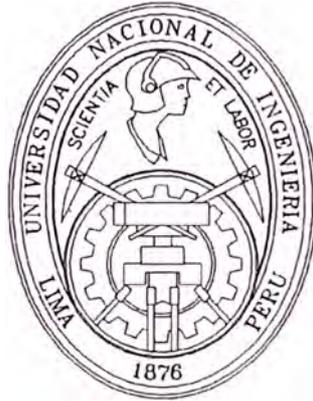


# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



## **CALIDAD DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE ILUMINACIÓN**

### **INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

### **INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTADO POR:

**MARCO ANTONIO RAMÍREZ MEJÍA**

PROMOCIÓN 1988-1

LIMA – PERÚ

2002

*A mi dulce Natalia,  
A mis queridos padres Cástula y Fortunato,  
A mi entrañable abuelita Gregoria,  
A mis hermanos Edwin y Miguel,  
por su amor, cariño y apoyo de siempre.*

# **CALIDAD DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE ILUMINACIÓN**

## SUMARIO

En el presente informe analizamos el comportamiento de los Equipos de Iluminación en los Sistemas Eléctricos actuales, considerando los conceptos de Calidad de Energía.

Empezamos con un breve resumen de la terminología más utilizada en Iluminación y Calidad de Energía, luego describimos los principales equipos de iluminación así como sus características más relevantes; seguidamente mencionamos las principales normas locales e internacionales aplicables al tema y finalmente exponemos dos casos prácticos.

El primero de ellos, muestra la influencia de los armónicos en el desempeño de las Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC) y el segundo caso evalúa el efecto de la calidad del suministro eléctrico en el desempeño del Sistema de Iluminación de una sala multicine.

Es nuestro anhelo que este estudio ayude a los alumnos y profesionales de la especialidad a reflexionar sobre la importancia de los tópicos de Calidad de Energía en el diseño e implementación de los Sistemas de Iluminación y sus circuitos alimentadores, así como también los motive a investigar más sobre este tópico de tanta actualidad.

## ÍNDICE

	Pág.
<b>PRÓLOGO</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>CONSIDERACIONES CONCEPTUALES</b>	4
1.1 Conceptos sobre Energía y Calidad de Energía	4
1.1.1 Onda Sinusoidal Pura y Distorsionada	4
1.1.2 Valor Eficaz RMS	5
1.1.3 Demanda	6
1.1.4 Factor de Potencia	6
1.1.5 Armónicos	6
1.1.6 Serie de Fourier	7
1.1.7 Distorsión Armónica	8
1.1.8 Perturbaciones de la Onda Eléctrica	9
1.2 Conceptos en Sistemas de Iluminación	10
1.2.1 Flujo luminoso ( $\Phi$ )	10
1.2.2 Iluminancia (E)	10
1.2.3 Eficacia Luminosa (K)	11
1.2.4 Vida Media	11
1.2.5 Vida Útil	11

**CAPÍTULO II**

<b>SISTEMAS DE ILUMINACIÓN</b>	12
2.1 Luminarias	13
2.2 Lámparas	13
2.2.1 Lámparas Incandescentes	13
2.2.2 Lámparas de Descarga de Mercurio	17
2.2.3 Lámparas de Descarga de Sodio	31
2.3 Calidad de Energía y Sistemas de Iluminación	37
2.3.1 Efecto de los Armónicos	37
2.3.2 Efecto de las variaciones de tensión	40

**CAPÍTULO III**

<b>NORMAS APLICABLES</b>	42
3.1 Norma IEEE 519-92	42
3.1.1 Lineamientos para los Clientes Individuales	43
3.1.2 Lineamientos para las Compañías de Electricidad	44
3.2 Norma NTCSE	46
3.2.1 Tensión	47
3.2.2 Perturbaciones	48
3.3 Norma Europea EN 61000-3-2	51
3.3.1 Límites para equipos Clase C	51

**CAPÍTULO IV**

<b>CASO 1: EFECTO DE UNA FUENTE DE ARMÓNICOS EN LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS</b>	54
4.1 Descripción de las lámparas evaluadas	55

4.2 Descripción de la Prueba	56
4.3 Presentación y evaluación de los resultados	61
4.4 Economía de las lámparas fluorescentes compactas	66
4.5 Conclusiones	69
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>CASO 2: DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN DE UNA SALA MULTICINE</b>	71
5.1 Descripción de las instalaciones	71
5.2 Identificación y diagnóstico del Problema	74
5.2.1 Identificación del Problema	74
5.2.2 Diagnóstico del Problema	74
5.3 Conclusiones y Recomendaciones	80
<b>CONCLUSIONES</b>	82
<b>ANEXOS</b>	89
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	103

## PRÓLOGO

“Calidad de Energía” es un término que comúnmente se ha utilizado para referirse a la variación de la tensión, corriente y frecuencia en los sistemas eléctricos. Históricamente, la mayoría de los equipos instalados en estos sistemas han operado satisfactoriamente aún frente a variaciones significativas de estas tres variables. Sin embargo, en los últimos años se han incorporado a estos sistemas, una gran cantidad de equipos que no son tan tolerantes a estas fluctuaciones.

Si bien estos aparatos, basados en aplicaciones electrónicas, han permitido el uso más eficiente de la energía eléctrica así como el aumento de la productividad en los procesos industriales, también han originado una situación problemática debido a la distorsión de la onda de tensión y corriente que generan, perturbando el desempeño de los propios equipos, causando además calentamientos excesivos en motores, condensadores, transformadores, conductores y afectando el funcionamiento de múltiples sistemas como los de iluminación, comunicación, medición, protección, etc.

Entonces, los sistemas de iluminación resultan también afectados por la distorsión armónica y las variaciones de la tensión de alimentación y simultáneamente los propios equipos de iluminación afectan o “contaminan” la fuente de alimentación.

El objetivo de este informe es mostrar la influencia de la Calidad de Energía, considerando solo las variaciones de tensión y la presencia de armónicos, en el desempeño de los Sistemas de Iluminación.

La metodología empleada se basa en el desarrollo de una breve presentación teórica de los principales conceptos y características de funcionamiento de los equipos involucrados y posteriormente se incluyen dos informes sobre experiencias reales referidas al tema.

Empezamos, en el Capítulo I, mencionando algunos conceptos básicos de Calidad de Energía e Iluminación que utilizaremos en el desarrollo del informe.

Seguidamente se realiza una breve exposición de los Sistemas de Iluminación y sus componentes como luminarias, lámparas y elementos de control y regulación. Se muestra las características de funcionamiento de cada dispositivo así como su comportamiento frente a variaciones de tensión y presencia de armónicos.

En el Capítulo III, mencionamos las principales normas aplicables a nuestro tema que muestran las Tolerancias en Calidad de Energía (Tensión y Armónicos) y los límites de Armónicos en Equipos de Iluminación.

Después de la exposición teórica, mostramos dos reportes experimentales que ilustran mejor el tema. Ambos fueron escogidos por su

vigencia y porque involucran a dos equipos de iluminación de amplia difusión: La Lámpara Incandescente y la Lámpara Fluorescente Compacta (LFC).

Es así que en el Capítulo IV se muestra un estudio realizado al comportamiento de las lámparas fluorescentes compactas (LFCs) al ser alimentadas con una fuente de tensión de forma de onda "sinusoidal pura" y "sinusoidal distorsionada".

En el Capítulo V se presenta un diagnóstico realizado de la calidad de energía en una sala multicine, mostrando además un problema existente en el sistema de iluminación basado en lámparas incandescentes. Se evalúa esta situación y después del análisis correspondiente se proponen algunas medidas correctivas.

# CAPÍTULO I

## CONSIDERACIONES CONCEPTUALES

Con el propósito de entender el material que se presentará en adelante consideramos necesario, en este primer Capítulo, desarrollar algunas nociones conceptuales sobre Calidad de Energía y Sistemas de Iluminación.

### **1.1 Conceptos sobre Energía y Calidad de Energía.**

La terminología necesaria para referirnos a estos temas es variada y numerosa y no pretendemos desarrollar una extensa presentación, sino más bien, mencionar brevemente los principales conceptos que aprovecharemos posteriormente.

#### **1.1.1 Onda Sinusoidal Pura y Distorsionada.**

La Figura 1 muestra una onda sinusoidal pura, similar a la que existiría en un sistema eléctrico si además de contar por fuentes ideales de tensión o corriente, estas estuvieran alimentando cargas idealmente lineales.

La Figura 2 muestra una onda distorsionada, similar a la que encontraríamos cuando se analizan las ondas de tensión o de corriente en los sistemas eléctricos actuales.

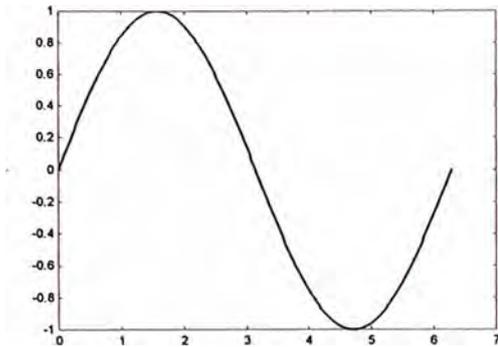


Figura 1. Onda Sinusoidal Pura.

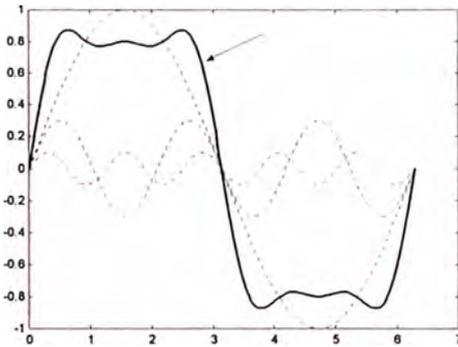


Figura 2. Onda Sinusoidal Distorsionada.

### 1.1.2 Valor Eficaz RMS.

El termino RMS (Root-Mean-Square), utilizado para las ondas alternas, significa "equivalente" o "efectivo", refiriéndose a la cantidad de trabajo realizado por un valor equivalente de corriente continua. Este termino, RMS, es muy apropiado para describir el valor de una tensión o corriente alterna que constantemente esta cambiando en amplitud y polaridad a intervalos regulares, y también para las formas de onda no lineales (distorsionadas).

Los medidores convencionales usualmente miden el valor promedio en base a la amplitud de la forma de onda. Algunos medidores están calibrados para leer el valor RMS equivalente (multiplicando  $0.707 * \text{Valor máximo}$ ). Este lectura será correcta solo cuando la forma de onda sea una senoide pura y no así cuando este presente la distorsión porque la relación entre las lecturas promedio y los valores reales RMS varían sustancialmente.

Solo un instrumento que mide valores eficaces RMS mostrará lecturas correctas para una forma de onda no sinusoidal. El proceso de lectura es a través de los circuitos de medición RMS internos que muestrean la señal de entrada a muy alta velocidad digitalizando y elevando al cuadrado cada

muestra, luego la adicionan a la suma de los cuadrados de las muestras anteriores y finalmente toman la raíz cuadrada del total. El resultado obtenido será el valor eficaz RMS.

### 1.1.3 Demanda.

Es la cantidad de energía eléctrica consumida entre el tiempo. Demanda también es la carga promedio colocada por la empresa de electricidad para satisfacer a un consumidor en un intervalo de tiempo especificado por la empresa (15 o 30 minutos).

Para abastecer esta demanda, variable en el tiempo, la empresa de electricidad debe invertir en equipos de capacidad adecuada. No se consideran los picos máximos de corta duración, como los que se presentan cuando entran en línea cargas importantes, porque su duración es corta respecto al intervalo de demanda promedio.

### 1.1.4 Factor de Potencia.

El Factor de Potencia es el cociente entre la Potencia Activa utilizada en un circuito y la Potencia Aparente entregada por la empresa de electricidad. La Potencia activa es expresada en watts (W) o kilowatts (kW); la Potencia aparente en voltamperios (VA) o kilovoltamperios (kVA).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{kW}{kVA} \quad (1)$$

### 1.1.5 Armónicos.

Una típica definición de un armónico es la siguiente: “Un componente sinusoidal de una onda periódica con frecuencia correspondiente a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental”.

La calidad de energía involucra perturbaciones transitorias y distorsiones de estado estable. Los armónicos pertenecen al segundo tipo y pueden causar daños muy severos alterando el normal funcionamiento de los equipos electrónicos y causando excesivo calentamiento en equipos eléctricos como motores, condensadores, transformadores, conductores, etc. Por tanto, afectará el desempeño de diferentes sistemas como los de iluminación, comunicación, medición, protección, etc.

Algunos autores utilizan el término energía "limpia" o "pura" para referirse a aquella que no contiene armónicos, sin embargo, las típicas formas de onda "limpias" solo existen en el laboratorio. Más aún, debemos comprender que los armónicos han estado presentes en los sistemas eléctricos desde siempre y seguramente permanecerán por tiempo indefinido.

Entre las cargas que producen armónicos podemos mencionar:

- \* Los balastos electrónicos,
- \* Las computadoras,
- \* Los variadores de velocidad,
- \* Los hornos eléctricos de arco,
- \* Los rectificadores de estado sólido,
- \* Los transformadores saturados,
- \* Los sistemas UPS, etc., etc.

#### **1.1.6 Serie de Fourier**

Las tensiones o corrientes periódicas con forma de onda distorsionada, pueden ser representadas por la suma de una serie de términos de

frecuencia múltiple, con magnitudes y ángulos de fase variables. Esto se expresa en el Teorema de Fourier, donde una forma de onda compleja es representada como:

$$m(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t + q_n)] \quad (2)$$

Aquí, el término  $a_n$  es la magnitud de la  $n$ -ésima frecuencia armónica,  $q_n$  es su ángulo de fase y  $\omega$  es la pulsación de la onda.

### 1.1.7 Distorsión Armónica.

Los parámetros para cuantificar la presencia de armónicos es algo variada e incluso existe cierta confusión al definirlos y asignar la simbología correspondiente de alguno de ellos. Nosotros mencionaremos solo las más reconocidas y utilizaremos también la simbología mas aceptada para cada una de ellas.

#### a) Distorsión Armónica Total (THD).

La distorsión armónica puede ser cuantificada por varios métodos diferentes y uno de las medidas más comunes de la distorsión, como resultado de todos los componentes armónicos, es la Distorsión Armónica Total (THD) y es definida como:

$$THD = \sqrt{\left[ \left( \sum_{n=2}^{\infty} a_n^2 \right) / (a_1^2) \right]} \quad (3)$$

donde  $a_n$  es la magnitud RMS de las frecuencias armónicas y  $a_1$  es la magnitud RMS de la fundamental. Las magnitudes individuales de las frecuencias armónicas pueden ser representadas como un porcentaje de la componente fundamental.

Muchos instrumentos de medición de armónicos expresan resultados como la distorsión armónica total y los componentes individuales como un porcentaje de la fundamental.

#### **b) Distorsión Total de Demanda (TDD).**

Es la distorsión de la corriente armónica definida como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (4)$$

donde  $I_L$  es la máxima corriente de demanda (demanda de 15 o 30 minutos) en la frecuencia fundamental, en el punto común de acoplamiento (PCC), calculada como la corriente promedio de las máximas demandas de los doce meses anteriores.

#### **1.1.8 Perturbaciones de la Onda Eléctrica.**

Se dice que la onda de tensión sufre una perturbación cuando se produce una alteración transitoria o permanente en cualquiera de sus parámetros (Frecuencia, Amplitud, Forma de onda, Simetría entre las fases, etc.). El término "calidad de la onda" involucra la permanencia de estos parámetros característicos de la onda, dentro de ciertos límites aceptables.

Debido a la configuración actual de nuestros sistemas eléctricos, es poco probable la ocurrencia de variaciones de frecuencia pero excepcionalmente pudieran ocurrir solo en caso de grandes fallas que originen pérdida de interconexión. En el caso de pequeños sistemas aislados, la conexión y desconexión de cargas importantes es la causa de las habituales variaciones de frecuencia.

Como lo mencionamos al principio de nuestro informe solo consideraremos la influencia en los sistemas de iluminación de las perturbaciones relacionadas a la variación del valor nominal eficaz y la forma de onda (contenido armónico o THD) de la tensión de alimentación. Básicamente porque son las más frecuentes y no requieren de situaciones muy particulares para existir.

Adicionalmente nombraremos las variaciones rápidas de tensión que aparecen de manera esporádica y repetitiva. Un caso particular de estas variaciones repetitivas origina el fenómeno del flicker, que es el efecto visible al ojo humano pero no la perturbación misma.

## **1.2 Conceptos en Sistemas de Iluminación.**

Mencionaremos algunos de los principales términos que existen sobre el tema y que ayudaran al mejor entendimiento de los próximos capítulos. La simbología y unidades mencionadas corresponden al Sistema Internacional de unidades.

### **1.2.1 Flujo luminoso ( $\Phi$ ).**

El flujo luminoso es la rapidez del flujo de luz con respecto al tiempo.

El *lumen* es la unidad de flujo luminoso y es igual al flujo que incide sobre un ángulo sólido unitario (estereorradián) desde una fuente luminosa puntual (o uniforme) de una candela. Su abreviatura simbólica es: lm

### **1.2.2 Iluminancia (E).**

La Iluminancia en un punto de una superficie, viene a ser el cociente del flujo luminoso incidente sobre un elemento de la superficie conteniendo el punto y el área de la superficie cuando esta última se ilumina

uniformemente. El termino *iluminación* se usa para designar el acto de iluminar o el estado de estar iluminado dependiendo del contexto.

El *Lux* es la unidad de iluminancia del sistema internacional (SI) y su abreviatura simbólica: lx.

### **1.2.3 Eficacia Luminosa (K).**

La eficacia luminosa es una cantidad que denota la efectividad de fuentes de luz. Es la razón del flujo luminoso total (lúmenes) a la entrada total de potencia (watts). Su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el *lumen por watt* y su abreviatura simbólica: lm/W.

### **1.2.4 Vida Media.**

Es el tiempo medido en horas, que funcionan en forma encendida el 50% de una muestra de lámparas (hasta llegar a su total agotamiento), si están operadas dentro del rango de tensión y temperatura establecidos.

### **1.2.5 Vida Útil.**

Es el tiempo medido en horas que funciona una lámpara en forma encendida y durante el cual mantiene su flujo luminoso dentro del rango establecido, siempre que sea operada bajo condiciones establecidas de tensión y temperatura.

## **CAPÍTULO II**

### **SISTEMAS DE ILUMINACIÓN**

Los sistemas de Iluminación son instalaciones de una o más luminarias, que tienen como finalidad, como su nombre lo indica, iluminar alguna ambiente o estación de uso industrial, comercial, doméstico, de alumbrado público, etc. Una de las formas más aceptada de clasificarlas es según su ubicación respecto al objeto iluminado. En cuyo caso tendremos:

1. Iluminación General
2. Iluminación General Localizada y
3. Iluminación Local

Los sistemas de alumbrado que proporcionan un nivel aproximadamente uniforme de iluminación en el plano de trabajo en toda una zona, se llaman sistemas de iluminación general.

Un sistema de Iluminación general localizada, llamada también iluminación de trabajo esta conformada por un arreglo de luminarias con respecto al trabajo visual o zona de trabajo.

Un sistema local de iluminación proporciona alumbrado solo sobre una pequeña superficie ocupada por el trabajo y su entorno inmediato.

## **2.1 Luminarias.**

Las luminarias son unidades completas de iluminación que están formadas por una o varias lámparas con las partes diseñadas para distribuir la luz, para ubicar y proteger las lámparas y para conectar las lámparas a la fuente de alimentación.

En consecuencia, además de ser estéticamente agradable, los requisitos básicos de una luminaria son:

- \* Proporcionar conexión eléctrica hacia la(s) lámpara(s).
- \* Proteger físicamente la(s) lámpara(s).
- \* Controlar y distribuir la luz de la lámpara(s)
- \* Ser suficientemente robusto para soportar las condiciones de uso
- \* Ser de uso eficiente

## **2.2 Lámparas.**

Por tratarse del elemento fundamental de los sistemas de iluminación desarrollamos una presentación resumida de las principales lámparas existentes. En tal sentido, y considerando una de las diferentes clasificaciones que existen sobre estos equipos, las agruparemos en tres categorías: Lámparas Incandescentes, Lámparas de Descarga de Mercurio y Lámparas de Descarga de Sodio.

### **2.2.1 Lámparas Incandescentes.**

La lámpara incandescente es la más antigua y conocida fuente de luz eléctrica. Existe una diversidad de tipos y pueden encontrarse en casi todas

las aplicaciones donde se requiera una solución simple, económica y compacta para obtener un nivel de iluminación moderado.

### a) Lámparas Incandescentes Normales.

Son aquellas en las que la luz se produce por un filamento calentado a incandescencia por una corriente eléctrica. De todas las fuentes luminosas que por lo general se utilizan, las lámparas incandescentes tienen el menor costo inicial, la eficacia luminosa más baja y la vida (media y útil) mas corta.

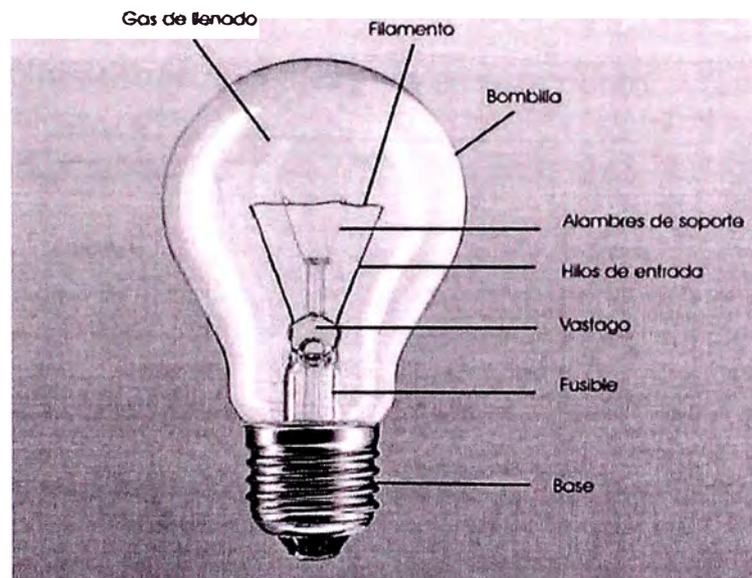


Figura 3. Partes principales de una Lámpara Incandescente

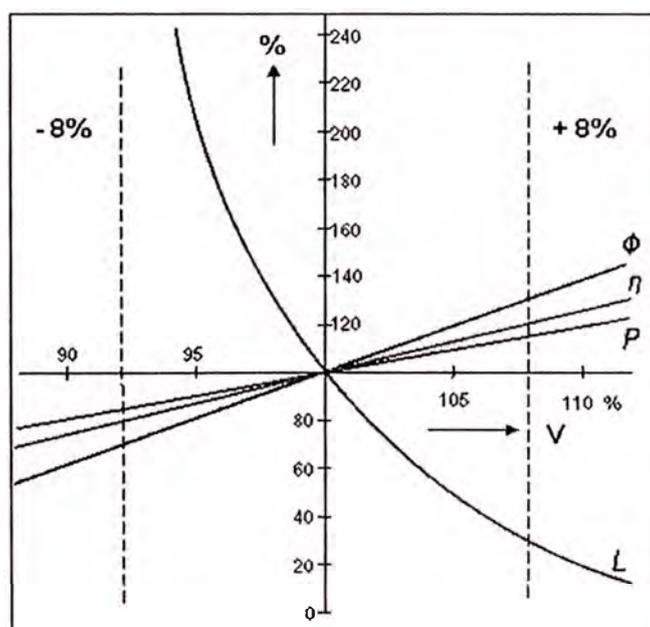
La frecuente conmutación, normalmente no es perjudicial para la vida de la lámpara. Sin embargo, el esfuerzo mecánico producto del súbito incremento de la temperatura, debido a la conmutación, afectará el filamento adelgazado por envejecimiento pudiendo causar su rotura.

