

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

En este primer capítulo se presenta una introducción general de la tecnología electrónica aplicada a la iluminación. Además se plantean los principales problemas surgidos de la aplicación de estos métodos de alimentación a las fuentes de luz actualmente existentes en el mercado. Tras presentar los aspectos físicos de la producción de luz, se realiza un breve repaso a temas de iluminación, así como a los principales tipos de lámparas existentes. Se presta especial atención a las lámparas de halogenuros metálicos y de sodio a alta presión, que, debido a sus peculiaridades, presentan mayores problemas de estabilidad ante resonancias acústicas

Índice del Capítulo

1.1	INTRODUCCIÓN	1-4
1.2	CONCEPTOS BÁSICOS DE ILUMINACIÓN	1-6
1.2.1	MAGNITUDES Y PRINCIPIOS FÍSICOS.....	1-6
1.2.1.1	Magnitudes y Unidades de Radiación.....	1-6
1.2.1.2	Magnitudes y Unidades en Iluminación	1-7
1.2.1.3	Otros Parámetros	1-9
1.3	CONCEPTOS BÁSICOS DE LÁMPARAS	1-11
1.3.1	PRINCIPIOS FÍSICOS.....	1-11
1.3.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LÁMPARAS.....	1-12
1.3.3	LA DESCARGA EN GASES.....	1-13
1.3.3.1	Generación de Calor	1-13
1.3.3.2	Excitación de Átomos del Gas y Moléculas	1-13
1.3.4	LIMITACIÓN DE CORRIENTE DE DESCARGA.....	1-14
1.3.5	ARRANQUE DE LA DESCARGA	1-15
1.3.6	LUZ EMITIDA EN LA DESCARGA.....	1-15
1.4	LÁMPARAS DE DESCARGA	1-16
1.4.1	LA DESCARGA A BAJA PRESIÓN	1-16
1.4.1.1	Lámparas de Vapor de Sodio a Baja Presión.	1-16
1.4.1.2	Tubos Fluorescentes.....	1-17

1.4.2	DESCARGA A ALTA PRESIÓN	1-18
1.4.2.1	Lámparas de Vapor de Mercurio a Alta Presión	1-18
1.4.2.2	Lámparas de Halogenuros Metálicos	1-19
1.4.2.3	Lámparas de Vapor de Sodio a Alta Presión	1-21
1.4.3	BALANCE DE POTENCIA EN LÁMPARAS DE DESCARGA.....	1-22
1.5	REFERENCIAS	1-24

1.1 INTRODUCCIÓN

La aplicación de los circuitos electrónicos en la alimentación de lámparas de descarga es relativamente reciente (basta examinar las fechas de algunas de las referencias bibliográficas más relevantes, [4], [9], [12], [19], [5]), aportando numerosas mejoras frente a la solución convencional de reactancia electromagnética y cebador. Una de las principales ventajas que presentan los circuitos basados en tecnología electrónica, es la reducción en tamaño y peso del equipo. Esta ventaja es análoga a la que ya presentaban las fuentes de alimentación conmutadas frente a las convencionales, basadas en transformadores a frecuencia de red. La razón de esta disminución de tamaño y peso, se basa en que estos equipos trabajan a una frecuencia muy superior a la de la red (unas 1000 veces superior), por lo que se minimiza el valor de los elementos reactivos y, por tanto, su tamaño y peso. Del mismo modo fue posible la alimentación electrónica de lámparas de descarga a alta frecuencia.

Al realizar los primeros ensayos de alimentación a alta frecuencia en tubos fluorescentes, se observó un efecto favorable adicional. Manteniendo constante la potencia eléctrica suministrada a la lámpara y subiendo la frecuencia de trabajo, el flujo luminoso emitido por la lámpara aumenta. Posteriormente se constató que dicho aumento tenía un límite en torno a los 25 Khz. A frecuencias superiores, el rendimiento luminoso no se incrementa más. El flujo luminoso conseguido es aproximadamente de un 10% a un 20% mayor (dependiendo de la potencia y tipo de lámpara), que el obtenido trabajando a frecuencia de red, en torno a 50-60 hz. ([4], [9], [12]).

Aparte de la reducción en volumen y peso, y del mayor rendimiento luminoso de la lámpara, el empleo de balastos electrónicos presenta otras ventajas. Por ejemplo, se introduce la posibilidad de controlar la luz emitida por la lámpara ("dimming"). Este tipo de control permite adaptar el nivel de iluminación en función de parámetros externos.

Otra ventaja es la mejor regulación de la potencia eléctrica frente a variaciones de la tensión de entrada, de la temperatura ambiente, etc.

Cabe destacar el aumento en la vida útil de la lámpara, debido principalmente a que los picos de tensión de reencendido a frecuencia de red, típicos en lámparas de descarga, no se dan a alta frecuencia. Esto provoca menos esfuerzos en la lámpara [7]; además de lograr que ésta trabaje siempre en su punto óptimo de funcionamiento. Otro aspecto que permite prolongar la vida útil de la lámpara es el mayor control del que se dispone durante los instantes de arranque. El encendido de la lámpara fluorescente se realiza de forma controlada y es prácticamente instantáneo, en contraste con los destellos erráticos que producen los balastos electromagnéticos convencionales y que se pueden prolongar durante varios segundos. Además el efecto estroboscópico (parpadeo

a frecuencia doble de red debido a los picos de reencendido) es imperceptible a alta frecuencia.

Existen en la actualidad numerosos aspectos relacionados con la alimentación electrónica de lámparas de descarga en fase de estudio:

- ❑ Estabilización de la lámpara en régimen permanente: Funcionamiento a potencia nominal independientemente de las variaciones de la tensión de entrada, de la temperatura o de la tensión de la lámpara debido al propio envejecimiento [2].
- ❑ Control de la intensidad luminosa de la lámpara ("dimming") [10], .
- ❑ Funcionamiento en alta frecuencia. Búsqueda de una frecuencia de funcionamiento óptima donde el rendimiento luminoso presente un máximo.
- ❑ Optimización del proceso de arranque, que determina en mayor medida la vida útil de la lámpara, [4], [9], [12], [20].
- ❑ Variación del rendimiento luminoso y del rendimiento de color en función de la forma de onda de alimentación [16], [11], [3].
- ❑ Planteamiento de topologías de potencia. Posible integración de circuitos de mando, [1].
- ❑ Disminución de efectos nocivos tales como el efecto estroboscópico o el ruido acústico en los equipos de alimentación.
- ❑ Obtención de un factor de potencia adecuado.
- ❑ Eliminación de resonancias acústicas [22], [13], [21], [18], [15], [14].

