Energía eléctrica, un producto con calidad.

PÁGINAS WEB:

1. Así funcionan las lámparas incandescentes. Disponible en: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_incandesc/af_incandesc_1.htm

2. Así funcionan las lámparas ahorradoras CFL. Disponible en: http://www.asifunciona.com/electronica/af_cfl/af_cfl_2.html.

3. Luminotecnia e Iluminación. Disponible en: http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_electrica_y_electronica/luminotecniailuminacion/defaul8.asp

REVISTAS Y DOCUMENTOS ESPECIALES:

1. Arias Blanco, Edward. “Estudio de armónicos en la red de distribución”. Informe de pasantía. USB. Diciembre 2003.

2. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std 519-1992.

3. Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución (Regulación No. CONELEC 004/01).Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC). 2001.

4. Comisión de Integración Energética Regional. Evaluación del programa de eficiencia energética para el sector residencial en base a LFC. Zumba, Diego. Cuenca 2008.

5. Ministerio de Electricidad y energía Renovable (MEER). “Impacto técnico – económico y ambiental de la sustitución de 6 millones de focos incandescentes por fluorescentes en todo el Ecuador.” Quito, Marzo 2008.

6. Schneider Electric. Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos.

7. TORRELLES, William, “Impacto del uso intensivo de las LFC en la calidad de energía suministrada por la EDC”, Abril, 2008.

PROYECTOS DE TITULACIÓN:

1. GARRIDO, Héctor. “La calidad de servicio eléctrico”. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica Quito, 1997.

2. SÁNCHEZ, Jorge Luis. “Evaluación de la calidad del servicio de distribución eléctrica en el Ecuador”. Escuela Politécnica Nacional, Quito. Facultad Ingeniería Eléctrica, 2001.

3. TAIMAL, Verenice. “Incorporación de la Eficiencia y Sistemas de Ahorro de Energía en el Edificio Mariana de Jesús y 10 de Agosto de la EEQ”

7 ANEXOS.

7.1 ANEXO 1.

INDICADORES COMPARATIVOS.

A partir de los conceptos de tasa de descuento y factor de recuperación de capital, se puede definir algunos indicadores útiles para evaluar la rentabilidad de las inversiones en el uso eficiente de energía. Estos indicadores permiten evaluar la conveniencia económica, o no, de utilizar tecnologías eficientes.

La elección del indicador a utilizar para realizar la evaluación dependerá del caso particular bajo estudio, de los datos disponibles, de la profundidad con que quiera procederse, etc. Los distintos indicadores se expresan en diversas unidades, que posibilitan varios enfoques en el análisis. En algunos estudios puede convenir, incluso, calcular más de un indicador para obtener una apreciación más completa del problema analizado, por ejemplo para comparación con otra alternativa de inversión u otro propósito.

En la Tabla 4, se resumen los rasgos más destacados de cada uno de ellos.

Cabe destacar que la determinación de si una opción de eficiencia energética es rentable o cual de dos o más alternativas es la más rentable es independiente del indicador utilizado, siempre que las suposiciones fueran las mismas.

Generalmente las instalaciones de iluminación eficientes requieren una mayor inversión inicial debido a que este tipo de tecnologías son más caras. Sin embargo y a lo largo de la vida útil de la instalación, se verá una reducción en los costos operativos energéticos y posiblemente también del mantenimiento de las instalaciones. La evaluación económica consiste en apreciar si la mayor inversión adicional se justifica en términos de los ahorros futuros de energía y mantenimiento.

A continuación, se desarrollará las características de los proyectos y la nomenclatura utilizada para realizar los cálculos.

Inversiones.

En adelante al costo inicial de la tecnología *convencional* se lo llamará *CC*, mientras que al de la tecnología *eficiente CE*. La inversión adicional ΔI se computará de la siguiente forma:

$$\Delta I = CE - CC \qquad (7)$$

Las tecnologías eficientes tienen generalmente un costo superior de las que no lo son, por lo cual ΔI es positivo.

Costos de operación y mantenimiento (O&M).

Los costos de operación y mantenimiento (O&M) pueden resumirse en:

a) Costos de la energía,

b) Costos de la potencia[36] y

c) Costos de mantenimiento.

Los costos de O&M en las instalaciones de iluminación eficiente generalmente son siempre inferiores a los de aquellas que no lo son.

Al consumo energético de la instalación convencional se lo denominará *EC* y al de la variante eficiente *EE*. Este consumo se indicará, generalmente, en kWh al año [kWh/año].

El precio de la energía está determinado por el sitio y el tipo de tarifa aplicado a la instalación. A este precio se lo notará como PE y en general estará expresado en dólares por kilowatt-hora [$/kWh].

Existen otros costos que deben ser evaluados cuando corresponda, como ser el costo que se paga por potencia contratada en algunas tarifas. Para ello debemos considerar la potencia demandada por las instalaciones. Esta potencia será generalmente menor en la instalación eficiente que en la que no lo es. A la potencia *demandada* por la instalación *eficiente* se la notará como DE y a la *convencional*, DC y se expresa en [Kw]. Al costo de la *potencia* se lo señalará PP,

[36] Solo en aquellas tarifas que incluyen un cargo por este concepto.

y estará indicado en dólares por kilowatt al año [$/Kw-año][37]. La evaluación del costo por potencia cobra sentido cuando la modificación afecta una gran porción de la instalación o a un proyecto completo, y puede en consecuencia disminuirse el monto de la potencia contratada.

En ciertos casos, también podrán obtenerse beneficios indirectos como por ejemplo descenso en los niveles de mantenimiento, de requerimiento de aire acondicionado, etc. que, llegado el caso, también pueden ser evaluados.

En resumen:

CE: costo (inversión inicial) de la tecnología eficiente. [$].