El uso de un “dimmer”<sup>1</sup> permitirá la regulación de la intensidad luminosa. Una lámpara regulada soportará una menor temperatura de filamento, menor

<sup>1</sup> **dimmer:** Cualquier dispositivo eléctrico o electrónico destinado a reducir el brillo de una lámpara. Puede ser una resistencia variable, un auto transformador variable, o un dispositivo de tipo electrónico.

temperatura de color, menor eficacia luminosa y tendrá una vida mas larga pero en detrimento de la eficacia. Por este motivo, en una situación donde la lámpara estará continuamente atenuada, generalmente es mejor utilizar otra lámpara de menor potencia para el nivel inferior de iluminación (o utilizar una lámpara de doble filamento) y hacer la regulación por conmutación.

También mencionaremos que debajo del 50% de la tensión nominal de operación, la salida de luz de una lámpara incandescente es insignificante, pero el consumo de energía es importante, por lo que, es muy recomendable que los “dimmer” desconecten la lámpara en este punto.



**Figura 4. Efecto de la Variación de la Tensión sobre la Vida Útil (L), Flujo Luminoso ( $\Phi$ ), Eficacia luminosa ( $\eta$ ) y Potencia disipada (P)**

Cualquier variación de la tensión aplicada a una lámpara incandescente producirá un cambio en sus características de operación según apreciamos en la Figura 4. Aquí se muestra por ejemplo que un 5% de sobre voltaje reduce la vida de la lámpara en casi 50%.

## b) Lámparas Incandescentes de Tungsteno Halógeno

La alta temperatura del filamento de una lámpara incandescente normal origina que las partículas de tungsteno se evaporen y condensen sobre las paredes de la bombilla, formando una película negra sobre la cara interior. Este fenómeno es superado en las lámparas halógenas que tienen un halógeno (Yodo, cloro o bromo) agregado al gas normal de llenado y que evita el ennegrecimiento.

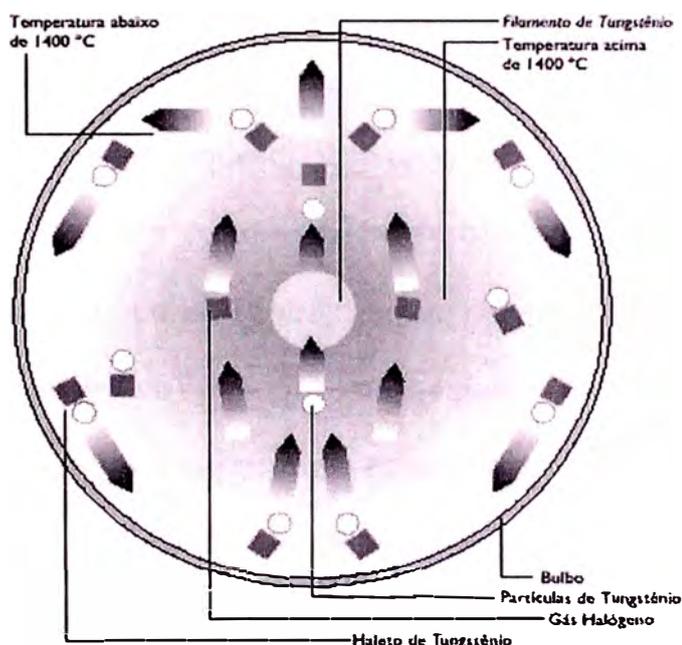


Figura 5. Ciclo Regenerativo del Tungsteno

A la temperatura de 1.400° C el vapor producido por el tungsteno incandescente se combina con el halógeno gaseoso antes de que pueda alcanzar la envoltura de vidrio. Debido a la convección, el haluro de tungsteno circula hacia la proximidad del filamento y se disocia, entonces, las partículas de tungsteno se fijan en el filamento y se desprenden los haluros para completar un nuevo ciclo. Este es el proceso cíclico que proporciona las mayores ventajas de las lámparas halógenas, siendo estas:

- \* Más luz para el mismo consumo de energía, debido a la temperatura más elevada del filamento.
- \* Mayor duración debido a la continua renovación del filamento.
- \* Flujo luminoso constante a lo largo de toda la vida útil gracias a la ausencia de ennegrecimiento de la envoltura.
- \* Tamaño compacto para satisfacer los requisitos del proceso cíclico.

Otra importante diferencia con las lámparas incandescentes normales, además del aditivo halógeno ya mencionado, es la bombilla. La envoltura tubular es hecha de un cristal de cuarzo especial, resistente a las altas temperaturas necesarias para que el ciclo regenerativo funcione.

Estas lámparas también pueden ser controladas por un “dimmer”, pero se debe tener en cuenta que por debajo de un determinado punto inferior de regulación, la lámpara se enfriará demasiado deteniéndose el ciclo regenerativo del tungsteno y a partir de este momento la lámpara halógena se comportará como una incandescente normal. En esta situación, la bombilla estará expuesta a severos ennegrecimientos y al riesgo que el bromo libre ataque los hilos de entrada. Esta es la razón por la que generalmente **NO** se recomienda una prolongada atenuación de la emisión luminosa de las lámparas halógenas.

### **2.2.2 Lámparas de Descarga de Mercurio.**

Esta sección describe las lámparas de descarga en las que el vapor de mercurio está incluido en el tubo de descarga. Pueden clasificarse en:

1. Lámparas de baja presión (fluorescentes tubulares) y LFCs
2. Lámparas de alta presión

3. Lámparas de luz mixta
4. Lámparas de haluros metálicos.

#### a) Lámparas Fluorescentes Tubulares y LFCs.

Son lámparas de descarga de mercurio de baja presión, en las que la luz es producida predominantemente por polvos fluorescentes activados por la energía ultravioleta de la descarga.

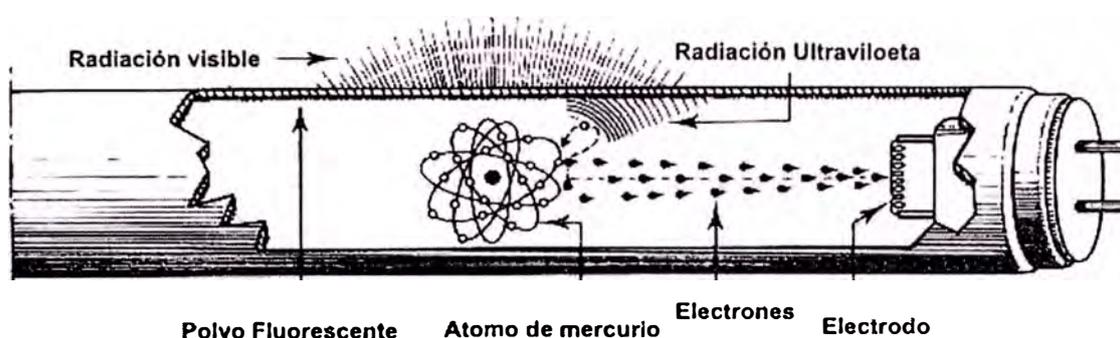


Figura 6. Principio de funcionamiento de una lámpara fluorescente tubular

Tal como se aprecia en la Figura 6, esta lámpara, generalmente de forma tubular con un electrodo sellado en cada extremo, contiene vapor de mercurio a baja presión con una pequeña cantidad de gas inerte para el arranque y la regulación del arco. La superficie interna del tubo está revestida con un polvo fluorescente o fósforo, cuya composición determinará la cantidad y el color de la luz emitida.

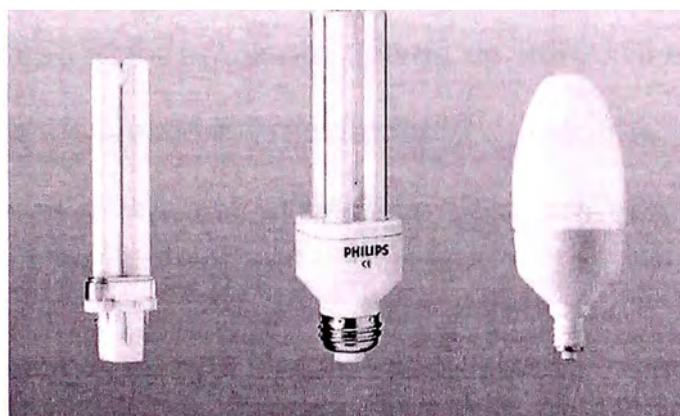
Cuando se aplica la tensión nominal a los terminales de la lámpara, se origina un arco producto de la corriente circulando a través del gas de relleno.

Además de la lámpara tubular o tubo fluorescente común, hay una gran variedad de tipos especiales de formas más compactas. Todas ellas trabajan

bajo el mismo principio indicado anteriormente, aun cuando algunas tienen un arrancador incorporado y otras además un balastro incorporado.

### **Lámparas Fluorescentes compactas (LFCs).**

Las lámparas fluorescentes compactas (LFCs) han sido desarrolladas para su uso en aquellas aplicaciones que tradicionalmente fueron atendidas por las incandescentes. Las LFCs combinan una alta eficacia y una buena característica de color con un bajo consumo de energía y larga vida útil.



**Figura 7. Lámpara Fluorescente Compacta (LFC)**

Resumiremos las ventajas de las lámparas de ahorro de energía o LFCs comparadas con las de incandescencia.

- \* Hasta un 80% de ahorro de energía para la misma cantidad de luz.
- \* Hasta 12 veces más de duración, comparadas con las lámparas normales de incandescencia, es decir, en algunas lámparas de la familia, el tiempo de operación es de 12,000 horas.
- \* Bajos costos de mantenimiento, en comparación con las lámparas normales de incandescencia, especialmente en el caso de luces de exterior y techo para trabajo pesado.

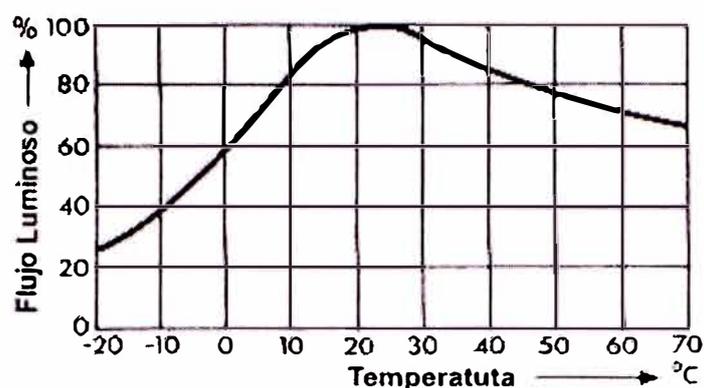


Figura 8. Flujo Luminoso vs. Temperatura Ambiente

La emisión luminosa de una lámpara de descarga de mercurio es máxima a una temperatura ambiente óptima de 25°C. Si esta se reduce, la emisión luminosa disminuye rápidamente, mientras que para una temperatura superior a la nominal decrece pero con una pendiente menor según se aprecia en la Figura 8.

La eficacia luminosa de una lámpara fluorescente expresada en términos de eficacia del sistema, esta influenciada por el tipo del circuito de control y de los componentes utilizados del equipo de control de lámpara.

Dos factores influyen sobre la eficacia luminosa de la lámpara misma además de fósforo utilizado, son la temperatura ambiente y la frecuencia de la tensión de alimentación.

La operación con una fuente de alta frecuencia dará como resultado, un incremento de la eficacia luminosa de alrededor del 10%. Esta es una de las razones para emplear balastos electrónicos de alta frecuencia.

A lo largo de la vida de las lámparas fluorescentes su flujo luminoso disminuye. Por ejemplo después de 8000 horas será de un 70 a 90% del valor inicial. La principal causa de esta depreciación es la lenta pérdida de

efectividad de los polvos fluorescentes. Cuando se utilizan mezclas de diferentes polvos fluorescentes algunas veces puede suceder, que las lámparas viejas muestren una ligera decoloración frente a las nuevas.

Una causa secundaria de depreciación es el ennegrecimiento de las paredes del tubo (especialmente en los extremos) por la dispersión del material emisor. El empleo de balastos de alta frecuencia, producirá un menor desprendimiento del material emisor, el cual, a su vez, originará una menor tasa de depreciación.

### **Equipo de Control de Lámparas.**

La lámpara fluorescente tiene una característica resistencia negativa y por tanto debe ser operada en conjunto con un dispositivo limitador de corriente (o balastro) para prevenir el incremento desmedido de la corriente.

### **Balastro.**

El balastro, que tiene una característica resistencia positiva, puede ser:

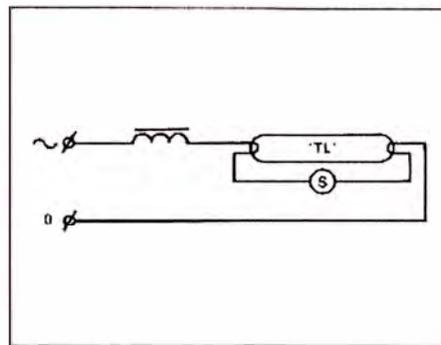
- \* Una resistencia,
- \* Un Inductor o bobina, ó
- \* Un circuito electrónico

Cada uno tiene sus ventajas y desventajas y cada una ha encontrado su aplicación práctica, sin embargo, gradualmente los balastos electrónicos concentran el mayor porcentaje y se prevé que en un futuro muy próximo sean los únicos del mercado.

El balastro resistivo fue una forma muy antieconómica de limitar la corriente, porque la energía eléctrica es desperdiciada, disipándose en forma de calor. Por lo tanto, los balastos resistivos solamente fueron empleados

en el caso de lámparas fluorescentes tubulares operadas con una fuente de corriente continua d.c.

En aplicaciones en corriente alterna a.c., el balastro inductivo fue el más utilizado en la década pasada. En combinación con un arrancador, que produce el pulso de alta tensión necesario para encender la lámpara, harán posible el funcionamiento de la lámpara fluorescente (Figura 9).



**Figura 9. Lámpara Fluorescente operando con un balastro inductivo.**

Un balastro inductor consta de un gran número de espiras de alambre de cobre sobre un núcleo de hierro laminado. Las pérdidas por disipación de calor se deben a la resistencia eléctrica de los devanados y a la histéresis del núcleo, que dependerán en gran medida de la construcción mecánica del balastro y del diámetro del alambre de cobre.

Los balastos inductores rápidamente han cedido su supremacía a los balastos electrónicos.

A pesar de ser más caros, los balastos electrónicos (Figura 10) ofrecen importantes ventajas sobre los balastos inductivos convencionales, entre los que podemos mencionar, por ejemplo:

- \* Mejoran la eficacia de la lámpara y del sistema.
- \* No originan efectos flicker o estroboscópicos.

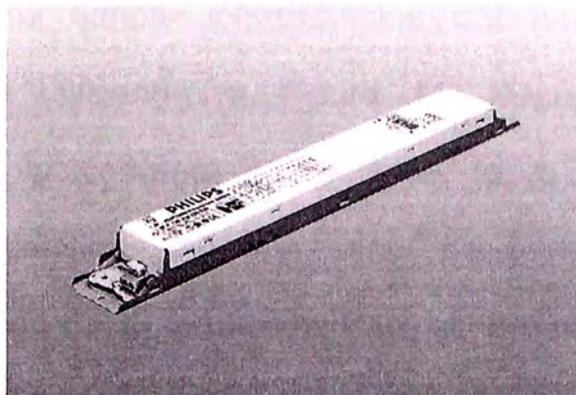


Figura 10. Balastro Electrónico

- \* Arranque instantáneo sin la necesidad de un arrancador separado.
- \* Incrementa la vida útil de la lámpara.
- \* Excelentes posibilidades de regulación de la luz.
- \* No necesitan corrección del factor de potencia.
- \* Cableado muy simple.
- \* Menor aumento de temperatura (debido a menores pérdidas)
- \* Sin zumbidos u otros ruidos
- \* Menor peso, especialmente para lámparas de gran tamaño.
- \* Puede también ser utilizadas en d.c.

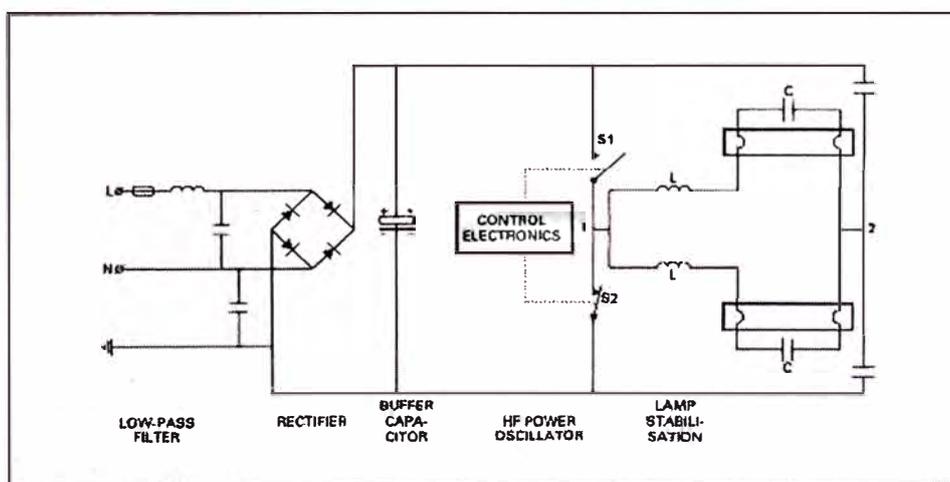


Figura 11. Esquema de un Balastro Electrónico de Alta Frecuencia

Intentaremos una simple interpretación del funcionamiento de un balastro electrónico utilizando la Figura 11. Según se observa este dispositivo rectifica la corriente proveniente de la fuente principal de alimentación y la convierte en una señal de onda cuadrada de alta frecuencia, en el rango de 20 a 100kHz. Para el control de la corriente de la lámpara se utiliza un circuito de estabilización electrónico o un balastro inductor convencional (pero mucho más pequeño y por consiguiente más eficiente). En el último caso, la regulación de la luz se logra mediante el incremento de la frecuencia.

### Corrección del factor de potencia.

En la práctica, el mejoramiento del factor de potencia se logra haciendo trabajar la mitad de las lámparas con balastos capacitivos (balastos donde la impedancia del condensador de compensación es dos veces la de la bobina), y la otra mitad con balastos inductivos sin compensación. Los equipos de las lámparas estarán divididos de forma uniforme sobre la instalación y sobre las tres fases de la alimentación principal.

Existen dos formas prácticas de alcanzar la compensación: La mono compensación y la doble compensación tal como se aprecia en la Figura 12.

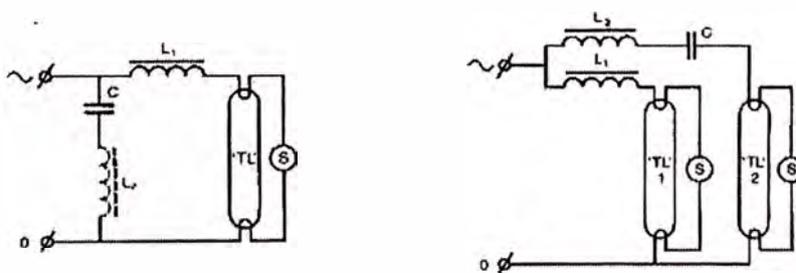


Figura 12. Mono y Doble Compensación

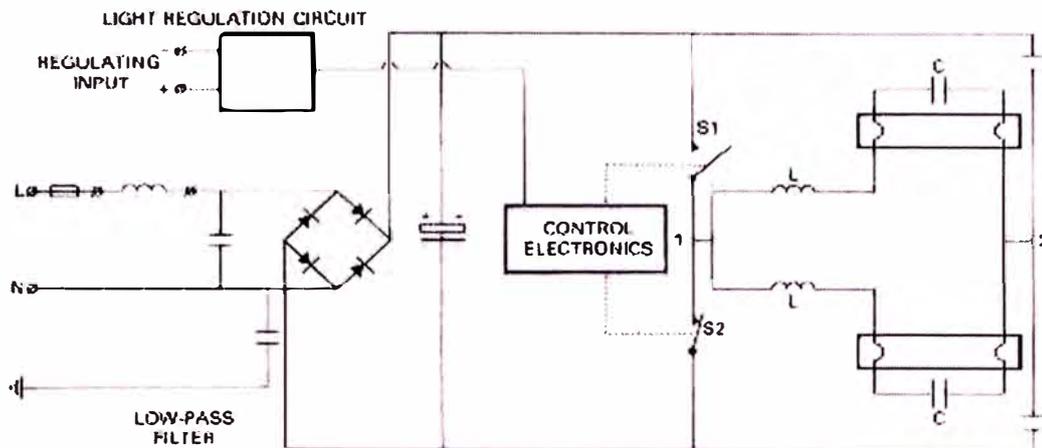
### **Regulación de la intensidad luminosa (*Dimming*).**

El equipo atenuador o regulador de la intensidad luminosa para lámparas fluorescentes puede ser del tipo tiristor (interruptor periódico) o del tipo de frecuencia variable (regulación de luz electrónica HF).

Con el primero de ellos puede reducirse la corriente nominal en la lámpara hasta en un 50%, con lo que se logra reducir la emisión luminosa en aproximadamente el mismo porcentaje.

Por debajo de este límite, la descarga no generara suficiente calor para mantener los electrodos a una temperatura de emisión apropiada y será necesario el calentamiento continuo del electrodo. La corriente de calentamiento debe ser independiente de la corriente de la lámpara, por lo que se requiere de un transformador de calentamiento separado. De este modo puede controlarse niveles de emisión luminosa próximos a cero y también es posible encender las lámparas aun cuando el regulador se encuentra en posición de emisión luminosa reducida (*dimmed position*). Estos reguladores de la emisión luminosa operan invariablemente a alta frecuencia para prevenir los flicker a bajos niveles de iluminación.

Con los balastos electrónicos HF reguladores de luz o "*electronic dimmers*" similares a los mostrados en la Figura 13, la corriente puede ser reducida hasta alcanzar el 10% del valor nominal. Aquí, se logra la reducción por el incremento de la frecuencia de la corriente de alimentación. El balastro también suministra la corriente de calentamiento para los electrodos mientras la lámpara esta en posición en emisión luminosa reducida.



**Figura 13. Balastro regulador de luz electrónico de alta frecuencia (Electronic Dimmer)**

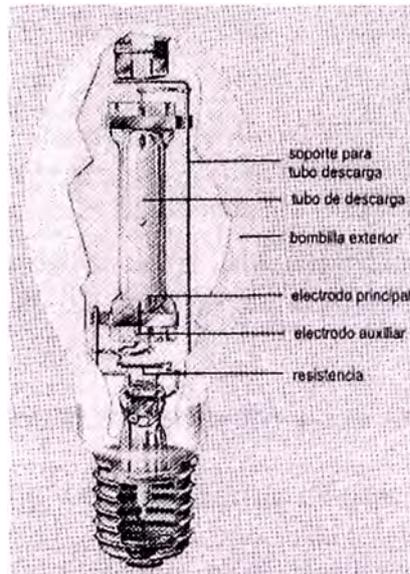
Una lámpara operada con un balastro como éste es arrancada con la tensión y frecuencia de operación nominal. Inmediatamente después que la lámpara ha encendido, es automáticamente regulada al nivel de atenuación prefijado. Esto sucede tan rápidamente que es imperceptible al ojo humano.

#### **b) Lámparas de Mercurio de Alta Presión.**

En estas lámparas, similares a la mostrada en la Figura 14, la descarga tiene lugar en un tubo de descarga de cuarzo que contiene una pequeña cantidad de mercurio y un gas inerte de llenado, usualmente argón, para ayudar al arranque.

Una parte de la radiación de la descarga ocurre en la región visible del espectro como luz, pero también otra parte es emitida en la región ultravioleta. Mediante el revestimiento de la superficie interna de la bombilla exterior, en el que esta alojado el tubo de descarga, con un polvo fluorescente que convierte esta radiación ultravioleta en radiación visible, o luz, la lámpara entregará más luz que una versión similar sin revestimiento.