1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE ILUMINACIÓN

Para realizar un diseño eficaz de balastos electrónicos, debe conocerse a fondo el comportamiento de la lámpara objeto del mismo. Se realiza a continuación un estudio de las lámparas de descarga, analizándose especialmente el comportamiento eléctrico de las mismas.

1.2.1 Magnitudes y Principios Físicos.

Las magnitudes teóricas y prácticas necesarias para definir una fuente de luz, tienen por objeto comparar cuantitativamente distintos tipos de lámparas. De esta forma pueden definirse las principales magnitudes utilizadas en radiación, en iluminación y en otros conceptos prácticos de las lámparas.

La radiación estudia la propagación de energía radiante en el espacio de una manera puramente física. La iluminación estudia esta misma radiación pero desde el punto de vista del efecto que produce en el ojo humano. Se relacionan en los puntos siguientes las magnitudes más importantes tanto de radiación como de iluminación.

En la figura 1.1 pueden observarse las diferentes transformaciones de la energía introducida en un sistema de iluminación hasta llegar a la luz emitida tal y como la percibe el ojo humano.

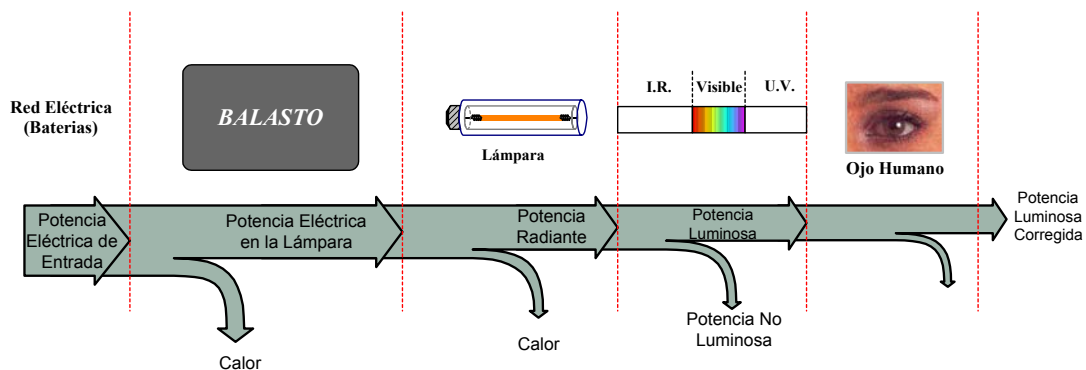


Figura 1.1. Transformaciones energéticas en un sistema de iluminación.

1.2.1.1 Magnitudes y Unidades de Radiación

- ❑ **Potencia radiante (flujo radiante):** Se denota mediante el símbolo F_r . Representa la potencia de la radiación electromagnética. Se mide en vatios (W).
- ❑ **Potencia radiante espectral (flujo radiante espectral):** Denotado por $F_{r\lambda}$, simboliza la potencia radiante por unidad de longitud de onda (W/m en el SI,

aunque en la práctica suele expresarse en W/nm). Así, la potencia radiante corresponde a la integración de esta $F_{r\lambda}$ en todo el espectro electromagnético:

$$F_r = \int F_{r\lambda} \cdot d\lambda \quad \text{ec. (1.1)}$$

- **Eficacia radiante:** Se denota por n_r . Es la relación entre la potencia radiante emitida y la potencia total absorbida por la fuente de luz. Es adimensional.

$$n_r = \frac{F_r}{P} \quad \text{ec. (1.2)}$$

- **Intensidad radiante:** Representado mediante I_r , simboliza la potencia radiante emitida en una dirección determinada, y se define como potencia radiante emitida en el ángulo sólido que contiene dicha dirección. Tiene unidades de potencia por unidad de ángulo sólido (W/sr en el S.I.).

$$I_r = \frac{F_r}{\Omega} \quad \text{ec. (1.3)}$$

- **Irradiancia:** La notación de esta magnitud es E_r . Se trata de la potencia radiante recibida por unidad de superficie, y sus unidades son de potencia por unidad de superficie (W / m²).

$$E_r = \frac{F_r}{S} \quad \text{ec. (1.4)}$$

- **Radiancia:** Denotada por L_r , es la relación entre la potencia radiante de un emisor, en una dirección determinada, y la superficie del emisor proyectada en dicha dirección. Las unidades son de potencia por unidad de longitud y de ángulo sólido (W/sr·m²). Puede representarse como:

$$L_r = \frac{I_r}{S \cdot \cos(\alpha)} \quad \text{ec. (1.5)}$$

1.2.1.2 Magnitudes y Unidades en Iluminación

- **Potencia luminosa (flujo luminoso):** Denotado por F , se trata de la potencia radiante emitida dentro del espectro visible, corregida mediante la curva de sensibilidad visual del ojo humano, $V(\lambda)$.

$$F = 683 \cdot \int F_{r\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{ec. (1.6)}$$

La unidad es el lumen (lm), que se define como la potencia luminosa producida por una potencia radiante de 1/683 W a $\lambda=555$ nm (longitud de onda de la máxima sensibilidad del ojo humano).

- *Eficacia luminosa de la radiación*: Se representa mediante K , e indica la relación entre la potencia luminosa y la potencia radiante:

$$K = \frac{F}{F_r} \quad \text{ec. (1.7)}$$

Se expresa en lm/W.

- *Rendimiento luminoso o eficacia luminosa de la fuente de luz*: Simbolizada por n , es la relación entre la potencia luminosa y la potencia absorbida por la fuente:

$$n = \frac{F}{P} \quad \text{ec. (1.8)}$$

Tiene también unidades de lm/W, pero no debe confundirse con la eficacia luminosa de la radiación.

- *Intensidad luminosa*: Representada por I , la intensidad luminosa en una dirección es la potencia luminosa emitida en el ángulo sólido que contiene dicha dirección:

$$I = \frac{F}{\Omega} \quad \text{ec. (1.9)}$$

La unidad es la candela (cd). En el sistema internacional se define la candela como la intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de 555 nm en el aire, cuya potencia es de 1/683 W.

- *Iluminancia*: Se simboliza mediante E , y representa la potencia luminosa por unidad de superficie,

$$E = \frac{F}{S} \quad \text{ec. (1.10)}$$

Se mide en lux.

