

# Capítulo 4

## Fuentes Luminosas

Beatriz M. O'Donell, José D. Sandoval y Fernando Paukste

### 1. Evolución de las fuentes luminosas

### 2. Formas de producción de la radiación luminosa

- 2.1. Incandescencia
- 2.2. Luminiscencia
- 2.3. Descarga en gases
- 2.4. Electroluminiscencia
- 2.5. Clasificación de las fuentes luminosas
- 2.6. Características generales de las fuentes luminosas

### 3. Lámparas Incandescentes

- 3.1. Componentes de una lámpara incandescente
- 3.2. Características de funcionamiento

### 4. Lámparas de descarga en gas

### 5. Lámparas Fluorescentes

- 5.1. Componentes de una lámpara fluorescente
- 5.2. Características de funcionamiento

### 6. Lámparas de Inducción

- 6.1. Características de funcionamiento

### 7. Lámpara de sodio baja presión

### 8. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)

### 9. Lámparas de vapor de mercurio de alta presión

- 9.1. Características de funcionamiento

### 10. Lámpara de halogenuros metálicos

- 10.1. Componentes de la lámpara de halogenuro metálico.
- 10.2. Características de funcionamiento

### 11. Lámpara de sodio de alta presión

- 11.1. Componentes de la lámpara de sodio de alta presión
- 11.2. Características de funcionamiento

### 12. Comparación entre las lámparas de alta intensidad

### **13. LED (Light Emitting Diode)**

13.1. Detalles constructivos de un LED

13.2. Evolucion de los LEDs

13.3. Beneficios

13.4. Aplicaciones

### **14. Criterios de selección de lámparas**

### **Bibliografía**

## 1. Evolución de las fuentes luminosas

Las primeras fuentes luminosas empleadas por el hombre estuvieron basadas en alguna forma de combustión: el fuego, las antorchas, las velas, etc. Las lámparas más antiguas de que se tienen noticias aparecieron en el antiguo Egipto hacia el año 3000 a.C. y consistían en piedras ahuecadas rellenas de aceite, con fibras vegetales como mechas. Ya en la Edad Media, se fabricaban velas empleando sebo de origen animal. Más tarde, se reemplazó el sebo por cera de abejas o parafina. Las velas modernas pueden considerarse como la evolución de estas lámparas de grasa, pero su uso actual es casi por completo decorativo y ceremonial

Los griegos y romanos fabricaron lámparas de bronce o arcilla, con aceite de oliva u otros aceites vegetales como combustible.

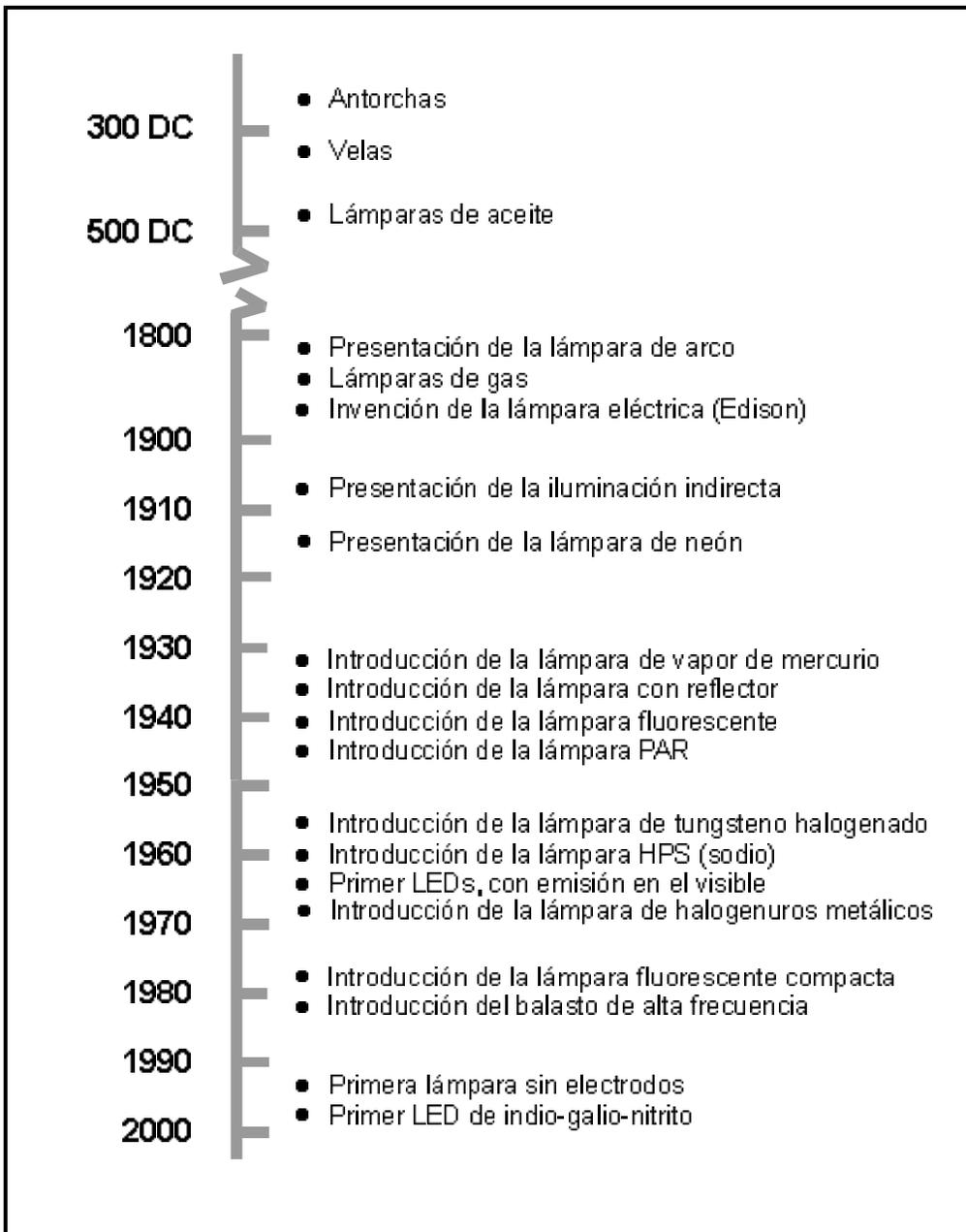
La evolución del diseño de estas lámparas condujo al agregado de elementos reflectores para mejorar el aprovechamiento de la luz producida.

Con el correr del tiempo, se introdujeron muchas mejoras en el diseño y la fabricación de estas lámparas, aunque sin lograr que produjeran luz de manera razonablemente eficiente hasta 1874, cuando el químico suizo Argand inventó una lámpara que usaba una mecha hueca para permitir que el aire alcanzara la llama, obteniendo así una luz más intensa. Luego, a la lámpara de Argand se le agregaría un cilindro de vidrio para proteger la llama y permitirle arder mejor. Con el advenimiento de la industria del petróleo, el kerosén se transformaría en el combustible más utilizado en este tipo de lámparas.

Alrededor del año 1800, se hizo muy común resolver el alumbrado de calles con lámparas de gas, que funcionaban prescindiendo de la mecha. Estas lámparas producían luz mediante una llama abierta caracterizada por un parpadeo considerable.

Hacia el final del siglo XIX y principio del XX se inició el reemplazo de las lámparas de gas por la lámpara eléctrica.

La primera lámpara eléctrica fue la lámpara de arco de carbón, presentada en 1801 por Humphrey Davy, aunque la luz eléctrica sólo se impondría a partir del desarrollo de la lámpara incandescente por Joseph Swan (Inglaterra) y Tomás A. Edison (EE.UU.) trabajando independientemente. Edison patentó su invención en 1879, transformándola posteriormente en el éxito comercial que aún perdura. La Figura 1 ilustra la evolución de las diferentes fuentes luminosas.



*Figura 1. Evolución de las fuentes luminosas desde su aparición hasta la actualidad*

La cantidad de fuentes luminosas de diversos tipos se ha visto enormemente incrementada durante el siglo XX, considerando las mejoras introducidas a la lámpara de Edison, la aparición de las lámparas de vapor de mercurio alrededor de 1930, la presentación de las lámparas fluorescentes en la Feria Mundial de 1939, la introducción de las lámparas de tungsteno halogenado alrededor de 1950, la aparición de las lámparas de sodio de alta presión y las de halogenuros metálicos en los años 1960, la introducción de las lámparas fluorescentes compactas en la década del 1970 hasta el surgimiento de las lámparas sin electrodos en los 1990. Dado el alto grado de dinamismo de esta industria, es de esperar que la evolución de las fuentes luminosas continúe al mismo ritmo en el presente siglo.

## 2. Formas de producción de la radiación luminosa

Todas las fuentes de luz artificial implican la conversión de alguna forma de energía en radiación electromagnética. Considerada esta conversión como un proceso físico a nivel atómico, la excitación y subsiguiente desexcitación de átomos o moléculas es el proceso más empleado para la generación de luz en las fuentes artificiales. La Figura 2 muestra una representación muy simplificada de este proceso: la parte (a) muestra un átomo consistente en un núcleo con un electrón girando alrededor de él en una órbita estable; el átomo es “excitado”, por ejemplo mediante el choque con alguna otra partícula, de modo que el electrón se mueve a otra órbita con un nivel de energía mayor, como se muestra en (b); luego, el electrón en estado “excitado” caerá “espontáneamente” a su órbita estable original, como en la parte (c) de la figura, devolviendo en esta “desexcitación” el exceso de energía en forma de un *fotón* o unidad de luz. Este fenómeno se conoce como emisión de radiación. La frecuencia de la radiación emitida, correspondiente a una línea espectral, está dada por la *relación de Planck*:

$$Q = h \nu = h c / \lambda$$

Donde  $Q$  es la diferencia de energía entre los dos estados,  $\nu$  es la frecuencia,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $c = 2.998 \times 10^8$  m/s) y  $h$  es la constante de Planck ( $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J s).

El estado estable de más baja energía se denomina *estado base o fundamental*.

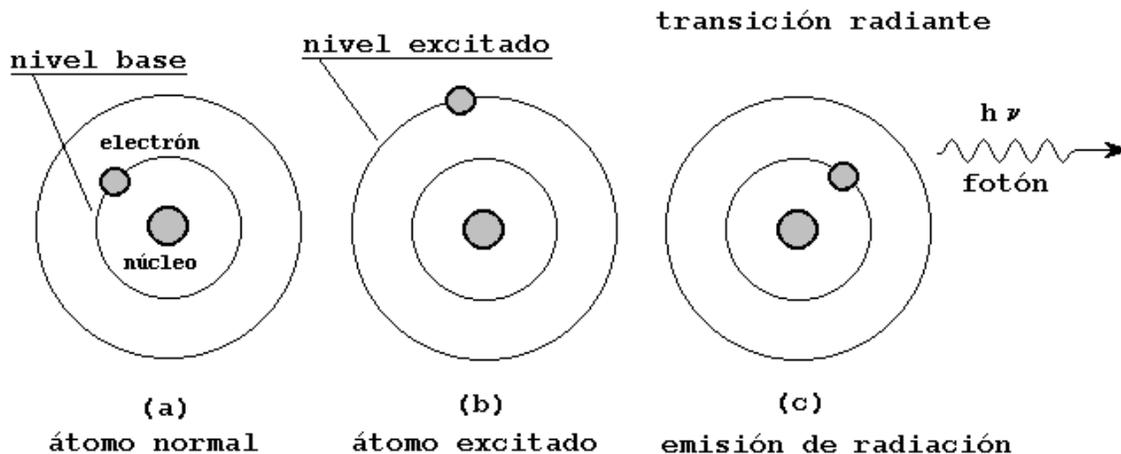


Figura 2. Excitación atómica y emisión espontánea de radiación

La discusión anterior está referida a un átomo aislado, sin embargo los átomos reales no están aislados y las interacciones entre ellos provocan perturbaciones que dan lugar a una multiplicidad de líneas espectrales de diferentes frecuencias cuando retornan a sus estados de energía original.