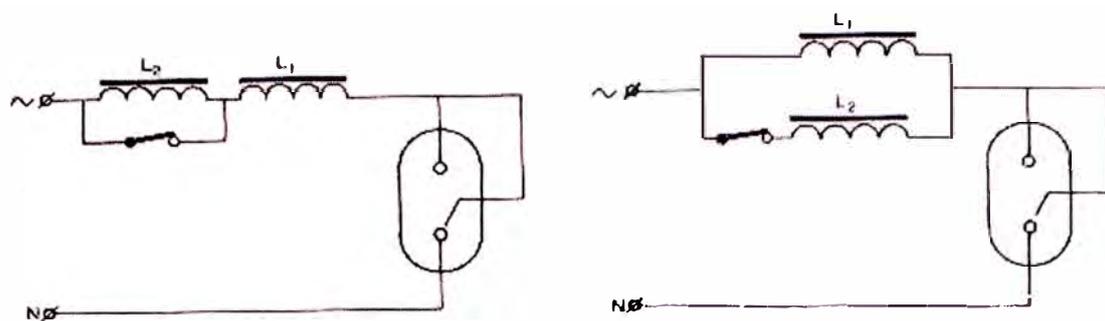
Además, la composición espectral de esta luz mejorará considerablemente las propiedades de prestación de color de la lámpara.



**Figura 14. Lámpara de Mercurio de Alta Presión Ovalada**

La emisión luminosa, la tensión en la lámpara y su vida útil no se afectan significativamente por las variaciones de la temperatura ambiente.

Las lámparas de mercurio de alta presión frecuentemente se encuentran instaladas en aquellos lugares en donde la variación de la tensión del suministro con el que deben operar, es realmente pobre. Donde otras lámparas están propensas a fallas prematuras o no pueden funcionar del todo, las lámparas de mercurio de alta presión son una buena alternativa porque responderán adecuadamente. Sin embargo, una interrupción del suministro apagará la lámpara y esta no se podrá reencender hasta que se haya enfriado lo suficiente para bajar la presión de vapor a un punto donde el arco reencienda con la tensión disponible. Este tiempo, llamado tiempo de reencendido es de aproximadamente cinco minutos



**Figura 15. Balastos de Regulación (Dimming Ballast) para Lámparas de Mercurio Alta Presión**

Existen varios tipos de balastos, entre ellos el balastro de regulación de emisión luminosa “Dimming ballast” como el que aparece en la Figura 15, que es muy utilizado en la iluminación de carreteras. Adicionando una bobina extra ( $L_2$ ) en el circuito del balastro, la lámpara puede ser conmutada para funcionar con la mitad de su potencia. De esta manera la uniformidad de la iluminación se mantiene y se reduce, simultáneamente, la energía consumida en la instalación.

### **c) Lámparas de Luz Mixta.**

La lámpara de luz mixta es derivada de la lámpara convencional de mercurio de alta presión. La principal diferencia entre ambas es que mientras la última depende de un balastro externo para estabilizar la corriente, la lámpara de luz mixta (Figura 16) tiene el balastro incorporado en la forma de un filamento de tungsteno conectado en serie con el tubo de descarga.

La luz de la descarga del mercurio y la que proviene del filamento de tungsteno se combinan o mezclan (de aquí el nombre), para originar una lámpara con características de operación totalmente diferentes a aquellas que tiene la lámpara de mercurio puro o la incandescente.

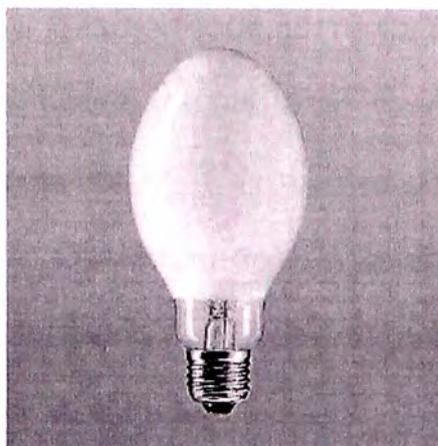


Figura 16. Lámpara de Luz Mixta

La eficacia luminosa total de la lámpara es afectada por la influencia de la baja eficacia del filamento.

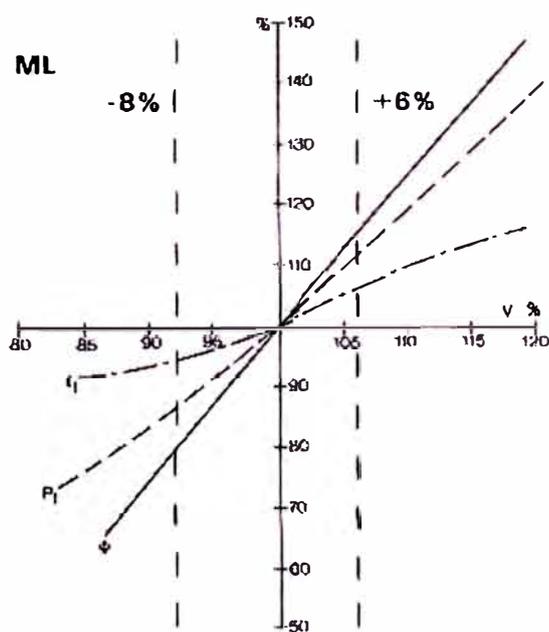


Figura 17. Influencia Externa en las Lámparas de Luz Mixta.

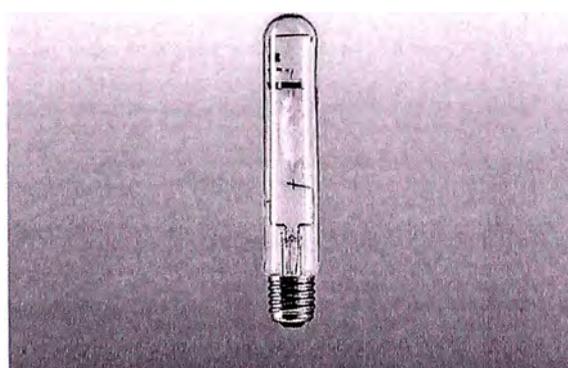
La influencia de las condiciones externas es presentada en la Figura 17. Aquí la corriente de la lámpara es limitada por la resistencia del filamento de tungsteno. Pero la vida del filamento, y consecuentemente la vida útil de la lámpara, es reducida drásticamente por el calentamiento debido a la

sobretensión. Por lo tanto, la lámpara de luz mixta no es muy apropiada para utilizarse en situaciones donde se esperan grandes fluctuaciones en la tensión principal de alimentación.

Estas lámparas tienen un tiempo de reencendido de entre cinco a diez minutos y su emisión luminosa no puede ser regulada.

#### **d) Lámparas de Haluros Metálicos**

Las lámparas de haluros metálicos son similares en construcción a las lámparas de mercurio de alta presión. La principal diferencia entre los dos tipos es que el tubo de descarga del primero de ellos contiene además del mercurio, un número de haluros metálicos. Estos haluros son parcialmente vaporizados cuando la lámpara alcanza su temperatura de operación nominal. El vapor del haluro es luego disociado dentro de la región central caliente del arco en el halógeno y el metal, con el metal vaporizado irradiando su espectro correspondiente.



**Figura 18. Lámpara de Haluros Metálicos.**

Las lámparas de haluros metálicos son más sensibles a las variaciones de la tensión de alimentación que las lámparas de mercurio de alta presión. Una variación de  $\pm 10\%$  del valor nominal de la tensión originaría un cambio

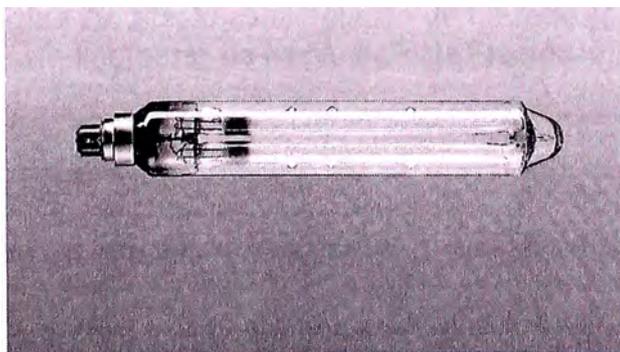
de color en la lámpara. Además, una tensión demasiado alta en la lámpara reducirá su vida útil.

Cuando las lámparas se apagan, la presión en el tubo de descarga es demasiado alta para permitir el reencendido. Este solo será posible después de 5 a 20 minutos, dependiendo del factor de enfriamiento de la lámpara.

### **2.2.3 Lámparas de Descarga de Sodio.**

#### **a) Lámparas de Sodio de baja Presión.**

Hay una gran semejanza entre el funcionamiento de una lámpara de sodio de baja presión y una de mercurio de baja presión (o fluorescente tubular). Sin embargo, mientras que en el último la luz es producida mediante la conversión de la radiación ultravioleta de la descarga de mercurio en radiación visible utilizando un polvo fluorescente sobre la superficie interna del tubo de descarga, en la lámpara de sodio de baja presión, la radiación visible es producida por la descarga directa del sodio.



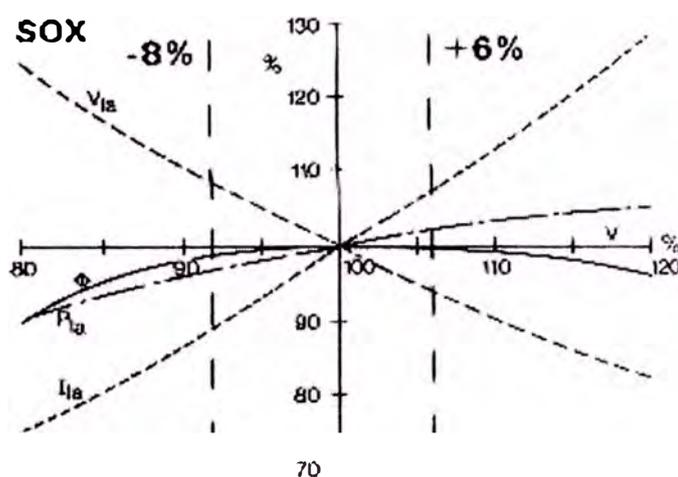
**Figura 19. Lámpara de Sodio Baja Presión.**

La lámpara alcanza su intensidad luminosa nominal en mas o menos diez minutos. Puede reencenderse inmediatamente después, debido a que

la presión de vapor es pequeña y la tensión aplicada suficiente para reencender el arco.

En la práctica, la emisión luminosa de la lámpara no puede ser regulada y gracias al buen aislamiento térmico ofrecido por la bombilla externa de la lámpara, los cambios en la temperatura ambiente casi no afectan el comportamiento de la lámpara.

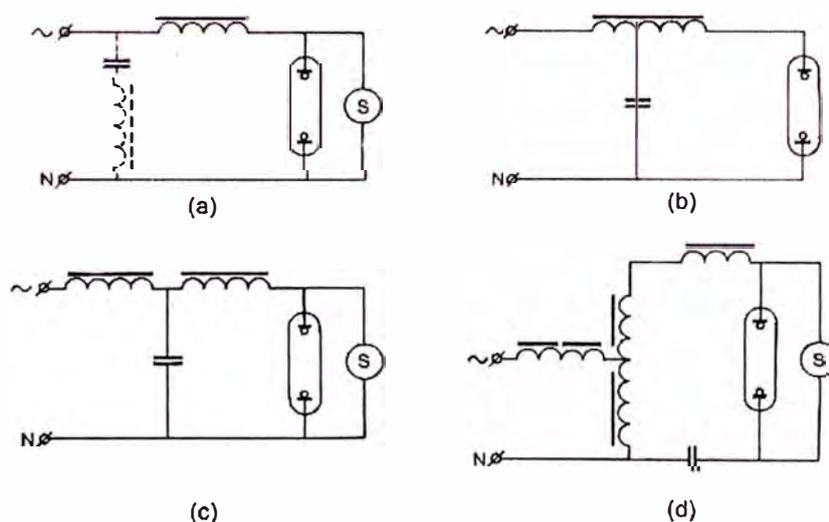
Cuando la lámpara opera en conjunto con un arrancador electrónico, la temperatura mínima de operación es especificada como  $-30^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 20. Efecto de la Tensión de Entrada en las Lámparas de Sodio de Baja Presión**

La Figura 20 muestra los efectos de la variación de la tensión principal de alimentación en la tensión, corriente y potencia de la lámpara. Las variaciones en la corriente y tensión de la lámpara frente a la variación de la tensión de alimentación tienden a cancelarse una a otra, el resultado neto es que el vatiaje de la lámpara, y hasta cierto punto el flujo luminoso, permanecen prácticamente constantes sobre un amplio rango.

La Figura 21 muestra los balastos con los que operan estas lámparas: Balastro de bobina, con (a) o sin (b) arrancador separado y balastro de transformador de vatiaje constante con arrancador separado (d).



**Figura 21. Balastos para Lámparas de Sodio de Baja Presión**

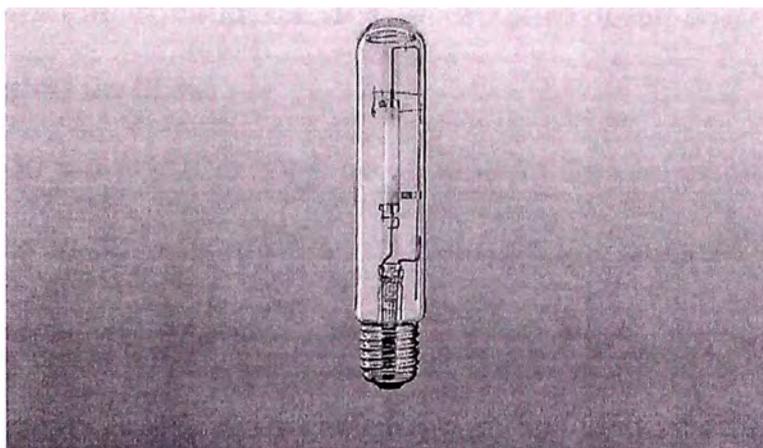
Aun cuando estos son los tipos de balastro mas utilizados en la actualidad para este tipo de lámpara, ya existen balastos del tipo electrónico que gradualmente desplazaran del mercado a sus similares siempre que se logren reducir sus costos y el nivel de armónicos que entregan a la red.

### **b) Lámparas de Sodio de Alta Presión.**

Existen muchas diferencias entre una lámpara de sodio de alta y otra de baja presión. La mayor presión de vapor en la primera es la responsable de las diferencias entre ambas, incluyendo las propiedades de la luz emitida.

El tubo de descarga en una lámpara de sodio de alta presión contiene un exceso de sodio para producir condiciones de vapor saturado cuando la lámpara esta funcionando. Un exceso de mercurio también esta presente para proporcionar un gas regulador, además de xenón para facilitar el

arranque y limitar la conducción del calor del arco de descarga a las paredes del tubo. El tubo de descarga está alojado en una cubierta de cristal protectora (Ver Figura 22).



**Figura 22. Lámpara de Sodio de Alta Presión**

Cuando la lámpara se extingue debido a una interrupción en la tensión de alimentación, ésta deberá enfriarse lo suficiente para que la presión de vapor en el tubo de descarga sea tal que los átomos de sodio puedan nuevamente ser ionizados por el pulso de arranque, y esto demora más o menos un minuto.

Si se consideran las medidas apropiadas para asegurar el reencendido después de cada ciclo de la onda de tensión, es posible controlar o atenuar la emisión luminosa de las lámparas de sodio de alta presión hasta niveles cercanos al 10% de su valor nominal. Sin embargo es muy usual atenuarla a solo el 50% de la emisión luminosa nominal utilizando un dimmer continuamente variable (tiristor) o un segundo balastro llamado de regulación. La última solución es muy popular para algunas instalaciones de

alumbrado público, cuyo nivel de iluminación sería reducido a la mitad de su valor nominal después de una cierta hora.

El esquema es similar al mostrado en la Figura 15. Es necesario mencionar que cuando la emisión luminosa es reducida al 50% de la nominal, la energía consumida por la lámpara y el control se reduce a aproximadamente un 65%.

El efecto de las fluctuaciones de la tensión de alimentación principal en el comportamiento de la lámpara se muestra en la Figura 23.

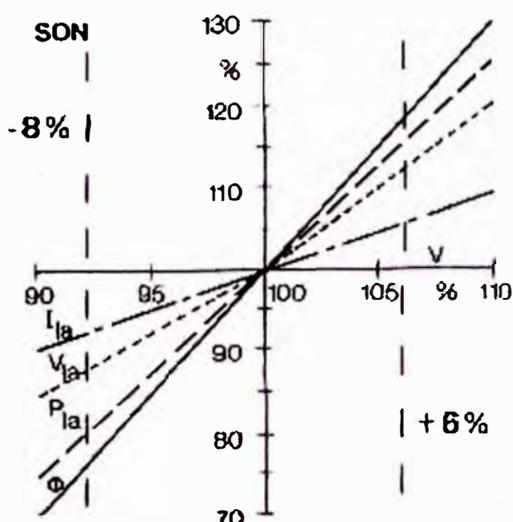


Figura 23. Efecto de la Tensión en las Lámparas de Sodio de Alta Presión

Hasta aquí hemos mostrado las lámparas más conocidas en el mercado pero existen otros tipos especiales que no han sido incluidos por su poco uso y características muy especiales.

La Tabla 4 de la siguiente página, nos muestra un resumen comparativo de las características principales de cada una de las lámparas tratadas en la primera parte de este Capítulo.

**Tabla 1. Estudio General de Lámparas**

Lámpara	Ventajas	Desventajas
Incandescente Normal	Tamaño compacto No requiere reactor Bajo costo inicial Buena calidad de color Buen mantenimiento de lúmenes Puede controlarse la intensidad	Corta duración ( vida útil) Baja eficacia <b>Incremento de tensión reduce vida útil +5% -&gt; -50%</b>
Incandescente de tungsteno halógeno	Compacta No requiere reactor Buena calidad de color Vida moderada Excelente control óptico Puede controlarse intensidad Excelente mantenimiento de lúmenes	Manejo difícil de lámpara durante mantenimiento Alto costo Baja eficacia Efectos de calor radiante <b>Temperatura de operación afecta duración de lámpara</b>
Fluorescente	Forma lineal Costo moderado Eficacia alta Larga vida Buen mantenimiento de lúmenes Puede controlarse intensidad Colores deluxe y especiales pueden dar excelente calidad de color	Requiere balastro Control óptico limitado Balastros pueden ser ruidosos (magnéticos) <b>Temperatura ambiente afecta salida y color de luz</b>
Mercurio	Eficacia moderada duración muy larga Buen mantenimiento de lúmenes Posición de encendido no critica Control limitado de intensidad	<b>Arranque que tarda de 3 a 5 minutos</b> <b>No reinicia de inmediato</b> Balastros necesarios grandes y pueden ser ruidosos (magneticos) Costo de lámpara y balastro relativamente alto
Haluro Metálico	Eficacia alta Buena calidad de color Vida media Buen control óptico Control limitado de intensidad	Variaciones de color Posición de encendido muy importante <b>No reinicia de inmediato</b> <b>Arranque tarde de 2 a 10 minutos</b> Alto costo de lámpara y reactor Balastros grandes y pueden ser ruidosos
Sodio baja presión	Eficacia muy superior duración muy larga de lámpara Reinicia casi de inmediato Buen desempeño frente a variaciones de tensión	Luz monocromática No se puede controlar la intensidad luminosa Arranque tarde de 7 a 15 minutos Requiere equipo adicional
Sodio alta presión	Eficacia muy alta duración muy larga de lámpara Excelente mantenimiento de lúmenes Control limitado de intensidad	Mala calidad de color <b>No reinicia de inmediato</b> Reactores grandes y pueden ser ruidosos Alto costo de lámpara y reactor <b>Arranque tarde de 1 a 4 minutos</b> Luminancia alta puede ocasionar problema de control

## **2.3 Calidad de Energía y Sistemas de Iluminación.**

En el Capítulo I, al tratar el tema de Calidad de Energía, mencionamos que nuestro trabajo solo consideraría la influencia de la tensión y sus perturbaciones estables y repetitivas en los Sistemas de Iluminación. De aquí que solo expondremos el efecto de los armónicos y las variaciones de tensión, sobre los sistemas de iluminación.

### **2.3.1 Efecto de los Armónicos.**

Hoy en día, es evidente que la mayoría de los sistemas de iluminación en espacios comerciales e industriales tiende a utilizar lámparas fluorescentes, aun cuando la realidad nos muestra que se trata de “sistemas” compuestos por lámparas, balastos y, algunas veces, dispositivos sensores de control. En las lámparas y en los sensores se han logrado avances importantes para mejorar su eficiencia no así con el balastro, considerado el corazón del sistema.

Los balastos electrónicos en contraposición a los tradicionales de “núcleo y bobina” representan la nueva tecnología y eventualmente tienden a ser el único tipo de balastro en producción. Como lo mencionamos anteriormente son de un desempeño superior en casi todos los aspectos, excepto en uno, los armónicos que generan.

Los primeros balastos electrónicos que alcanzaron el mercado cumplían su promesa de ahorro en el consumo pero se comprobó la presencia de armónicos en la red, que alcanzaron valores de THD de 80 y 90%. Como consecuencia de los problemas generados por los altos niveles de armónicos se tuvo que reemplazar los nuevos balastos electrónicos por los

tradicionales para continuar operando. Esto sucedió debido a que, instalar un dispositivo con un alto valor de THD y que constituye una minúscula fracción de la carga eléctrica total es una cosa y otra, muy diferente, cambiar todos los balastos de un sistema de iluminación cuya carga representa un 30% o más de la carga total de la instalación.

Los problemas originados por los armónicos se hacen evidentes en el mal funcionamiento de equipos que representan cargas no lineales tales como computadoras, copiadoras, faxes, UPS's, etc. No funcionan correctamente en un ambiente saturado de armónicas. Estos equipos demandan una alimentación relativamente "limpia". También se ven afectados los propios balastos, las lámparas no encienden apropiadamente, pueden destellar o parpadear o no encender del todo.

Algo que seguramente los fabricantes no evaluaron fueron los efectos acumulativos al colocar cientos de balastos electrónicos en un sistema eléctrico cualquiera. Aun cuando ahora el valor del THD producido por un balastro electrónico puede ser menor al de un balastro estándar, probablemente todavía producen un volumen de corriente armónica de tercer orden que se triplicará en el neutro y producirá un calentamiento en el transformador, sobrecargará el neutro y se percibirá un zumbido en los paneles de distribución.

Al evaluar el efecto de los armónicos en los sistemas de iluminación, no solo debemos considerar el beneficio económico por la utilización de tecnologías más eficientes, sino también su efecto en el desempeño de la instalación en su conjunto. Cuando las lámparas estén parpadearando o

destellando será tarde para informar al cliente que tenemos problemas de armónicos. Seguramente pensarán que se está utilizando equipo defectuoso, especialmente si el sistema anterior trabajaba bien.

Todos los ahorros potenciales que pudieran ocurrir no justifican un sistema que no funcione correctamente. Entonces, es muy importante que previo al diseño de los sistemas de iluminación, se recolecte información de la instalación en su conjunto (así como de las ampliaciones proyectadas) y se solicite también el registro de armónicos existentes.

Seguramente, realizar el diseño considerando la información indicada, probablemente no generará los ahorros estimados en un primer momento pero de seguro que tendremos la certeza que el sistema de iluminación funcionará según lo proyectado.

También es primordial educar al usuario final para que evalúe correctamente el producto antes de adquirirlo. En 1994, por ejemplo Philips Electronics NV lanzó en los Estados Unidos sus lámparas ecológicas de luz fluorescente, de menor energía, llamadas *Earthlight* pero las ventas no registraron volúmenes importantes. En el 2000, Philips cambió un poco la envoltura de estas lámparas, se olvidó del tema ecologista y puso énfasis en que eran prácticas, las llamó *Marathon*, debido a sus siete años de duración y, a partir de ese cambio, las ventas aumentaron un 12% cada año.

Hasta aquí hemos expuesto algunos comentarios generales sobre el problema pero la pregunta es ¿Cuál es la influencia del contenido armónico en el desempeño de los diferentes sistemas de iluminación?

Para dar respuesta a esta interrogante, diremos que las lámparas incandescentes tienen una pérdida efectiva de su vida útil cuando operan con tensiones distorsionadas. Si el valor de la tensión eficaz (rms) de operación esta por encima de la tensión nominal, debido a la distorsión armónica, el incremento de la temperatura del filamento reducirá la vida útil de la lámpara. Algunos reportes sostienen que la operación continua a 105% del voltaje nominal RMS, reduce la vida útil de las lámparas en un 47%.