CC: costo (inversión inicial) de la tecnología convencional [$]

EE: consumo anual de energía de la tecnología eficiente [kWh/año]

EC: consumo anual de energía de la tecnología convencional [kWh/año]

PE: precio de energía [$/kWh]

DE: demanda de potencia en la instalación eficiente [kW]

DC: demanda de potencia en la instalación convencional [kW]

PP: precio de la potencia [$/kW-año]

CMC: costo de mantenimiento de la tecnología convencional [$/año]

CME: costo de mantenimiento de la tecnología eficiente [$/año]

Utilizando esta nomenclatura, se tiene que el ahorro anual – beneficio - obtenido en O&M, ΔO&M, queda expresado de la siguiente forma:

$$\Delta O\&M = (EC - EE) * PE + (DC - DE) * PP + (CMC - CME) \qquad (8)$$

[37] Debe considerarse que el costo se paga mensualmente, por lo que el monto anual se obtendrá multiplicando por 12 (meses).

7.1.1 VALOR ACTUAL NETO (VAN).

Recordando el concepto de valor actual, el VAN se obtiene sumando los costos y los beneficios producidos en un determinado proyecto a lo largo de su vida útil ajustándolos a su valor actual.

$$VAN = \sum_{n=0}^{N} \frac{Fn}{(1+i)^n} = F_0 + \frac{F_1}{(1+i)^1} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + K + \frac{F_N}{(1+i)^N} \quad (9)$$

A diferencia del concepto de valor actual visto en la Sec. 3.2.1.4 Valor actual (Ec. (3)) el valor actual neto, para evaluar integralmente el proyecto incorpora a la sumatoria el término correspondiente a la inversión inicial F_0.

Para el cálculo del VAN en iluminación eficiente, se considerarán los flujos de caja de las inversiones como negativos *(CE - CC)* y los correspondientes a los ahorros *(PE x (EC — EE))* como positivos. El VAN queda expresado en dólares [$]. Para el caso particular en donde comparemos dos alternativas de iluminación eficiente, la expresión que queda (aplicando (7), (8) y (9)) utilizando la nomenclatura ya vista, es la siguiente:

$$VAN = \Delta I + \sum_{n=1}^{N} \frac{\Delta O \ \& \ M}{(1+i)^n} \qquad (10)$$

Aquellas alternativas con VAN positivos mayores resultan convenientes.

Ejemplo

Sea un proyecto eficiente de 5 años, que tiene una inversión adicional mayor que el convencional ΔI de $10.000. La variante eficiente produce un ahorro anual de O&M de $4.000 y se considera una tasa de descuento del 10%. El VAN quedará determinado entonces por el desarrollo que se efectúa en la Tabla 3.

Tabla 5. Valor Actual Neto de los movimientos de caja de dólares actuales.

Período **n**	Mov. de caja F_n	$\frac{1}{(1+i)^n}$	Valor actual
0	$(10 000)	1	$(10 000)
1	$ 4 000	0.9091	$ 3 636
2	$ 4 000	0.8264	$ 3 306
3	$ 4 000	0.7513	$ 3 005
4	$ 4 000	0.6830	$ 2 721
5	$ 4 000	0.6209	$ 2 484
		Valor Actual Neto	$ 5 152

Un VAN positivo como el que resulta del ejemplo, muestra que la inversión considerada resulta económica. Frente a otra alternativa con un VAN mayor debería escogerse la de VAN más alto. Si la inversión hubiese dado un VAN igual a cero, esto significaría que resultaría indiferente para el inversor. Mientras que, una inversión con un VAN negativo hubiera indicado que los ahorros que se percibirán en el futuro tendrán menor valor que la inversión realizada en el año cero resultando por lo tanto inconveniente.

El VAN se recomienda para la evaluación de alternativas que son mútuamente excluyentes, por ejemplo varios alternativos diseños de iluminación para un estadio de futbol. El diseño cuyo VAN es mayor resulta más conveniente económicamente.

7.1.2 EL PERIODO SIMPLE DE REPAGO (PSR).

Una forma muy común de evaluar una inversión es a partir de cuantificar el tiempo que tarda en recuperarse la inversión adicional. Para hacer esto el índice más sencillo es el periodo simple de repago (PSR) del capital. El PSR es la relación entre la inversión inicial y el ahorro en el primer año.

$$PSR = \frac{\Delta I}{\Delta O\&M} \qquad (11)$$

El resultado de este indicador está expresado en años o fracción.

Pese a su sencillez y popularidad, éste es el menos deseable de los indicadores, ya que no considera la vida útil de la inversión ni el valor futuro del dinero.

7.1.3 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR).

La tasa interna de retorno (TIR) de una inversión que tiene una serie de flujos de caja futuros (F_0, F_1,... F_n) es la tasa de descuento *i* para la cual el Valor Actual Neto es cero.

En nuestro caso, recordando la expresión (9), resulta:

$$VAN = \Delta I + \sum_{n=1}^{N} \frac{\Delta O\&M}{(1+i)^n} = 0 \qquad (12)$$

Para calcular la tasa interna de retorno hay que encontrar la fórmula que anule el VAN dado los valores de *CE, CC, PE, EE, EC y N* (que intervienen en el cálculo de ∆I y ∆O&M. Debido a que esta ecuación no tiene una solución analítica explícita, es más fácil resolverla por iteración suponiendo distintos valores para *i*. Afortunadamente la ecuación (9) se puede resolver con facilidad en una planilla de cálculo, caso que se verá en la sección de ejemplos. Adicionalmente las calculadoras financieras pueden dar el valor del TIR.

7.1.3.1 Consideraciones sobre la TIR.

La ventaja de este índice es que el cálculo no requiere la especificación de una tasa de descuento, y el resultado aparece como una tasa derivada de la inversión. Sin embargo, este método asume implícitamente que el beneficio que se recibe a través de ahorros energéticos se está invirtiendo en un negocio que gana la misma tasa. Esta suposición es cierta cuando un proyecto genera una TIR cercana a la tasa de descuento (una inversión alternativa) pero cuando la TIR es mucho mayor, se sobrestima el rendimiento[38].

Un inconveniente con el uso del TIR (al igual que el PSR) es que sólo se puede comparar dos alternativas a la vez, por ejemplo, una eficiente versus una convencional.