En los gases atómicos, estas líneas pueden ser bien definidas y distintas. Sin embargo, en los gases moleculares hay tantos niveles de energía permitidos que las líneas espectrales se mezclan y confunden, formando bandas, y en los líquidos y sólidos, en los que los niveles de energía se encuentran ensanchados de tal modo que sus límites se pierden, mezclándose y confundiendo, dando como resultado un espectro continuo sobre un amplio rango de frecuencias.

Las maneras de llevar un átomo a niveles energéticos superiores son diversas: someter los átomos en un gas a esfuerzos de compresión considerables, calentarlos a elevadas temperaturas, someterlos a fuertes campos eléctricos o magnéticos o producir la recombinación de átomos ionizados con electrones. En este último caso se emite un espectro continuo de radiación, dando lugar a lo que se denomina un “continuo de recombinación”.

Un átomo excitado puede volver a su estado base en forma *espontánea* o por la *estimulación* de otro fotón. En el primer caso las fases de los fotones emitidos no tienen relación entre sí, denominándose radiación *incoherente*, mientras en el otro caso tanto la fase del fotón estimulante como la del emitido son iguales generando de este modo radiación *coherente*, como es el caso de las fuentes de luz láser. En realidad ambos tipos de radiación pueden ocurrir simultáneamente, pero bajo circunstancias normales prevalece la primera.

Si bien el proceso básico de producción de energía es el mismo, cualquiera sea la fuente luminosa involucrada, es decir átomos excitados que vuelven a sus estado bases emitiendo fotones, la radiación luminosa incoherente está producida por la *incandescencia* y la *luminiscencia*. Esta última, a su vez se puede dividir en *descarga en gases* y *electroluminiscencia*

A continuación, se describe los procesos de incandescencia y luminiscencia en general. La luminiscencia representa la mayoría de las fuentes de iluminación eficiente, por lo cual el texto continúa con una explicación más detallada de las dos formas de luminiscencia: descarga en gases y la electroluminiscencia.

## **2.1. Incandescencia**

Cuando un cuerpo adquiere una temperatura determinada, sus átomos sufren choques que los llevan a estados excitados, con la subsiguiente desexcitación y producción de radiación de un espectro continuo. Esta forma de generar la radiación luminosa recibe el nombre de *incandescencia*.

La incandescencia en una lámpara de filamento es causada por el calentamiento debido al paso de una corriente eléctrica. La corriente es transportada por el movimiento de electrones libres a través de una apretada red de átomos o iones (átomos que han perdido un electrón, quedando cargados positivamente) que, salvo por las vibraciones térmicas, están inmóviles. Los conductores metálicos contienen aproximadamente tantos electrones libres como átomos o iones fijos, de lo que se deriva su alta conductividad eléctrica. Si bien las moléculas de sólidos o gases están en constante movimiento a temperaturas por arriba del

cero absoluto y su movimiento es función de la temperatura, la emisión en el rango visible comienza a temperaturas mayores de 600 °C. El efecto directo del pasaje de una corriente eléctrica a través de un conductor es el calentamiento de éste, de manera que si el calentamiento es suficiente para excitar los átomos se produce la emisión en el rango visible.

El fenómeno de incandescencia se describe a través de las propiedades macroscópicas de un cuerpo negro o radiador perfecto. Por definición un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la radiación que llega a una dada temperatura. La Figura 3 muestra la emitancia radiante espectral de un cuerpo negro en función de la longitud de onda. Los máximos aumentan rápidamente a medida que la temperatura aumenta, desplazándose hacia longitudes de onda menores.

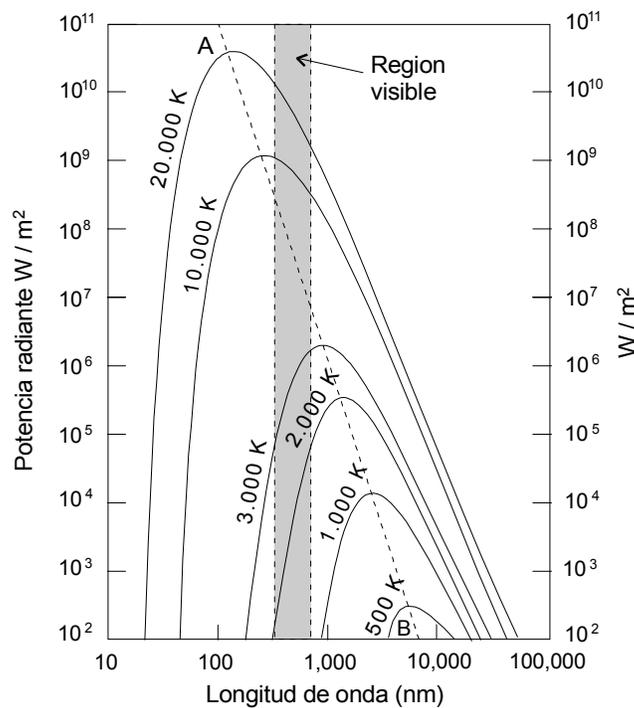


Figura 3. Curva de radiación de un cuerpo negro para temperaturas entre 500 y 20000 K, en la que se muestra el desplazamiento de los picos máximos. La región sombreada corresponde a la zona visible.

En la práctica los materiales reales no se comportan tal cual lo haría un cuerpo negro a la misma temperatura, lo que lleva a la definición de *emisividad*, una medida de lo que radia un cuerpo real en comparación a lo que radia un cuerpo negro a igual temperatura. De este modo, si se quiere usar el fenómeno de incandescencia para generar radiación en el visible el material empleado debe ser resistente a altas temperaturas (> 2000 K) y ser un emisor selectivo que favorezca la zona visible.

## 2.2. Luminiscencia

Luminiscencia es el proceso en el cual la energía es absorbida por la materia y luego reemitida en forma de fotones. Dentro del fenómeno de luminiscencia puede ocurrir que la emisión ocurra casi inmediatamente a la excitación, denominándose este caso *fluorescencia*, mientras que cuando hay un retardo entre estos dos procesos, excitación y emisión, se llama *fosforescencia*. La emisión de luz se produce por la excitación de los electrones de valencia de un átomo, tanto en estado gaseoso como en un sólido cristalino o molécula orgánica. En el primer caso, se emiten líneas espectrales, como las de mercurio o sodio, mientras en el segundo caso se emiten bandas angostas que usualmente se encuentran en la región visible, contrastando las mismas con el espectro de radiación continuo de una fuente incandescente.

Una de las características de la *luminiscencia*, a diferencia de la *incandescencia*, es que la fuente excitante es no térmica; el caso más simple de luminiscencia ocurre cuando un electrón es excitado por alguna fuente no térmica, como puede ser la absorción de un fotón o una colisión con otro, como es el caso de electrones energéticos en un tubo de rayos catódicos. El fotón es emitido cuando el electrón vuelve a su estado base con una frecuencia correspondiente a ese salto de energía, como se indicó anteriormente.

La *fluorescencia* tiene además una transición intermedia no radiante, es decir, el electrón decae a un nivel inferior —relajación— para luego alcanzar su nivel de base con un quantum de luz de mayor longitud de onda que lo que se hubiera esperado sin ese paso medio. En el caso de la *fosforescencia* el fenómeno es algo más complicado, ya que en este caso el paso intermedio corresponde a un nivel de energía *metaestable*. De este modo la diferencia entre ambos fenómenos radica en la forma de volver a su estado base.

En los materiales luminiscentes reales los sistemas energéticos y transiciones intermedias son más complicadas. El juego de energía puede estar restringido a un átomo aislado o molécula —centro de excitación— o puede ser transferido a otras zonas. Por ejemplo en los halofosfatos usados en las lámparas fluorescentes la excitación ocurre en los iones antimonios, de manera que parte de la energía es radiada en los mismos iones, emitiendo radiación de color azul luego de la relajación, y la otra proporción de la energía en juego es transferida a los iones de manganeso, consecuentemente produciendo una emisión de color naranja. Se dice entonces que el ion de manganeso es *activador*, mientras el ion de antimonio *sensibilizador* o activador primario.

Uno de las consecuencias a destacar es que en la mayoría de estos procesos la longitud de onda de la energía radiada es mayor que la de la energía absorbida, ya que la cantidad de energía emitida es menor. Casi todos los fósforos que recubren el interior de las lámparas fluorescentes y de descarga convierten la radiación ultravioleta, generada por la descarga en el gas, en radiación visible a través de estos procesos explicados.

### **2.3. Descarga en gases**

Las descargas en gases son usualmente más eficientes que la incandescencia para producir radiación luminosa, ya que en este último caso la radiación se logra con filamentos sólidos a altas temperaturas y con subsecuentes pérdidas de energía en el infrarrojo, mientras que en las primeras se logra una emisión más selectiva.

Si sobre un gas cualquiera, confinado en un espacio o *tubo de descarga* con dos electrodos, se aplica un campo eléctrico, y, dado que dentro del gas normalmente no se encuentran electrones libres, la conducción sólo puede tener lugar si se *ionizan* los átomos del gas, obteniéndose electrones e iones positivos. Este flujo de iones y electrones a través del gas se llama *descarga*, en la que los electrones se desplazan hacia el ánodo y los iones hacia el cátodo, como se muestra en la Figura 4.

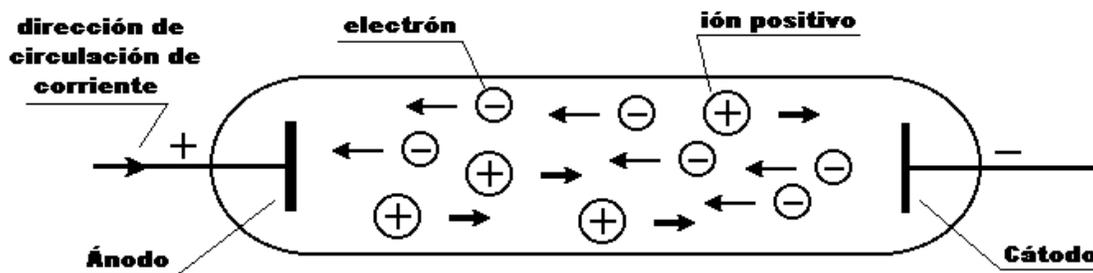


Figura 4. Descarga eléctrica a través de un tubo lleno de gas ionizado

La mayoría de los electrones presentes son el resultado del proceso de ionización, por lo que hay casi el mismo número de electrones que de iones. Esta igualdad está acentuada por la atracción electrostática mutua entre iones y electrones, de modo que prácticamente no hay carga espacial neta, constituyendo una región neutra en lo que a carga eléctrica se refiere y a la que se denomina *plasma*. La densidad de electrones en cualquier punto es igual a la densidad de iones y se designa normalmente como la *densidad del plasma*.

La ionización de los átomos del gas puede lograrse por diferentes medios: aumentando la tensión entre electrodos a valores suficientemente altos; utilizando una mezcla apropiada de gases; utilizando un electrodo auxiliar a muy corta distancia del ánodo.

