

# EVALUACIÓN TÉCNICA – ECONÓMICA DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS

Ing. Edison Moposita  
Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Ing. Eduardo Cazco

**Resumen.-** El objetivo del proyecto es estudiar las características eléctricas de las lámparas fluorescentes compactas – LFC, su comportamiento individual e influencia en las redes eléctricas de las distribuidoras y evaluar económicamente la factibilidad de invertir en un plan de sustitución masiva; se toma en cuenta también el impacto ambiental.

Se indican los conceptos teóricos relacionados con la estructura, funcionamiento y la normativa de las LFC y las incandescentes. Asimismo, se repasa los conceptos sobre calidad de la energía (indicadores de calidad, armónicos y sus técnicas de control).

En base a la normativa estudiada, se realizan pruebas de laboratorio a un grupo de lámparas seleccionadas aleatoriamente, concluyéndose que presentan un índice de distorsión armónica, bajo el 120% del valor de la fundamental; las lámparas fluorescentes tiene consumos más bajos que las equivalentes incandescentes.

El estudio económico mediante el método del Costo Anualizado Total (CAT), demuestra que la sustitución de incandescentes por LFC es conveniente debido al ahorro de energía.

En la parte final del proyecto se hace una revisión del plan gubernamental del Ecuador de instalación masiva de LFC, se emiten sugerencias que se consideran necesarias y se concluye que dicho plan debe ser impulsado.

## I. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento actual de la población, junto al desarrollo tecnológico y el comercio a nivel global, el consumo de energía eléctrica ha crecido sostenidamente. Además, la elevación de los precios de los recursos no renovables y el deterioro ambiental exige que varios gobiernos busquen soluciones responsables; estas soluciones han encaminado programas de eficiencia energética y prioritariamente las de efecto inmediato.

Dentro de este marco, se halla la sustitución masiva de lámparas incandescentes por las lámparas fluorescentes compactas – LFC; esta opción desde el punto de vista energético (en base a rendimiento),

aparece como la solución más idónea. Sin embargo, al estar formadas básicamente de un tubo fluorescente y un balastro electrónico merecen un estudio más profundo para analizar las ventajas y desventajas que puedan tener frente a las lámparas incandescentes.

## II. EL TUBO FLUORESCENTE DE UNA LFC

Posee 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<sup>[1]</sup>.



Fig. 1. Estructura del tubo de una LFC

Dentro del tubo fluorescente se encuentra el mercurio, un metal pesado utilizado en forma de gas para producir radiación, con la optimización de la tecnología de las lámparas, han surgido modelos con muy baja cantidad de mercurio: la Asociación nacional de fabricantes eléctricos norteamericana (NEMA) estipula un contenido máximo de 5 mg por lámpara<sup>[2]</sup>, aunque no todos los fabricantes cumplen con este estándar. A pesar de la reducción del contenido de mercurio, distintas agencias de la salud recomiendan, en caso de rotura, salir de la habitación por 15 minutos.

En lo referente a la liberación de mercurio al medio ambiente, hay que tener en cuenta que la generación de electricidad libera a su vez apreciables cantidades de este metal a la atmósfera. Dado que las lámparas fluorescentes compactas consumen mucha menos energía, el efecto global a este respecto es positivo. Esto se da debido a que la producción de una lámpara incandescente puede requerir la liberación al ambiente de 10 mg de mercurio, mientras que la fluorescente requiere la liberación de 2,4 mg, lo

cual implica beneficios para el ambiente.

En el caso de que la bombilla fluorescente se haya roto, o no se haya reciclado, esta ventaja se mantendría, pues se estarían agregando 5mg a los 2,4 mg, lo cual da una suma de 7,4 mg, de toda manera menor a los 10 mg<sup>[2]</sup>.

## II. BALASTRO ELECTRÓNICO DE UNA LFC

Sirve para que la LFC tenga un encendido rápido se encuentra encerrado en la base de la lámpara entre el tubo y la rosca de metal, este balastro 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. Se compone de un circuito oscilador, compuesto fundamentalmente por un circuito transistorizado en función de amplificador de corriente<sup>[2]</sup>. Formado de 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. 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).