Aparte del ruido audible, no se conoce otro efecto de la distorsión armónica de la tensión sobre la iluminación de descarga. Las lámparas de descarga tales como las de sodio a baja presión, las de haluros metálicos de alta presión o los fluorescentes necesitan balastos inductivos como un elemento serie limitador de corriente. Frecuentemente, los condensadores están orientados a corregir el factor de potencia hacia valores cercanos a la unidad. Los balastos duales de lámparas fluorescentes usan el cambio de fase de la corriente de la lámpara para mejorar el factor de potencia sin utilizar condensadores.

En equipos con condensadores, estos últimos junto con el balastro inductor y la lámpara pueden presentar un problema de resonancia. Sin embargo, la frecuencia de resonancia de la mayoría de las lámparas esta en el rango de 75 – 80Hz y no debería interactuar con la fuente de alimentación.

### **2.3.2 Efecto de las variaciones de tensión.**

Al referirnos a las diversas clases de lámparas desarrollamos brevemente la influencia de las variaciones de tensión en el funcionamiento de las lámparas, razón por la cual solo resumiremos nuestros comentarios.

Así para el caso de las lámparas incandescentes se presenta la Figura 4 que muestra el efecto producido por la variación de tensión en la vida útil de la lámpara.

Para un adecuado funcionamiento de las lámparas fluorescentes, estas deben operar a tensiones de  $\pm 10\%$  su valor nominal de operación de diseño. Si se hacen operar a tensiones menores puede acortarse la vida útil y el arranque resultaría incierto. Si se operan a tensiones mayores, existe el riesgo del sobrecalentamiento del reactor así como el acortamiento de la duración de la lámpara.

Una de las limitaciones de las lámparas de descarga es el efecto de las interrupciones de la alimentación. Ellas son muy sensibles y típicamente se apagan ante disminuciones de tensión de entre 85 a 90% del valor nominal para periodos de tiempo tan corto como un ciclo y les toma varios minutos reencenderse. Una manera de neutralizar esto, es utilizar sistemas de iluminación con capacidad e reencendido instantáneo o utilizar lámparas de emergencia.

Los "flickers" también representan una distorsión de la onda de tensión. Su efecto es ampliamente conocido y seguramente persistirá mientras utilizemos lámparas incandescentes. Para las demás lámparas, gradualmente se está migrando hacia el uso de balastos electrónicos que superan este inconveniente.

## CAPÍTULO III

### NORMAS APLICABLES

En éste Capítulo, nos referiremos a tres importantes normas: La Norma Americana IEEE 519-92, la Norma Peruana NTCSE y la Norma Europea EN 61000-3-2.

#### **3.1 Norma IEEE 519-92.**

Las normas estadounidenses con respecto a los armónicos han sido agrupadas por la IEEE en la Norma 519: *IEEE Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia.*

El propósito de la IEEE 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

1. Existe una limitación sobre la cantidad de CORRIENTE armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
2. Se establece una limitación en el nivel de TENSIÓN armónica que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

### 3.1.1 Lineamientos para los Clientes Individuales.

Aquí se limita la cantidad de corriente armónica que los clientes individuales pueden inyectar en la red de distribución. Los límites se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución. Los clientes mayores se restringen más que los clientes pequeños. El tamaño relativo de la carga con respecto a la fuente se define como la relación de cortocircuito (SCR), en el punto de acoplamiento común (PCC), que es donde la carga del consumidor se conecta con otras cargas en el sistema de potencia. El tamaño del consumidor es definido por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga,  $I_L$ , que incluye todas las cargas lineales y no lineales. El tamaño del sistema de abastecimiento es definido por el nivel de la corriente de cortocircuito,  $I_{SC}$ , al PCC. Estas dos corrientes definen el SCR:

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{\text{cortocircuito MVA}}{\text{carga MW}} \quad (5)$$

Una relación alta significa que la carga es relativamente pequeña y que los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es mas baja. Esto se observa en la Tabla 2, donde se recomiendan los niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de SCR y el orden de la armónica. Todos los valores de distorsión de corriente se dan en base a la máxima corriente de carga (demanda). La distorsión total está en términos de la distorsión total de la demanda (TDD) en lugar del término más común THD.

Es importante notar que la Tabla 2 muestra sólo los límites para armónicos impares. La Norma IEEE 519 da lineamientos para los armónicos pares limitándolos al 25% de los impares, dentro de la misma gama. El armónico par es el resultado de una onda de corriente asimétrica (con forma diferente para la positiva y negativa) que puede contener componentes DC que saturarán los núcleos magnéticos.

### **3.1.2 Lineamientos para las Compañías de Electricidad.**

El segundo conjunto de criterios establecido por la norma IEEE 519 se refiere a los límites de distorsión del voltaje. Estos rigen la cantidad de distorsión aceptable en el voltaje que entrega la compañía de electricidad en el PCC de un consumidor. Los límites armónicos de voltaje recomendados se basan en niveles lo suficientemente pequeños como para garantizar que el equipo de los suscriptores opere satisfactoriamente. La Tabla 3 enumera los límites de distorsión armónica de tensión o voltaje según IEEE 519.

Como es común, los límites se imponen sobre componentes individuales y sobre la distorsión total para la combinación de todos los voltajes armónicos (THD). Lo diferente en esta tabla, sin embargo, es que se muestran tres límites diferentes. Observe que los límites disminuyen cuando el voltaje aumenta, al igual que para los límites de corrientes.

**Tabla 2. Límites de la Distorsión de Corriente según la IEEE 519-92**

Para condiciones con duración superior a una hora. Para periodos más cortos el límite aumenta un 50%

Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras						
Cargas, para voltajes entre 120 - 69,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
$I_{sc}/I_L$	h<11	11=h<17	17=h<23	23=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
Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras						
Cargas, para voltajes entre 69,000 - 161,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
$I_{sc}/I_L$	h<11	11=h<17	17=h<23	23=h<35	35=h	TDD
<20*	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50<100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100<1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10
Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras						
Cargas, para voltajes > 161,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
$I_{sc}/I_L$	h<11	11=h<17	17=h<23	23=h<35	35=h	TDD
<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de $I_{sc}/I_L$ que presente						
Donde						
$I_{sc}$ = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.						
$I_L$ = Máxima demanda de la corriente de carga ( a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.						
TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima .						

**Tabla 3. Límites de distorsión de Voltaje según IEEE 519-92**

(Para condiciones con más de una hora de duración. Periodos más cortos aumentan su límite en un 50%)

Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual de Voltaje (%)	Distorsión total del voltaje THD (%)
Hasta 69 KV	3	5
De 69 KV a 137.9 KV	1.5	2.5
138 KV y más	1	1.5
Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2.0% en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado.		

Nuevamente los límites armónicos impares son los únicos que se muestran en la Tabla 3. La generación de armónicos pares se restringe más debido a que la resultante DC puede ocasionar saturación en motores y transformadores. La corriente de secuencia negativa puede ocasionar calentamiento en generadores. Los armónicos pares individuales se limitan a un 25% de los límites armónicas impares, al igual que sucede con las corrientes.

Es muy común que los alimentadores de las compañías de electricidad alimenten a más de un consumidor. Los límites de distorsión de voltaje mostrados en la Tabla 3 no deberían excederse mientras todos los consumidores conectados no superen los límites de inyección de corriente. Cualquier consumidor que degrade la tensión en el PCC deberá corregir el problema. Sin embargo, el problema de distorsión de tensión es uno para la comunidad entera de consumidores y la concesionaria. Los consumidores muy grandes pueden buscar un compromiso con la compañía de distribución sobre la resolución de un problema específico, y ambos pueden contribuir a su solución.

### **3.2 Norma NTCSE.**

En el caso del Perú, la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos NTCSE (Decreto Supremo N° 020-97 del 11/10/97) establece los niveles mínimos de calidad de los servicios eléctricos, así como las obligaciones de las empresas de electricidad y los clientes. El control de la calidad considera los aspectos de calidad del producto (tensión, frecuencia, flicker y armónicos), la calidad del suministro (interrupciones), calidad del

servicio comercial (trato al cliente, medios de atención) y calidad del alumbrado público.

Se fijan las tolerancias y las respectivas compensaciones y/o multas por incumplimiento. Asimismo todo cliente es responsable ante el suministrador por aquellas perturbaciones que inyecte a la red y que excedan las tolerancias establecidas.

Haciendo una primera comparación observamos que esta norma no establece límites a la distorsión de corriente como si lo hace la Norma Americana IEEE 519, siendo por consiguiente menos estricta.

Por ser de utilidad para nuestro estudio, mencionaremos brevemente las partes pertinentes de la Norma Peruana que nos servirán de referencia mas adelante.

### **3.2.1 Tensión.**

El indicador para evaluar la tensión de entrega en un intervalo de medición (k) de quince (15) minutos de duración, es la diferencia ( $\Delta V_k$ ) entre la media de los valores eficaces (RMS) instantáneos medidos en el punto de entrega ( $V_k$ ) y el valor de la tensión nominal ( $V_N$ ) del mismo punto. Este indicador esta expresado como un porcentaje de la tensión nominal del punto:

$$\Delta V_k (\%) = \frac{(V_k - V_N)}{V_N} * 100\% \quad (6)$$

Las tolerancias admitidas sobre las tensiones nominales de los puntos de entrega de energía, en todas las Etapas y en todos los niveles de tensión, es de hasta el  $\pm 5.0\%$  de las tensiones nominales de tales puntos.

Tratándose de redes secundarias en servicios calificados como Urbano-Rurales, dichas tolerancias son de hasta el  $\pm 7.5\%$ . Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad, si la tensión se encuentra fuera del rango de tolerancia establecido, por un tiempo superior al cinco por ciento (5%) del periodo de medición.

### **3.2.2 Perturbaciones.**

Se propicia el control de todo tipo de perturbaciones pero inicialmente solo flicker y tensiones armónicas. Ambas se miden en el punto de acoplamiento común (PCC) del sistema.

Se consideran los siguientes indicadores de calidad:

1. Para FLICKER: El Índice de Severidad por Flicker de corta duración ( $P_{st}$ ) definido según las normas IEC.
2. Para ARMONICAS: Las Tensiones Armónicas Individuales ( $V_i$ ) y el Factor de Distorsión Total por Armónicas (THD)

Estos indicadores ( $P_{st}$ ,  $V_i$  y THD) se evalúan separadamente para intervalos de diez (10) minutos durante el periodo de medición de perturbaciones, que como mínimo será de siete (7) días calendarios continuos.

Las tolerancias son como sigue:

1. Flicker.- El Índice de Severidad por Flicker ( $P_{st}$ ) debe ser menor a uno, en alta, media y baja tensión. Un valor límite de  $P_{st}' = 1$ , es considerado como el umbral de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede ser soportada sin molestia por una muestra específica de población.

2. Tensiones Armónicas.- Los valores eficaces (RMS) de las tensiones armónicas individuales ( $V_i$ ) y los THD, expresado como porcentaje de la tensión nominal del punto de medición correspondiente, no deben superar los valores límite ( $V_i'$  y THD') indicados en la Tabla 3. Para efectos de esta norma, se consideran las armónicas comprendidas entre la segunda ( $2^{\circ}$ ) y la cuarenta ( $40^{\circ}$ ), ambas inclusive.

El Factor de Distorsión Total por Armónicas (THD) esta definido como:

$$THD = \left[ \sqrt{\sum_{i=2}^{40} \frac{V_i^2}{V_N^2}} \right] * 100\% \quad (7)$$

Donde  $V_i$  es el valor eficaz (RMS) de la tensión armónica "i" (para  $i=2\dots40$ ) expresado en voltios,  $V_N$  es la tensión nominal del punto de medición expresada en voltios.

Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad, si los indicadores de las perturbaciones medidas se encuentran fuera del rango de tolerancias establecidas, por un tiempo superior al 5% del periodo de medición. Cada tipo de perturbación se considera por separado.

**Tabla 4. Tolerancias de Tensiones Armónicas según NTCSE**

ORDEN (n) DE LA ARMONICA ó THD	TOLERANCIA I Vi' I o I THD' I (% respecto de la tension nominal del punto de medicion)	
	Alta y Muy Alta Tension	Media y Baja Tension
(Armonicas impares no multiplos 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
Mayores de 25	$0.1 + 2.5/n$	$0.2 + 12.5/n$
(Armonicas impares multiplos de 3)		
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 de 12	0.2	0.2
<b>THD</b>	<b>3</b>	<b>8</b>

### **3.3 Norma Europea EN 61000-3-2.**

Esta norma, aprobada por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC), publicada en abril de 1995 y corregida en octubre del mismo año, es parte de la serie de Normas Internacionales CEI 1000 sobre Compatibilidad Electromagnética.

Esta sección es una norma internacional que establece los límites de emisión de corrientes armónicas de equipos eléctricos y electrónicos con una corriente de entrada menor o igual a 16 amperios por fase. Se especifican los límites a las componentes armónicas de la corriente de entrada que pueden ser producidas por equipos ensayados bajo condiciones específicas.

Previo a la fijación de los límites, los equipos son clasificados en cuatro categorías siendo la Clase C la correspondiente a los Equipos de Iluminación (incluyendo sus dispositivos reguladores). Existen otras 3 categorías A, B y D para los demás equipos para los cuales también fija sus propios límites pero que no mencionaremos por no ser de utilidad para el desarrollo del tema.

#### **3.3.1 Límites para equipos Clase C.**

##### **a) Límites para equipos de iluminación.**

Los armónicos de corriente de equipos de iluminación no deberán exceder los límites relativos dados en la Tabla 6.

##### **b) Límites para reguladores de luminosidad**

Para reguladores de luminosidad que sean independientes o formen parte de las lámparas o luminarias se aplican las siguientes condiciones:

**Tabla 5. Límites para equipos clase A según EN 61000-3-2**

Orden del Armónico <b>n</b>	Corriente armónica máxima admisible <b>A</b>
Armónicos Impares	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15*(15/n)$
Armónicos Pares	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23*(8/n)$

**Tabla 6. Límites para equipos clase C según EN 61000-3-2**

Orden del Armónico <b>n</b>	Corriente armónica máxima admisible expresada en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental <b>%</b>
2	2
3	$30 * \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (solo armónicos impares)	3

Nota:  $\lambda$  es el factor de potencia del circuito

Los armónicos de corriente de los reguladores no deberán exceder los límites dados en la Tabla 5. Si se usa el control de fase en lámparas incandescentes, el ángulo de disparo no deberá exceder los  $145^\circ$  y el regulador deberá ser ensayado de acuerdo a las condiciones dadas fijadas en la misma norma.

Para luminarias con lámparas de descarga, los armónicos de corriente para el uso de máxima carga no deberán superar los límites indicados en la Tabla .En cualquier posición del regulador, los armónicos de corriente no deberán exceder el valor de corriente referido al caso de carga máximo y el equipo será ensayado según las condiciones fijadas en la norma.

## **CAPÍTULO IV**

### **CASO 1: EFECTO DE UNA FUENTE DE ARMÓNICOS EN LAS LÁMPARAS INCANDESCENTES COMPACTAS**

Como lo mencionamos en el Capítulo II, la lámpara fluorescente compacta (LFC) representa una nueva y efectiva alternativa a la lámpara incandescente tradicional. Normalmente consume menos energía y tiene una vida útil mayor que una lámpara incandescente con similar intensidad luminosa. Sin embargo, los balastos de las LFCs pueden ser una importante fuente de corriente armónica, además, algunos sistemas de iluminación con estas lámparas operan con un bajo factor de potencia.

Gradualmente, el consumo de energía en iluminación empieza a ser una fracción importante del consumo total y el uso creciente de las LFCs podría generar serias implicaciones en la calidad de la energía para los sistemas eléctricos. Aun cuando las empresas de electricidad se esfuerzan en atender a sus clientes con tensiones sinusoidales “puras y estables”, parece estar en aumento la existencia de distorsiones en la forma de onda, subtensiones e interrupciones del suministro eléctrico.

Este Capítulo presenta un estudio realizado por R. Arseneau y M. Oulette, ambos miembros de la IEEE, sobre el comportamiento de los sistemas de iluminación compuestos de lámparas fluorescentes compactas, cuando son alimentados con tensiones de onda sinusoidal “pura” y “distorsionada”.

#### **4.1 Descripción de las lámparas evaluadas.**

La Tabla 7 proporciona una breve descripción de las LFCs estudiadas. Las muestras incluyen lámparas de diversos tamaños T4 y T5, Asimismo se incluyen tubos de formas Twin, Quad y otros tipos. Las lámparas están provistas de un balastro magnético o de uno electrónico. Estos balastos están incorporados en la lámpara, cableados separadamente, o adaptados para operar en un portalámparas convencional.

La tensión nominal de todas las LFCs es 120VAC y sus potencias de consumo varían entre 13 y 28 vatios. El costo del conjunto lámpara y balastro varía entre \$17y \$55<sup>2</sup>. Para este estudio, la Muestra 13 es utilizada como referencia y es una lámpara incandescente de larga vida, de forma T10 y aproximadamente el mismo tamaño físico que las LFCs bajo prueba. Las Muestras 7 y 8 están provistas de balastro y circuitos de corrección del factor de potencia por lo que operan con un “alto” factor de potencia.

Cada muestra consistió de un grupo de siete lámparas nuevas y sus balastos, envejecidos y estabilizados por aproximadamente 100 horas. Durante el proceso de envejecimiento de cada muestra, las siete lámparas

<sup>2</sup> Estos precios son para el usuario final y correspondían al promedio vigente a la fecha del estudio (1993). Actualmente se han reducido apreciablemente.

fueron alimentadas en conjunto y se monitoreo su emisión luminosa, tensión, corriente, potencia y factor de potencia. Después del envejecimiento, se hizo una selección final de tres lámparas de cada muestra que serian sometidas a la prueba con tensión de onda sinusoidal “pura” y “distorsionada.”

**Tabla 7. Descripción general de las Lámparas evaluadas**

MUESTRA	LÁMPARA							POTENCIA (W)	BALASTRO					COSTO (\$)	
	Tipo				Forma y tamaño				Tipo		Montaje				AFP
	T	M	Q	I	T4	T5	T10		M	E	S	I	A		
1	X				X			13	X		X				19.95
2		X			X			16	X			X			21.00
3			X		X			20		X		X			26.50
4		X			X			18		X		X			26.70
5			X		X			13	X				X		20.70
7			X		X			26	X		X			X	55.69
8	X						X	24	X		X			X	45.03
9			X		X			28	X		X				26.61
10			X		X			13	X		X				35.00
11	X				X			13	X				X		17.58
13				X			X	60							0.88

T: Twin  
Q: Quad.  
M: Misc.  
I: Incand.

M: Magnético  
E: Electrónico  
S: Separado  
I: Incorporado  
A: Adaptado  
AFP: Alto factor de potencia

#### 4.2 Descripción de la Prueba.

En la Figura 24 se muestra un diagrama del sistema de prueba. Las ondas de tensión utilizadas para las pruebas fueron obtenidas de un sistema compuesto por una computadora, un generador digital de ondas de forma diversa y un amplificador de tensión. Las condiciones para la tensión de

prueba son ingresadas desde la computadora. El programa carga la forma de onda requerida dentro del generador de ondas y establece la magnitud apropiada a la salida del generador. Esta salida es luego amplificada y suministrada a las tres lámparas bajo prueba por cada muestra.

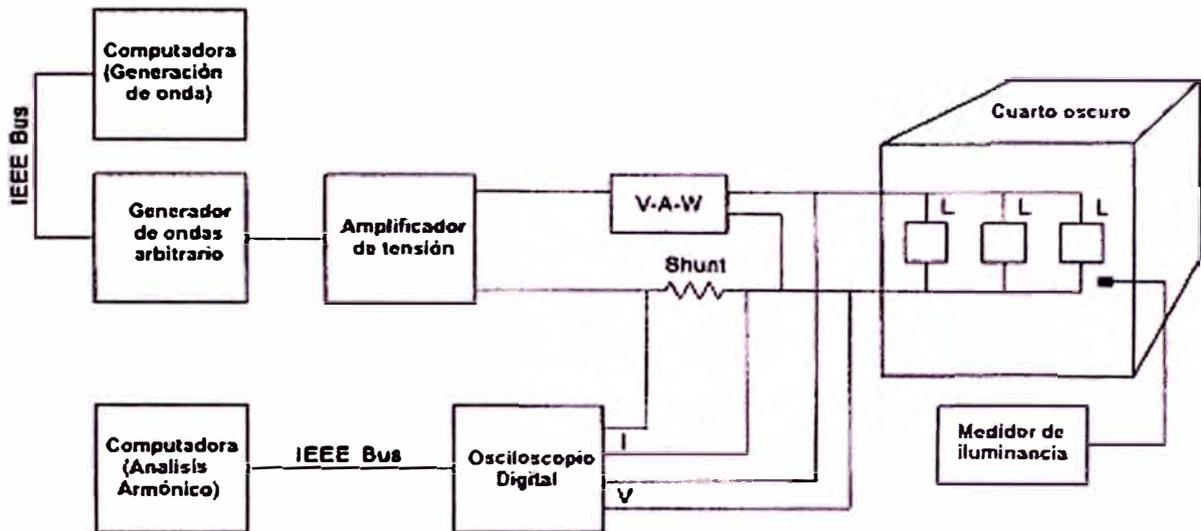
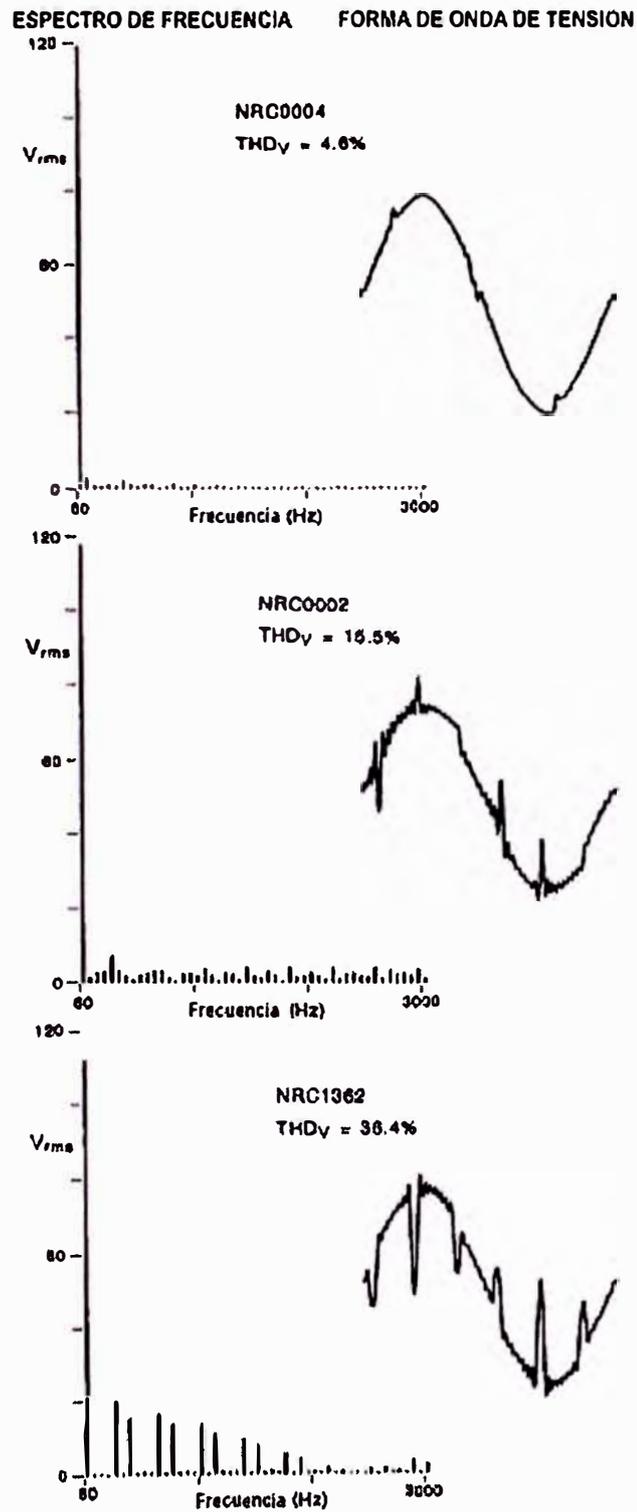


Figura 24. Diagrama del sistema de Prueba

Para las pruebas, todas las lámparas estaban montadas en base a un arreglo circular uniforme de 60 cm. de radio. Estas fueron encerradas dentro de un cuarto oscuro para eliminar la luz parásita. El cuarto oscuro fue ventilado desde arriba por convección natural. La temperatura al interior del recinto fue monitoreada durante las pruebas. Después de la estabilización, las lámparas fueron evaluadas a la temperatura del cuarto con una tensión de onda sinusoidal pura y tres tensiones con forma de onda no sinusoidal. La tensión se fijó en 120 Vrms para todas las pruebas. Las formas de onda no sinusoidal y sus espectros de frecuencia son mostrados en la Figura 25.