Un mecanismo típico de generación de luz en una descarga en gas, cuando se aplica el campo eléctrico, contiene los siguientes pasos:

1. Un electrón libre emitido por el cátodo choca con un átomo del gas. En este choque el electrón puede perder muy poca energía —choque elástico—, produciendo un incremento de la temperatura del gas, o puede excitarlo entregándole parte de su energía cinética, de modo que sus electrones de valencia ascienden a niveles energéticos superiores, o puede ionizar al átomo, liberando por completo uno de sus propios electrones.
2. Los electrones de conducción pierden velocidad en el impacto y cambian de dirección, pero continúan excitando o ionizando uno o más átomos y perdiendo su energía cada vez más. Generalmente terminan en las cercanías de las paredes del tubo, donde se recombinan con átomos ionizados y otra parte de la corriente de electrones es colectado por el ánodo.

3. Los electrones de conducción, ya sean los que provienen del cátodo o los que se generan por los procesos de colisión, ganan energía del campo eléctrico aplicado, y por tanto mantienen la descarga a través del tubo sin ninguna ayuda exterior.
4. Luego el electrón de valencia retorna a su estado energético normal ya sea mediante una sola transición o con una serie de pasos intermedios. Si el electrón retorna a su estado base en una sola transición la radiación emitida se llama de *resonancia*.

A medida que el campo eléctrico aumenta, los iones y electrones adquieren más energía y chocan con otros átomos de modo que la ionización aumenta produciéndose para un dado valor de tensión un proceso acumulativo de avalancha. Si la velocidad de ionización excede a la velocidad de recombinación de iones y electrones, se produce un aumento rápido en la descarga y por tanto la tensión en la descarga cae, lo que explica la característica negativa de la relación tensión-corriente en las descargas. Por este motivo es necesario el uso de diseños limitantes de corriente, usualmente llamados *balastos*, resistivos si la tensión aplicada es continua o, inductivos para alterna.

El número de colisiones de los electrones es muy grande, del orden de  $10^9$  /segundo y las velocidades al azar son mucho mayores que la velocidad neta en el campo eléctrico.

El periodo de encendido es crítico en la vida del cátodo. Hasta que el cátodo está suficientemente caliente para emitir *termoiónicamente* los electrones, los mismos abandonan el cátodo por *emisión de campo*, de modo que si el campo eléctrico en la superficie es muy alto algunos electrones pueden escapar. Sin embargo, el campo eléctrico necesario es tan alto que los iones son acelerados hacia el cátodo e impactan sobre él con gran energía. Los iones positivos, que chocan con el cátodo a gran velocidad, liberan electrones de la superficie de éste. La relativa inmovilidad de los iones, por su mayor masa en comparación con los electrones, da lugar a que se acumulen alrededor del cátodo, donde han sido generados la mayoría de ellos. De esta manera se forma una carga espacial positiva que produce una caída de tensión —caída catódica— entre esa zona positiva y el cátodo negativo. La pérdida de material emisor durante este periodo acorta la vida del cátodo, por ello, en las lámparas fluorescentes se ayuda este encendido mediante el precaldeo del cátodo —cátodo caliente—. Para favorecer este efecto se recubren los electrodos, con óxidos tales como óxido de bario, de modo que puedan operar a relativamente bajas temperaturas y con baja velocidad de evaporación. La temperatura a la cual se torna importante este fenómeno depende del tipo de óxido. Esto muestra que el cátodo tiene la función de suplir los electrones necesarios para mantener la descarga, mientras el ánodo es mucho menos importante, siendo principalmente un receptor de partículas cargadas para completar el ciclo.

También pueden operar como cátodos fríos, donde la emisión tiene lugar dentro de un pequeño cilindro con su interior recubierto de un material emisivo.

Las propiedades de una descarga en gases cambian principalmente con el tipo y presión del gas o mezcla de gases, el material del electrodo, la temperatura de trabajo de los mismos, la forma y estructura de su superficie, la separación entre ellos y la geometría del tubo de descarga.

### *Descarga en un gas a baja presión*

Cuando en un tubo de descarga de unos centímetros de diámetro y aproximadamente un metro de longitud, que contiene uno o más gases a una presión relativamente baja, por ejemplo una centésima de atmósfera, circula corriente no mayor que uno o dos Ampere, el calentamiento que se produce en el gas no es significativo y se puede hablar de una *descarga en baja presión*. Bajo estas condiciones, la *ionización* es principalmente producida por choques de electrones. Por ejemplo en una lámpara fluorescente que contiene mercurio y argón a baja presión, la mayor parte de los iones presentes son los de mercurio, como resultado de los choques entre los átomos de mercurio y los electrones energéticos de la descarga, ya que su energía de ionización es de 10.4 eV, mientras que la del argón es de 15.7 eV (1 eV es la energía ganada por un electrón que es acelerado por una diferencia de potencial de 1 V,  $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ). Muy pocos de los electrones en la descarga tienen energía suficiente para ionizar o excitar a los átomos de argón, de modo que la mayoría de las colisiones de los electrones con átomos de argón son colisiones elásticas que dan como resultado un ligero incremento en la temperatura del gas.

La gran región uniforme que se forma entre los electrodos en una descarga se denomina *columna positiva*. Está formada por una mezcla de átomos del gas, átomos excitados, iones y electrones, todos moviéndose aleatoriamente. Las partículas más pesadas forman un gas que está a una temperatura apenas superior a la de los alrededores del tubo (típicamente entre 40 °C y 60 °C). Los electrones, en cambio, requieren mucha más energía para producir la ionización. Generalmente, éstos tienen energías que corresponden a temperaturas del electrón del orden de 11000 K a 13000 K. Esta energía adicional es obtenida de la aceleración debida al campo eléctrico a medida que se desplazan hacia el ánodo, produciendo múltiples colisiones. Resulta entonces sorprendente que en un mismo espacio coexistan átomos gaseosos y electrones a diferentes temperaturas, lo que se explica por la poca interacción entre ellos. El campo eléctrico actúa sobre los electrones acelerándolos, mientras los iones se mueven más lentamente. Los electrones chocan con los átomos pero en cada choque la energía transferida es muy pequeña dada sus masas muy diferentes, por lo que sus velocidades prácticamente mantienen su alto valor. Este fenómeno es lo que diferencia la descarga de baja presión respecto de la de alta ya que en este último caso la frecuencia con que realizan los choques es tan alta que las temperaturas de los electrones y átomos son similares.

La radiación en la descarga proviene de la columna positiva, ya que los electrones energéticos que producen la ionización y excitación de los átomos de gas, radian en sus frecuencias características. En el caso de la descarga de baja presión de mercurio, la radiación de resonancia ultravioleta es la fuente de radiación más importante y es la que incide sobre los fósforos que recubren las paredes internas del tubo, convirtiéndola en radiación visible.

En el caso que se usen mezclas de gases —mezcla Penning— para iniciar la descarga, se agrega una pequeña porción de otro gas que posee una energía de ionización menor que la del gas principal. Las funciones de este gas adicional, que puede ser argón, neón, helio kriptón, son: ayudar a la iniciación de la descarga; reducir la pérdida de iones que se dirigen hacia las paredes; controlar la movilidad de los electrones y por tanto la conductividad

eléctrica; prolongar la vida de los electrodos reduciendo su evaporación, y, en el caso de las lámparas fluorescentes, proteger a los fósforos de los iones mercurio.

### *Descarga en un gas a alta presión*

Cuando la presión del gas en una descarga aumenta gradualmente ocurren los siguientes cambios:

- La temperatura del gas aumenta gradualmente debido a la transferencia de energía por el incremento de choques (principalmente elásticos) de sus átomos con los electrones energéticos, y la energía media del electrón se reduce también gradualmente, hasta alcanzar un equilibrio (4000 K a 6000 K) con los átomos de gas. A estas temperaturas los electrones tienen suficiente energía para ionizar al gas.
- La mayor temperatura se localiza en el centro de la descarga generando un gradiente de temperatura hacia las paredes, por lo que la mayoría de la radiación es generada en el centro.
- Las altas temperaturas favorecen la excitación y la ionización.

Las paredes se vuelven menos importantes, de modo que la descarga trabaja entre los electrodos. Cuando opera horizontalmente la zona de emisión luminosa central se inclina hacia arriba y por esta razón a este tipo de descarga se la llama *de arco*. Sin embargo hay una fuerte tendencia a la inestabilidad, el arco se inclina o se retuerce, convirtiéndolo en una fuente de luz inútil. Los medios para prevenir estos efectos son limitaciones a las paredes o los electrodos de modo que no se encuentren lejos uno de otro. Esto también explica porque estas lámparas no tienen una posición de encendido universal, ya que pequeñas inclinaciones pueden cambiar el color y provocar sobrecalentamiento en las paredes.

Los electrodos son más robustos que en la descarga de baja presión y son indefectiblemente autocalentados por bombardeo de iones. La emisión de electrones se logra mediante efecto termiónico.

Debido a que el flujo radiante por unidad de superficie de arco es mucho más elevado, una lámpara de descarga de alta presión puede ser de menor tamaño en comparación a otra de baja presión, aunque la diferencia más importante es la composición espectral de la radiación emitida. En este sentido cuando la descarga se produce en un gas a baja presión el espectro está formado por líneas de emisión angostas entre las que sobresalen las líneas de resonancia emitidas por el elemento con potencial de excitación más bajo. Al aumentar la presión, el número de líneas se incrementa, debido a la excitación de los niveles más elevados y a que las transiciones entre niveles metaestables se hacen más prominentes. De esta manera las líneas se ensanchan convirtiéndose en bandas y apareciendo de esta manera un débil espectro continuo, de tal modo que cuando la presión es muy elevada el espectro es casi continuo. Gracias a estas bandas de emisión las lámparas de descarga de alta presión poseen mejor rendimiento de color dependiendo del gas usado.

## 2.4. Electroluminiscencia

La electroluminiscencia es la conversión directa de energía eléctrica en luz, sin necesidad de un paso intermedio como en la descarga de un gas o como el calentamiento de un material. Los dos mecanismos a través de los cuales ocurre la excitación en este proceso son: la recombinación de portadores de carga en ciertos semiconductores y mediante la excitación de centros luminiscentes en fósforos. Los LEDs y los paneles electroluminiscentes son ejemplos de fuentes de luz basadas respectivamente en estos fenómenos.

## 2.5. Clasificación de las fuentes luminosas

La Figura 5 muestra una clasificación de las fuentes luminosas artificiales, de acuerdo a los fenómenos involucrados en la generación de luz.