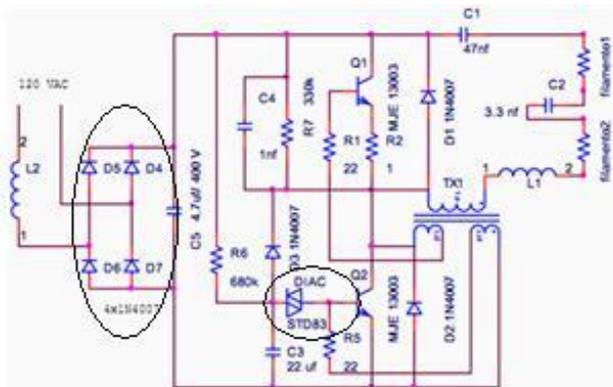


Fig. 2. Circuito interno del balastro electrónico de una LFC

El balastro electrónico usado en las LFC por su parte usa una configuración de por sí obsoleta, que difícilmente alcance un rendimiento superior al 87 % (valor no aceptado en la electrónica de potencia moderna), un factor de potencia inferior a 0,6 y un THD elevado<sup>[3]</sup>.

En la fig. 2 se han señalado los componentes que la mayor parte de los fabricantes sacrifican para obtener competitividad en sus productos pero que afectan fundamentalmente la confiabilidad de los mismos.

Por otra parte la configuración de entrada o rectificador debería poseer filtros de tipo EMC para reducir notablemente el contenido armónico y evitar la presencia de señales de alta frecuencia (no armónicas) moduladas sobre la señal de 60 Hz<sup>[3]</sup>.

En las LFC es prácticamente imposible montar el filtro EMC dadas las dimensiones que se pretenden tengan estos dispositivos, utilizándose como único elemento un pequeño inductor serie de núcleo abierto, relevado en algunas de las lámparas estudiadas.

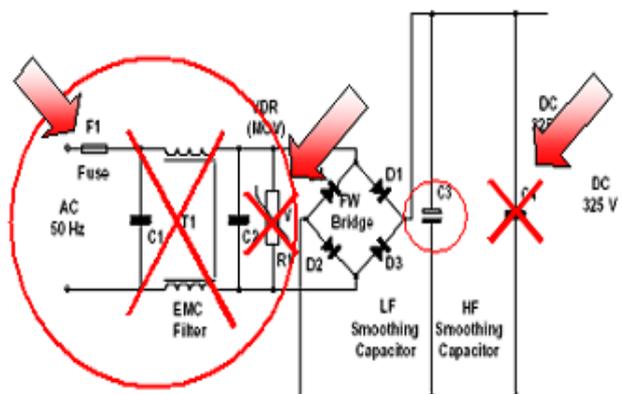


Fig. 3. Circuito de entrada para un balastro electrónico sin corrección del factor de potencia

En la fig. 3 es posible observar en color rojo los elementos que han sido suprimidos por algunos fabricantes entre los que se encuentran, capacitores de filtrado de alta y baja frecuencias, varistores de óxido metálico y fusible.<sup>[3]</sup>

## III. ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN LAS LFC's

El balastro usado en las lámparas de bajo consumo se acopla a la red mediante un rectificador monofásico de puente completo se conecta a un capacitor electrolítico el cual tiene la función de mantener un valor de factor de rizado lo más bajo posible para que el inversor no presente fluctuaciones que afecten la emisión luminosa de la lámpara<sup>[3]</sup>.

Esta configuración genera una forma de consumo de corriente con alto nivel de contenido armónico tal como se puede observar en la figura 4.