**Figura 25. Espectro de Frecuencias y Formas de Onda de las Tensiones de Prueba**

Estas formas de onda fueron previamente obtenidas y registradas de localidades con problemas de armónicos. Ellas fueron seleccionadas para la prueba de las LFCs porque representan las típicas formas de onda de tensión con baja (4.6%), media (15.5%) y alta (36.4%) distorsión armónica total entre las numerosas muestras guardados en la biblioteca de formas de ondas registradas del campo, de la NRC<sup>3</sup>. Por tanto, las lámparas fueron evaluadas simulando condiciones reales.

Un osciloscopio digital fue utilizado para registrar las ondas de corriente y tensión en las lámparas bajo prueba. Las muestras digitales almacenadas fueron después transferidas por medio del bus IEEE hacia una computadora para el análisis armónico y cálculo de las magnitudes eléctricas mostradas en la Tabla 8.

Los valores  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ , Potencia (P), Distorsión Armónica Total de Tensión  $THD_V$  y Distorsión Armónica Total de Corriente  $THD_I$  fueron calculados directamente de las componentes armónicas obtenidas con una Transformada Rápida de Fourier de la información muestreada de las ondas de tensión y corriente en las lámparas bajo prueba. Estas cantidades fueron calculadas así:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{100} V_h^2} \quad (8)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{100} I_h^2} \quad (9)$$

<sup>3</sup> NRC: National Research Council of Canada – Consejo de Investigación Nacional del Canadá

$$P = \sum_{h=1}^{100} V_h I_h \cos \Phi_h \quad (10)$$

$$THD_V = \left( \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{100} V_h^2}}{V_{rms}} \right) \times 100\% \quad (11)$$

$$THD_I = \left( \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{100} I_h^2}}{I_{rms}} \right) \times 100\% \quad (12)$$

donde  $V_h$ ,  $I_h$  y  $\Phi_h$  son magnitudes y ángulo de fase de la tensión y corriente armónica de orden  $h$ .

La potencia aparente  $S$  y el factor de potencia  $PF$  fueron calculados según las ecuaciones (13) y (14).

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \quad (13)$$

$$PF = \frac{P}{S} \quad (14)$$

Se estima que la precisión de los valores obtenidos a partir de las ecuaciones (8) a la (14) son mayores que 0.25%.

Durante las pruebas, un medidor multifunción de RMS verdadero con un ancho de banda de 20kHz fue utilizado para monitorear independientemente los valores de tensión, corriente y potencia real consumida en las lámparas bajo prueba. La comparación de las lecturas del medidor con los correspondientes valores calculados en base a la información muestreada del osciloscopio digital demostró una buena aproximación entre los valores obtenidos por estos dos sistemas para todas las pruebas.

Las medidas de Iluminancia de las tres lámparas bajo prueba fueron tomadas con un medidor de iluminancia en una ubicación equidistante de cada lámpara, en un plano 1 metro por debajo del punto más próximo de las lámparas.

#### **4.3 Presentación y evaluación de los resultados.**

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8. Las mediciones de corriente, potencia real y potencia aparente representan los valores promedio obtenido para una lámpara en cada muestra evaluada. En la tabla, las once muestras han sido reagrupadas en 5 categorías (de I al V) cada una con características eléctricas similares.

Las Muestras 1, 2, 5, 9, 10 y 11 están en la categoría I. Todas ellas tienen balastro magnético y operan con un factor de potencia cercano a 0.5 para todas las ondas de la tensión de prueba. Los valores THD de corriente en promedio, están ligeramente por encima del 10% excepto para la prueba con la onda NRC 1362 donde sobrepasa ligeramente el 14%. La iluminancia de salida de las lámparas en esta categoría es relativamente constante para la onda sinusoidal y las NRC 0002 y NRC 0004. Las muestras 1, 2, 5 y 9 experimentan una caída de 7 a 10% en la salida de luz cuando son alimentadas con la onda NRC 1362.

La Categoría II esta compuesta por las Muestras 3 y 4 que corresponden a las lámparas que tienen balastro electrónico. Ellas operan a un factor de potencia de 0.55 para la sinusoidal y la onda NRC 0004, y de 0.35 a 0.4 para las ondas NRC 0002 y NRC 1362. Los valores THD de corriente son aproximadamente 82% para la sinusoidal y la onda NRC 0004

y 94% para las otras dos ondas de prueba. La salida de luz de estas dos muestras se eleva con la distorsión armónica de las ondas de prueba.

Las Categorías III, IV y V tienen una sola muestra cada una, las Muestras 7, 8 y 13 respectivamente. La Muestra 7 tiene un balastro magnético con un circuito de corrección del factor de potencia. Este opera a un factor de potencia de 0.97 con un THD de corriente del 21% para la tensión de prueba sinusoidal. El comportamiento eléctrico de la Muestra 7 cambió significativamente cuando fue alimentada con cada una de las tres ondas de prueba distorsionadas. Su factor de potencia cayó por debajo de 0.1% y el THD de corriente alcanzó el 99.8% para la onda NRC 1362.

La Muestra 8 también tiene un balastro magnético con un circuito de corrección del factor de potencia. Sin embargo las tres ondas de tensión distorsionadas utilizadas durante las pruebas tienen solo un ligero efecto sobre el comportamiento de esta muestra. Esta opera a un factor de potencia mayor al 95% y tiene una THD de corriente de aproximadamente 13% para todas las ondas de tensión utilizadas. La iluminancia de salida de esta muestra es también relativamente constante para todas las pruebas.

La Muestra 13 es la lámpara incandescente referencial. Como se esperaba, ésta opera con un factor de potencia de 1.0 y con un THD de corriente ligeramente más alto que el THD de tensión de la onda de prueba con la que es alimentada. Su iluminancia no varía significativamente con las tensiones de prueba.

Las formas de onda de la tensión de prueba y su correspondiente onda de corriente, para una lámpara típica de cada categoría, son mostradas en la

Figura 26. La forma y el contenido armónico de la corriente para las lámparas de la Categorías I y la Categoría IV son las menos afectadas por los cambios de distorsión armónica en sus fuentes de tensión. Las corrientes de la lámpara incandescente de la Categoría V son, como se esperaba, de la misma forma que la tensión de alimentación.

Las formas de onda de corriente de las lámparas de la Categoría II y de la Categoría III cambiaron significativamente cuando fueron alimentadas con las ondas de tensión distorsionadas. Las formas de onda de corriente de las lámparas de la Categoría II son no simétricas y están particularmente afectadas por pulsos breves de corta duración cerca de los picos de las ondas de tensión NRC 0002 y NRC 1362. Las formas de onda de corriente de las lámparas de la Categoría III observadas bajo condiciones de onda de tensión distorsionada no se asemejan a la obtenida para una tensión sinusoidal. Esta lámpara funciona defectuosamente ante la presencia de armónicos en su fuente de alimentación.

Tabla 8. Comparación del desempeño de las Lámparas bajo prueba

Tensión de Prueba	Categoría	I Magnético						II Electrónico		III	IV	V
		Muestra	1	2	5	9	10	11	3	4	afp*	afp*
Seno 120Vrms THD <sub>v</sub> = 0.1%	Illum.(L)	70.6	157.1	87.3	187.2	90.8	76.4	158.0	94.1	165.1	135.4	50.3
	I(A)	0.28	0.25	0.24	0.62	0.29	0.25	0.28	0.22	0.25	0.29	0.44
	S(VA)	33.8	30.3	28.6	74.5	35.1	29.6	33.6	26.4	30.4	34.6	53.4
	P(W)	16.6	16.0	14.7	33.7	18.6	14.5	18.5	15.2	29.6	34.2	53.4
	PF	0.49	0.53	0.51	0.45	0.53	0.49	0.55	0.58	0.97	0.99	1.00
	THD <sub>i</sub> (%)	12.8	11.1	9.5	8.6	10.4	9.2	82.9	78.7	20.9	12.5	0.7
NRC 0004 120Vrms THDV = 4.6%	Illum.(L)	70.1	158.2	87.7	188.1	90.2	76.4	160.2	95.8	166.8	134.8	50.1
	I(A)	0.27	0.25	0.24	0.62	0.29	0.24	0.29	0.22	0.45	0.29	0.44
	S(VA)	33.0	30.3	28.6	74.0	35.5	29.4	35.1	26.4	54.6	34.6	53.4
	P(W)	16.3	15.9	14.6	33.8	18.7	14.5	19.0	15.5	29.5	34.1	53.4
	PF	0.49	0.53	0.51	0.46	0.53	0.49	0.54	0.59	0.54	0.98	1.00
	THD <sub>i</sub> (%)	12.8	11.3	9.5	8.6	10.1	9.0	84.3	79.8	87.8	14.0	4.6
NRC 0002 120Vrms THDV = 15.5%	Illum.(L)	70.7	157.1	86.9	184.8	88.5	74.2	162.4	98.4	165.7	134.8	50.1
	I(A)	0.27	0.25	0.23	0.61	0.29	0.24	0.50	0.41	2.24	0.29	0.44
	S(VA)	32.9	29.7	28.2	73.2	35.1	29.7	59.7	49.7	269.5	34.4	53.4
	P(W)	16.3	15.7	14.4	33.2	18.4	14.2	20.1	17.5	31.1	33.7	53.4
	PF	0.49	0.53	0.51	0.43	0.52	0.48	0.38	0.35	0.11	0.98	1.00
	THD <sub>i</sub> (%)	12.9	11.2	9.5	8.6	10.2	8.6	95.1	94.4	99.5	11.3	15.4
NRC 1362 120Vrms THDV = 36.4%	Illum.(L)	63.3	144.3	81.6	176.1	89.9	74.8	166.9	103.7	154.8	137.0	50.0
	I(A)	0.23	0.22	0.21	0.54	0.24	0.21	0.41	0.41	2.58	0.29	0.44
	S(VA)	27.7	25.9	24.9	64.6	28.9	24.8	49.3	49.1	310.7	35.2	53.4
	P(W)	14.1	14.0	12.9	29.7	15.8	12.8	20.5	18.1	28.4	33.6	53.4
	PF	0.51	0.54	0.52	0.46	0.55	0.51	0.42	0.37	0.09	0.95	1.00
	THD <sub>i</sub> (%)	16.8	14.1	12.8	12.4	14.3	13.2	92.8	94.1	99.8	15.0	34.4

NOTA: afp\* = alto factor de potencia, inc.\* = incandescente

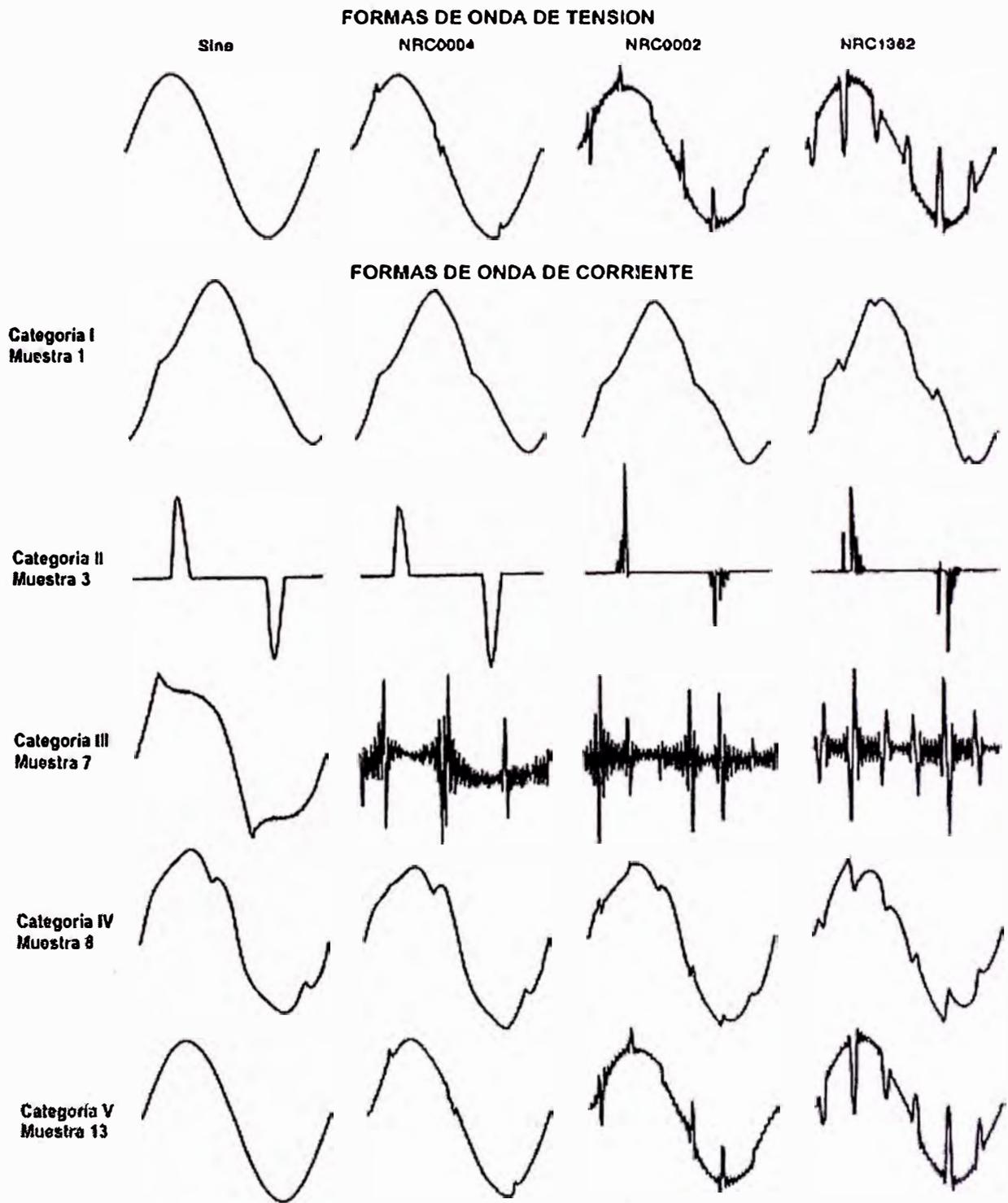


Figura 26. Formas de onda de tensión y corriente de prueba para una Lámpara típica de cada categoría

#### **4.4 Economía de las lámparas fluorescentes compactas.**

Una breve revisión de la potencia consumida y la emisión luminosa, mostrados en la Tabla 8, indican claramente que las lámparas fluorescentes compactas estudiadas producen más luz por vatio que las lámparas incandescentes. En consecuencia, estas LFCs tendrán un costo de operación menor al de la lámpara incandescente. A fin de que las LFCs logren la aceptación general del mercado debería demostrarse que esta reducción en su costo de operación es suficiente para permitir al cliente recuperar, en un tiempo razonable, el mayor costo inicial de la lámpara y su balastro.

Las políticas de precios y estructuras tarifarias en electricidad varían enormemente en los diferentes países y Norteamérica no es la excepción, sin embargo, en la mayoría de los casos los clientes residenciales del servicio eléctrico reciben cargos por la energía consumida mientras que a los clientes comerciales e industriales se les factura la energía y la demanda. Estos cargos de demanda se incrementan en función a las lecturas de potencia aparente de los medidores de KVA.

El costo de operación, a la temperatura del cuarto de las lámparas estudiadas en este proyecto, ha sido calculado para sus primeras 10,000 horas de operación, que es la vida útil estimada de las lámparas. Las ecuaciones de costo (15) y (16) para clientes residenciales y comerciales considera el costo de una lámpara nueva y su balastro, una tarifa residencial (Res.) de 7ctvs por kW-h, una tarifa comercial (Com.) de 6ctvs por kW-h y cargos por demanda de \$6.00 por kVA máximo. El costo de la mano de obra

para la instalación de un nuevo sistema de lámparas o el reemplazo de las unidades malogradas no ha sido incluido en los cálculos. Los efectos de reducción en la vida útil de la lámpara debido a la conmutación no han sido considerados. Los cálculos de costo han sido ajustados para una iluminancia de salida común de 100 lux.

$$\text{Costo(Res.)} = \left[ \text{R.C.} + \frac{P}{1000} \times 10000 \times 0.07 \right] \times \frac{100}{\text{Ill.}} \quad (15)$$

$$\text{Costo(Com.)} = \left[ \text{R.C.} + \frac{P}{1000} \times 10000 \times 0.06 + \frac{S}{1000} \times \frac{10000}{720} \times 6.00 \right] \times \frac{100}{\text{Ill.}} \quad (16)$$

donde los valores de P, Ill. Y S son los valores medidos reportados en la Tabla 8 y R.C. es el costo al usuario mostrado en la Tabla 7.

El segundo término de la ecuación de costo representa los costos de energía para las 10,000 horas de operación de las lámparas. El último término de la ecuación (16) es un estimado de los cargos de demanda para la vida útil de la lámpara. Se asume que la lámpara siempre esta encendida cuando ocurre la máxima demanda mensual y que el ciclo de facturación es de 30 días, esto es 720 horas.

Los costos totales de operación mostrados en la Tabla 3 han sido calculados para todas las lámparas evaluadas y para una lámpara incandescente convencional A19, 60W, 120V, 2500 horas conocida por tener dos veces la salida de luz de la Muestra 13. Estos cálculos se hicieron para ambas ondas de tensión, la sinusoidal y la NRC 1362.

Estos cálculos indican que en promedio los costos fueron solo ligeramente más altos para la onda distorsionada excepto para la Muestra 7 donde el costo, bajo condiciones distorsionadas, es 20% más alto. Esto es debido a los valores relativamente altos de la potencia aparente medida para esta muestra bajo estas condiciones. En general los costos basados en la tarifa comercial son también ligeramente más altos que la residencial.

El costo de todos los sistemas de LFCs durante las 10,000 horas iniciales de operación fue menor a los de la lámpara de referencia de la Muestra 13. Cuando lo comparamos con una lámpara convencional de 60W, las Muestras 2, 3, 4, 5, 9 y 11 tienen costos menores.

**Tabla 9. Costo de operación de las lámparas para sus primeras 10,000 horas (\$/100 Lux)**

Muestra	Seno		NRC 1362	
	Res.	Com.	Res.	Com.
1	44.72	46.36	47.11	48.53
2	20.50	21.09	21.34	21.87
3	24.97	25.57	24.48	25.71
4	39.68	40.40	37.97	40.17
5	35.50	36.54	36.43	37.40
7	46.28	46.02	48.82	63.71
8	50.94	50.54	50.04	49.73
9	26.82	28.33	26.92	28.29
10	52.89	54.06	51.23	52.16
11	36.30	37.63	35.48	36.53
13	76.06	74.29	76.52	74.74
A-19	44.00	43.00		

Después de las primeras 10,000 horas, el costo al usuario en los cálculos de los sistemas de lámparas restantes (Muestras 1, 7, 8 y 10) puede reducirse a solo el costo de una nueva lámpara de reemplazo (y ya no

incluir el del balastro separado). Como tal, todas estas lámparas alcanzarán su “punto de equilibrio”<sup>4</sup> durante las segundas 10,000 horas de operación.

#### **4.5 Conclusiones.**

En los últimos años, los niveles de distorsión armónica han aumentado constantemente. Como consecuencia las LFCs, que decididamente están siendo cada vez más utilizadas en alternativa a las lámparas incandescentes, seguramente serán instaladas en lugares donde la tensión de alimentación no siempre serán sinusoides “puras”. Por consiguiente es importante estudiar el comportamiento de estas lámparas frente a tensiones de alimentación de onda sinusoidal “pura” (ideal) y “distorsionada” (real), observadas y registradas previamente en los sistemas de potencia.

Los resultados de las pruebas indican que el comportamiento de las lámparas frente a las condiciones de onda de tensión sinusoidal pura y distorsionada esta relacionada al tipo de balastro utilizado (magnético o electrónico) y si estos balastos están provistos o no de un circuito de corrección para alcanzar un alto factor, de potencia. Las lámparas con balastos magnéticos sin circuito de corrección (Categoría I) producen las menores corrientes armónicas y fueron las menos afectadas por los armónicos de la fuente de tensión. La lámpara de la Muestra 7 (Categoría III) funcionó defectuosamente ante la presencia de armónicos en la fuente de tensión.

El análisis económico mostró que seis de los diez sistemas de LFCs estudiados alcanzaron su punto de equilibrio durante las primeras 10,000

<sup>4</sup> Situación en la que las curvas de costos de dos alternativas distintas se cruzan (igualan).

horas de operación, es decir el tiempo de vida esperado de la lámpara. Los otros cuatro sistemas de LFCs alcanzarían su punto de equilibrio en las siguientes 10,000 horas de operación. Los armónicos en la fuente de tensión tienen relativamente poca influencia en la economía de los sistemas de LFCs.

## **CAPÍTULO V**

### **CASO 2 : DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN DE UNA SALA MULTICINE**

En este Capítulo presentamos una evaluación general, considerando los conceptos de Calidad de Energía, de las instalaciones eléctricas de un local multicine.

Empezamos con una descripción general de las instalaciones eléctricas, incluyendo los circuitos y equipos existentes, luego, identificamos el problema y realizamos el diagnóstico en base al registro detallado de los parámetros eléctricos necesarios, en puntos estratégicamente definidos para tal fin. Finalmente se dan algunas conclusiones y recomendaciones para lograr un mejor funcionamiento de las instalaciones eléctricas en su conjunto, incluyendo, los sistemas de iluminación.

#### **5.1 Descripción de las instalaciones**

El local multicine se encuentra ubicado en un exclusivo centro comercial de nuestro medio y consta de ocho (8) salas de cine y áreas de servicios de boletería, dulcería, SS.HH, almacenes, talleres y subestación eléctrica.

El suministro eléctrico es en media tensión (10kV) y se realiza a través de una subestación de transformación tipo caseta, ubicada en el sótano del edificio. La línea de alimentación en 10kV de la empresa concesionaria ingresa a una celda de llegada y luego se deriva a dos celdas de transformación, en las que la tensión se reduce de 10,000 a 230 voltios.

La subestación cuenta con dos (2) transformadores de potencia de las siguientes características técnicas:

#### **Transformador N° 1.**

Marca	CEA
Potencia	500 kVA
Tensión	10,000 $\pm$ 2 x 2.5% / 230V.
Corriente	28.87 / 1255.11 A
Conexión	Dyn5
Tcc	4.41%
N° Fases	3
Frecuencia :	60 Hz
Año Fabr.	1999
Altura	1000 m.s.n.m.

A partir de este transformador, se deriva el suministro en baja tensión 220V a un tablero de enlace TGP1 donde se ubica un interruptor de 1000 A, de aquí continua hacia un tablero general de aire acondicionado TG1 que tiene un interruptor principal de 1200 A y alimenta las siguientes cargas:

- \* C11 : Aire acondicionado y salas, 400 A.
- \* C12 : Aire acondicionado y salas, 400 A.
- \* C13 : Aire acondicionado y salas, 250 A.
- \* C14 : Aire acondicionado y salas, 100 A.
- \* C15 : Aire acondicionado y salas, 100 A.

- \* C16: Reserva, 40 A.

### **Transformador N° 2.**

Marca	:	CEA
Potencia	:	315 kVA
Tensión	:	10,000 $\pm$ 2 x 2.5% / 230V.
Corriente	:	18.19 / 790.72 A
Conexión	:	Dyn5
Tcc	:	4.40%
N° Fases	:	3
Frecuencia	:	60 Hz
Año Fabr.	:	1999
Altura	:	1000 m.s.n.m.