[38] Para este último tipo de proyectos las tasas pseudo internas o ajustada de retorno que no se verán en este capítulo

En proyectos de eficiencia energética, es común analizar varias alternativas, en cuyo caso el análisis se vuelve oneroso. La alternativa con mayor TIR respecto a la opción convencional no es necesariamente la mejor. Se tiene que ordenar las alternativas en orden incremental de inversiones y analizar pares consecutivos para determinar si la inversión incremental es rentable (*TIR> i*).

7.1.3.2 Comparación entre los distintos índices.

Debido a que los indicadores a utilizar tienen diversas características, éstas se sintetizan en la Tabla 4 con el objeto de facilitar su selección.

Tabla 6. Características destacadas de los indicadores comparativos.

		Tiene en cuenta		**Características generales**
Indicador	Se expresa en:	Vida útil	Valor futuro del dinero	Sencillez de cálculo (*)
PSR	Años	No	No	Sí
VAN	$	Sí	Sí	No
TIR	%	Sí	Sí	No
CAT	$/año	Sí	Sí	Sí

(*) Si el cálculo se realiza con computadora la operatoria será simple en todos los casos, excepto cuando deban compararse alternativas con distinta vida útil.

7.2 ANEXO 2. EL MERCURIO EN EL AMBIENTE.

El mercurio se genera de manera natural en el medio ambiente y se encuentra en distintas formas. Se trata de un metal pesado que en su forma pura se le conoce como mercurio “elemental” o “metálico”. El mercurio elemental a temperatura ambiente es un líquido blanco plateado brillante, y si no está encapsulado se evapora parcialmente. Los vapores de mercurio son incoloros e inodoros. La producción de vapores aumenta con el aumento de temperatura.

Rara vez se le encuentra en su forma pura, como metal líquido; es más común en compuestos y sales inorgánicas. Se extrae como sulfuro de mercurio (mineral de cinabrio), los yacimientos de cinabrio han sido la fuente mineral para la extracción comercial de mercurio metálico. La forma metálica se refina a partir del mineral de sulfuro de mercurio calentando el mineral a temperaturas superiores a los 540 º C. De esta manera se vaporiza el mercurio contenido en el mineral, y luego se captan y enfrían los vapores para formar el mercurio metálico líquido.

Algunos de los compuestos inorgánicos de mercurio son: sulfuro de mercurio (HgS), óxido de mercurio (HgO) y cloruro de mercurio ($HgCl_2$). La mayoría de los compuestos inorgánicos de mercurio son polvos o cristales blancos, excepto el sulfuro de mercurio, que es rojo y se vuelve negro con la exposición a la luz. Algunas sales de mercurio (como el $HgCl_2$) son lo bastante volátiles para existir como gas atmosférico. Sin embargo, la solubilidad en agua y reactividad química de estos gases inorgánicos de mercurio hacen que su deposición desde la atmósfera sea mucho más rápida que la del mercurio elemental. Esto significa que la vida atmosférica de los gases de mercurio divalentes es mucho más corta que la del gas de mercurio elemental.

Varias formas de mercurio se dan de manera natural en el medio ambiente. Las formas naturales de mercurio más comunes en el medio ambiente son el mercurio metálico, sulfuro de mercurio, cloruro de mercurio y metilmercurio. Ciertos microorganismos y procesos naturales pueden hacer que el mercurio en el medio ambiente pase de una forma a otra.

7.2.1.1 Ciclo Global del Mercurio.

Como elemento químico, el mercurio no puede ser creado ni destruido. La misma cantidad ha existido en el planeta desde que la tierra fue formada. Los suelos superficiales de la tierra, las aguas y los sedimentos del fondo acuático se consideran los principales depósitos biosféricos de mercurio.

El mercurio posee un ciclo en el ambiente como parte de actividades naturales y antropogénicas. Los resultados de mediciones y modelos indican que la cantidad de mercurio movilizada y emitida a la biosfera se ha incrementado desde el comienzo de la era industrial.

Distintos tipos de fuentes de emisiones contribuyen a la carga total de mercurio atmosférico. Una vez en el aire, el mercurio puede dispersarse y ser transportado a gran distancia de la fuente de emisión. La distancia de este transporte y la eventual deposición depende de la forma física y química del mercurio emitido. Hay estudios que indican que el tiempo de residencia del mercurio elemental en la atmósfera puede estar en el orden de un año, permitiendo la distribución a través de grandes distancias, tanto regional como globalmente, antes de ser depositado en la tierra. El tiempo de residencia de los compuestos de mercurio oxidado en la atmósfera es incierto, pero se cree que es del orden de unos pocos días o menos. Aún después de depositarse, el mercurio es nuevamente emitido a la atmósfera sea como gas o en asociación con partículas que se depositarán a su vez en otro sitio. El mercurio bajo una serie de complejas transformaciones físicas y químicas forma un ciclo entre atmósfera, tierra y agua. Desde una variedad de fuentes, es dispersado y transportado en el aire, depositado en la tierra, y almacenado o transferido entre suelo, agua, y aire; numerosos estudios de elevados niveles de mercurio en localizaciones remotas, donde el transporte atmosférico y la deposición aparecen como los mecanismos primarios de contaminación, proveen evidencia de la importancia de los patrones atmosféricos.

La especiación desempeña un papel importante en la toxicidad y exposición al mercurio de organismos vivos. También incide en el transporte del mercurio dentro de cada compartimiento medioambiental y entre uno y otro, como la atmósfera y los océanos. Por ejemplo, la especiación es un factor determinante para la distancia que recorre el mercurio emitido en el aire desde su fuente de

emisión. El mercurio adsorbido en partículas y compuestos de mercurio iónico (divalente) cae sobre todo en el suelo y las aguas cercanas a las fuentes (distancias locales a regionales), mientras que el vapor de mercurio elemental se transporta a escala hemisférica/mundial, lo que hace de las emisiones de mercurio una preocupación de alcance mundial.