- *Luminancia*: Denotada por L , es la potencia luminosa emitida en una dirección por unidad de superficie proyectada en esa dirección:

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos(\alpha)} \quad \text{ec. (1.11)}$$

Tiene unidades de cd / m².

Se presenta, a modo de resumen, la tabla 1.1:

Magnitud	Símbolo	Unidad	Relaciones
Potencia Radiante (Flujo Radiante)	F_r	W	$F_r = \int F_{r\lambda} \cdot d\lambda$
Potencia Radiante Espectral (Flujo Radiante Espectral)	$F_{r\lambda}$	W/m	
Eficacia Radiante	N_r	-	$n_r = \frac{F_r}{P}$
Intensidad Radiante	I_i	W/sr	$I_r = \frac{F_r}{\Omega}$
Irradiancia	E_r	W/m ²	$E_r = \frac{F_r}{S}$
Radiancia	L_r	W/sr·m ²	$L_r = \frac{I_r}{S \cdot \cos(\alpha)}$
Potencia Luminosa (Flujo luminoso)	F	lm	$F = 683 \cdot \int \lambda \cdot F_{r\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$
Eficacia Luminosa de la Radiación	K	Lm/W	$K = \frac{F}{F_r}$
Rendimiento Luminoso	N	Lm/W	$n = \frac{F}{P}$
Intensidad Luminosa	I	cd	$I = \frac{F}{\Omega}$
Iluminancia	E	Lx	$E = \frac{F}{S}$
Luminancia	L	Cd/m ²	$L = \frac{I}{S \cdot \cos(\alpha)}$

Tabla 1.1; Principales magnitudes físicas utilizadas en radiación e iluminación.

1.2.1.3 Otros Parámetros

Existen otros parámetros técnicos relacionados con propiedades y características prácticas de las lámparas. De entre estos, los más utilizados son los que se describen a continuación:

- **Rendimiento eléctrico del balasto:** η_e ; Es la potencia que absorbe la lámpara (P) a partir de la potencia de entrada tomada de la red (P_E). Es adimensional. La diferencia entre ambas potencias son las pérdidas en el balasto.

La **vida** o duración de una lámpara indica el tiempo, en horas de funcionamiento, durante el cual una fuente es útil. A este efecto pueden definirse dos conceptos distintos:

- ❑ *Vida media*: Número de horas de funcionamiento en el que dejan de funcionar el 50% de las fuentes de luz de un lote.
- ❑ *Vida útil*: Tiempo transcurrido hasta que una fuente deja de satisfacer todos los requerimientos (aunque siga funcionando).

En cuanto al **color**, se tienen los siguientes parámetros:

- ❑ *Apariencia de color*: El color que presenta la fuente.
- ❑ *Reproducción cromática*: Cómo son reproducidos los colores de los objetos iluminados por determinada fuente. Dependen del espectro de la luz emitida, pero son independientes entre sí.
- ❑ *Temperatura de color*: Existe una relación entre la temperatura de un objeto y la apariencia de color que presenta (termorradiación). Se determina por comparación con un patrón.
- ❑ *Índice de rendimiento de color (IRC)*. Caracteriza la capacidad de reproducción cromática de los objetos iluminados con una fuente de luz.

1.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE LÁMPARAS

Las lámparas de alta intensidad de descarga son, de entre todas las fuentes de luz artificial, las más utilizadas en aplicaciones de iluminación industrial y de exteriores, alumbrado público, espectáculos deportivos, aeropuertos y puertos marítimos, etc. Combinan una alta potencia de luz emitida con un buen rendimiento. Más aún, la tendencia actual de utilización de este tipo de lámparas es la del empleo de las mismas en aplicaciones de menor potencia con alta exigencia en cuanto a calidad de la luz emitida (alumbrado de escaparates, comercios, restaurantes, etc.).

En el presente punto, se realiza un breve estudio de las lámparas de descarga en general, analizándose especialmente el comportamiento eléctrico de las mismas.

1.3.1 Principios Físicos.

Se considera la luz como una emisión de radiación electromagnética en el espectro visible (esto es, con longitudes de onda de entre los 400 y los 700 nm), debida, principalmente, a emisión de radiación electromagnética por los electrones de los átomos cuando éstos pasan a niveles inferiores de energía.

En cuanto a las formas en que esto ocurre, destacan la termorradiación y la luminiscencia.

La termorradiación es una radiación que depende exclusivamente de la temperatura del material. La parte de la radiación emitida dentro del espectro visible es la incandescencia. Presenta un espectro de emisión continuo. Al aumentar la temperatura, el movimiento de los átomos aumenta, así como los posibles niveles de energía, aumentando por tanto el número de diferentes longitudes de onda a la que se emitirá la radiación. Por otra parte, al aumentar la temperatura, aumenta la energía radiada. Si aumenta la temperatura, disminuye la longitud de onda, para ser una radiación más energética. Se acerca al espectro visible. El valor máximo de rendimiento visible se tiene alrededor de 4300 K, muy por encima del punto de fusión de los materiales empleados comúnmente en la realización de lámparas incandescentes.

Por otra parte se tiene la luminiscencia, que depende esencialmente de la estructura atómica, y no sólo de la temperatura. Es la emisión de radiación electromagnética visible. La intensidad en determinadas longitudes de onda es superior a la que se produciría únicamente por termorradiación a la misma temperatura. Se trata, por tanto, de un espectro discreto. Existe un agente exterior que excita los átomos del cuerpo. Dependiendo de éste agente excitador, se tiene:

- ❑ *Electroluminiscencia*; producida por la acción de un campo eléctrico en el seno de un gas o un sólido (descarga a través de gases, diodos LED);
- ❑ *Catodoluminiscencia* (aparato de TV);
- ❑ *Fluorescencia o fotoluminiscencia*; por acción de otras radiaciones de longitud de onda no visible (conversión de radiación ultravioleta en radiación visible en los tubos fluorescentes);
- ❑ *Fosforescencia* (fotoluminiscencia retardada).

1.3.2 Descripción General de Lámparas

Según la forma en la que una lámpara emite luz, se diferencian los tipos de lámparas que existen actualmente:

Las lámparas de incandescencia generan luz a partir del fenómeno de termorradiación. Funcionan por caldeo de un filamento metálico, que emite luz en función de su temperatura. La principal ventaja es que la alimentación se logra conectando las lámparas directamente a la red eléctrica. El principal inconveniente es debido a las altas temperaturas a las que el filamento debe trabajar. Ello hace que la vida útil de estas lámparas sea bastante pequeña en comparación con otro tipo de lámparas.