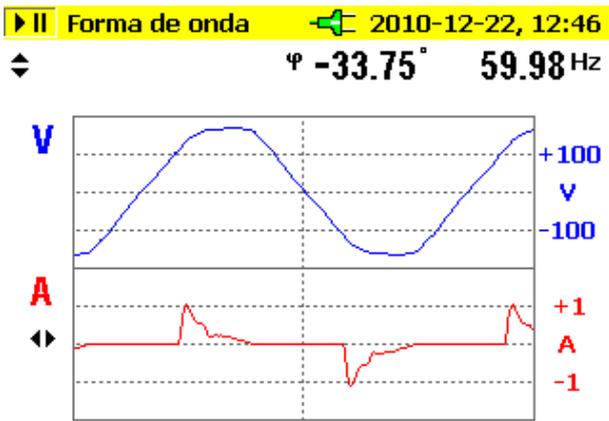


Fig. 4. Forma de onda de tensión y corriente para una lámpara fluorescente compacta de 20 W

En el oscilograma es posible notar que la forma de onda de corriente se encuentra prácticamente en fase con la onda de tensión con un ángulo de 33grados en retraso, valor que cambia dependiendo del tipo y potencia de lámpara. Además es de notarse que existe un pico de corriente elevado debido a la presencia del capacitor después del rectificador. En la figura 5 es posible observar el espectro de la señal de corriente correspondiente a esta señal, donde tenemos:

$$\text{THD} = 96,8 \% \quad \text{FP} = 0,583$$

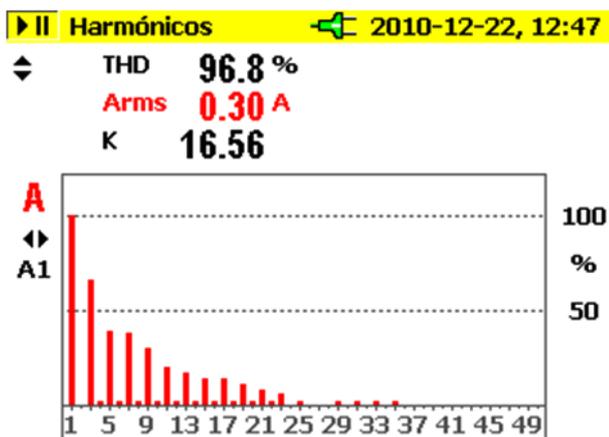


Fig. 5 Contenido armónico y análisis espectral de la señal de corriente correspondiente a una lámpara de 45 W

Del análisis del contenido espectral es de notarse que existen armónicos con un 70 % del valor en corriente de la fundamental, el armónico de mayor peso es el de tercer orden. Sin embargo existe una notable presencia de los armónicos de 5° hasta 9° orden. No existe presencia de los armónicos pares.

### III. ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE TENSIÓN

### Y CORRIENTE DEBIDO AL USO MASIVO DE LFC's

En el ítem anterior se analizó el caso particular del comportamiento eléctrico de una lámpara fluorescente compacta funcionando en forma independiente. Para estudiar los efectos que presentaría el uso masivo de estas cargas alineales se construyo un circuito eléctrico acoplado a la red de distribución sometándolo a condiciones de operación (120V / 60 Hz). Los ensayos realizados contemplaron el comportamiento eléctrico de las lámparas en conjunto. Para el primer tipo de carga ensayada, se utilizó lámparas incandescentes, con una potencia de 100 W cada una, se obtuvieron las formas de onda de tensión y corriente mostradas en la figura 6.

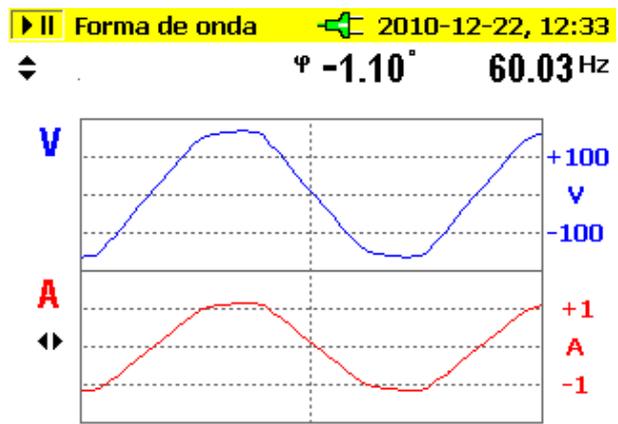


Fig. 6. Formas de onda de voltaje y corriente con lámparas incandescentes

En este caso es posible observar la total concordancia de las señales de tensión y corriente tanto en ángulo como en forma. En contraparte, los valores de potencia activa y aparente reflejan un considerable consumo de energía.

$$\begin{aligned} \text{PT} &= 0,27 \\ \text{kW. S} &= 0,28 \\ \text{kW fp} &= 0,93 \end{aligned}$$

los valores de THD no sobrepasan el 4%.