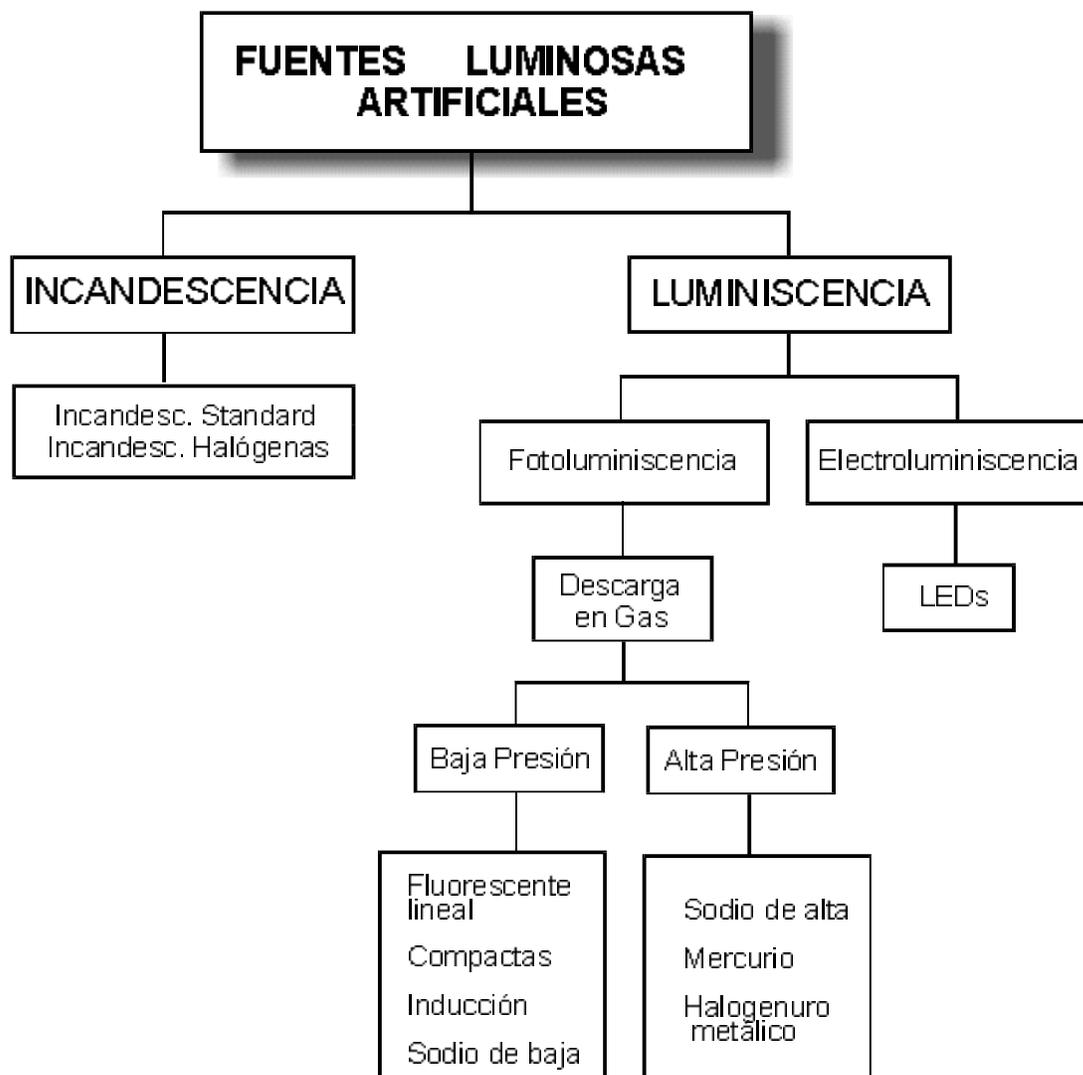


Figura 5. Clasificación de las fuentes luminosas más importantes

## 2.6. Características generales de las fuentes luminosas

Las características generales de las fuentes luminosas se pueden dividir en cuatro grupos: *fotométricas, colorimétricas, eléctricas y duración.*

### *Fotométricas*

Se incluyen en este grupo al flujo luminoso, intensidad y eficacia. Las dos primeras ya fueron definidas en el Capítulo 2 *Luz, Color y Visión.*

*Eficacia luminosa:* se define como la relación entre el flujo luminoso de una fuente de luz y la potencia suministrada a ella, expresada en lm/W.

La eficacia luminosa depende de dos factores: el porcentaje de la potencia eléctrica que se transforma en radiación visible y, la distribución espectral de la radiación emitida por la fuente en relación con la curva de sensibilidad espectral del sistema visual humano.

De acuerdo a la curva de sensibilidad espectral ya presentada en el Capítulo 2: *Luz, Color y Visión*, surge que 1 watt de potencia radiante de 555 nm equivale a 683 lm/W, valor que correspondería a la máxima eficacia luminosa posible. Sin embargo, las fuentes luminosas no tienen valores tan altos de eficacia luminosa, ya que van desde 10 a 20 lm/W para una lámpara incandescente a 200 lm/W para algunas lámparas de sodio de baja presión. Esto se debe a que la energía entregada a una fuente no sólo se transforma en energía del visible sino también en energía ultravioleta (UV), infrarroja (IR) y pérdidas de calor por conducción o convección.

La siguiente tabla indica el balance energético para las fuentes luminosas más comunes, en donde los valores son ordenes aproximados, ya que como se verá más adelante este balance depende de una serie de otros factores.

<b>Tabla 1.</b> Distribución de la energía emitida en la radiación de distintas fuentes luminosas. (Fuente: CEI, 1996)				
<i>Tipo de fuente</i>	<i>% de radiación visible</i>	<i>% de radiación UV</i>	<i>% de radiación IR</i>	<i>Conducción y convección</i>
Incandescente	5,75	0,25	75	19
Fluorescente	28	0,5		71,5
Mercurio halogenado	24	1,5	24,5	50
Mercurio de alta presión	16,5	4	15	64,5
Sodio de baja presión	31		25	44
Sodio de alta presión	40,5		3,5	56

La tabla 1 muestra que sólo una parte de la energía entregada se convierte en radiación visible.

### *Colorimétricas*

Las características colorimétricas se refieren a la Temperatura de Color ( $T_c$ ) y al Índice de Rendimiento de Color (IRC), magnitudes ya explicadas en el Capítulo 2: *Luz, Color y Visión*.

La *Temperatura de Color*, expresada en K para las lámparas incandescentes, está estrechamente relacionada con la temperatura del cuerpo incandescente, ya que es una fuente que emite un espectro continuo, similar al de un cuerpo negro. Se define como la temperatura absoluta del cuerpo negro cuya radiación tiene su misma cromaticidad.

En cambio para el caso de fuentes luminosas de descarga, ya que la radiación emitida es un espectro discreto (bandas y líneas), la apariencia de color se describe en términos de la Temperatura de Color Correlacionada, correspondiente a la temperatura de color del cuerpo negro cuyas coordenadas están más próximas en el diagrama de cromaticidad de la CIE 1931.

Respecto del aspecto cromático que proporciona una fuente al iluminar un objeto, el mismo se indica por el *Índice de Rendimiento de Color* (IRC), ya descrito en el capítulo *Luz, Color y Visión*. Puesto que este índice es bajo en las lámparas de descarga, por su espectro de emisión discreto, se han buscado diferentes formas de mejorar este valor: combinar dos fuentes con diferentes distribuciones espectrales dentro de una misma lámpara; incrementar la presión del gas en la descarga; añadir sólidos con el gas de relleno, los cuales se vaporizan con el calor generado en la descarga y emiten radiación con espectros de bandas más extensos o hasta casi continuo; depositar polvos fluorescentes sobre la capa interna del tubo de descarga.

El resultado de estas mejoras es variable ya que por ejemplo el aumento de la presión del gas en la descarga disminuye su eficacia respecto de sus correspondientes de baja presión por las pérdidas térmicas. Sin embargo las lámparas con aditivos de halogenuros metálicos o con recubrimientos fluorescentes tienen en general mejor eficacia que cuando no lo tienen.

### *Eléctricas*

Una de las diferencias fundamentales entre las lámparas incandescentes y las de descarga es que las primeras tienen una resistencia eléctrica positiva —ley de Ohm— pero con las de descarga ocurre en general lo contrario, debido a que durante la descarga cada electrón libera nuevos electrones. Precisamente la compensación de este efecto obliga al uso de balastos en el funcionamiento de estas lámparas.

En la presentación de cada lámpara que se incluye más adelante se consideraran las siguientes características eléctricas:

*Arranque.* Cuando una lámpara de descarga está desconectada, la resistencia interna del tubo de descarga es demasiado alta como para que la lámpara arranque con la tensión nominal de la red. Las maneras de resolver este problema son: incorporación de un electrodo auxiliar; precaldeo de los electrodos hasta el punto de emisión termoiónica; aplicación un pulso de tensión sobre los electrodos.

*Periodo de encendido.* En muchas lámparas de descarga, los elementos emisores se encuentran en estado sólido o líquido cuando la lámpara está fría. En estas condiciones, la tensión de vapor es insuficiente para su encendido. Éste es el caso de las lámparas de mercurio, sodio y halogenuros metálicos. El encendido de estas lámparas se logra mediante un gas auxiliar que se caracteriza por tener una tensión de ruptura muy baja.

*Reencendido.* En algunas lámparas de descarga de alta presión, la presión del gas en el tubo de descarga es más alta cuando la lámpara está funcionando que cuando está fría o apagada. Si se la apaga, los electrones libres en la descarga desaparecen casi inmediatamente pero la presión del gas se mantiene hasta que la lámpara se enfría, proceso que puede llevar algunos minutos. Dado que la resistencia de un gas no ionizado aumenta gradualmente con la presión, la tensión de pico del arrancador puede ser insuficiente para reencender una lámpara caliente.

### *Duración*

*Vida.* El tiempo de vida de una lámpara depende de un sinnúmero de factores, por lo que sólo es posible estimar un valor medio de vida sobre la base de una muestra representativa. Su valor depende de la cantidad de encendidos, de la posición de funcionamiento, de la tensión de alimentación y de factores ambientales tales como temperatura y vibraciones. Las diferentes formas de definir la vida son:

- Vida individual: es el número de horas de encendido después del cual una lámpara queda inservible, bajo condiciones específicas.
- Vida promedio o nominal: tiempo transcurrido hasta que falla el 50% de las lámparas de la muestra bajo condiciones específicas.
- Vida útil o económica: valor basado en datos de depreciación, cambio de color, supervivencia como así también el costo de la lámpara, precio de energía que consume y costo de mantenimiento. Puede definirse como el número de horas durante el cual puede operar correctamente una lámpara hasta que se hace necesario su reemplazo.
- Vida media: valor medio estadístico sobre la base de una muestra.

*Depreciación del flujo luminoso.* El flujo luminoso de una lámpara corresponde al valor medido luego de 100 horas de funcionamiento. Este valor puede disminuir con el tiempo de funcionamiento como consecuencia del ennegrecimiento del bulbo: ya sea por evaporación del tungsteno en las lámparas incandescentes, en las lámparas de descarga a causa de la dispersión del material del electrodo que se deposita sobre las paredes del tubo de descarga; agotamiento gradual de los polvos fluorescentes, en el caso de lámparas con recubrimientos fluorescentes como fluorescentes y mercurio de alta presión.

A pesar de que la definición de la vida promedio o nominal es la misma cualquiera sea el caso, la manera de medirla difiere según la fuente luminosa. Así, en el caso de una lámpara incandescente la vida nominal se mide sobre una muestra que opera *continuamente* a una tensión constante hasta que el 50% de las lámparas fallan. En el caso de las lámparas fluorescentes, al igual que en las otras de descarga, la vida nominal se mide bajo un ciclo de

funcionamiento determinado y bajo condiciones específicas de acuerdo al caso. Hoy se sabe que menores ciclos de operación resultan en un menor valor medido de vida nominal en la mayoría de las lámparas de descarga, por lo que últimamente la vida útil o económica se ha convertido en un parámetro de mayor utilidad. Por ejemplo en el caso de lámparas de mercurio halogenado, la vida útil es alrededor del 60 a 70% de su vida nominal teniendo en cuenta su depreciación luminosa y cambio de color. Por ejemplo, si la vida nominal es de 10000 h, su vida útil es de 6000 h, ya que a esa altura la lámpara emite el 70% de su intensidad luminosa inicial. Esto muestra que el término vida nominal provee una información parcial sobre la vida de una lámpara.

La tabla 2 compara la vida nominal de diferentes fuentes y el porcentaje de depreciación luminosa en lm al 50% y 100 % de su vida nominal.

<b>Tabla 2.</b> Vida nominal y depreciación luminosa para distintos tipos de lámparas. (Fuente: Narendran et al., 2000)			
Fuente de luz	Vida nominal	% depreciación luminosa al 50% de la vida nominal	% depreciación luminosa al 100% de la vida nominal
Incandescente	1.000	88	83
Incandescente halogenada	2.000	98	97
Fluorescente T8	20.000	85	75
Mercurio	24.000	75	65
Mercurio halogenado	15.000	74	68
Sodio de alta presión	24.000	90	72

Según esta tabla una lámpara de mercurio de alta presión tiene un 65% de su intensidad luminosa inicial al final de su vida nominal, en cambio en las lámparas incandescentes la variación en la depreciación luminosa es menor.