El segundo tipo fundamental de lámparas son las lámparas de intensidad de descarga. El funcionamiento básico consiste en establecer una descarga eléctrica en el seno de un gas. Al excitarse los átomos del gas, se logra la emisión de radiación electromagnética parte de la cual es visible (o puede convertirse en visible). Presentan una característica de resistencia negativa (al aumentar la corriente disminuye la tensión).

Si bien a frecuencias de red la relación entre la tensión en bornes y la corriente por la lámpara es de impedancia positiva, ante variaciones más lentas (del orden de hertzios) se observa un comportamiento de resistencia negativa, hecho que tiene una importancia capital a la hora de estudiar la estabilidad sistema-balasto.

Además, para lograr que la descarga comience, es necesario un valor inicial de tensión en bornes muy elevado, lo que implica el uso de arrancadores externos.

Las lámparas de descarga de vapor de mercurio a baja presión (tubos fluorescentes), son lámparas de fotoluminiscencia. La radiación electromagnética no visible (ultravioleta) excita determinados compuestos de flúor presentes en la pared del tubo de la lámpara que emite radiación visible. Las lámparas de vapor de mercurio de

alta presión, así como las de vapor de sodio, halogenuros metálicos y luz mezcla, entran dentro de la electroluminiscencia.

1.3.3 La Descarga en Gases

La parte más importante de una lámpara de descarga es, obviamente, la descarga en el seno del gas. Aquí es donde la energía eléctrica se transforma en radiación electromagnética, una gran parte de la cual se tiene a longitudes de onda visibles.

La descarga a través del gas tiene lugar en un tubo de descarga. Es un tubo de material transparente o traslúcido con los electrodos sellados herméticamente, relleno con un gas inerte y vapor de metal. Los electrones emitidos por los electrodos se aceleran debido al campo eléctrico existente. Los electrones pueden sufrir choques elásticos o inelásticos con los átomos o moléculas del gas. Los primeros llevan a la generación de calor (se incrementa la temperatura de los átomos del gas), mientras que los segundos pueden llevar a la ionización o a la excitación de dichos átomos. Los átomos excitados pueden generar radiación electromagnética. La concentración de electrones en el gas se incrementa mediante la ionización. La velocidad de los electrones en la descarga varía con el camino libre medio de estas partículas. Este camino libre depende, entre otros factores, de la densidad del gas y de la magnitud del campo eléctrico en la descarga. Por tanto se tienen los tres procesos esenciales en la descarga a través de gases:

- ❑ Generación de calor
- ❑ Excitación de átomos y moléculas del gas
- ❑ Ionización de átomos del gas

1.3.3.1 Generación de Calor

En caso de colisiones elásticas entre un electrón y un átomo de gas, solo una pequeña parte de la baja energía cinética del electrón se transfiere al átomo del gas, debido a la ley para colisiones entre masas muy diferentes. Al haber un número bastante elevado de estas colisiones, tiene lugar una considerable transferencia de energía, que se manifiesta en un aumento de la temperatura.

1.3.3.2 Excitación de Átomos del Gas y Moléculas

La velocidad de un electrón que colisiona con un átomo puede ser tan elevada que afecte a uno de los electrones pertenecientes al átomo en una de las órbitas más alejadas del núcleo. Este electrón absorbe la mayoría de la energía del electrón libre y,

por lo tanto, se mueve a un nivel energético mayor. La fuerte atracción de la carga del núcleo, sin embargo, pronto atrae de nuevo al electrón a su estado original, posiblemente a través de órbitas intermedias, y esta energía absorbida en la colisión se libera en forma de radiación electromagnética. Puesto que los electrones sólo pueden moverse en unas órbitas determinadas discretas, la radiación emitida consiste en líneas espectrales discretas. La transición de un electrón atómico de un nivel superior al nivel normal de equilibrio, en forma de radiación electromagnética, normalmente conlleva un tiempo muy corto (10^{-8} s). Existen también niveles energéticos desde los cuales pasar a un nivel energético inferior no es posible. En tal caso el electrón debe en primer lugar ser puesto nuevamente en un nivel energético superior mediante una colisión con otro electrón. A partir de ese nuevo nivel de energía sí es posible volver al nivel original, si bien normalmente ello se consigue a través de diferentes estados intermedios. Como este proceso requiere tiempos extra, se habla de niveles meta-estables en este caso. Estos niveles meta-estables son de gran importancia para el funcionamiento de lámparas de descarga a baja presión.

1.3.3.2.1 Ionización de los Átomos del Gas

Si el electrón libre tiene una energía cinética tal que es capaz de disociar completamente un electrón de su átomo, queda entonces un ión con carga neta positiva. Este electrón libre comienza a moverse según el campo eléctrico. Por tanto un nuevo electrón participa de los procesos vistos anteriormente. El proceso puede repetirse muchas veces, dependiendo de la energía cinética de los electrones. La ionización de los átomos o moléculas es necesaria para lograr una corriente eléctrica en la descarga.

1.3.4 Limitación de Corriente de Descarga

El número creciente de electrones libres puede degenerar en una ionización continua, que a su vez lleva rápidamente a una corriente ilimitada a través de la descarga, es decir, a un cortocircuito.

Para prevenir este efecto, se incluye una impedancia en el circuito (normalmente un balasto inductivo), que limita la corriente. El valor de esta impedancia y la tensión aplicada determina la magnitud de la corriente en el tubo de descarga.

La diferencia de potencial entre los dos electrodos del tubo depende en primer lugar del gas de relleno y de su presión de vapor. Esta presión es función de la potencia nominal de la lámpara, que está directamente relacionada con la corriente y la tensión en el tubo y con las dimensiones del tubo. Este es un principio importante,

puesto que, como se verá más adelante, la presión de vapor determina la calidad de la luz emitida por la lámpara. La elección de la corriente y del balasto que limite esta corriente en un estrecho margen de valores es esencial para un buen funcionamiento de la lámpara.

1.3.5 Arranque de la descarga

Si una tensión, como por ejemplo, la de red, se aplica entre los dos electrodos de un tubo de descarga, no va a ocurrir nada en la mayoría de lámparas de descarga, puesto que la mayoría de los gases y vapores son buenos aislantes. La descarga eléctrica sólo es posible si el número de partículas cargadas permanece a un nivel lo suficientemente alto y constante como para que la corriente pueda fluir a través del gas. El arranque es, por tanto, un requisito previo para la generación de una descarga en gases.