El segundo caso se implementó una carga totalmente alineal, lámparas fluorescentes compactas con una potencia máxima de 20 W cada una. En este caso la distorsión armónica total resultante, fue menor que el que se registrara para lámparas individuales, esto debido a la coexistencia de cargas con diferentes factores de desplazamiento que aplicando el principio de superposición de señales daría en definitiva una forma de onda con menor contenido armónico, figura 7.

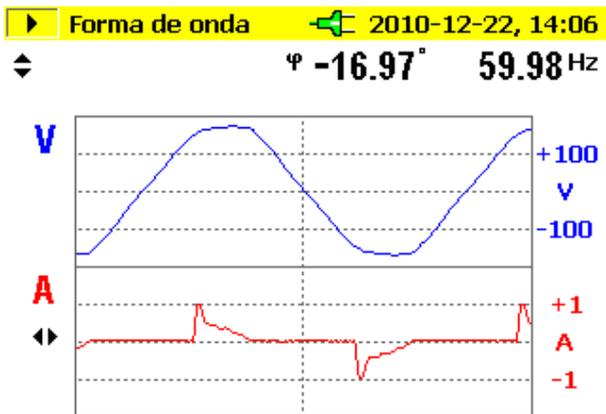


Fig. 7. Formas de onda de voltaje y corriente de un circuito formado únicamente por lámparas fluorescentes compactas

Los valores registrados de distorsión armónica de corriente no superaron el 100 %.

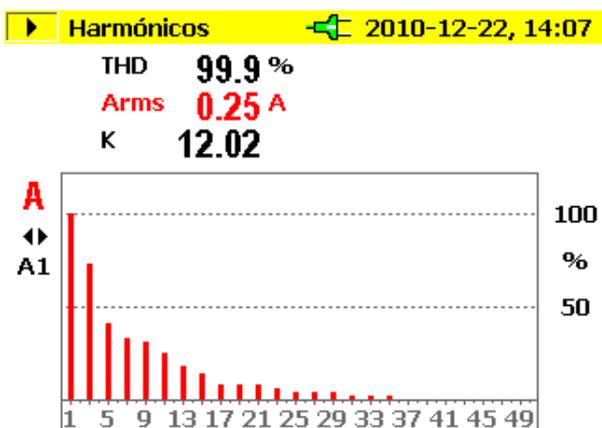


Fig. 8. Espectro de frecuencia para 90 VA con LFC's

Del estudio espectral de la corriente es posible observar que existe un corrimiento del contenido armónico hacia los armónicos de menor orden existiendo una atenuación importante, en los de orden superior, posiblemente debido a la superposición de señales.

## V. MEDIDA REFENCIAL DEL NIVEL DE ILUMINACIÓN

Se midió el nivel de iluminación proporcionado por las LFC, principalmente motivado para verificar el cumplimiento de los datos proporcionados por los fabricantes en las presentaciones de los focos, teniendo como resultado una diferencia de valor entre la potencia nominal de las lámparas y la potencia real medida en las pruebas.

Para la realización de las pruebas, se utilizó un mesón de pruebas y un luxómetro en una habitación común, previamente las lámparas fueron

“envejecidas” como indica la Norma INEN.

Los resultados fueron:

**TABLA 1. MEDICIÓN DEL NIVEL DE ILUMINACIÓN PARA LFC'S Y LÁMPARAS INCANDESCENTES**

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
H	LFC	1560
I	LFC	1060
J	LFC	770
K	Incandescente	1660
L	Incandescente	1660

## B. 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:

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

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.