En la tabla 3 se muestran las características fotométricas, colorimétricas y de duración para las lámparas más representativas de cada tipo.

**Tabla 3.** Características fotométricas, colorimétricas y de duración para las lámparas más representativas de cada tipo. (Fuente: IES, 2000)

Lámpara	Potencia (W)	Temperatura de color (K)	Eficacia (lm/W)	Índice de rendimiento de color	Vida útil (h)	Tiempo de encendido (min)
Incandescente convencional	100	2700	15	100	1000	0
Inc. halógena lineal	300	2950	18	100	2000	0
Inc. halógena reflectora	100	2850	15	100	2500	0
Inc. halógena de baja tensión	50	3000 - 3200	18	100	3000	0
Fluorescente lineal T5 alta frecuencia	28	3000 - 4100	104	85	12000	0
Fluorescente lineal T8 alta frecuencia	32	3000 - 4100	75	85	12000	0
Fluorescente compacta	36	2700 -4000	80	85	12000	0 -1
Fluorescente compacta doble	26	2700 -4100	70	85	12000	0 -1
Vapor de mercurio	125	6500	50	45	16000	< 10
Mercurio halogenado (baja potencia)	100	3200	80	75	12000	< 5
Mercurio halogenado(alta potencia)	400	4000	85	85	16000	< 10
Sodio de alta presión (baja potencia)	70	2100	90	21	16000	< 5
Sodio de alta presión (alta potencia)	250	2100	104	21	16000	< 5

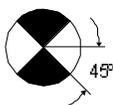
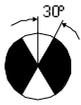
*Otros factores que influyen sobre el funcionamiento*

*Temperatura ambiente.* Las lámparas se construyen para que trabajen a temperaturas ambientes, es decir entre -30 °C y 50 °C. Sin embargo, debido a que algunas disipan una gran cantidad de calor, su temperatura de trabajo puede ser bastante más alta como es el caso de lámparas dentro de luminarias cerradas.

*Desviaciones de la tensión nominal de red.* Las desviaciones de la tensión nominal de la red afecta tanto a la tensión de la lámpara, su potencia, corriente y flujo luminoso, pero estos efectos varían de acuerdo al tipo de lámpara que se trate.

*Numero de encendidos.* El número de veces que se enciende una lámpara de descarga a lo largo de un tiempo dado es un dato de importancia para determinar su duración, ya que esto afecta a la eliminación de las sustancias emisoras que contienen los electrodos. Por ello es importante definir el ciclo de encendido-apagado con el que se realiza una prueba de duración. Ya que es muy difícil que el ciclo real coincida con el de la prueba, existen discrepancias entre los valores reales y las condiciones de laboratorio.

*Posición de funcionamiento.* La posición de funcionamiento de una lámpara influye sobre la cantidad de luz entregada así como sobre su vida. Los catálogos especifican el flujo luminoso para una posición de funcionamiento vertical y horizontal, pudiéndose calcular para posiciones intermedias. Cuando esta posición no está especificada significa que no es de importancia. La tabla 4 muestra las maneras en que se indica la posición de funcionamiento en los catálogos. El sector angular de color claro, en cada uno de los símbolos de la tabla, indican el valor del ángulo que puede inclinarse la lámpara como máximo.

<b>Tabla 4.</b> Ejemplos indicativos de posiciones posibles de funcionamiento para lámparas.	
<i>Diagrama</i>	<i>Posición de funcionamiento</i>
	Cualquier posición
	Horizontal, inclinada hacia arriba o abajo hasta 45°
	Vertical, inclinada hasta 30° hacia derecha o izquierda.

### 3. Lámparas incandescentes

La lámpara incandescente, desde su invención, ha mejorado sensiblemente en características tales como tamaño, eficacia y vida. A pesar de que hoy en día existen otras lámparas más eficientes, permanece como la fuente dominante para la iluminación en el sector residencial y hasta cierto punto en comercios y para la iluminación decorativa de interiores en general. Esto se debe a su bajo costo inicial, disponibilidad en un gran rango de formas decorativas y por su buena reproducción de color. Oficinas, industrias, edificios públicos, comercios, vehículos han ido adoptando cada vez más lámparas de descarga. Las lámparas incandescentes halógenas han ido reemplazando a las incandescentes convencionales. Por otro lado, la existencia de lámparas fluorescentes compactas de tamaño comparable con las incandescentes y disponibles en una variedad de formas decorativas achica aún más el uso de las lámparas incandescentes. Aunque puede tener todavía algún futuro, la lámpara incandescente común es hoy el símbolo de la iluminación ineficiente.

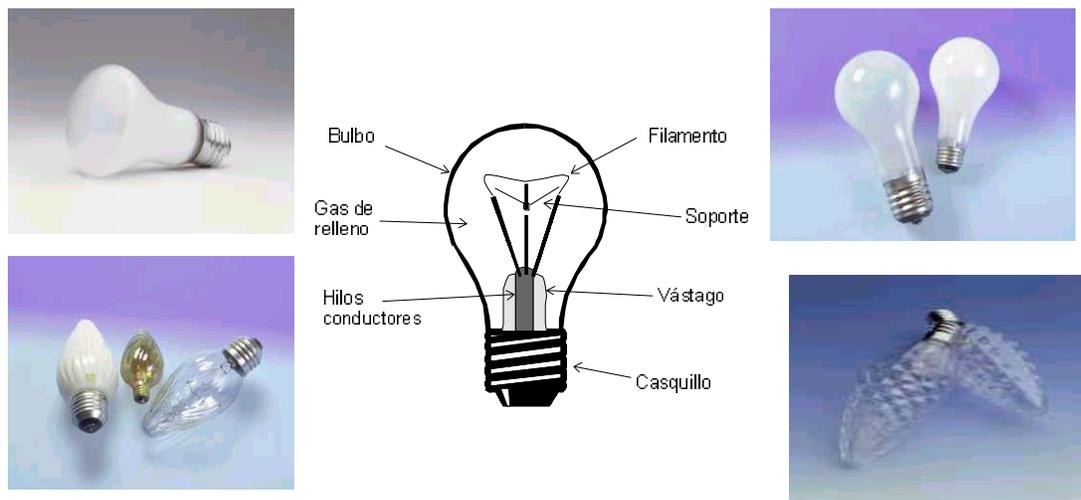
### *Principio de operación de la lámpara incandescente convencional*

Cuando una corriente eléctrica es suministrada a un alambre, parte de esta energía se transforma en energía radiada por la superficie del filamento (infrarroja, visible y ultravioleta), de acuerdo al fenómeno de incandescencia ya explicado. Si el bulbo de una lámpara incandescente se llena de gas, hay pérdidas de energía por convección, lo que no ocurre si el filamento está en vacío. Por otro lado, la energía suministrada se transforma también en calor por conducción en los alambres que soportan al filamento. Es así que lámparas que trabajan en lugares con vibraciones o que están sujetas a golpes tienen soportes extras para el filamento, y por tanto menor eficacia.

El balance de energía (tabla 1) depende de varios factores: temperatura del gas, presión de vapor del gas, tipo de gas usado, longitud y forma del filamento y diámetro de los soportes. Este balance de energía determina fundamentalmente características de la lámpara tales como eficacia y vida.

### **3.1. Componentes de una lámpara incandescente**

La Figura 6 muestra el *esquema de construcción* típico de una lámpara incandescente convencional. Cada una de sus partes se describen a continuación.



*Figura 6: Componentes de una lámpara incandescente. Lámparas de diferentes formas*

#### *Bulbo*

Es lo que determina la forma de la lámpara, existiendo una enorme variedad de ellas. En general estas lámparas tienen formas de pera u hongos. Por lo general, estos bulbos se construyen con vidrio de diferentes tipos. En la mayoría de los casos están hechos de sodocalcio o vidrio blando y en otros casos, en los que deben soportar altas temperaturas, se usa sílice o sílice puro fundido (cuarzo). En muchos tipos de bulbos se aplica una cubierta interior, consistente en una capa de polvo de sílica blanca que produce una moderada

difusión de la luz con una reducción de la misma desde el 2% hasta el 35% debido al fenómeno de absorción.

Las lámparas incandescentes también pueden ser coloreadas. El color se logra mediante una capa exterior, o interior, o con cerámicos mezclados con el vidrio o con un plástico transparente que cubre el bulbo. El hecho de que sólo se aprovecha una parte de la luz emitida por el filamento, las lámparas de color tienen eficacia luminosa aún menor que las incandescentes comunes.

### *Casquillo*

Los casquillos o bases de estas lámparas tienen variadas formas. Hay dos tipos de casquillos, de rosca y bayoneta –(dos patas), por ejemplo E 27 es un casquillo de rosca de diámetro 27 mm. Cuando se necesita una posición determinada con relación a sus componentes ópticos, como el caso de un proyector, la base debe proveer una ubicación exacta, en este caso el casquillo es de tipo bayoneta.

### *Filamento*

La eficacia de estas fuentes de luz depende de la temperatura del filamento, dado que cuanto mayor es la temperatura del filamento mayor es la proporción de energía radiada dentro del espectro visible. Como se indica en la Figura 3.3, sólo una pequeña porción de la radiación total está en la región visible. Cuando la temperatura aumenta, la radiación para longitudes de onda cortas se incrementa más rápidamente que para longitudes de onda largas. Por lo tanto la radiación en el visible aumenta más rápidamente que en la región infrarroja, mejorando la eficacia de la lámpara.

Pero por otro lado a mayor temperatura del filamento, mayor debe ser el punto de fusión del material elegido para el filamento. Sin embargo, aparte de su punto de fusión, es importante también que el mismo posea una baja presión de vapor, alta ductilidad, emisividad selectiva y adecuada resistencia eléctrica.

El tungsteno ha mostrado buenas propiedades como elemento de construcción del filamento. Su baja presión de vapor y alto punto de fusión (3382°C) permite operar a altas temperaturas y como consecuencia se consigue mayor eficacia. Cuanto más cerca es la temperatura del filamento a la temperatura de fusión, más alta es la proporción de energía visible radiada y, por tanto mayor su eficacia luminosa, pero, por otro lado mayor es la velocidad de evaporación del filamento en vacío, y por lo tanto su vida es menor, de aquí el compromiso que deberá existir entre eficacia luminosa y vida para una dada potencia de la lámpara.

El material del filamento evaporado se transfiere ya sea a las partes adyacentes al filamento o al soporte de la estructura, o puede difundirse a través del gas y luego transportarse por las corrientes convectivas. El mismo se condensa sobre todo en la superficie del bulbo formando una capa metálica que incrementa a través de la vida y absorbe cada vez más la radiación emitida, reduciendo así su eficacia.

Ya que la pérdida de energía a través del gas que rodea al filamento es proporcional a la longitud del filamento e inversamente proporcional al diámetro, esta pérdida se reduce si al filamento se le da una forma de espiral con un diámetro de 2 a 6 veces el diámetro del alambre. El uso de filamentos doblemente enrollados junto a un gas inerte mejora notablemente la eficacia de estas lámparas.