A partir de este transformador, se deriva el suministro en baja tensión 220V a un tablero de enlace TGP2, donde se ubica un interruptor de 700 A, continúa hacia un tablero de transferencia de emergencia y de ahí hacia el tablero general de alumbrado y fuerza en baja tensión TG2 en el que se tiene un interruptor general de 600 A y las siguientes cargas:

- \* C21: 175 A.
- \* C22: 125 A.
- \* C23: TA-E, 100 A.
- \* C24: Sala N° 1, 100 A.
- \* C25: Sala N° 2, 100 A.
- \* C26: Sala N° 3, 70 A.
- \* C27: Sala N° 4, 70 A.
- \* C28: Sala N° 5, 70 A.
- \* C29: Sala N° 6, 60 A.
- \* C30: Sala N° 7, 60 A.
- \* C31: Sala N° 8, 60 A.
- \* C32: Reserva, 20 A.

- \* C33 : Reserva, 40 A.
- \* C34 : Reserva, 40 A.

### **Tablero de Distribución de Salas de Cine.**

Para la distribución eléctrica en cada una de las salas de cine, se cuenta con tableros de distribución para las siguientes cargas:

1. Proyector N° 1
2. Proyector N° 2
3. Amplificador
4. T.C. cabina
5. T.C. sala
6. T.C. sala
7. TS1 – Dimmer
8. T.C. sala
9. Luz caseta
10. Luces guía
11. Extractor.

## **5.2 Identificación y diagnóstico del Problema.**

### **5.2.1 Identificación del Problema.**

El problema existente en esta sala multicine fue el deterioro prematuro de las lámparas principales de iluminación de las salas de cine. Estas lámparas operan con emisión luminosa variable (ó intensidad de iluminación variable) controlada a través de los equipos “dimmer” de la marca Strong Internacional Inc.

### **5.2.2 Diagnóstico del Problema.**

Con el fin de determinar el problema se realizaron mediciones de los parámetros de calidad de energía en puntos estratégicamente seleccionados para tal fin.

## **A. Mediciones Realizadas.**

Las mediciones se realizaron con dos analizadores que fueron convenientemente instalados y programados para el mejor registro de los parámetros requeridos. Así, los equipos utilizados, puntos medidos y parámetros eléctricos registrados fueron los siguientes:

### **1. Mediciones con el Analizador Powersight**

**a) Tablero General de Aire Acondicionado - TG1**, mediciones de Tensión (V), Corriente (I), Potencia (P), Factor de Potencia ( $\cos\Phi$ ), Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ), Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ); para intervalos de medición de diez (10) minutos, entre los días 5 y 6 de abril.

**b) Tablero de Iluminación “dimmer” de la Sala N° 7**, mediciones de Tensión (V), Corriente (I), Potencia (P), Factor de Potencia ( $\cos\Phi$ ), Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ), Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ); para intervalos de medición de cinco (5) minutos, durante 48 horas, entre los días 7, 8 y 9 de abril.

**c) Tablero de Distribución de la Sala N° 7**, mediciones de Tensión (V), Corriente (I), Potencia (P), Factor de Potencia ( $\cos\Phi$ ), Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ), Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ); para intervalos de medición de cinco (5) minutos, durante 24 horas, entre los días 9 y 10 de abril.

### **2. Mediciones con el Analizador RPM**

**d) Tablero General de Salas TG2**, mediciones de Tensión (V), Corriente (I), Potencia (P), Factor de Potencia ( $\cos\Phi$ ), Distorsión armónica total de

tensión ( $THD_V$ ), Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ) , par intervalos de medición de un (1) minuto, durante 24 horas, entre los días 5 y 6 de abril.

**e) Tablero de Iluminación “dimmer” de la Sala N° 2**, mediciones de Tensión (V), Corriente (I), Potencia (P), Factor de Potencia ( $\cos\phi$ ), Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ), Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ) para intervalos de medición de un (1) minuto, durante 24 horas, entre los días 6 y 7 de abril.

**f) Circuito “dimmer” de la Sala N° 2**, mediciones de Tensión (V), Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ), Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ) para intervalos de medición de un (1) minuto, durante 48 horas, entre los días 7 y 9 de abril.

Los gráficos más relevantes, que servirán para el análisis, se encuentran en el Anexo que se incluye al final del informe. No se ha incorporado la data ni otros gráficos obtenidos para no engrosar innecesariamente este informe

## **B. Evaluación de las Mediciones.**

### **a) Tablero General de Aire Acondicionado - TG1.**

En el grafico de la tensión se observa que los valores no exceden el rango permitido por la Norma Peruana NTCSE, que es de  $\pm 5\%$ , registrándose para la Fase A, un valor mínimo de 221.5 voltios, un valor promedio de 227 voltios y un valor máximo de 233.3 voltios.

En cuanto a la Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ) se han registrado valores que varían entre el 1 y 2%, inferior al límite máximo permitido por la NTCSE, que es del 8%. (La Norma IEEE 519-92 la fija en 5%).

Para la Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ) se han registrado valores que varían entre 2 y 6%. Debemos recordar que la Norma Peruana no contempla ni fija límites para este parámetro.

El Factor de Potencia ( $\cos\phi$ ) registrado es bajo, en promedio 0.82.

**b) Tablero de Alumbrado “dimmer” de la Sala N° 7.**

En el gráfico de la tensión se observa que los valores no exceden el rango permitido por la Norma Peruana NTCSE, que es de  $\pm 5\%$ , registrándose por ejemplo para la Fase A, un valor mínimo de 217.9 voltios, un valor promedio de 225.4 voltios y un valor máximo de 233.6 voltios. Se observa algunas fluctuaciones de los valores máximos de hasta 5 voltios.

En cuanto a la Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ) se han registrado valores que varían entre el 1 y 3%, inferior al límite máximo permitido por la Norma Peruana NTCSE, que es del 8%. (La Norma IEEE 519-92 la fija en 5%).

Para la Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ) se han registrado valores que varían entre 2 y 84%. Debemos recordar que la Norma Peruana no contempla ni fija límites para este parámetro.

El Factor de Potencia ( $\cos\phi$ ) registrado es bajo, en promedio 0.88.

**c) Tablero de Distribución de la Sala N° 7.**

En el gráfico de la tensión se observa que los valores no exceden el rango permitido por la Norma Peruana NTCSE, que es de  $\pm 5\%$ , registrándose para la Fase A un valor mínimo de 217.4 voltios, un valor promedio de 224.9 voltios y un valor máximo de 230.7 voltios. Se observa algunas fluctuaciones de los valores máximos de hasta 3 voltios.

En cuanto a la Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ) se han registrado valores que varían entre el 1 y 3%, inferior al límite máximo permitido por la Norma Peruana NTCSE, que es del 8%. (La Norma IEEE 519-92 la fija en 5%).

Para la Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ) se han registrado valores inferiores al 24%. Debemos recordar que la Norma Peruana no contempla ni fija límites para este parámetro.

El Factor de Potencia ( $\cos\phi$ ) registrado es bajo, en promedio 0.71.

#### **d) Tablero General de Salas (Alumbrado y Fuerza).**

En el gráfico de la tensión se observa que los valores no exceden el rango permitido por la Norma Peruana NTCSE, que es de  $\pm 5\%$ , registrándose para la Fase A, un valor mínimo de 216.1 voltios, un valor promedio de 225.6 voltios y un valor máximo de 233.1 voltios. Se observan variaciones de los valores máximos de hasta 3 voltios.

En cuanto a la Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ) se han registrado valores que varían entre el 1.2 y 2.7%, inferior al límite máximo permitido por la Norma Peruana NTCSE, que es del 8%. (La Norma IEEE 519-92 la fija en 5%).

Para la Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ) se han registrado valores que varían entre 1.6 y 16.2%. Debemos recordar que la Norma Peruana no contempla ni fija límites para este parámetro.

El desbalance de tensión entre fases varía entre 0.4 y 1.07%.

#### **e) Tablero de Alumbrado “dimmer” de la Sala Nº 2.**

En el gráfico de la tensión se observa que los valores no exceden el rango permitido por la Norma Peruana NTCSE, que es de  $\pm 5\%$ , registrándose un valor mínimo de 170.9 voltios, un valor promedio de 228 voltios y un valor máximo de 235.5 voltios. Se observa algunas fluctuaciones de los valores máximos de hasta 6 voltios.

**f) Circuito a la salida del “dimmer”.**

Con el fin de determinar la causa del problema se realizó, a la salida del dimmer, la medición de diferentes parámetros de calidad de energía como la tensión, corriente, flicker y armónicos.

La variación de la intensidad luminosa de las lámparas halógenas es producto del modo de operación del “dimmer” que genera tres (3) niveles de tensión, previamente programados, durante la presentación de la película. Se identificaron y registraron tres niveles de tensión de operación siguientes:

Posición	Nivel	Tensión	Duración
1	Alta	230V	30 minutos
2	Media	145V	10 minutos
3	Baja	12V	120 minutos

Los registros de tensión en cada nivel no presentaron variaciones bruscas de tensión.

En los registros del Flicker se observa que existen dos intervalos fuera de la norma (valores mayores a uno) siendo el valor máximo obtenido de 1.90.

Los registros de Distorsión armónica total de tensión ( $THD_V$ ), a la salida del “dimmer”, presentan valores cercanos al 100% en condiciones de nivel de tensión mínima de 12V (Pos. 3). Para el nivel de tensión media 145V (Pos. 2) se registra valores cercanos al 30% y en el nivel de tensión superior 230V (Pos. 1) se registra un 9%.

#### **g) Mediciones de Puesta a Tierra en el Tablero General.**

Se realizaron también mediciones en el pozo de puesta a tierra del tablero general, registrándose una resistencia promedio de 6.7 ohmios.

### **5.3 Conclusiones y Recomendaciones.**

- \* De las mediciones realizadas en los Tableros Generales de Aire Acondicionado y Salas, concluimos que las variaciones de Tensión promedio no exceden el límite permisible del 5%. Asimismo los niveles de Distorsión armónica total de tensión varían de un 2 a 3% y resultan menores al límite máximo del 8% recomendado por la Norma Peruana NTCSE.
- \* Considerando los resultados obtenidos para las mediciones a la salida del “dimmer” concluimos que actualmente las lámparas halógenas no están expuestas a sobre tensiones mayores al 5% del valor nominal que podrían afectar y reducir la vida útil de las lámparas hasta en un 50%. Sin embargo, la operación con “dimmer” en 3 niveles de tensión (230, 145 y 12V) estarían reduciendo drásticamente la vida útil de las lámparas.
- \* Tal como lo indicamos en el Capítulo II, las lámparas incandescentes halógenas pueden ser controladas por un “dimmer”, pero debajo de un punto determinado la lámpara se enfriará de forma tal que se interrumpa el ciclo regenerativo del halógeno. Desde este momento la lámpara halógena

funcionará como una lámpara incandescente normal y en esta situación, estará expuesta a severos ennegrecimientos de la bombilla y al riesgo de que el bromo libre ataque los hilos de entrada. Esta es la razón por la que generalmente no se recomienda una prolongada atenuación de las lámparas halógenas.

- \* La interrupción del “ciclo regenerativo del filamento” se presenta al operar las lámparas con un nivel de tensión, a la salida del “dimmer”, inferior a su valor nominal de 230 voltios. El enfriamiento propicia la condensación y evita que las moléculas de tungsteno regresen al filamento, haciéndolo mas delgado y evidenciando por tanto, un desgaste prematuro.
- \* La Posición 3 del “dimmer” debería permitir la desconexión total de las lámparas en lugar de mantenerlas con una tensión en 12 voltios por largos periodos que en total suman alrededor de 8 horas al día.
- \* Nuestra primera recomendación se deriva de la observación anterior, por lo que se deberá acondicionar en el sistema del “dimmer” la posición de desconexión.
- \* El uso alternativo de lámparas con mayor vida útil seria una solución temporal, mientras se modifica el sistema del “dimmer”, que reduciría las frecuentes labores de reemplazo de lámparas.
- \* Como recomendación general también se sugiere utilizar alimentadores independientes para los sistemas con circuitos electrónicos.

## CONCLUSIONES

### **1. Los armónicos están presentes en los sistemas eléctricos y los sistemas de iluminación deben convivir con ellos.**

Gradualmente el avance de la electrónica ha generado equipos más eficientes pero a su vez muy contaminantes por la distorsión de onda que generan.

Los actuales sistemas de iluminación incluyen por lo general un gran número de lámparas con sus equipos asociados (balastos, arrancadores, condensadores, reguladores, etc.) que gradualmente están migrando hacia versiones electrónicas que generan importantes niveles de distorsión armónica. En consecuencia, es una realidad la presencia de los armónicos (los que vienen con el suministro y aquellos que generan los propios equipos de iluminación).

El contenido de armónicos que generan los equipos de los sistemas de iluminación se concentran en los de orden 3ro, 5to y 15to. Su manejo y control debe ser atendido con las técnicas conocidas para los armónicos en general. Los niveles de armónicos producidos por estos equipos son

inferiores al 32% que es lo permitido por la norma ANSI 62.41 (Norteamericana) o cumplen con los límites establecidos por la Norma Europea EN 61000-3-2.

Además de los efectos producidos por los armónicos en general, los equipos de iluminación pueden producir un alto grado de emisión magnética, en función de la frecuencia de operación de los balastos electrónicos. Esto puede producir interferencias en el funcionamiento de equipos electrónicos como lectoras de barras, detectores, relojes, etc.

## **2. La variación de la tensión de alimentación afecta el buen desempeño de los sistemas de iluminación.**

Es conveniente señalar que al referirnos a la variación de tensión nos referimos a la diferencia del valor eficaz de la tensión existente en el suministro (que incluye la fundamental mas los armónicos existentes) con el valor nominal de operación de los equipos.

Además mencionamos que los sistemas de iluminación involucran lámparas y dispositivos adicionales para su control, regulación, etc.

Entonces en el caso de las lámparas incandescentes la variación de tensión afecta su vida útil. Una tensión rms de suministro de 105% del valor nominal de operación (considerado por la Norma NTCSE como aceptable) reduciría su vida útil en 47%.

Para un adecuado funcionamiento de las lámparas fluorescentes, estas deben operar con una tensión en el rango de  $\pm 10\%$  su valor nominal de operación de diseño. Si trabajan a tensiones menores puede acortarse la vida útil y el arranque resultaría incierto. Si se operan a tensiones mayores,

existe el riesgo del sobrecalentamiento del balastro así como la reducción del tiempo de operación de la lámpara.

Una de las limitaciones de las lámparas de descarga es el efecto de las interrupciones de la alimentación. Ellas son muy sensibles y típicamente se apagan ante disminuciones de tensión de entre 85 a 90% del valor nominal para periodos de tiempo tan cortos como un ciclo y les toma varios minutos reencenderse. Una manera de neutralizar esto es utilizar sistemas de iluminación con capacidad e reencendido instantáneo o utilizar iluminación de emergencia.

Los "flickers" también representan una distorsión de la onda de tensión. Su efecto es ampliamente conocido y seguramente persistirá mientras utilicemos lámparas incandescentes. Para las demás lámparas, gradualmente se está migrando hacia el uso de balastros electrónicos que superan este inconveniente.

El diseño futuro de los equipos electrónicos en iluminación contempla el uso de unidades multirango que permitirán las fluctuaciones de tensión de suministro en un amplio margen sin afectar apreciablemente el desempeño del sistema de iluminación.

### **3. La LFC: Alternativa de iluminación eficiente y económica.**

Las lámparas fluorescentes compactas (LFCs) han sido desarrolladas para su uso en aquellas aplicaciones que tradicionalmente fueron atendidas por las incandescentes porque combinan una alta eficacia y una buena característica de color con un bajo consumo de energía y larga vida útil.

Inicialmente cuando se desarrollaron y probaron las primeras LFCs se evidenció que el comportamiento de estas unidades alimentadas con tensiones reales (aquellas cuya forma de onda es distorsionada) era deficiente y en muchos casos se tuvo que retirarlas y reinstalar los equipos tradicionales. Más aun se demostró que la economía por su uso no era realmente decisiva. Sin embargo, con el transcurrir del tiempo y con el mejoramiento de la tecnología se ha logrado desarrollar equipos muy buenos que trabajan con un buen factor de potencia ( $>90\%$ ), son muy eficientes, tienen una buena respuesta de color, y sobre todo se han logrado precios muy competitivos.

#### **4. Es necesario el mejoramiento del diseño de filtros para lograr soluciones más económicas y menos contaminantes.**

Como parte de las mejoras realizadas a las nuevas versiones de las lámparas y sus accesorios, se han mejorado los diseños hasta lograr versiones que no excedan el THD permitido, pero seguirá siendo una preocupación el lograr mejores productos a precios razonables que desarrollen una menor distorsión armónica.

El mejorar el diseño de los filtros que permitan la reducción del THD, es entonces el camino a seguir. El logro de filtros más compactos y económicos permitirá incorporarlos a cada unidad del sistema de iluminación. Se pretende por tanto trabajar de forma similar a como se esta haciendo con la los armónicos generados por las computadoras personales, en las que se desea incorporar un filtro a la entrada de la fuente de alimentación que reduzca los niveles de distorsión armónica.

## **5. La eficiencia en la iluminación es apreciada en los sistemas de generación alternativos.**

Desde hace varios años se están impulsando métodos alternativos de generación de energía y uno de ellos es la generación por medio de paneles solares de células fotoeléctricas.

Las células utilizadas para este método todavía son poco eficientes y entregan cantidades reducidas de energía, pero se está trabajando en la búsqueda de mejores productos que nos permitan aprovechar plenamente la energía solar disponible. Sin embargo, es una realidad que es una alternativa interesante para atender las necesidades de energía eléctrica de lugares apartados que no cuentan con un acceso a la red de suministro eléctrico.

La existencia en el mercado de equipos de iluminación más eficientes también alienta el desarrollo de la generación alternativa puesto que hace posible atender adecuadamente los requerimientos de iluminación mediante el uso de las LFCs.

## **6. Existe una tendencia creciente por el uso de equipos electrónicos en iluminación.**

Gradualmente la presencia de equipos electrónicos se hace más evidente en todos los campos y el caso de los sistemas de iluminación no es la excepción. Aquí el uso de la electrónica está reemplazando gradualmente a los dispositivos magnéticos utilizados tradicionalmente. Se prevé que para el 2004, el 50% de las lámparas compactas de alta intensidad se venderán con equipos electrónicos (en el 2000 este porcentaje fue del 12%) y las razones son su diseño compacto, mejor desempeño de la lámpara, elimina

el efecto de flickeo, elimina desvíos de tensión, menores pérdidas de energía, etc.

También se procura lograr versiones de lámparas (fluorescentes y de descarga) y accesorios (balastos, arrancadores, condensadores, etc) más compactos que puedan ser masivamente utilizados y lograr mejores resultados en iluminación.

El creciente numero de productos disponibles en el mercado y el incremento de la globalización del mercado de iluminación ha incrementado la posibilidad de incompatibilidad entre los equipos. Por esta razón, debemos verificar que los productos a utilizar sean compatibles entre si y nos ayuden a lograr un optimo resultado, alterando lo menos posible el desempeño de los demás equipos. Adicionalmente, se apreciará que estén disponibles a precios muy convenientes.

#### **7. El diseño de un sistema de iluminación debe considerar las condiciones de calidad de energía de la instalación.**

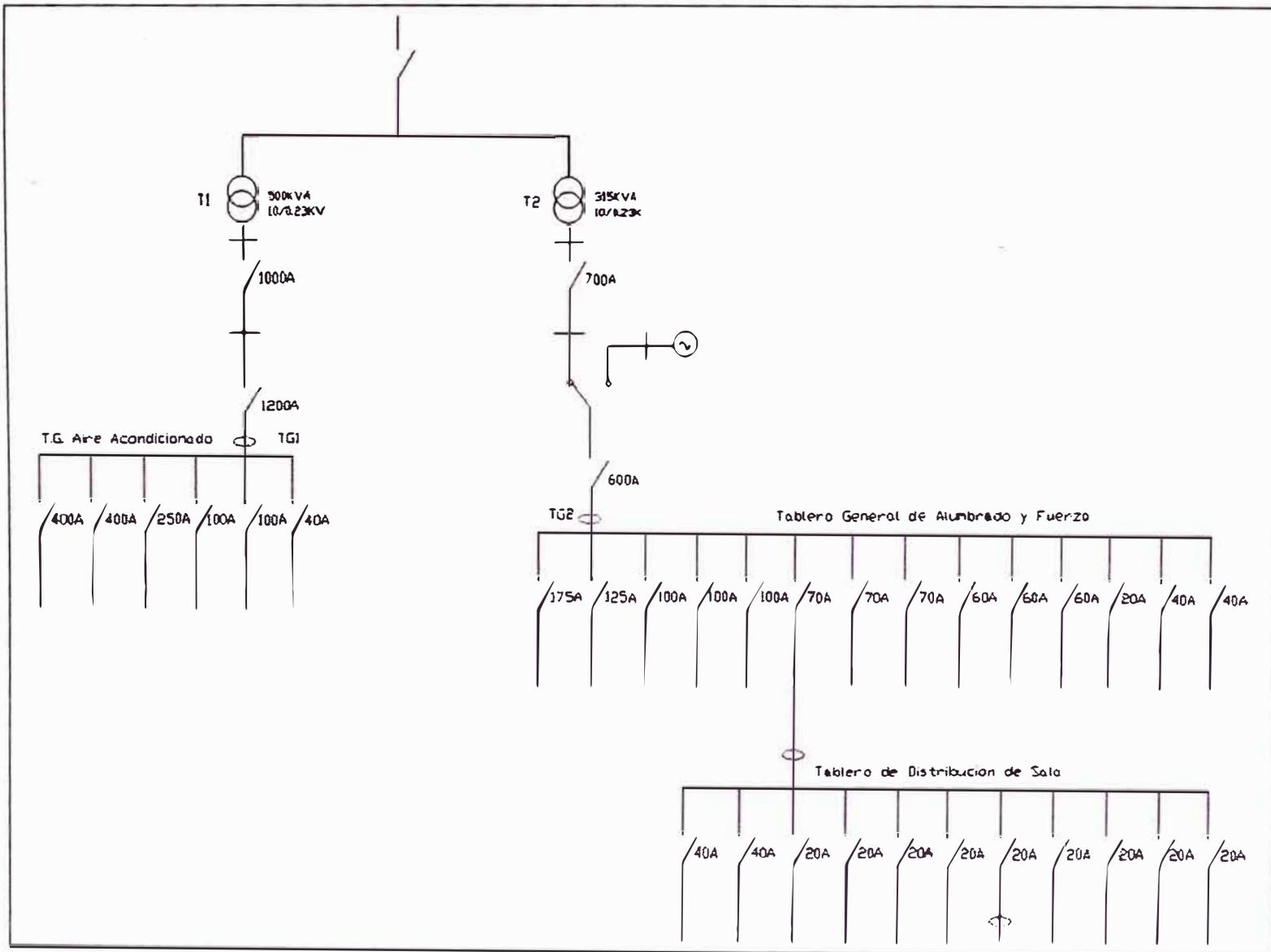
Actualmente, la presencia de cargas no-lineales en los sistemas eléctricos ha incrementado los niveles de distorsión armónica. Asimismo, el uso de balastos electrónicos en iluminación incrementa la presencia de armónicos en las instalaciones eléctricas y podría afectar el desempeño y rendimiento de los sistemas de iluminación.