Adicionalmente la especiación es muy importante para la capacidad de controlar las emisiones de mercurio en el aire. Por ejemplo, algunos instrumentos de control (como depuradores húmedos) captan razonablemente bien las emisiones de compuestos inorgánicos de mercurio, pero la mayoría de este tipo de instrumentos capta poco mercurio elemental.

7.2.1.1.1 Ecosistemas vulnerables.

Hay estudios recientes que sugieren que el mercurio ocasiona una reducción de la actividad microbiológica vital para la cadena alimentaria terrestre en suelos de grandes partes de Europa y posiblemente de muchos otros lugares del mundo con características edafológicas similares. A fin de prevenir los efectos ecológicos del mercurio en suelos orgánicos se han establecido límites críticos preliminares de 0.07-0.3 mg/kg de contenido de mercurio total en el suelo. En el ámbito mundial, la región del Ártico ha atraído recientemente la atención debido al transporte a largas distancias del mercurio. Sin embargo, los efectos del mercurio no son en absoluto exclusivos de la región Ártica.

El aumento en los niveles de agua asociados con el cambio climático mundial también podría tener efectos en la metilación del mercurio y su acumulación en peces. Por ejemplo, existen indicios de una mayor formación de metilmercurio en lagos pequeños y cálidos y en muchas áreas recién inundadas.

7.2.2 EFECTOS DEL MERCURIO EN LOS ANIMALES.

La biomagnificación del mercurio es lo que más incide en los efectos para animales y seres humanos. Al parecer, los peces adhieren con fuerza el metilmercurio; casi el 100% del mercurio que se bioacumula en peces depredadores es metilmercurio.

En comparación con otros compuestos de mercurio, la eliminación del metilmercurio en peces es muy lenta. En concentraciones ambientales

constantes, las concentraciones de mercurio en peces de determinada especie tienden a aumentar con la edad, como consecuencia de la lenta eliminación del metilmercurio y una mayor ingesta debido a los desplazamientos en los niveles tróficos que suele haber a medida que el pez va creciendo (come cada vez más peces, y las presas son más grandes). Por eso, es común que los peces más viejos tengan en sus tejidos concentraciones de mercurio más altas que los peces más jóvenes de la misma especie.

Generalmente, el mercurio se acumula en la cadena alimenticia acuática de forma que los organismos de los altos niveles tróficos presentan mayores concentraciones del metal. En los niveles tróficos más altos están las aves y mamíferos, animales y humanos. Por lo tanto, el mercurio es transferido y acumulado a través de varios niveles tróficos.

Los estudios muestran que el mercurio se transmite a través de los efectos de la exposición de corta y larga duración a través del agua, de los alimentos o de la inhalación de polvo. Estos estudios muestran que por vía oral el mercurio inorgánico puede ocasionar daño renal, efectos en la presión sanguínea y el estómago, así como reacciones autoinmunes y alteraciones en el sistema nervioso. Por su parte, la exposición a corto plazo afecta a fetos. El mercurio orgánico en exposiciones a largo plazo provoca daño renal, estomacal, intestinal, alteraciones en la presión sanguínea, efectos adversos en el feto, esperma y órganos reproductivos masculinos, además de abortos espontáneos y muertes al nacer; el sistema nervioso es más sensible que los otros órganos a los efectos tóxicos de estos compuestos; también hay indicios de que pudiera ocasionar cáncer renal.

7.3 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ENERGÉTICA ENEL ECUADOR

La energía disponible para distribución durante el año 2007 llegó a 14.377 MWh, de los cuales descontando las pérdidas en el proceso de distribución se llegó a facturar 11.585 MWh, que significaron 977 millones de dólares, de lo cual se recaudó el 91%. En la siguiente tabla se presenta un resumen de algunas cifras al respecto.

Tabla # 1: Estadísticas Globales del año 2007

Parámetro	Unidad	Valor
Energía Disponible distr	MWh	14,377,614
Energía perdida distrib.	MWh	2,792,485
Energía Facturada	MWh	11,585,129
Precio Medio	US¢/kWh	8.43
Dolares Facturado	USD	977,140,945
Impuestos en Planilla	USD	174,066,727
Recaudación	USD	869,833,988
Recaudación	%	91.07
Cobertura Serv. Eléctrico	%	90.97
Pérdidas Energía	%	21.07

Lo anterior corresponde a un mercado de 3,37 millones de clientes, 87% del los cuales fueron residenciales, consumiendo el 35% de la energía facturada, como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla # 2: Estadísticas Comerciales- año 2007

Tipo de Consumo	Factura Energía (GWh)		Precio medio (¢/kWh)	# de Clientes (Miles)	
Residencial	4.096	35%	9,65	2.948	87%
Comercial	2.203	19%	8,18	336	10%
Industrial	3.445	30%	6,46	41	1%
A.Público	774	7%	12,65	1	0%
Otros	1.067	9%	7,61	45	1%
TOTAL	11.585	100%	8,43	3.371	100%

A continuación, la demanda de los usuarios finales ha crecido sostenidamente durante el quinquenio 2002 - 2006, tanto en demanda de potencia como de energía, así también la necesidad de suministro por mayor cantidad de clientes,

las cifras en promedio superan el 6% anual; el año 2007, por razones que se analizan más adelante se registran valores menores.