Por ello el proceso de arranque es objeto de un estudio intensivo. El mecanismo concreto de arranque es menos interesante. Lo que de verdad interesa a la hora de diseñar balastos es la influencia de la geometría y el tipo de lámpara a la hora de lograr el arranque, así como qué condiciones aseguran un arranque fiable.

En el capítulo 8 se presta especial atención al problema del arranque de lámparas de descarga, presentándose además un nuevo tipo de arrancadores electrónicos para este tipo de lámparas.

1.3.6 Luz Emitida en la Descarga

El principal interés de las lámparas de descarga es, por supuesto, la luz emitida en la descarga. Esta luz puede ser radiación electromagnética directamente visible. Puede ser también derivada de la radiación emitida en la zona ultravioleta del espectro, transformada en radiación visible mediante materiales fluorescentes en la pared interna del tubo, denominados fósforos.

La composición de esta radiación electromagnética depende del gas de relleno del tubo, que consiste normalmente en uno o más metales en fase vapor además de un gas auxiliar.

Existen dos tipos de descargas bajo este punto de vista:

- ❑ Lámparas de descarga de baja presión
- ❑ Lámparas de descarga de alta presión

1.4 LÁMPARAS DE DESCARGA

En función del tipo de descarga y del elemento emisor de luz pueden clasificarse las lámparas de descarga existentes en la actualidad.

1.4.1 La Descarga a Baja Presión

Las descargas a baja presión emiten una porción relativamente alta de la energía eléctrica convertida en líneas espectrales de bajos niveles de excitación, las denominadas líneas de resonancia. La presión de vapor óptima para las descarga de baja presión eficientes se encuentra en torno a de 1 Pa. La radiación de las líneas resonantes decrece debido a la autoabsorción por causa del aumento de presiones y al aumento de la carga (densidad de corriente). La baja presión y la baja densidad de corriente generalmente implican que las dimensiones de los tubos de descarga deben ser considerables. El tubo de descarga es, por tanto, el elemento que limita la fabricación de este tipo de lámparas de descarga.

Las principales lámparas que emplean la descarga a baja presión son la lámpara de vapor de sodio a baja presión y la lámparas de vapor de mercurio a baja presión (tubos fluorescentes).

1.4.1.1 Lámparas de Vapor de Sodio a Baja Presión.

No todos los elementos son adecuados para generar radiación por este sistema dentro del espectro visible. En esta zona del espectro hay dos líneas de resonancia del sodio, las denominadas líneas D del sodio. La situación de estas líneas muy cerca del máximo de la curva de sensibilidad del ojo humano, $V(\lambda)$, (figura 1.2), es muy apropiada para determinadas aplicaciones. El valor de $V(\lambda)$ a esta longitud de onda es de 0,76. El ojo humano percibe la radiación electromagnética que recibe con diferentes grados de sensibilidad, de acuerdo con la longitud de onda λ de la radiación. La sensibilidad del ojo humano, $V(\lambda)$, tiene su máximo en el centro de la zona visible del espectro electromagnético, en la zona correspondiente al color verde, y decrece progresivamente hacia los extremos de esta zona, alcanzando el cero en los extremos (infrarrojo y ultravioleta).

Una desventaja es que el valor óptimo de la presión de vapor de 0.4 Pa, requiere una temperatura de 260° C para el sodio. La energía empleada en llevar la descarga a esta temperatura no se transforma en luz. Sin embargo, las lámparas de descarga de sodio a baja presión actuales pueden llegar a eficacias luminosas superiores a los 200 lm/W.

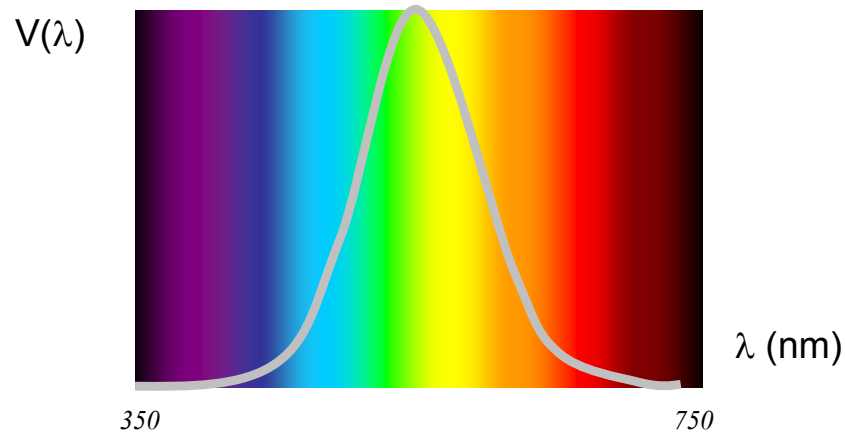


Figura 1.2. Curva de Sensibilidad del Ojo Humano. Los valores están normalizados a 1.

Un inconveniente de la radiación emitida por la lámpara de sodio a baja presión es que se trata de una radiación monocromática. Sin embargo ello lleva a que los contrastes se perciban de una manera mucho más clara, lo que puede resultar una ventaja en determinadas aplicaciones. En la figura 1.3 se representa el funcionamiento de este tipo de lámparas.