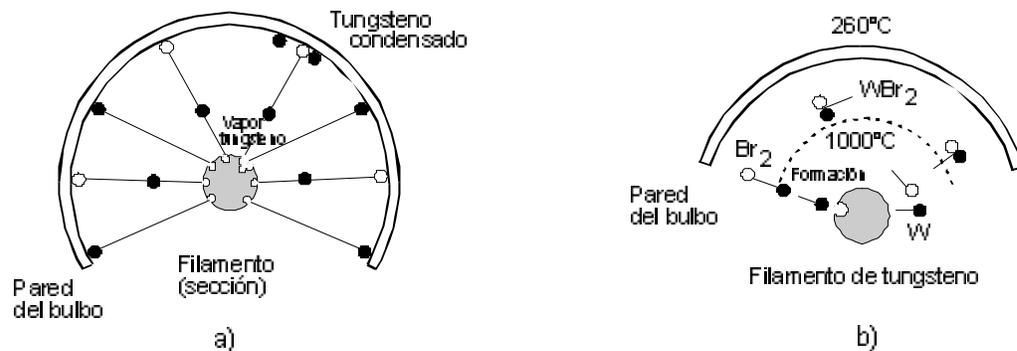
### Gas de relleno

Alrededor de 1911 se realizaron intentos para reducir la velocidad de evaporación del filamento, mediante el llenado del bulbo con algún gas. A pesar de que el gas reduce el ennegrecimiento, la presencia del gas incrementa la pérdida de calor, por convección, disminuyendo, como ya se dijo, su eficacia. Si el bulbo en cambio se llena con un gas no-reactivo y de baja conductividad de calor que reduzca la velocidad de evaporación, y por tanto el ennegrecimiento del bulbo, se puede mejorar la vida y la eficacia de la lámpara. Para ello se usan gases inertes teniendo en cuenta sus características no-reactivas con las partes internas de la lámpara. Aunque las lámparas de vacío se siguen fabricando todavía, para potencias menores de 40W, la mayoría de las lámparas incandescentes contienen un gas de relleno. Normalmente consiste en una mezcla de argón y nitrógeno, cuya proporción depende de la aplicación a que se destina y de la tensión de la lámpara.

### Lámparas incandescentes halógenas

La necesidad de mejorar la relación eficacia-vida en las lámparas incandescentes convencionales llevó a la incorporación de un gas haluro aditivo —bromo, cloro, flúor y yodo— el cual produce un ciclo regenerativo del filamento. El termino halógeno es el nombre que se da a esta familia de elementos electro-negativos. El yodo fue usado en las primeras lámparas pero hoy en día se usa el bromo.

En la figura 7 a) se muestra el proceso de evaporación del tungsteno para una lámpara incandescente convencional en la que el tungsteno evaporado se deposita en el bulbo. La figura 7 b) corresponde al ciclo halógeno para una lámpara incandescente halógena para el caso en que el aditivo es bromo en forma de compuesto orgánico o bromuro de metileno ( $\text{CH}_2\text{Br}_2$ ). El vapor de tungsteno se combina con el halógeno para formar bromuro de tungsteno ( $\text{WBr}_2$ ), el cual permanece en estado gaseoso en vez de depositarse en las paredes de la ampolla. Cuando una molécula de bromuro de tungsteno se acerca al filamento caliente se descompone en Tungsteno (W) y  $2\text{Br}$ , dando lugar a que el tungsteno se redeposite sobre el filamento, reiniciándose el ciclo.



*Figura 7. a) Una lámpara incandescente convencional y b) Ciclo halógeno en una incandescente halogenada*

Aun con esta mejora introducida en las lámparas halógenas el tungsteno no siempre se deposita en aquellos lugares de donde se evaporó, por lo que la vida de estas lámparas tiene un valor finito.

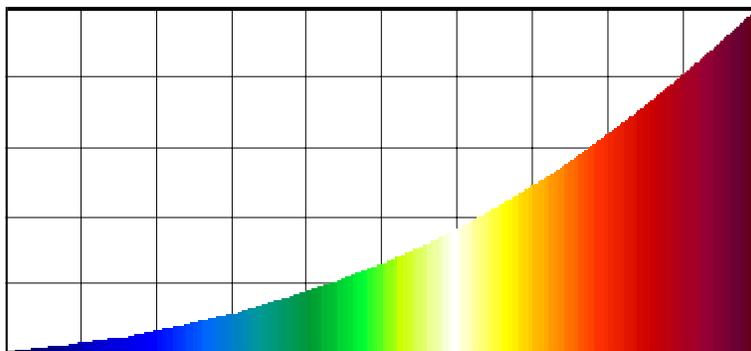
Las altas temperaturas de las paredes de la ampolla (una temperatura mínima de la ampolla de 260°C), necesarias para mantener el ciclo halógeno, exige un tamaño reducido de la misma. Como consecuencia de esto, las temperaturas son elevadas y por tanto la ampolla se construye de un material mas resistente como es el cuarzo. Debido a la forma más compacta de estas lámparas, la presión admisible del gas puede ser mayor, con lo cual se reduce su velocidad de evaporación, y la posibilidad de usar un gas de mayor densidad, tal como el kriptón o xenón en vez de argón o nitrógeno, aunque los mismos son de mayor precio. Este proceso lógicamente aumenta su vida.

Estas lámparas generan mayor cantidad de ultravioleta (UV) que las incandescentes convencionales, debido a la mayor temperatura del filamento. La cantidad de UV emitida está determinada por el material del bulbo, como es el caso del cuarzo. Por tanto en las aplicaciones donde es crítica esta radiación, caso de obras de arte, el uso de un filtro es casi obligatorio. Especial cuidado debe tenerse cuando se usan lámparas con una temperatura de color por arriba de 3100K, dado que la radiación emitida tanto en el ultravioleta como en las bajas longitudes de onda del visible aumenta con la temperatura creando una fuente potencial de daño.

### **3.2. Características de funcionamiento**

#### *Características cromáticas*

El espectro emitido por una lámpara incandescente es continuo (ver Figura 8). El índice de reproducción de color es de 100, por definición.



*Figura 8. Espectro de emisión visible de una lámpara incandescente*

#### *Vida, eficacia y depreciación del flujo luminoso*

Una lámpara incandescente halógena posee una eficacia luminosa entre 17 a 25 lm/W, como consecuencia de la mayor temperatura a que trabaja el filamento, frente a una convencional de 12 a 15 lm/W.

En el caso de lámparas incandescentes, la vida de una lámpara está determinada por la rotura del filamento. La vida de las halógenas es del orden de 2000 horas frente a 1000 h en las convencionales. Algunas lámparas experimentan un rápido deterioro por disipación térmica, según la posición de funcionamiento tales como las incandescentes halógenas de cuarzo lineales, ya que una parte del filamento trabaja a mayor temperatura que el resto.

#### *Desviaciones de la tensión nominal de red*

La temperatura del filamento esta determinada por la tensión aplicada (V). La corriente (I), la potencia (P), el flujo luminoso ( $\phi$ ) y la vida son todas variables dependientes de la temperatura y, por tanto de la tensión aplicada.. La Figura 9 muestra la variación porcentual de, la potencia, la corriente, la eficacia y el flujo luminoso en el eje de ordenadas de la derecha, con la variación porcentual de la tensión nominal de red mientras, en el eje ordenado de la izquierda se muestra la vida útil de una lámpara incandescente convencional. La relación más importante de éstas es la dependencia de la vida: a medida que la variación de la tensión aumenta la vida disminuye exponencialmente. Por ejemplo una variación del 5% por arriba de la tensión nominal puede reducir la vida a la mitad, mientras una reducción en la misma cantidad puede casi duplicar su vida, sin embargo la eficacia luminosa sólo cae en un 10%, en el último caso.

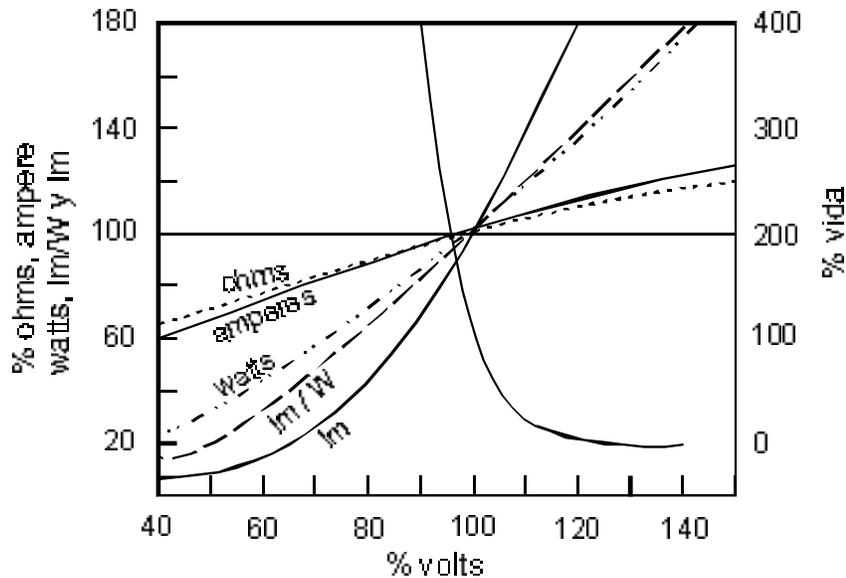


Figura 9. Curvas típicas de variación % de la potencia (en W), vida (en horas), eficacia (en lm/W) y flujo luminoso (en lm) para una lámpara incandescente convencional con la variación % de la tensión (en V).

### Aplicaciones

Las lámparas incandescentes tienen amplio uso en la iluminación del hogar, por su color cálido de luz, su reducido peso, dimensiones y, particularmente por su bajo costo inicial, además de que no necesitan equipos auxiliares para funcionar. La baja eficacia y corta vida útil de las lámparas incandescentes frente a las alternativas disponibles, limitan las posibles aplicaciones de las lámparas incandescentes. El costo energético de operación es muy alto (ver Capítulo 13: Análisis Económico de la Iluminación Eficiente). Sólo se las recomiendan para locales de poco uso o de alta intermitencia de uso, por ejemplo en sótanos, garajes, baños y placares residenciales. No se aconsejan para iluminación donde sea necesario altos niveles de iluminancia o de uso prolongado.

*Incandescentes halógenas:* debido a sus menores dimensiones, mayor vida y eficacia ofrecen ciertas ventajas respecto a las incandescentes convencionales. Son muy útiles en aquellos lugares donde se necesiten luminarias de pequeñas dimensiones o, para iluminación de acento, dado su mejor control óptico respecto de las convencionales o cuando es necesario un encendido rápido como el caso de luminarias de seguridad, o para iluminación de vehículos, sistemas de proyección, iluminación de estudios de televisión, teatro, cine, etc. Sin embargo, la eficacia es muy inferior a las lámparas de descarga, por lo cual no debe utilizarse para la iluminación general de espacios con uso prolongado.

Hasta que haya una lámpara de bajo costo y mejor rendimiento, las lámparas incandescentes seguirán cumpliendo una función importante para la iluminación.

## 4. Lámparas de descarga en gas

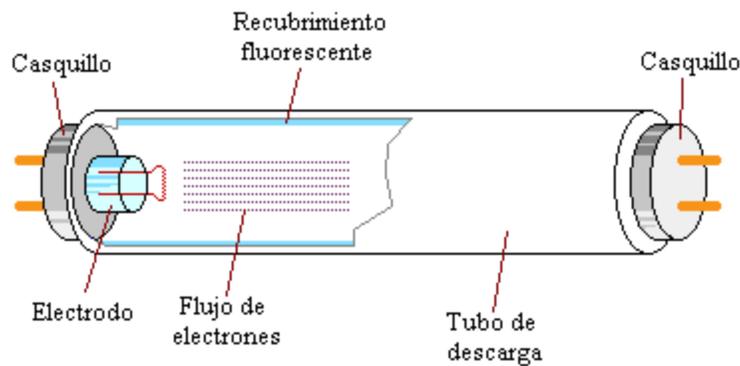
Existen varios tipos de lámparas de descarga en gas, las cuales se describen a continuación.