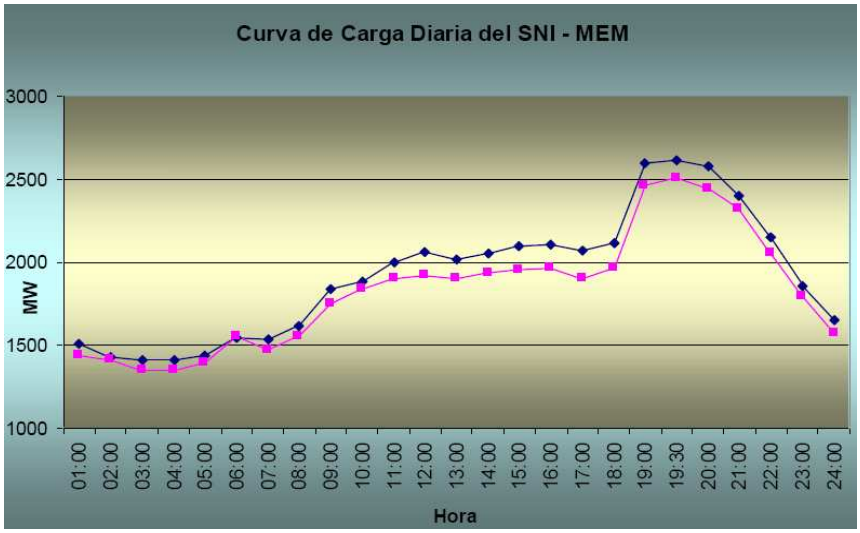
Tabla # 3: Crecimiento de la Demanda

AÑO	Energía Disponible Distribución		Demanda Máxima en Generación		Clientes Regulados al final del Año	
	GWh	(%)	MW	(%)	Número	(%)
2.002	11.013		2.134		2.623.291	
2.003	11.613	5,4%	2.223	4,2%	2.746.168	4,7%
2.004	12.435	7,1%	2.401	8,0%	2.891.519	5,3%
2.005	13.192	6,1%	2.424	1,0%	3.079.458	6,5%
2.006	14.083	6,8%	2.642	9,0%	3.229.890	4,9%
2.007	14.378	2,1%	2.706	2,4%	3.371.036	4,4%

La curva de carga del sistema eléctrico constituye otro factor de importancia al momento de analizar la realidad de la oferta y demanda de energía en el país, ya que muestra la forma de la utilización de la energía a lo largo de un día típico.

La curva típica de carga del sistema eléctrico nacional interconectado que se presentó en el año 2007 es la que se muestra en el Gráfico # 1, notándose que existe un pico de demanda entre las 18h00 y 22h00, determinado principalmente el consumo residencial. Se observan en la figura las curvas para día laborable en color azul y para fin de semana o feriado en color rosado.

Gráfico # 1: Curva de Carga S.N.I.



Desde el lado de la oferta, se observa que a diciembre de 2007, la potencia conectada al S.N.I. en el país alcanzaba los 4.269 MW, en tanto que la potencia

efectiva llegó a 3.831 MW, de los cuales un 52% es hidroeléctrica efectiva, mientras que el restante 48% esta conformada por plantas térmicas e interconexión con Colombia y Perú.

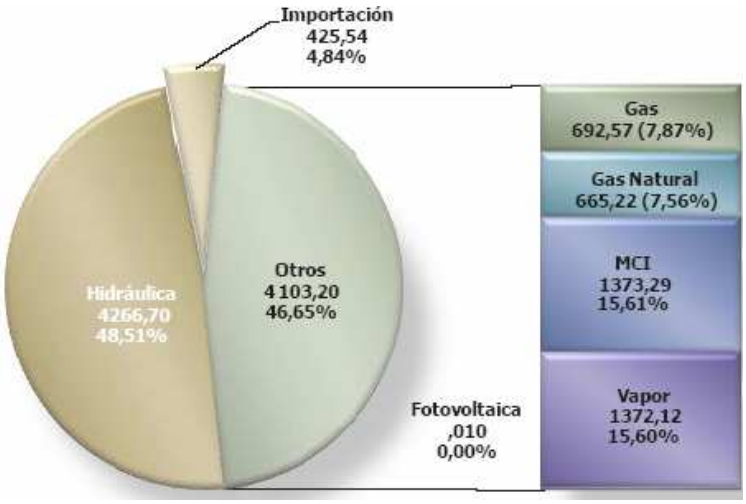
Tabla # 4: Potencia disponible a Dic/2007.

Tipo Central	Nominal		Efectiva	
	(MW)		(MW)	
Hidráulica	2.020,60	47%	1.991,82	52%
Térmica Gas	667,14	16%	602,50	16%
Gas Natural	140,00	3%	130,00	3%
Térmica MCI	521,90	12%	361,36	9%
Térmica vapor	519,80	12%	506,30	13%
Interconexión	400,00	9%	240,00	6%
TOTAL	**4.269,44**	**100%**	**3.831,98**	**100%**

La casi totalidad de los motores de combustión interna (MCI) de las centrales térmicas tienen más de 30 años de instalación, razón por la cual sus rendimientos y factores de planta son bajos, por lo que deberían salir de servicio en forma progresiva, desplazadas en el mercado por la incorporación de unidades de generación más eficientes.

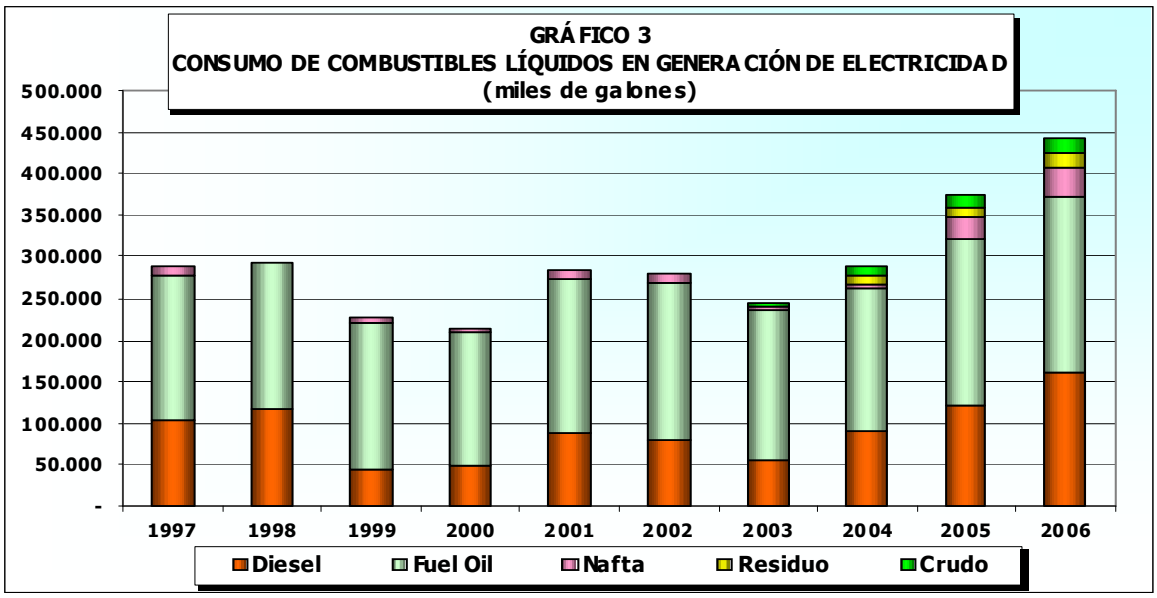
La generación bruta, que corresponde a la energía que se genera durante un tiempo determinado, utilizando la potencia disponible, para el 2007 alcanzó los 17.746 GWh. En el siguiente gráfico se puede apreciar el abastecimiento de la energía por tipo de fuente para el primer semestre del año pasado.