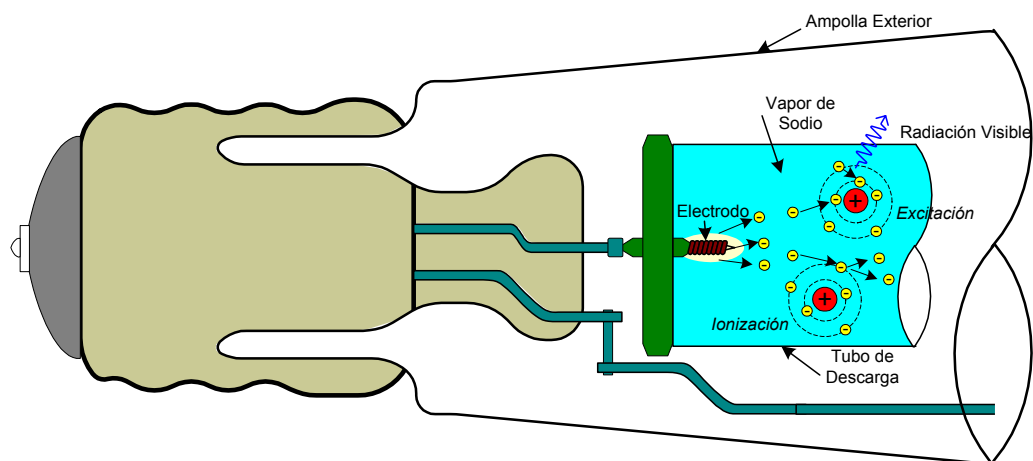


Figura 1.3. Funcionamiento de una lámpara de vapor de sodio a baja presión

1.4.1.2 Tubos Fluorescentes.

Las otras únicas líneas de resonancia que han resultado ser prácticas son las del mercurio. Estas dos líneas, sin embargo, no se encuentran en la zona visible del espectro, sino que se localizan en la zona del ultravioleta, a longitudes de onda de 185,0 y 253,7 nm. Esta radiación puede convertirse en radiación visible mediante fósforos. Tal conversión no es posible sin pérdidas. Sin embargo, la ventaja radica en que la composición de la radiación visible puede ser variada dependiendo de qué tipos de fósforos, y en qué proporciones, se utilicen.

Puesto que la presión de vapor óptima es de 0,8 Pa para el mercurio, la temperatura correspondiente se tiene a 40° C. Es decir, apenas se necesita calentamiento. Por tanto, tampoco se tienen excesivos problemas de estabilización. En la figura se presenta un diagrama explicativo del funcionamiento de los tubos fluorescentes.

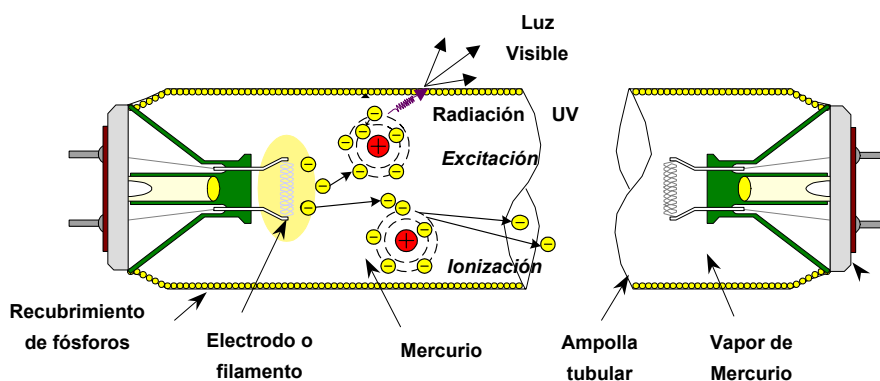


Figura 1.4. Funcionamiento del tubo fluorescente.

1.4.2 Descarga a Alta Presión

Una segunda posibilidad de obtener una potencia de salida luminosa elevada a partir de energía eléctrica se tiene mediante la descarga a alta presión.

Dentro de la descarga a alta presión existen diferentes tipos de lámparas:

- ❑ Lámparas de Vapor de Mercurio a Alta Presión.
- ❑ Lámparas de Vapor de Sodio a Alta Presión.
- ❑ Lámparas de Halogenuros Metálicos.

1.4.2.1 Lámparas de Vapor de Mercurio a Alta Presión

La eficacia luminosa en una lámpara de mercurio a 0,8 Pa (presión óptima en la lámpara de mercurio a baja presión), no es superior a 7 lm/W. Sin entrar en muchos detalles, puede decirse que la eficacia luminosa aumenta, aunque todavía es relativamente baja, hasta presiones del orden de 400 Pa. Sólo entonces la eficacia luminosa aumenta apreciablemente, alcanzando los 45 lm/W a 10^5 Pa (1 atm) y 65 lm/W a 10^7 Pa (100 atm).

Este acusado aumento se debe a la excitación de los átomos a niveles energéticos superiores, apareciendo líneas espectrales dispersas en la parte visible del espectro. Se tiene además cierta componente de radiación continua. La temperatura requerida para mantener la alta presión inevitablemente empeora la

eficacia de la descarga y usualmente se llevará a cabo con la ayuda de una ampolla exterior alrededor del tubo de descarga.

El rendimiento de color puede mejorarse en las descargas a alta presión mediante fósforos. La radiación ultravioleta generada por la descarga puede, de este modo, convertirse en luz visible, preferiblemente en la zona del rojo, para compensar la falta de estas longitudes de onda en la descarga.

Sin embargo, el rendimiento de color no es adecuado todavía para muchas aplicaciones.

1.4.2.2 Lámparas de Halogenuros Metálicos

Este pobre rendimiento de color de las lámparas de descarga en mercurio a alta presión puede mejorarse si se añaden otros elementos. Durante muchos años fue imposible encontrar materiales para los tubos de descarga capaces de soportar las condiciones de temperatura y presión necesarias; generalmente se obtenían sistemas que presentaban una degradación muy importante tras pocos miles de horas de funcionamiento. Tras descubrirse que los compuestos de halogenuros pueden generar espectros que pueden utilizarse para aplicaciones muy amplias, comenzó una investigación más seria en torno al desarrollo de estas fuentes de luz. El resultado son las modernas lámparas de halogenuros metálicos. La eficacia luminosa de lámparas de este tipo puede alcanzar valores superiores a 100 lm/W, combinados con muy buenas propiedades de color. Son estas excelentes cualidades cromáticas las que hacen imprescindibles estas lámparas cuando se trata de obtener grandes niveles de luz con gran reproducción cromática (espectáculos deportivos, iluminación de monumentos, transmisión por TV, etc.)

Las lámparas de halogenuros metálicos son la evolución tecnológica de las lámparas de vapor de mercurio a alta presión. Dentro del tubo de descarga, se han añadido al mercurio una serie de aditivos metálicos, generalmente en forma de yoduros, de manera que las líneas espectrales de emisión de estos metales cubran las zonas apropiadas del espectro visible. De esta manera se logra mejorar la eficiencia luminosa, el rendimiento de color o ambas características simultáneamente [6].

Estos halogenuros metálicos se disocian en el arco de descarga (con una temperatura en torno a los 6000 °C). Son los átomos metálicos excitados los que, mediante sus líneas de emisión características, producen la luz adecuada. Las lámparas de halogenuros metálicos apenas generan luz ultravioleta, por lo cual sus ampollas exteriores no están cubiertas de sustancias fluorescentes. Sin embargo, en

algunos casos se añade una capa externa difusora a fin de reducir la luminancia de la lámpara.