Es muy importante que previo al diseño de los sistemas de iluminación, se recolecte información de la instalación en su conjunto (así como de las ampliaciones proyectadas), se solicite también el registro de armónicos existentes. Realizar el diseño considerando la información indicada,

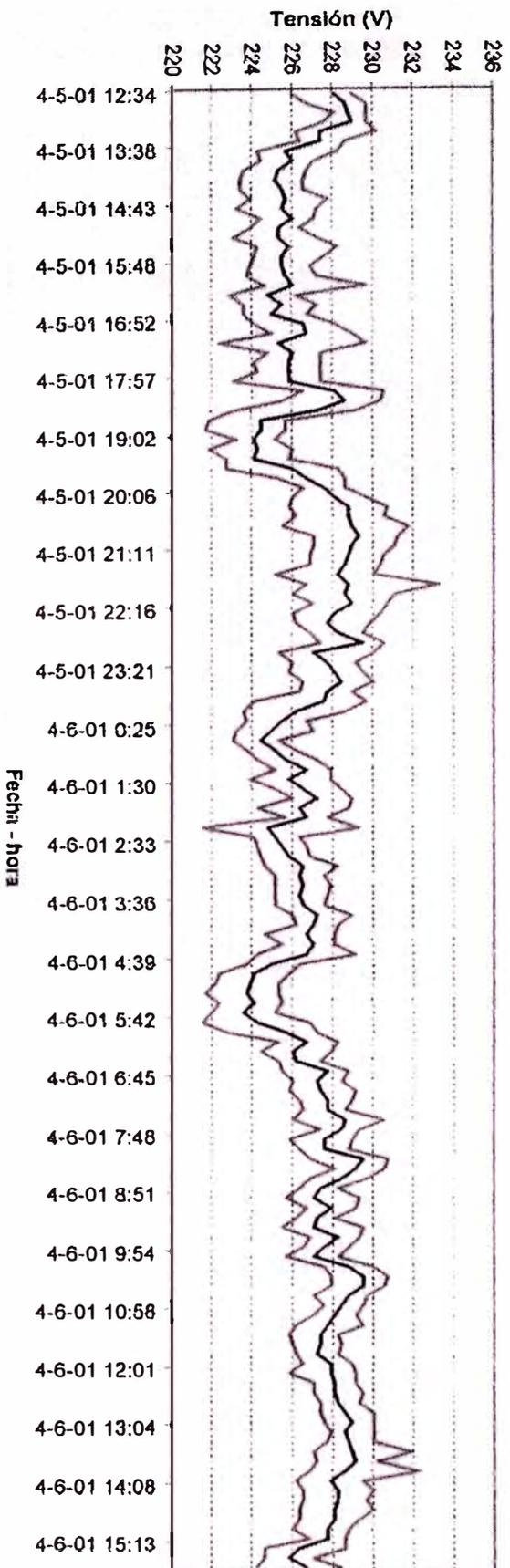
probablemente no generará los ahorros de energía estimados en un primer momento pero de seguro, el sistema de iluminación funcionará según lo proyectado.

También debe considerarse en la propuesta que se diseñe, los efectos adicionales que generara nuestro sistema, evaluando no solo el contenido armónico y su efecto sobre las instalaciones adyacentes sino también la interferencia electromagnética que pudieran generar y que pudiera perturbar el desempeño de otros equipos electrónicos.

## **ANEXOS**

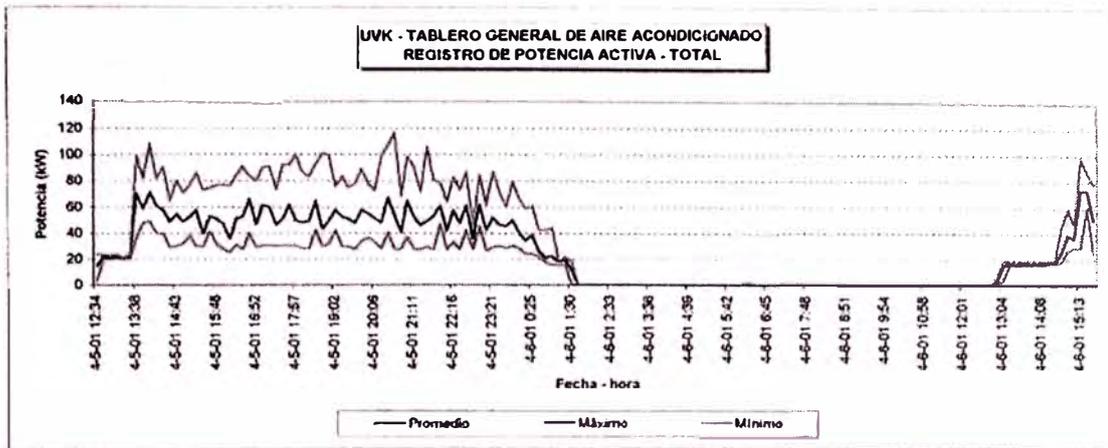


Anexo 1.- Diagrama Electrico Unifilar, Sala Multicine (Caso 2)



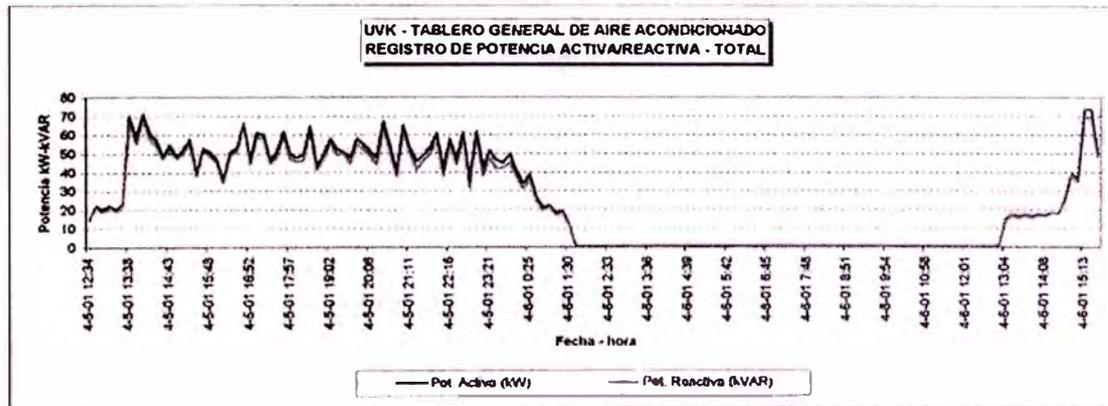
FASE A	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
MAXIMO	229.5	233.3	228.1
PROMEDIO	227.0	228.6	225.3
MINIMO	223.6	225.2	221.5

Anexo 2.- Registro de Tensión, Fase A, Tablero General de Aire Acondicionado (TG 1)  
Sala Multicine



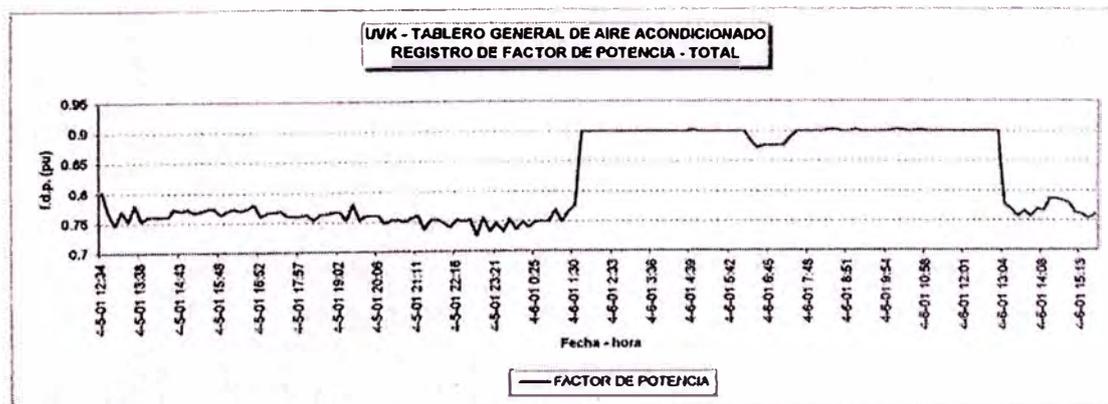
5 - 6 abril/2001

	PROMEDIO	MÁXIMO	MINIMO
MÁXIMO	73.7	117.0	61.2
PROMEDIO	25.5	39.1	18.5
MINIMO	0.6	0.6	0.6



5 - 6 abril/2001

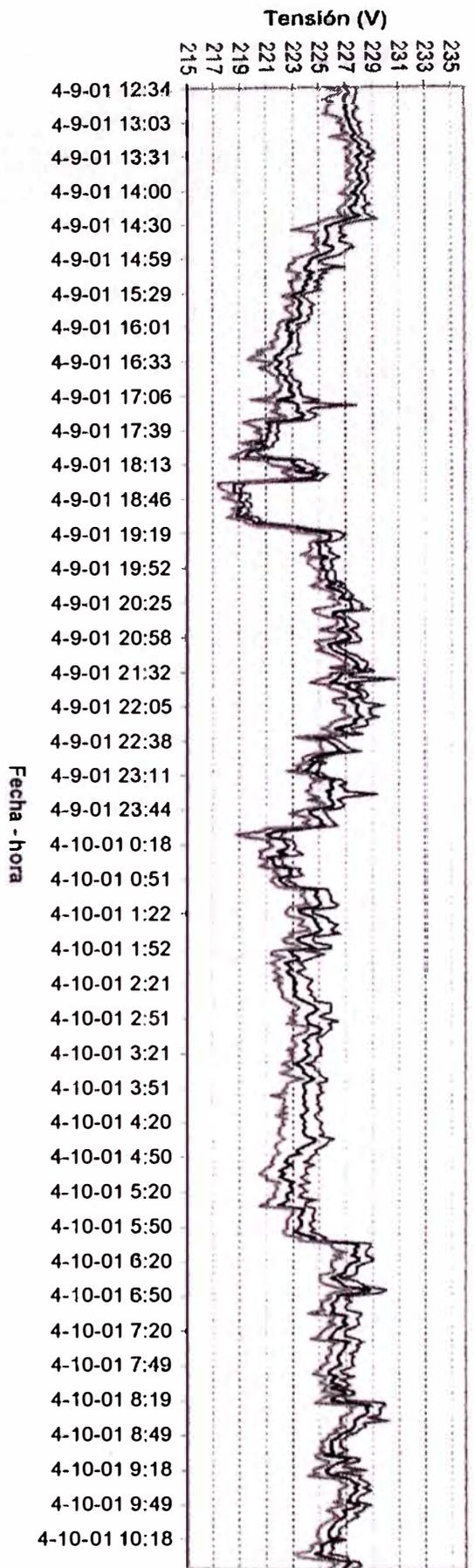
	kW	kVAR
MÁXIMO	117.0	70.0
PROMEDIO	39.1	24.3
MINIMO	0.8	0.7



5 - 6 abril/2001

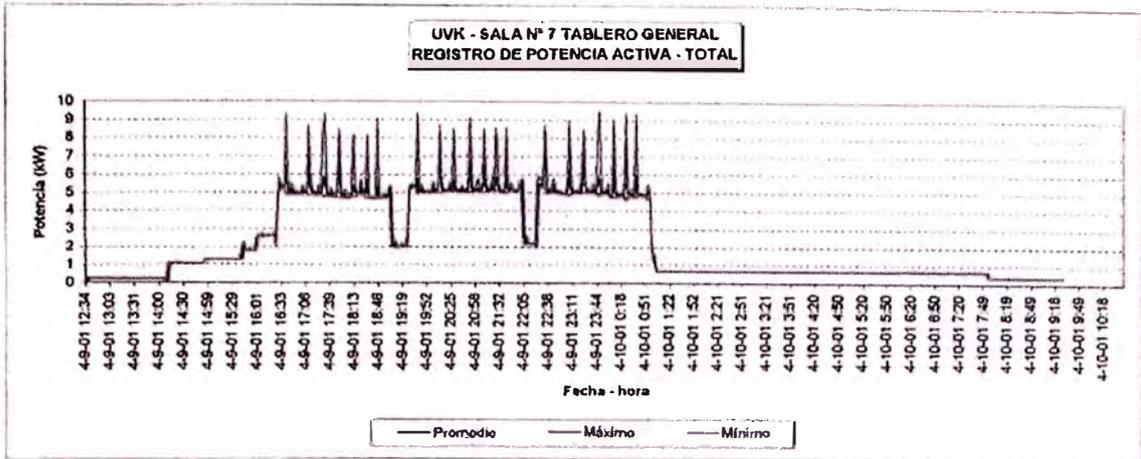
	f.d.p.
MÁXIMO	0.90
PROMEDIO	0.82
MINIMO	0.73

**Anexo 3.- Registros de Potencia Activa, Reactiva, Total y Factor de Potencia Tablero General de Aire Acondicionado (TG 1), Salas Multicine.**

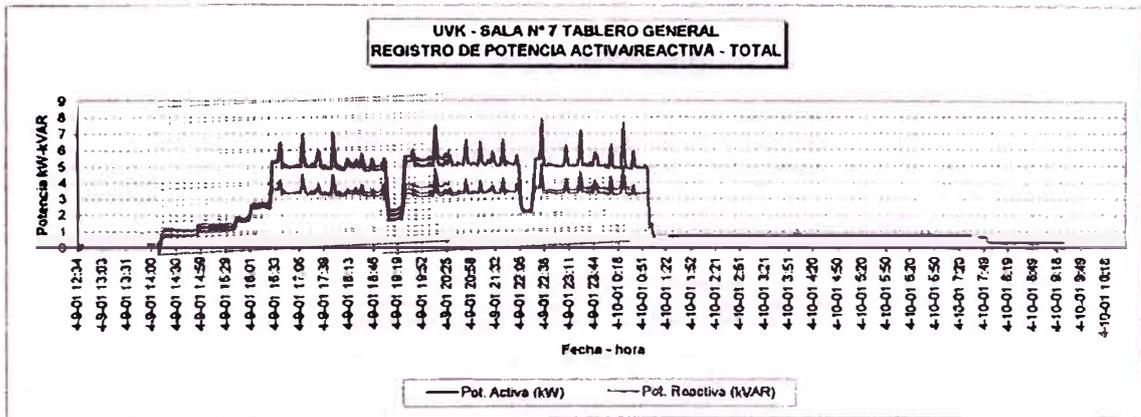


FASE A	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
MAXIMO	228.8	230.7	227.8
PROMEDIO	224.9	225.9	223.8
MINIMO	218.6	219.1	217.4

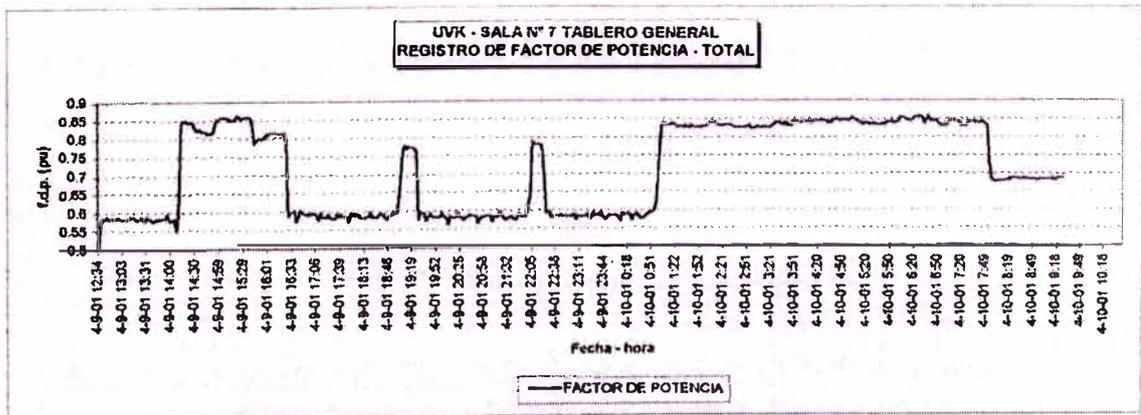
Anexo 4.- Registro de Tensión, Fase A, Tablero General de Distribución Sala7 Salas Multicine (Caso 2)



	PROMEDIO	MÁXIMO	MINIMO
MÁXIMO	7.8	9.4	5.6
PROMEDIO	2.4	2.5	2.2
MINIMO	0.1	0.2	0.1

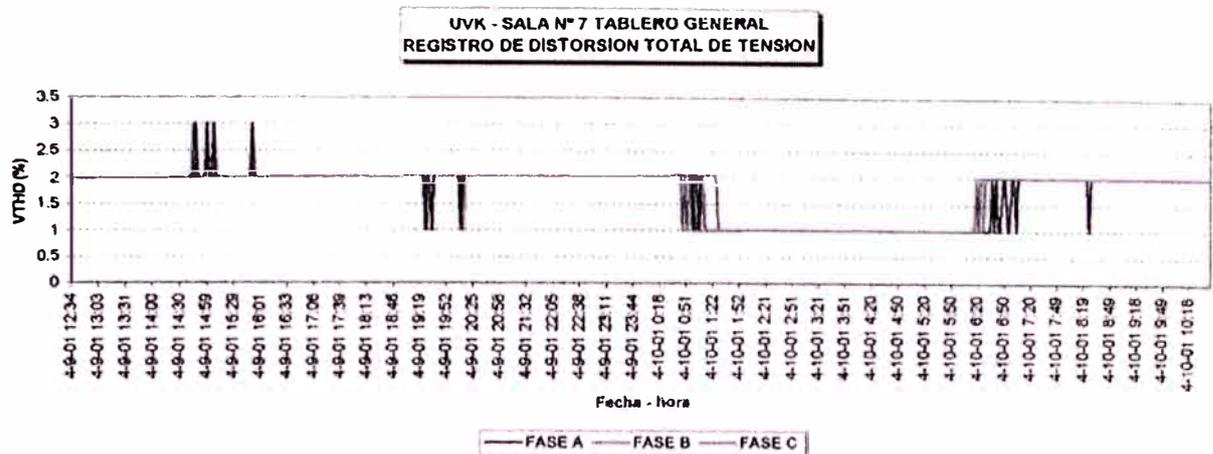


	kW	kVAR
MÁXIMO	9.4	5.1
PROMEDIO	2.5	1.8
MINIMO	0.2	0.1

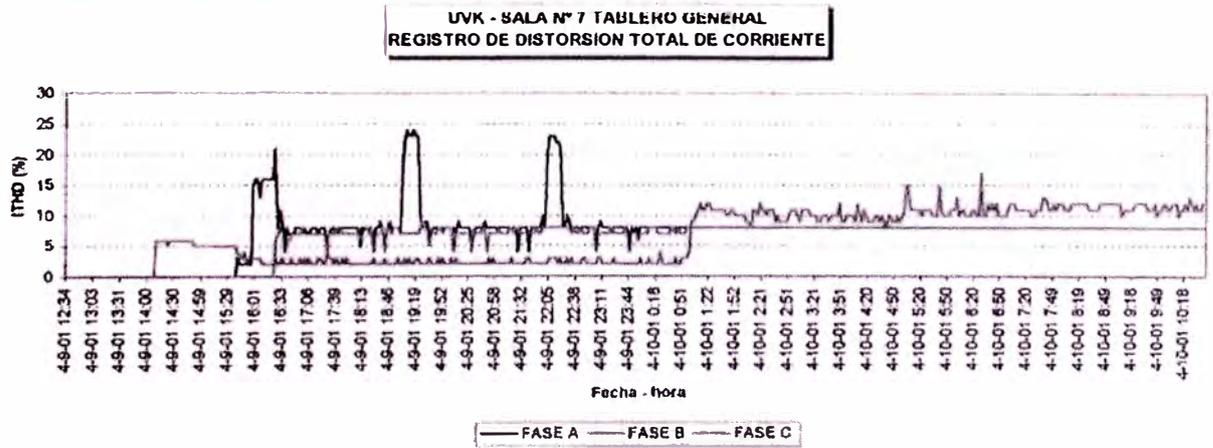


	f.d.p.
MÁXIMO	0.86
PROMEDIO	0.71
MINIMO	0.47

**Anexo 5.- Registros de Potencia Activa, Reactiva, Total y Factor de Potencia Tablero General de Distribución Sala 7, Salas Multicine (Caso 2)**

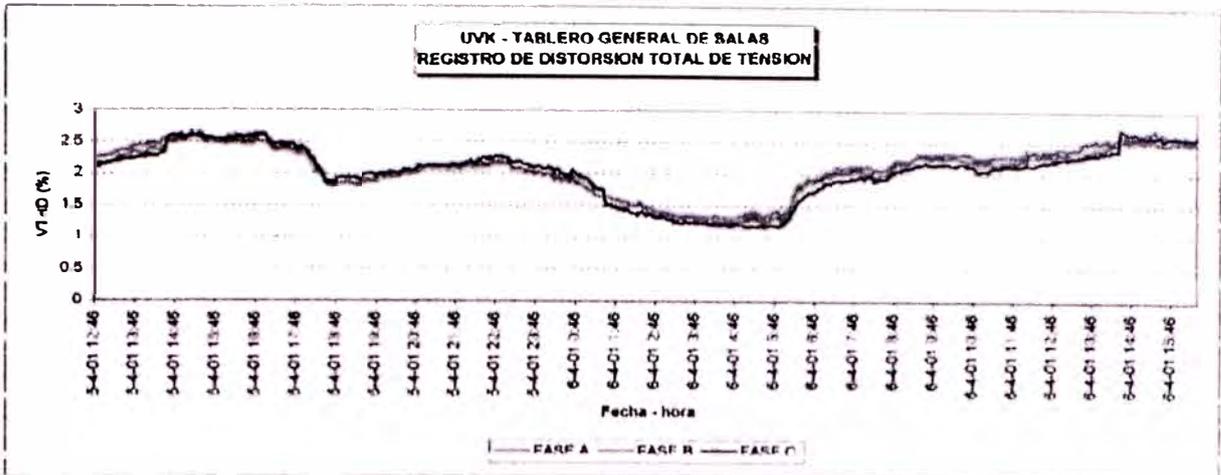


VTHD	FASE A	FASE B	FASE C
<b>MÁXIMO</b>	3.0	2.0	3.0
<b>PROMEDIO</b>	1.7	1.7	1.8
<b>MINIMO</b>	1.0	1.0	1.0

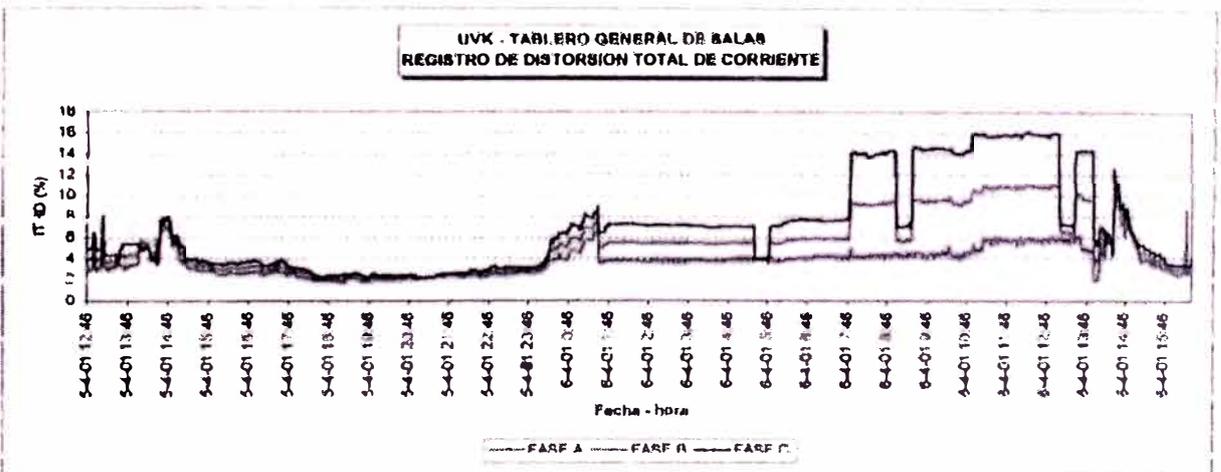


ITHD	FASE A	FASE B	FASE C
<b>MÁXIMO</b>	24.0	17.0	9.0
<b>PROMEDIO</b>	7.3	6.2	6.2
<b>MINIMO</b>	0.0	0.0	0.0

**Anexo 6.- Registros de Distorsión Total de Tensión VTHD y Corriente ITHD Tablero General de Distribución, Sala 7, Salas Multicine (Caso 2).**

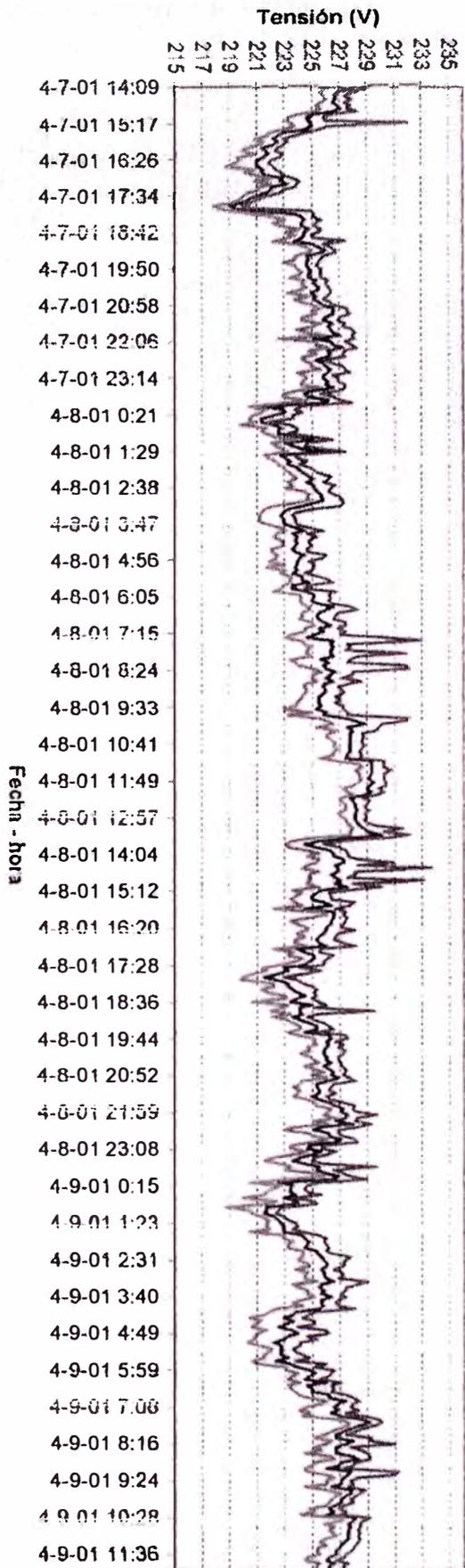


VTHD	FASE A	FASE B	FASE C
PROMEDIO	2.1	2.1	2.0
MÁXIMO	2.7	2.6	2.7



VTHD	FASE A	FASE B	FASE C
PROMEDIO	3.7	5.3	6.9
MÁXIMO	10.3	11.4	16.2

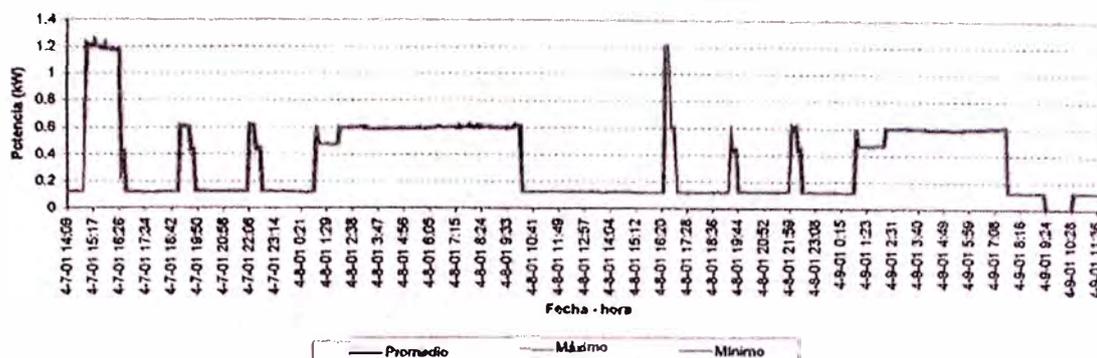
Anexo 7.- Registros de Distorsión Total de Tensión VTHD y Corriente ITHD Tablero General de Alumbrado y Fuerza de Salas (TG2).