Gráfico # 2: Producción de Energía – Primer Semestre 2007



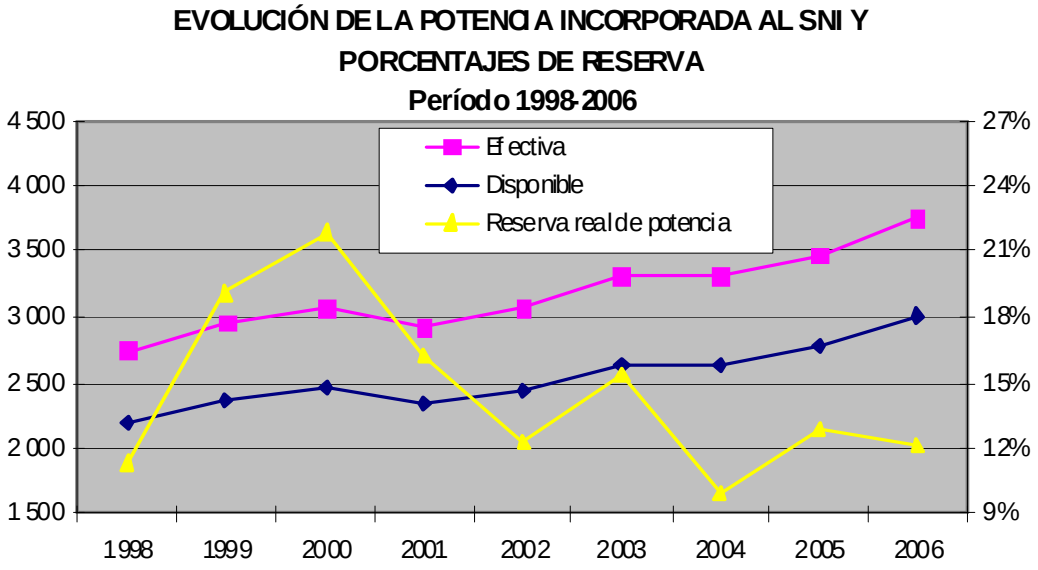
La poca disponibilidad de la oferta energética de las centrales hidroeléctricas en los períodos de estiaje, ha obligado al funcionamiento de las unidades de generación termoeléctrica de altos costos, sobre todo aquellas que funcionan con diesel o nafta. En el período de análisis, la utilización anual de diesel, fuel oil, nafta y residuo ha tenido un comportamiento como el indicado en la figura siguiente.

Gráfico # 3: Consumo del combustible



En la siguiente figura se puede observar la evolución registrada durante la última década de la potencia efectiva y disponible para satisfacer la demanda eléctrica nacional, se incluye adicionalmente el margen de reserva (en porcentaje) existente entre la capacidad de generación efectiva y los requerimientos de la demanda del país, pudiéndose notar que este margen se ha reducido considerablemente los últimos años, llegando a tenerse apenas un 12% de reserva. Debe considerarse que en este cálculo se incluye la capacidad efectiva del enlace internacional (240 MW), misma que podría bloquearse de así convenir a los países vecinos, con lo que el Ecuador se vería enfrentado a sufrir racionamientos de electricidad.

Gráfico # 4: Margen de Reserva en el País



Para atender los requerimientos de esta demanda y para recuperar el margen de reserva de generación a valores técnicamente adecuados, el país está realizando varias inversiones en generación que demandan ingentes recursos de la caja fiscal y requieren de un considerable tiempo para que entren en operación, lo cual sumando al gran volumen de recursos gastado en la compra de combustibles para la generación, obliga a buscar alternativas para restablecer el balance entre oferta y demanda de energía eléctrica, surgiendo como una de las mejores alternativas desde el lado de la demanda la implementación de programas de uso eficiente de energía.

LOS USOS FINALES DE LA ENERGÍA.

Una identificada la opción de eficiencia energética, es necesario determinar puntos donde concentrar la atención con planes y acciones específicas. Para ello adecuado partir del estudio de usos finales de energía; en el caso presente nos concentraremos en el sector residencial, que como se ha explicado anteriormente es el responsable de los mayores picos de consumo, donde se producen los mayores costos de generación e impactos al medio ambiente por la generación termoeléctrica que interviene en esos momentos.

Según el análisis en la hora de demanda pico, el factor iluminación pasa a ocupar el mayor porcentaje de consumo, esto indica un claro índice de la importancia de dicho factor en la curva de carga del sistema como se ve a continuación.