1.4.2.2.1 Características de Funcionamiento

□ Encendido

El inicio de la descarga, debido a la presencia de estos halogenuros, requiere el empleo de tensiones de cebado muy elevadas (entre 1,5 y 5 kV). Generalmente se consiguen mediante un arrancador electrónico.

El periodo de calentamiento puede durar desde 3-5 minutos hasta, en algunos tipos de lámparas, 10 minutos.

□ Reencendido

El reencendido requiere, en general, un tiempo de espera de varios minutos, para que la lámpara retorne a las condiciones de presión adecuadas. Algunos tipos de lámpara, sin embargo, permiten el reencendido inmediato en caliente mediante arrancadores especiales que proporcionan unas tensiones de cebado de entre 35 y 60 kV, [17].

□ Estabilización de la Descarga

En razón de su alta temperatura de funcionamiento, las lámparas de halogenuros concentran el arco de manera muy notable en el eje del tubo de descarga, de manera que es un arco menos estable que las demás lámparas de descarga. El tubo de descarga es, por tanto, menor que los de otro tipo de lámparas para la misma potencia nominal. Como se verá más adelante (capítulo 3), esto determinará el comportamiento en alta frecuencia de las lámparas de halogenuros.

□ Duración

Es función, en general, de la potencia nominal de las lámparas. Las de pequeña potencia presentan una vida media cercana a las 10.000 horas. Las de gran potencia pueden oscilar entre unas 2.000 y unas 6.000 horas.

1.4.2.2.2 Ventajas e Inconvenientes

Las principales ventajas de este tipo de lámparas son su alta eficacia luminosa y el buen rendimiento de color. Esto las hace adecuadas para alcanzar óptimos niveles de iluminación, tanto en aplicaciones de interior como de exterior. Son aptas especialmente para aplicaciones de ocio, donde el color es un factor decisivo. Por otra parte, su espectro luminoso se adapta a la perfección a la TV en color, por lo que su uso es preferente en retransmisiones de este tipo.

Además, debido a sus reducidas dimensiones, facilitan su adaptabilidad a sistemas de iluminación del sector comercial.

Sin embargo, estas lámparas presentan una serie de inconvenientes fundamentales.

En primer lugar, la duración es menor que la de otras lámparas de descarga. El precio es más elevado que el de otro tipo de lámparas, por lo que su uso se limita, en general, a aplicaciones en las que el rendimiento de color es prioritario.

No obstante, la principal desventaja tiene que ver con la estabilidad de la descarga. Mediante balasto convencional de frecuencia de red, el arco presenta cierta inestabilidad ante fluctuaciones de la tensión de alimentación. Cuando la lámpara es alimentada en alta frecuencia, se produce el fenómeno de resonancias acústicas. Este fenómeno es mucho más notable en lámparas de bajas potencias (35W, 70W y 125W). Además, a lo largo de la vida de la lámpara el rendimiento de color y la eficacia luminosa empeoran sensiblemente.

1.4.2.3 Lámparas de Vapor de Sodio a Alta Presión

También en la descarga a través del sodio se mejoran las características al aumentar la presión. Las líneas de resonancia del sodio resultan enormemente ensanchadas. Ello redundaría en una mejora visible de la apariencia de color y del rendimiento de color, desafortunadamente, en detrimento de la eficacia luminosa. De todos modos, a una presión de $1.5 \cdot 10^4$ Pa, la eficacia es del orden de 120 lm/W.

La descarga en el sodio a alta presión presenta las siguientes diferencias fundamentales frente a la descarga en sodio a baja presión [6]:

- ❑ Contracción intensa del arco, en el eje del tubo, con un alto gradiente de temperatura entre el arco (unos 4000 °C) y la pared del tubo (unos 1500°C).
- ❑ Espectro de emisión de bandas ampliadas. No existe prácticamente emisión ultravioleta.

Mediante aditivos como el xenón, se consigue reducir la longitud del arco, con un aumento de su temperatura, emisión y eficacia luminosa. Por tanto, El tubo de descarga de este tipo de lámparas presenta un tamaño pequeño.

1.4.2.3.1 Características de Funcionamiento

❑ Encendido

El método más común consiste en el empleo de arrancadores electrónicos. La tensión de cebado es menor en general que la de lámparas de halogenuros metálicos (entre 2 y 4 kV).

El calentamiento dura entre 5 y 10 minutos (si bien a los 4 minutos ya se emite el 80% del flujo nominal).

□ *Reencendido*

Al contrario que en el caso de halogenuros metálicos, el tiempo de espera en las lámparas de sodio a alta presión es muy breve (en torno a 1 minuto). En este período la presión retorna a las condiciones iniciales, con lo que es posible arrancar de nuevo la lámpara. Sin embargo, existen arrancadores especiales que permiten el reencendido en caliente de la lámpara (30-60 kV).

□ *Vida Media*

Se establece generalmente en unas 20.000-25.000 horas, siendo del orden del doble de la de las lámparas de halogenuros metálicos.

1.4.2.3.2 Ventajas e Inconvenientes

Las principales ventajas de estas lámparas son su alta eficacia luminosa, el adecuado rendimiento de color, las elevadas vidas media y útil, y el precio moderado. Todo esto las convierte en la fuente de luz más eficaz para un gran número de aplicaciones.

El principal inconveniente se deriva de los valores de reproducción cromática, inferiores a los de las lámparas de halogenuros metálicos. Presenta una apariencia de color cálida, que tiene un rechazo psicológico cuando se trata de ofrecer muy altos niveles de iluminación.

Al ser alimentadas a alta frecuencia, aparece también el fenómeno de resonancias acústicas, aunque en menor grado que para lámparas de la misma potencia de halogenuros metálicos. Ello es debido a que el tubo de descarga presenta un tamaño relativamente reducido, con una temperatura de descarga elevada.

1.4.3 Balance de Potencia en Lámparas de Descarga

Uno de los aspectos más importantes en la generación de la luz es la eficacia luminosa de la lámpara de descarga. Esta eficacia se define como la relación entre el flujo luminoso de una fuente de luz (en lúmenes, lm), y la potencia suministrada a la misma fuente (en vatios, W). Se expresa, por tanto, en lm W^{-1} .