FASE A	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
MAXIMO	230.0	233.6	228.6
PROMEDIO	225.4	226.7	223.9
MINIMO	219.1	220.0	217.9

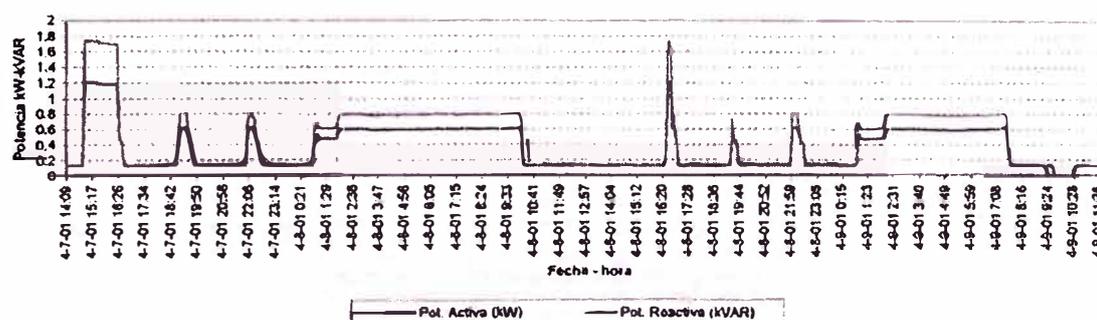
Anexo 8.- Registro de Tensión, Fase A, Tablero de Alumbrado Dimmer de la Sala 7 Salas Multicine (Caso 2).

**UVK - SALA N° 7 TABLERO DE ALUMBRADO DIMMER  
REGISTRO DE POTENCIA ACTIVA - TOTAL**



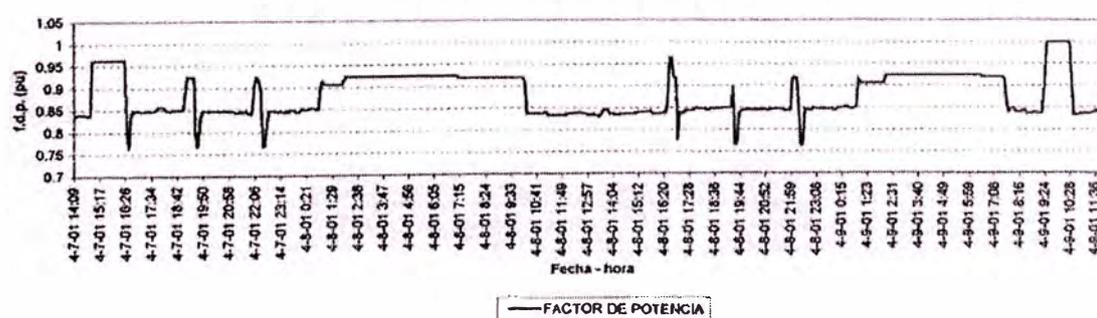
	PROMEDIO	MÁXIMO	MINIMO
MÁXIMO	1.2	1.3	1.2
PROMEDIO	0.3	0.4	0.3
MINIMO	0.0	0.0	0.0

**UVK - SALA N° 7 TABLERO DE ALUMBRADO DIMMER  
REGISTRO DE POTENCIA ACTIVA/REACTIVA - TOTAL**



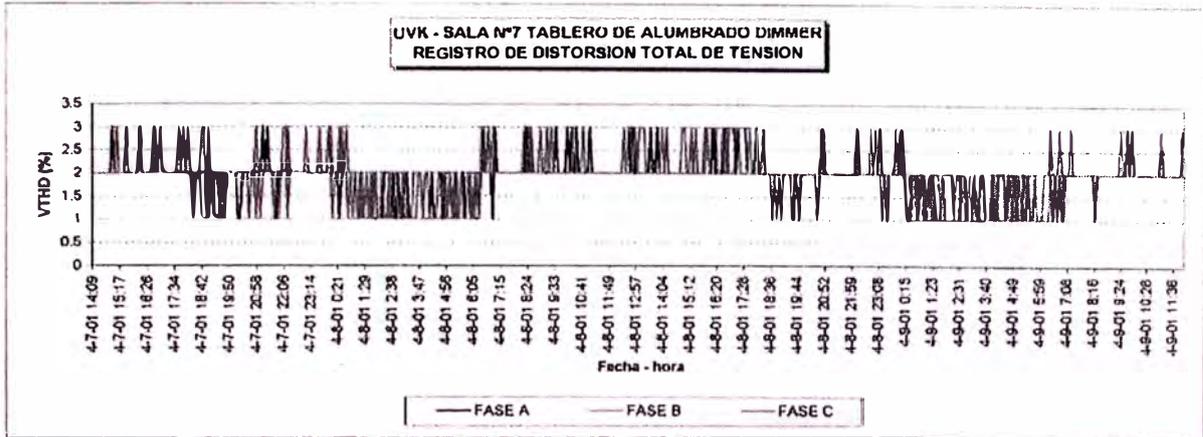
	KW	kVAR
MÁXIMO	1.3	1.7
PROMEDIO	0.4	0.4
MINIMO	0.0	0.0

**UVK - SALA N° 7 TABLERO DE ALUMBRADO DIMMER  
REGISTRO DE FACTOR DE POTENCIA - TOTAL**

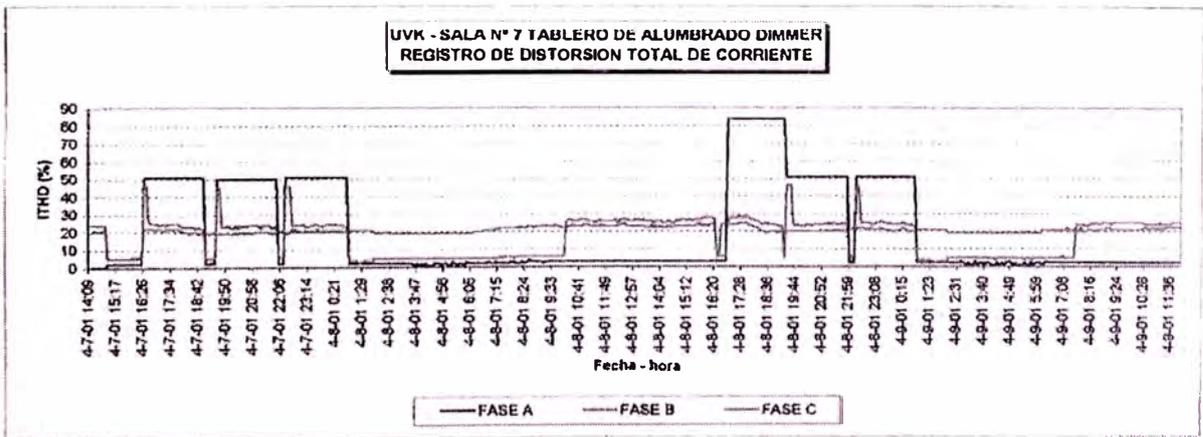


	f.d.p.
MÁXIMO	1.00
PROMEDIO	0.88
MINIMO	0.76

**Anexo 9.- Registros de Potencia Activa, Reactiva, Total y Factor de Potencia  
Tablero de Alumbrado Dimmer de la Sala 7, Salas Multicine(Caso 2).**



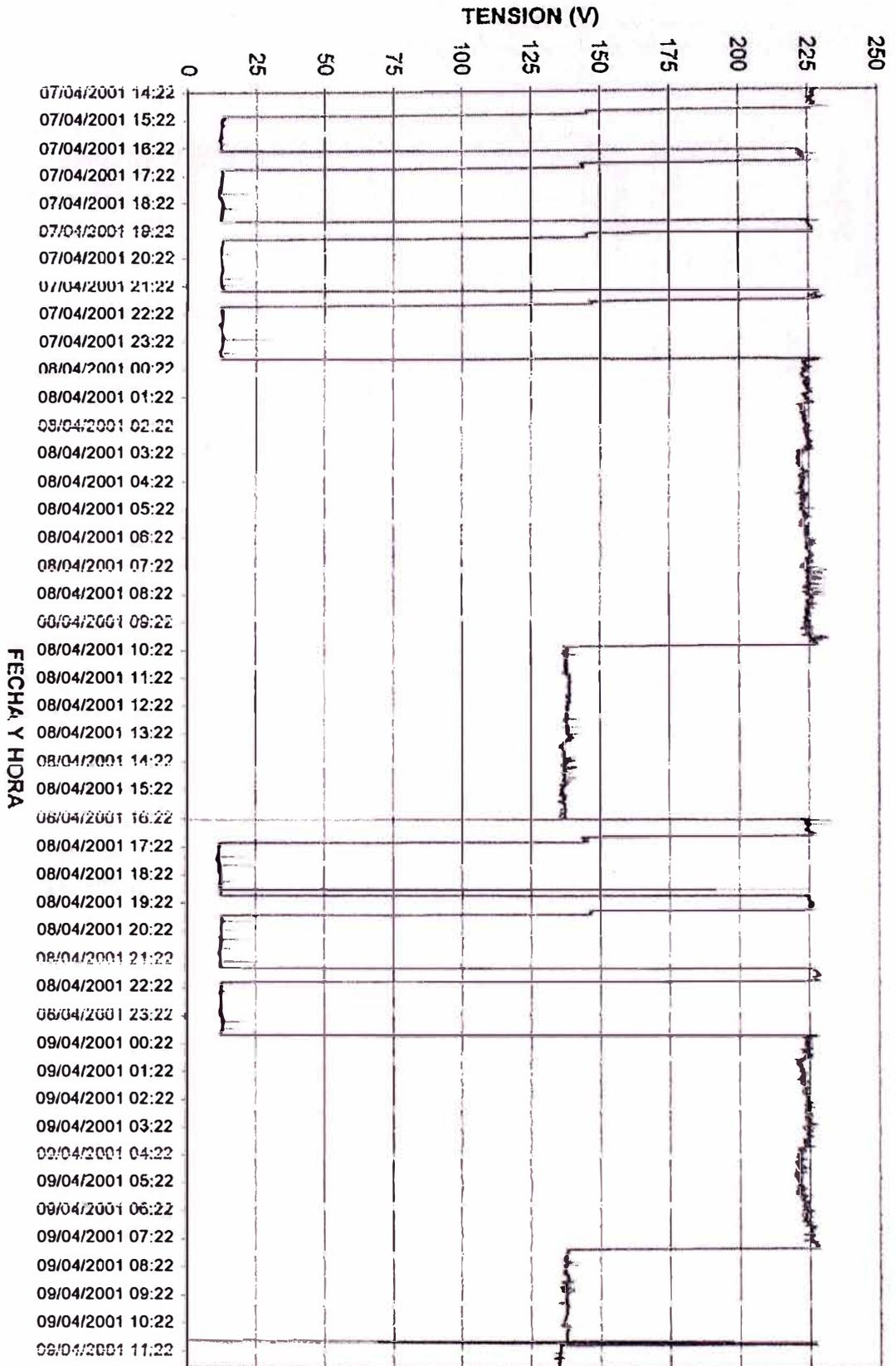
VTHD	FASE A	FASE B	FASE C
<b>MAXIMO</b>	3.0	3.0	3.0
<b>PROMEDIO</b>	1.9	1.9	2.0
<b>MINIMO</b>	1.0	1.0	1.0

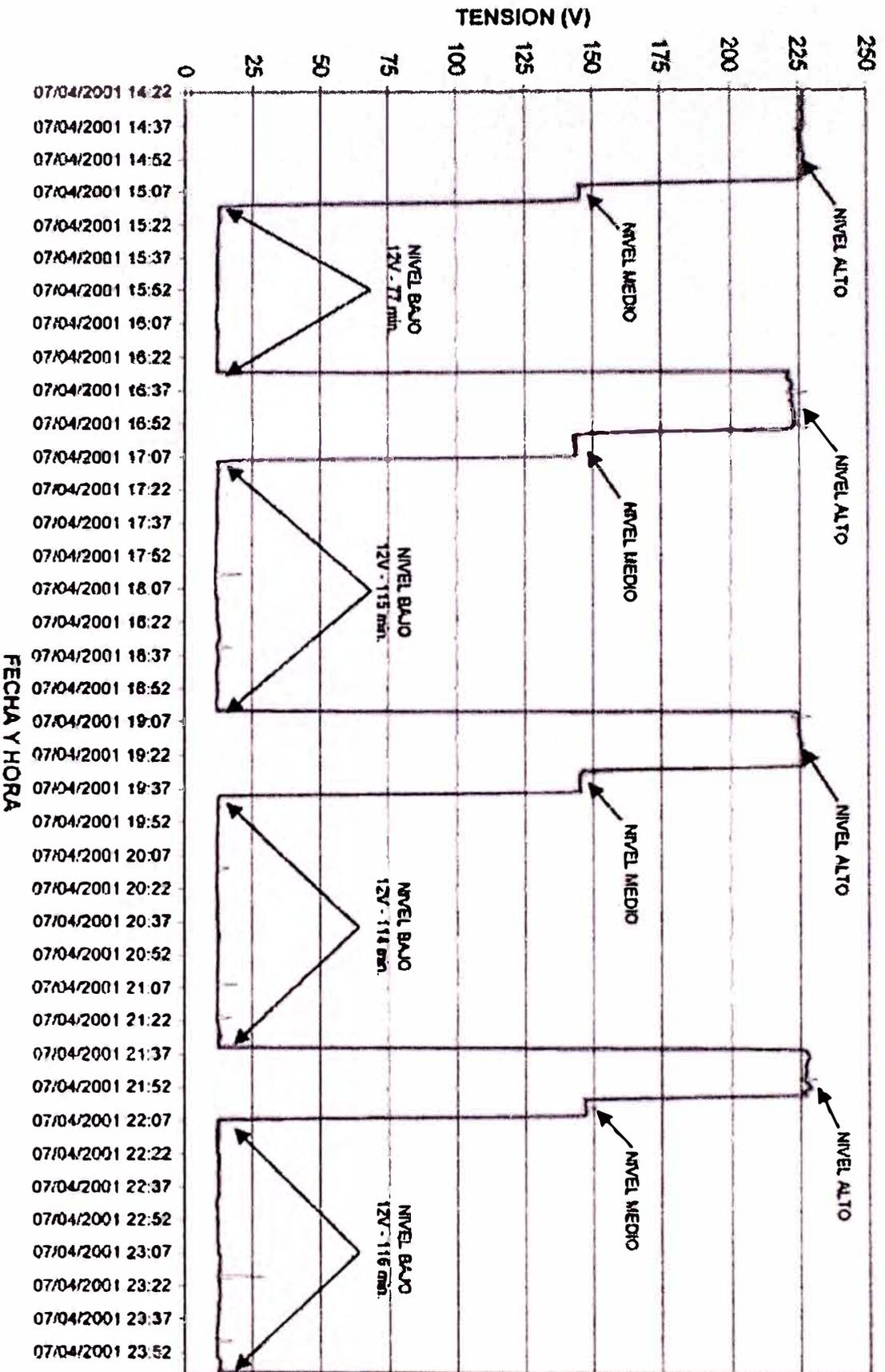


ITHD	FASE A	FASE B	FASE C
<b>MAXIMO</b>	84.0	25.0	47.0
<b>PROMEDIO</b>	20.3	20.4	17.2
<b>MINIMO</b>	0.0	5.0	2.0

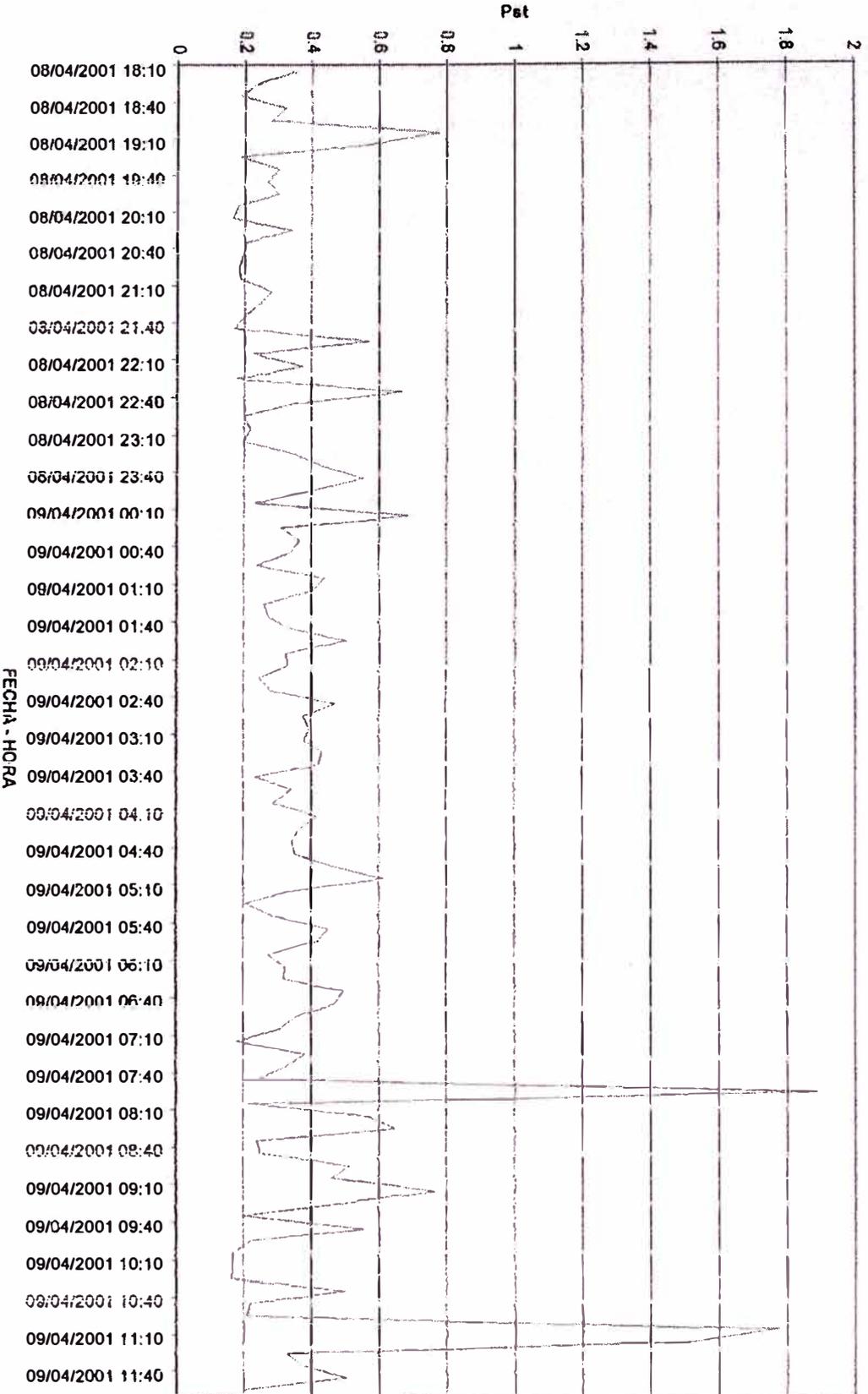
**Anexo 10.- Registros de Distorsión Total de Tensión VTHD y Corriente ITHD  
Tablero de Alumbrado Dimmer de la Sala 7, Salas Multicine (Caso 2).**

Anexo 11.- Registro de Tensiones , Circuito Dimmer (Monofásico) de la Sala 2  
Salas Multicine (Caso2)





Anexo 12.- Registro de Tensiones, Circuito Dimmer Monofásico de la Sala 2 Salas Multicine (Casoz)



Anexo 13.- Registro de Niveles de Flicker, Circuito Dimmer de la Sala 2  
Salas Multicine (Casos2)

## BIBLIOGRAFIA

1. PHILIPS LIGHTING. **Lighting Manual**. 5ta. ed. Holanda: Philips lighting B.V.1993. 467p.
2. FINK, Donald G. y H. Wayne Beaty. **Manual de Ingeniería Eléctrica**. 13ra. ed. Colombia: Mc Graw Hill. 1997, 28 s.
3. IEEE Task Force, **“The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads,”** IEEE Trans. Power Delivery, Vol 8, N° 2, April 1993, pp 672 – 680.
4. ARSENEAU, R y M. Ouellette, **“The Effects of Supply Harmonics on the Performance of Compact Florescent lamps,”** IEEE Trans. Power Delivery, Vol 8, N° 2, April 1993, pp 473 – 479.
5. TOPALIS, F.V., **“Efficiency of Energy Saving Lamps and Harmonic Distortion in Distribution Systems,”** IEEE Trans. Power Delivery, Vol 8, N° 4, October 1993, pp 2038 – 2042.
6. REID, W. Edward, **“Power Quality Issues – Standards and Guidelines,”** IEEE Trans. Industry Applications, Vol 32, N° 3, May/June 1996, pp 625 – 632.