Gráfico # 5: Curva de carga - Costa

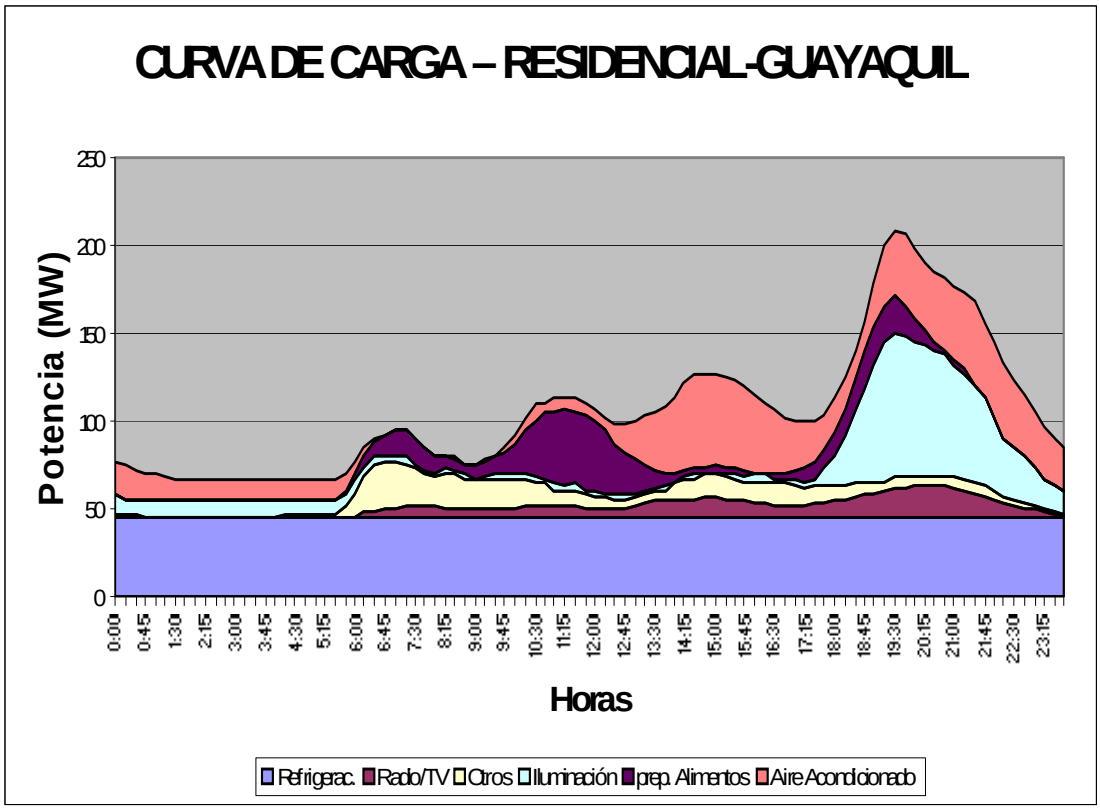
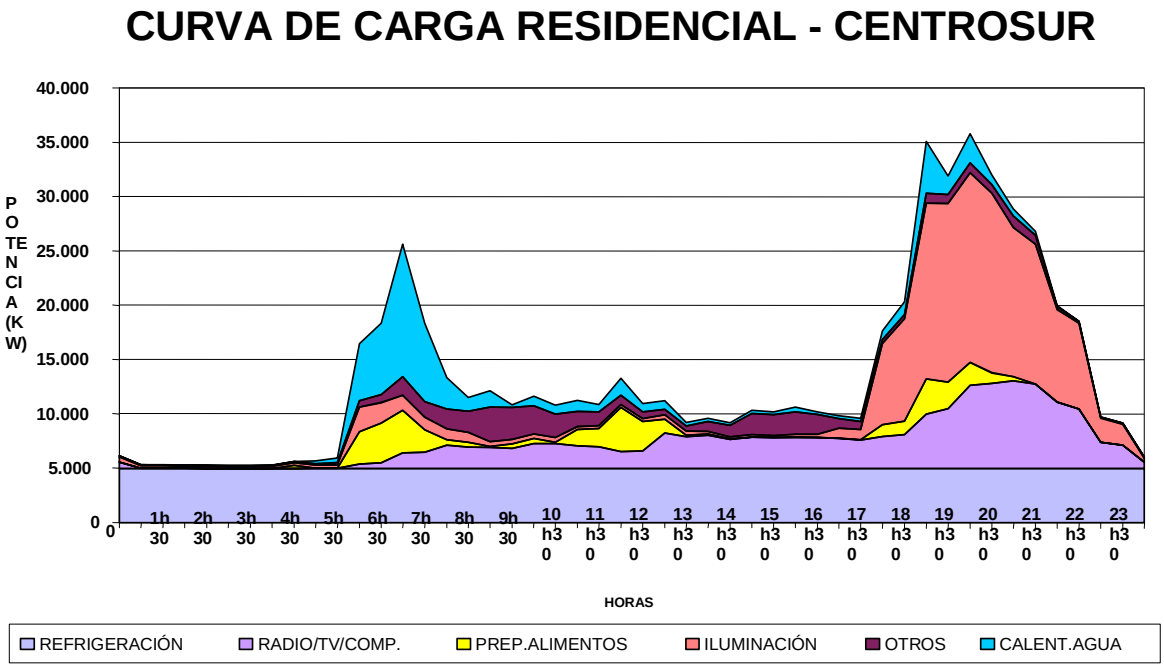
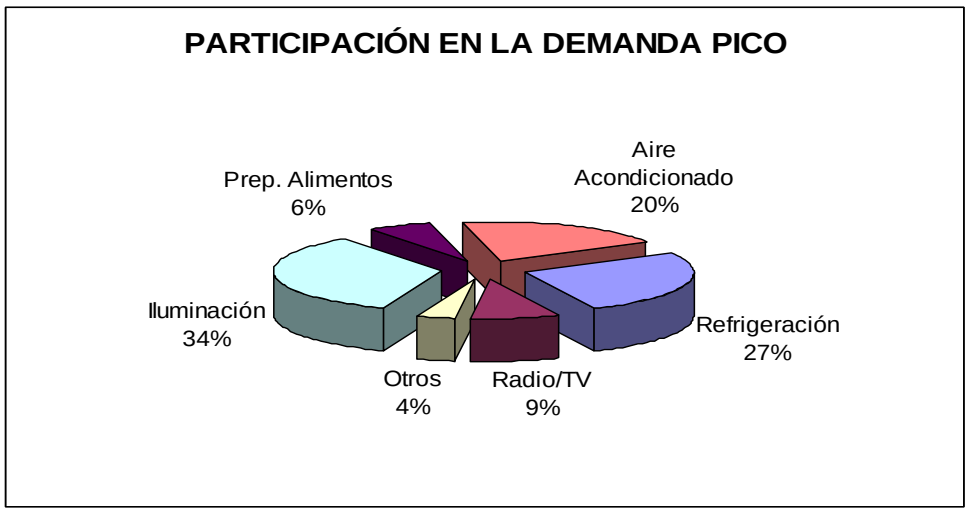