La eficiencia luminosa de una fuente de luz depende de dos factores: del porcentaje de la potencia eléctrica que se convierte en radiación visible y de la distribución espectral de esa energía relativa a la curva de sensibilidad del ojo humano ($V(\lambda)$). Para obtener más información sobre cómo se realiza esta conversión de energía en la lámpara, deben conocerse los procesos que tienen lugar en la lámpara. Estos procesos son muy complejos, pero el denominado "balance energético" da cierta idea de ellos (figura 1.5). Se trata de una representación de la conversión de potencia

en la lámpara en forma de diagrama. Muestra la potencia de entrada a la lámpara y las diferentes formas de energía en las cuales se transforma. Los anchos de las bandas de los diagramas son proporcionales a los porcentajes de energía relativa. Los valores energéticos son aproximados, puesto que varían mucho de unas lámparas a otras, e incluso para la misma lámpara varían en función de ciertas circunstancias.

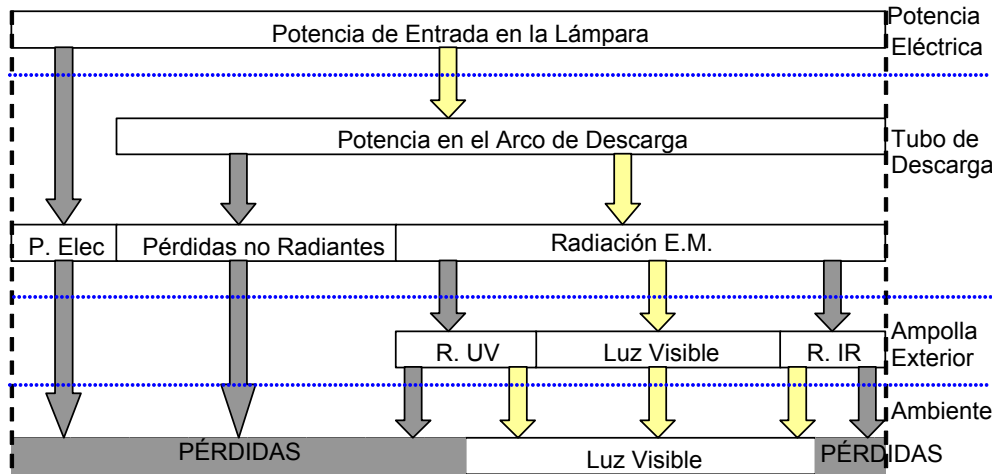


Figura 1.5 . Balance Energético de Lámparas de Descarga ($P. Elec$ = Pérdidas en los Electrodo; $R. UV$ = Radiación ultravioleta; $R. IR$ = Radiación infrarroja)

1.5 REFERENCIAS

- [1] Alonso M., Díaz J., Blanco C., Nuño F., Martínez J., Rico M., "Sistema de alimentación, supervisión y control de equipos de iluminación electrónica fluorescente", Congreso Internacional de Electrónica de Potencia. 1992
- [2] Alonso M., Díaz J., Blanco C., Villegas P., Rico M., "A Smart-Lighting Emergency System for Fluorescent Lamps", European Conference on Power Electronics and Applications. 1993.
- [3] Dunlop, J.; Smith, D. G.; "Ingeniería de las Telecomunicaciones", Ed. Gustavo Gili, 1984.
- [4] Elembaas, W.; "High Pressure Mercury Vapour Lamps and Their Applications", Philips Technical Library, 1965.
- [5] Faehnrich, H. J.; Rausch, E.; "Electronic Ballasts for Metal Halide Lamps", Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1988.
- [6] Fernandez, L.; Landa, J.; "Técnicas y Aplicaciones de la Iluminación", Mc Graw-Hill / Iberdrola / Ente Vasco de la Energía, 1993.
- [7] Fromm, D. C.; "New Developments in NaSc Metal Halide Lamps", IES of North America Annual Conference Technical Papers, 1993, pp- 381-392
- [8] Gibson R.G., "Dimming of Metal Halide Lamps", Journal of the Illuminating Engineering Society. Summer 1994.
- [9] Groot, J. de; Vliet, J. van; "The High Pressure Sodium Lamp", Philips Technical Library, 1986
- [10] Koshimura Y.; "Stable High Frequency Operation of High Intensity Discharge Lamps and Their Ballast Design", CIE 20th Session, 1983.
- [11] Laskai, L.; Enjeti, P.; Pitel, I.; "White-Noise Modulation of High-Frequency High-Intensity Discharge Lamp Ballasts", IAS 1994.
- [12] Meyer, C.; Nienhuis, H.; "Discharge Lamps", Philips Technical Library, 1988
- [13] Olsen, J.; Moskowitz, W. P.; "Optical Measurement of Acoustic Resonance Frequencies in HID Lamps", IAS 1997..
- [14] Olsen, J.; Moskowitz, W. P.; "Time Resolved Measurements of HID Lamp Acoustic Frequency Spectra", IAS 1998.
- [15] Peng, H.; Ratanapanachote, S.; Enjeti, P.; Laskai, L.; Pitel, I.; "Evaluation of Acoustic Resonance in Metal Halide (MH) Lamps And an Approach to Detect its Occurrence", IAS 1997
- [16] Ponce, M.; López, A.; Correa, J.; Arau, J.; Alonso, J. M.; "Electronic Ballast for HID Lamps with High Frequency Square Waveform to Avoid Acoustic Resonances", IEEE 2001.
- [17] Rodríguez Valdes, F.; "Circuitos de Encendido en Balastos Electrónicos para Lámparas de Alta Intensidad de Descarga: Análisis, Optimización y Diseño", Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 2001
- [18] Schafer, R.; Stormberg, H. P.; "Investigations of the Fundamental Longitudinal Acoustic Resonance of High Pressure Discharge Lamps", Journal of Applied Physics, 53(5), May 1982.
- [19] Wada, S.; Okada, A.; Morii, S.; "Study of HID Lamps with Reduced Acoustic Resonances", Journal of the Illuminating Engineering Society, 1987.
- [20] Witting, H. L.; "Acoustic Resonances in Cylindrical High-Pressure Arc Discharges", Journal of Applied Physics 49(5), May 1978.
- [21] Yan, W.; Ho, Y. K. E.; Hui, S. Y. R.; "Investigation on Methods of Eliminating Acoustic Resonance in Small Wattage High-Intensity-Discharge (HID) Lamps", IEEE 2000
- [22] Zhou, J.; Ma, L.; Qian, Z.; "A Novel Method for Testing Acoustic Resonance of HID Lamps", APEC 1999.