## 5. Lámparas fluorescentes

La mayor parte de la luz artificial hoy en día se produce en lámparas fluorescentes. Sus ventajosas características, tales como la gran variedad de formas y tamaños disponibles, la flexibilidad en sus propiedades de reproducción de color, el buen desempeño en términos de conversión de potencia eléctrica en luz, la emisión de luz difusa y la comparativamente baja luminancia que presentan, hacen de esta lámpara una fuente de luz adecuada para numerosas aplicaciones.

### *Principio de funcionamiento*

Las lámparas fluorescentes pertenecen a la categoría de lámparas de descarga en gases a baja presión. Están constituidas básicamente (Figura 10) por un bulbo o tubo de descarga con vapor de mercurio y recubierto de polvos fluorescentes (denominados “fósforos”) en la pared interior del tubo para la conversión de radiación UV en visible, un par de electrodos sellados herméticamente en los extremos del tubo y los casquillos que proporcionan la adecuada conexión eléctrica a la fuente de suministro de energía.



*Figura 10: Esquema de una lámpara fluorescente.*

La descarga eléctrica en una atmósfera de mercurio a baja presión es convertida principalmente en radiación UV. Típicamente alrededor del 63% es convertida en radiación UV-C en longitudes de onda de 185.0 nm y en 253.7 nm. Una pequeña cantidad de energía, aproximadamente el 3%, es convertida directamente en radiación visible, predominantemente en las longitudes de onda de 405 nm (violeta), 436 nm (azul), 546 nm (verde) y 577 nm (amarillo). El efecto de estas mezclas de cuatro colores le da a la descarga un color azul pálido. El resto de la energía es disipada en forma de calor, en los electrodos y en la descarga, como consecuencia de los choques entre iones y átomos del gas.

La cantidad de radiación producida en las dos líneas de UV depende principalmente de:

- la presión de vapor del mercurio
- el gas auxiliar

- la densidad de corriente
- las dimensiones del tubo de descarga.

La emisión ultravioleta tiene la capacidad de estimular los polvos fluorescentes que recubren el interior del tubo en el que se produce la descarga, y que convierten la radiación UV en luz visible, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 11.

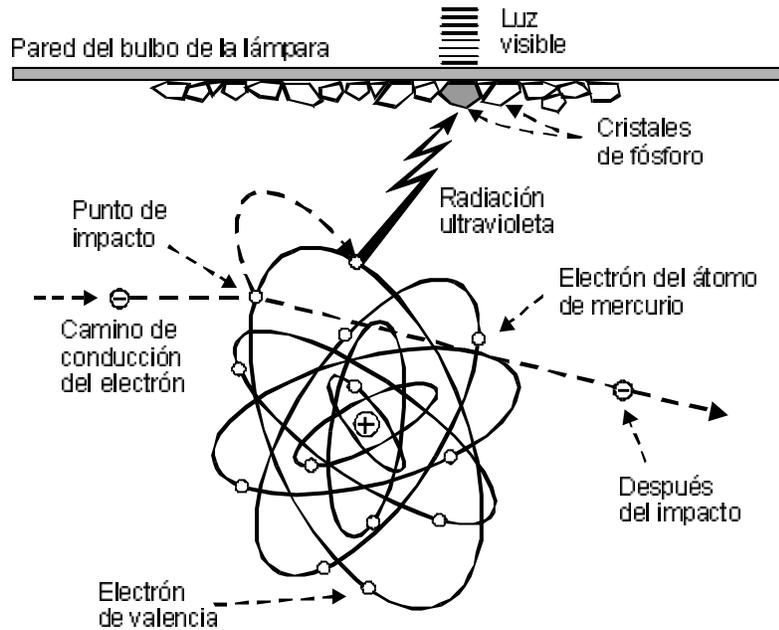


Figura 11: Conversión de radiación en la capa fluorescente

## 5.1. Componentes de una lámpara fluorescente

### Bulbo

Las lámparas fluorescentes se construyen con bulbos tubulares rectos cuyo diámetro varía entre aproximadamente 12 mm (0,5 pulgadas), designados T4 (porque su diámetro equivale a 4/8 de pulgada) y 54 mm (2,125 pulgadas) designados T17. Generalmente su longitud varía entre 100 mm y 2440 mm (4 y 96 pulgadas). La letra de la designación indica la forma del bulbo. En este caso, T por “tubular”; también puede ser C por “circular” o U indicando que el bulbo ha sido doblado sobre sí mismo. También existen lámparas de menor diámetro, de extremo único, de dos, cuatro o seis tubos paralelos, formadas por bulbos en forma de U conectados por pequeños tubos en sus extremos, conocidas como lámparas fluorescentes compactas (Figura 12).



*Figura 12. Lámparas fluorescentes lineales, circulares y compactas, de diferentes potencias y tipos de casquillos*

### *Electrodos*

Los electrodos se diseñan para operar ya sea como cátodos “fríos” o como cátodos “calientes”.

Las lámparas que emplean cátodo frío operan, por lo general con una corriente del orden de unos pocos cientos de mA, con un alto valor de caída de tensión catódica (tensión requerida para crear el flujo de corriente de electrones e iones), algo superior a 50 V.

Los electrodos de cátodo caliente se construyen generalmente con un único alambre de tungsteno o con un alambre de tungsteno con otro enrollado a su alrededor, produciendo así dobles o triples arrollamientos. Estos arrollamientos se cubren con una mezcla de óxidos para reforzar la emisión de electrones favoreciendo el encendido. Durante la operación de la lámpara el electrodo alcanza una temperatura de alrededor de 1100°C. En este punto, la combinación alambre/recubrimiento emite grandes cantidades de electrones para una caída de tensión catódica relativamente baja, entre 10 y 12 V. La corriente normal de operación

de las lámparas de cátodo caliente es del orden de 1.5 A. Como consecuencia de la menor caída de tensión catódica en este tipo de lámparas, se obtiene un funcionamiento más eficiente, por lo que la mayoría de las lámparas fluorescentes se diseñan para operar con cátodo caliente.

### *Gas de relleno*

La operación de las lámparas fluorescentes depende de la producción de una descarga entre los dos electrodos sellados en los extremos del bulbo. La presión del mercurio se mantiene aproximadamente a 1.07 Pa, valor que corresponde a la presión de vapor del mercurio líquido a 40°C. Además del mercurio, el bulbo contiene un gas o una mezcla de gases inertes a baja presión (entre 100 y 400 Pa) para facilitar el encendido de la descarga. Las lámparas fluorescentes convencionales emplean argón o una mezcla de argón, neón y xenón.

### *Fósforos*

La primera lámpara con descarga de mercurio que poseía una cubierta de fósforo para convertir el UV en visible se hizo en el año 1935 por la compañía General Electric en USA.

Como se indicó anteriormente, la radiación emitida, la cual define el color característico de una lámpara, tiene una longitud de onda mayor que la radiación de la excitación y depende de la naturaleza del fósforo usado y no de la longitud de onda de radiación excitadora.

Los fósforos usados en las lámparas son compuestos inorgánicos de alta pureza con partículas de tamaño mediano, del orden de 10 µm. Son generalmente óxidos o compuestos oxi-haluros, tales como fosfatos, aluminatos, boratos y silicatos. Además estos fósforos contienen iones activadores, que son deliberadamente agregados en una adecuada proporción.

La tabla 5 muestra los fósforos más comunes usados y el pico de longitud de onda en el que emiten, con el color de la luz percibida.

<b>Tabla 5. Polvos fluorescentes típicos</b>	
<i>Nombre del compuesto</i>	<i>Color</i>
<b>Haluros</b>	
Halofosfato de calcio	Blanco (480nm, 580nm)
<b>Trifósforos</b>	
óxido de itrio + trifósforo de europio	Rojo-naranja (611nm)
aluminato de magnesio, cesio y terbio	Verde (543 nm)
fosfato de lantano + fosfuro de cesio y terbio	Verde (544 nm)
borato de magnesio y gadolinio + fosfuro de cesio y terbio	Verde (545nm)
aluminato de magnesio y bario + fosfuro de europio	Azul (450nm)
Cloroapatita de estroncio + fosfuro de europio	Azul (447nm)

<b>Fósforos de lujo</b>	
Estroncio verde, azul	Verdoso (480nm, 560nm)
Estroncio rojo	Rojizo (630nm)

Los polvos fluorescentes de halofosfato de calcio combinan dos bandas de emisión de colores complementarios en un solo fósforo. Debido a que las dos bandas complementarias de color en los fósforos anteriores no cubren toda la región visible y en particular son deficientes en la región roja del espectro, los colores son distorsionados bajo la luz de estas lámparas en comparación con su apariencia bajo la luz del sol. Para mejorar el índice de rendimiento de color, se usan los fósforos de lujo. En particular el estroncio activado es usado para proveer una banda ancha de emisión en el rojo de 620 a 630 nm. Sin embargo, debido a la banda ancha de emisión, que se extiende fuera del rango visible, y por su baja eficiencia cuántica (relación entre la cantidad de fotones absorbidos y emitidos) estas lámparas tienen alrededor de sólo 2/3 del flujo luminoso respecto de las fluorescentes convencionales anteriores con halofosfato.

Alrededor de la década del 70 la industria de la iluminación logra una combinación de fósforos de tal modo que las lámparas emitían un espectro con tres bandas angostas en 610 nm del rojo, 545 nm del verde y 450 nm del azul. Estas longitudes de onda están cerca de los picos de la función triestímulo de la CIE 1931 usadas para definir el espacio de color. Esto hizo pensar que era importante tener una banda de emisión angosta en el rojo cerca de 610 nm. Si la emisión del rojo es desplazada hacia longitudes de onda mayores o ensanchada, el rendimiento de color mejora pero la eficacia luminosa disminuye. Si es desplazada hacia menores longitudes de onda el rendimiento de color cae abruptamente. Esto significa que existe mayor flexibilidad en la elección de las bandas de emisión del azul o el verde. Con el descubrimiento en los años 70 de los fósforos con tierras raras, se logró mejorar estas emisiones, como se muestra en la tabla 5.

Tan importante como su alto rendimiento de color es su habilidad para mantener su alta eficacia durante la vida de la lámpara. Los fósforos de halofosfatos tienen un anticipado daño en las cortas longitudes de onda de 185nm del UV y en el final de su vida se ven afectados por las interacciones del mercurio con el sodio del vidrio.

Las mejoras logradas con los trifósforos activados con tierras raras bajo condiciones de altas densidades de corriente de la descarga permitieron el desarrollo de las fluorescentes compactas. La mayor desventaja de los fósforos activados con tierras raras es su costo, aunque en la actualidad han bajado drásticamente.

## **5.2. Características de funcionamiento**

### *Eficacia luminosa*

La eficacia de una lámpara fluorescente depende de un gran número de factores: potencia, dimensiones, construcción del electrodo, tipo y presión del gas, propiedades de la capa de fósforo, tensión de suministro y temperatura ambiente. Por ejemplo, a medida que se incrementa el diámetro del tubo de descarga crece la eficacia de la lámpara hasta alcanzar

un máximo, más allá del cual comienza a decrecer. La longitud del tubo también influye sobre la eficacia, de modo que cuanto mayor es la longitud, más alta es la eficacia.

Es claro que la capa fluorescente es el factor que más contribuye a la eficacia de la lámpara, es así que si la lámpara no tuviera recubrimiento de fósforo, su eficacia sería de 5 lm/W. Los fósforos actuales permiten elevar este valor hasta 100 lm/W.

La eficacia luminosa está influenciada por la distribución espectral de la luz, cuanto más elevada es la proporción de radiación en aquellas bandas de energía a las que el sistema visual humano es más sensible mejor será su eficacia.