Se observa que algunas LFC's proporcionan un nivel de iluminación sumamente bajo a pesar que su potencia nominal es de 20W; proporcionan un nivel de iluminación similar al de las lámparas de 15W con una potencia medida también baja

## VI. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS LFC's

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. Costo Anualizado Total (CAT)

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.

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).

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

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

El FRC está dado por la ecuación:

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

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

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

$$FRC (\text{incandescente}) = 2.14$$

$$\text{De la misma manera: } FRC (\text{LFC}) = 0,40$$

#### C. Análisis mediante el Costo Anualizado Total (CAT)

Para la lámpara incandescente, el CAT está dado por:

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

Para la alternativa fluorescente compacta, el CAT está dado por:

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

Las LFC` s es económicamente rentable, cuando CATE es menor a CATC.

Para la lámpara incandescente según el cálculo anterior, la vida útil (N = 0.5 años), considerando una tasa de descuento de i= 10% y El precio promedio de la lámpara incandescente es de \$0.80, y el de la LFC de 20 W (equivalente) de \$5.

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

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

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

$$FRC (\text{incandescente}) = 2.14$$

$$CAT (\text{incandescente}) = \$0.80 * 2.14 \$/\text{año} + 0,09$$

$$/\text{kWh} * 109.5 \text{ kWh/año} = \$ 11.56$$

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

$$FRC (\text{LFC}) = 0,40 \text{ CAT} (\text{LFC}) = \$ 5 * 0,40 / \text{año} + 0,09 \$/\text{kWh} * 36.5 \text{ kWh/año} = \$ 5.30$$

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

## VII. CONCLUSIONES

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 sustitución 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.

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.

Con respecto a las conclusiones en el aspecto técnico se presenta lo siguiente:

Los armónicos de las LFC's, pueden interactuar con aquellos que se encuentran en la red. En esta interacción intervienen la magnitud de los mismos y su ángulo de desfasaje como se puede observar de las pruebas realizadas. Debido a ello puede dar lugar a que ciertos armónicos se reduzcan, o que se refuercen.

Existen otros tipos de cargas no lineales como son monitores, adaptadores, cargadores de equipo electrónico que poseen una mayor potencia que las LFC con lo cual habría un mayor efecto de distorsión que el provocado únicamente por el cambio de luminarias.

## REFERENCIAS

- [1] Así funcionan las lámparas ahorradoras CFL.  
Disponible en:  
[http://www.asifunciona.com/electronica/af\\_cfl/af\\_cfl\\_2.html](http://www.asifunciona.com/electronica/af_cfl/af_cfl_2.html)
- [2] El mercurio y los focos ahorradores [Online].  
Available:  
<http://www.greenpeace.org/raw/content/mexico/press/reports/mercurio.pdf>.2009.
- [3] M. Vincitorio, B. Brutti, L. Fround, H, Gonzalez. "Incidencia del uso de LFC como cargas alinéales en los sistemas de distribución eléctricos," Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Rep. 99-02, 2010.

## BIOGRAFÍAS

**Edison Raúl Moposita Moya** nació en Quito Ecuador, el 15 de Enero 1980. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional en la Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sus estudios secundarios los realizó en el Instituto Nacional Mejía. Especialización Bachiller en Ciencia Físico – Matemático. En Agosto del 2007 realizó sus pasantías en la Empresa Eléctrica de Santo Domingo (EMELSAD), área de Control de la Energía. Áreas de interés: Redes de distribución, Protecciones Eléctricas, Líneas de transmisión.

**Eduardo Cazco Castelli**, Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, 1974; Posgrado del PSEC de GE, Schenectady, NY. Profesor principal a tiempo parcial de la EPN. Consultor internacional en hidroelectricidad. Jefe de Sistema de Supervisión y Control y Director de Operaciones del INECEL entre 1990 y 1998; Director de Regulación y Director de Concesiones del CONELEC entre 1998 y 2010. Actualmente es Asesor de la Dirección Ejecutiva del CONELEC.