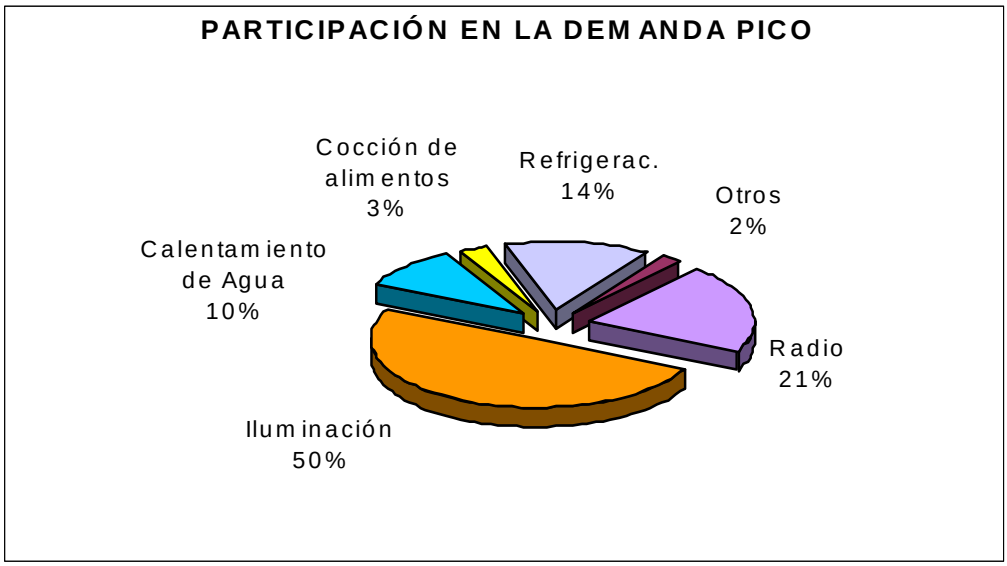
Gráfico # 5: Curva de carga - Sierra



Como se puede observar, ya sea en la costa o en la sierra, la iluminación residencial es la responsable del pico de consumo para este tipo de consumo y por ende de todo el consumo eléctrico a nivel global nacional, de esta forma, en el momento que se produce la demanda pico entre las 18h00 y 22h00 el consumo en iluminación es el factor que define la curva de carga.

Gráficos # 6: Consumo Residencial Hora Pico Guayaquil y Cuenca.





Al analizar detenidamente el consumo en las horas pico en las empresas distribuidoras localizadas en la zona de estudio, se concluye que la iluminación juega un papel fundamental representando en promedio un 57% de la demanda de potencia a esas horas.

La reducción del consumo energético en las horas pico permitiría un ahorro importante al país a la vez que disminuiría los requerimientos de combustible y construcción de nuevas infraestructuras de generación.

Al existir tecnologías de iluminación que permiten este ahorro, como es el caso concreto de las lámparas fluorescentes compactas o “focos ahorradores”, es de interés el estudiar su potencial de difusión en el mercado residencial ecuatoriano a fin de conseguir importantes ahorros para el estado y el consumidor, como se ha logrado en programas de este tipo, tanto dentro como fuera del país.

7.4 OTRAS TECNOLOGÍAS DE LFC

Otro tipo de lámpara fluorescente es la fluorescente sin electrodos, conocida como lámpara radiofluorescente o de inducción fluorescente. A diferencia de otras lámparas fluorescentes convencionales, la iluminación se lleva a cabo mediante inducción electromagnética. Esta inducción es efectuada mediante un núcleo de ferrita con un embobinado de hilo de cobre que se introduce en el bulbo de la lámpara encapsulado en una cubierta de vidrio con figura de "U" invertida. El embobinado es energizado con corriente alterna a una frecuencia de 2,65 o 13,6 MHz; esto ioniza el vapor de mercurio de la lámpara, excitando el recubrimiento interno de fósforo y produciendo luz. La ventaja principal que ofrece esta tecnología es el enorme aumento en la vida útil de la lámpara, la cual es típicamente estimada en 60 000 horas.

Otra variante de las tecnologías existentes de CFL son los bulbos o lámparas con un recubrimiento externo de nano-partículas de dióxido de titanio. Esta sustancia es un fotocatalizador que se ioniza cuando es expuesto a las radiaciones ultravioleta producidas por la CFL, siendo capaz de convertir oxígeno en ozono y agua en radicales hidroxilos, lo que neutraliza los olores y elimina bacterias, virus y esporas de moho.

La lámpara de luz fluorescente de cátodo frío (CCFL, por sus siglas en inglés) es una de las formas más nuevas de CFL. Las lámparas CCFL usan electrodos sin filamentos. El voltaje que atraviesa a estas lámparas es casi 5 veces superior al de las lámparas CFL y la corriente entre sus terminales es de alrededor de 10 veces menor. Las lámparas CCFL tienen un diámetro de casi 3 mm y son usadas en la retroiluminación de los monitores delgados. Su tiempo de vida útil es de aproximadamente 50 000 horas y su rendimiento luminoso es igual a la mitad de las lámparas CFL.

Actualmente, están empezando a extenderse las bombillas de LEDs blancos. Tienen un rendimiento y duración similar o incluso superior a las fluorescentes compactos y además se pueden encender y apagar (incluso cientos de veces por segundo) sin que su vida útil se vea afectada.