### *Características cromáticas*

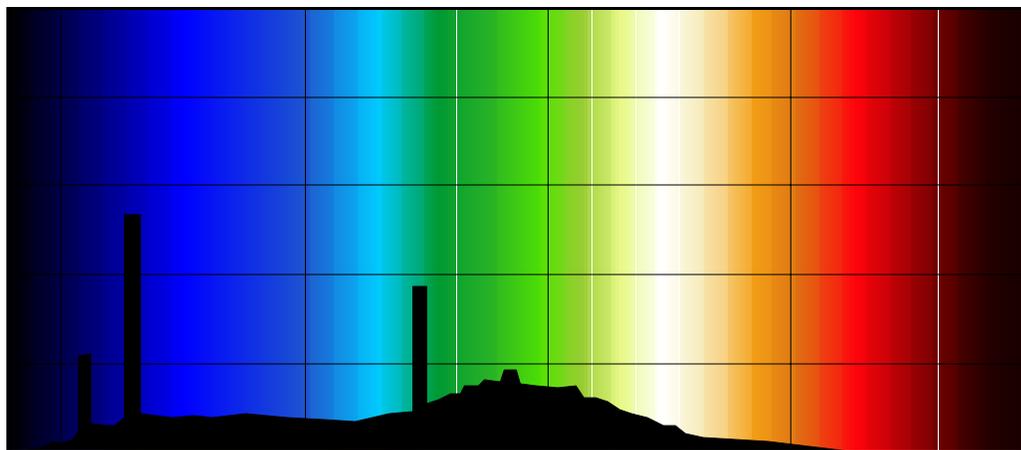
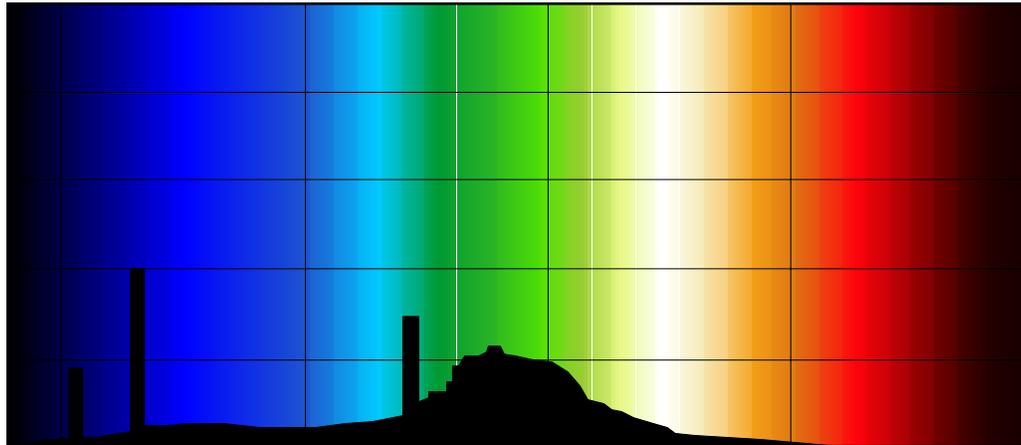
El color de una lámpara fluorescente está determinada por el fósforo usado. Como la curva de sensibilidad del sistema visual humano indica que su máxima sensibilidad se encuentra en 555 nm, una mayor eficiencia se lograría si los fósforos convierten la radiación UV en este rango. Sin embargo esta luz sería de un color muy verde e inaceptable para iluminación. La presencia de tres colores primarios —rojo, verde y azul— en proporciones correctas es esencial para alcanzar una luz blanca con buenas propiedades de reproducción de color por lo que existe un compromiso entre ésta y la eficacia luminosa. En la Figura 13 se muestran espectros de emisión de lámparas fluorescentes con diferentes índice de reproducción de color.

La tabla 6 muestra una clasificación de estas lámparas a partir de la que sugiere la Comisión Internacional de Alumbrado (CIE), de acuerdo a la apariencia de color y su temperatura de color correlacionada

<b>Tabla 6.</b> Apariencia de color de lámparas fluorescentes (adaptada de CIE Publicación N° 29.2, 1986)	
<i>Apariencia de color</i>	<i>Temperatura de color (K)</i>
Blanco cálido	3000
Blanco	3500
Blanco frío	4200
Luz día	6500

La tabla 7 establece además una clasificación de la lámparas, agrupándolas en distintos grados de reproducción cromática, a partir de la sugerida por la CIE.

<b>Tabla 7.</b> Clasificación de lámparas fluorescentes de acuerdo a su índice de reproducción cromática (adaptada de CIE, 1986)	
<i>Grado de reproducción cromática</i>	<i>Índice de rendimiento de color</i>
1 A	> 90
1 B	80 a 90
2 A	70 a 79
2 B	60 a 69
3	40 a 59
4	20 a 39



*Figura 13. Espectros de emisión de lámparas fluorescentes de diferentes índices de rendimiento de color: 55 (arriba) y 72 (abajo).*

En las lámparas fluorescentes la temperatura de la pared del bulbo es un factor crucial, ya que las variaciones de la misma no solamente afectan al flujo luminoso de la lámpara fluorescente, sino también las características cromáticas de la luz emitida por ellas. Puesto que la luz producida por las lámparas fluorescentes tradicionales de halofosfatos tiene dos componentes (uno proveniente de la descarga en una atmósfera de mercurio y el otro debido a la transformación que tiene lugar en el recubrimiento de fósforo), cada uno de los cuales reacciona a los cambios de temperatura en forma independiente del otro, el color resultante para la luz emitida depende de cuál de estos fenómenos prevalece en cada nivel de temperatura. En general, cuando aumenta la temperatura, el color de la luz se desplaza

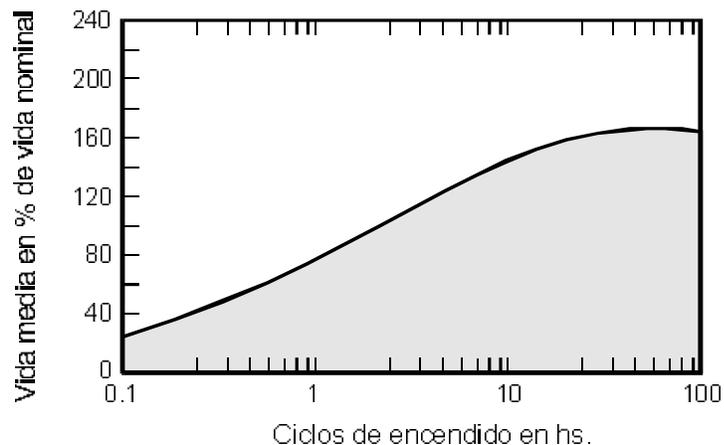
hacia el verde azulado debido a que la propia descarga en el mercurio incrementa en forma considerable su contribución en la región visible del espectro.

### *Vida*

La vida de las lámparas fluorescentes de cátodo caliente está determinada por la velocidad de pérdida del recubrimiento emisor de los electrodos. Cada vez que la lámpara se enciende, algo de este recubrimiento se pierde. Adicionalmente, este recubrimiento también sufre una cierta evaporación, por ello, los electrodos deben diseñarse para minimizar ambos efectos.

El fin de la vida de la lámpara se alcanza cuando uno o ambos electrodos han perdido por completo su recubrimiento, o cuando el recubrimiento restante ha perdido su poder, dejando de emitir.

Debido a las pérdidas de material emisor producidas en cada encendido, la vida de la lámpara de cátodo caliente está directamente influenciada por la frecuencia de encendido. La vida nominal de una lámpara se consigna suponiendo una operación de tres horas por encendido. Los efectos típicos del régimen de encendido sobre la vida de la lámpara se muestran en la Figura 14



*Figura 14. Efecto del ciclo de encendido medido en horas sobre la vida media para las lámparas fluorescentes más conocidas del tipo encendido rápido. Todas las lámparas fluorescentes poseen un comportamiento similar dependiendo del tipo de lámpara y balasto usado*

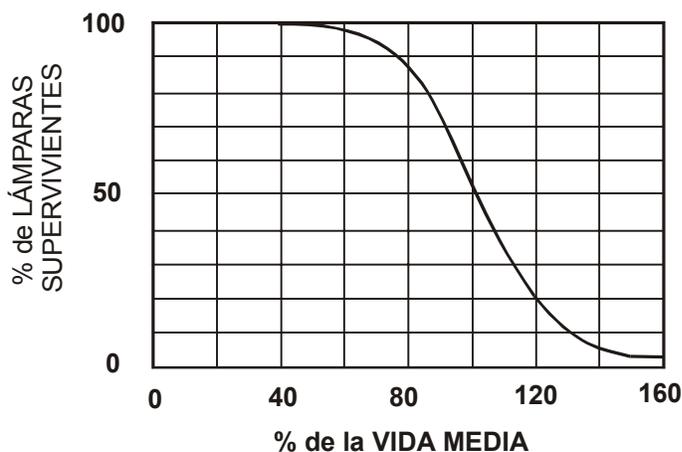
En cambio, la frecuencia de encendido no afecta en forma apreciable la vida de las lámparas de cátodo frío.

Hay, por otra parte, muchas otras condiciones que afectan la vida de las lámparas fluorescentes: las características de diseño de balastos y arrancadores en el caso de los dispositivos precaldeados; balastos que no proporcionan los requerimientos especificados

para el encendido o que no operan la lámpara a los niveles de tensión apropiados; contactos eléctricos inadecuados entre lámpara y zócalo; inapropiado conexionado; etc.

Un factor especialmente importante para la vida de la lámpara fluorescente es la tensión de línea, de modo que si ésta es muy elevada, puede ocasionar encendido instantáneo de las lámparas en circuitos de encendido rápido y precaldeados. Si la tensión de línea es baja, se produce un encendido muy lento de las lámparas de encendido rápido o de encendido instantáneo. Todas estas condiciones afectan negativamente la vida de la lámpara.

La Figura 15 muestra una curva típica del porcentaje de supervivencia de lámparas fluorescentes en función del porcentaje de vida media.

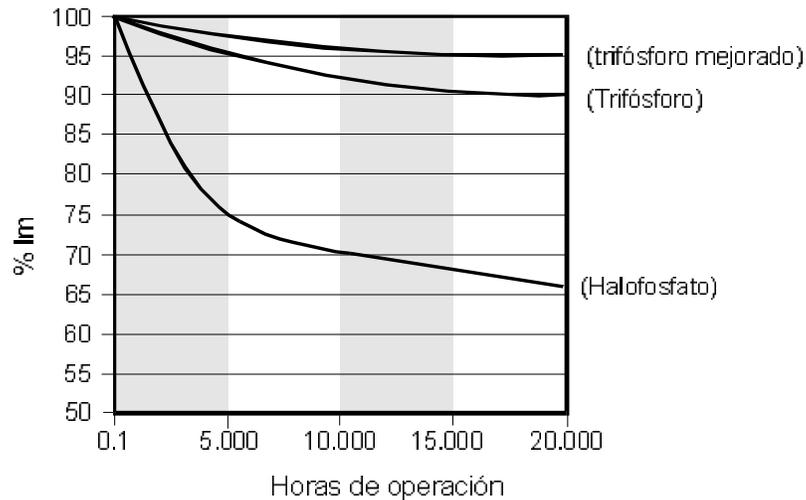


*Figura 15. Mortalidad típica para un gran número de lámparas fluorescentes (ciclo de encendido de 3 horas)*

### *Depreciación luminosa*

El flujo luminoso de la lámpara fluorescente decrece con el tiempo acumulado de operación, debido a la degradación fotoquímica, tanto de los fósforos del recubrimiento interno como del vidrio que forma el bulbo, y a la creciente deposición de elementos absorbentes de luz sobre el cuerpo de la lámpara.

La degradación de los fósforos aumenta con la potencia desarrollada en el arco y disminuye con el incremento del área cubierta por los fósforos. La Figura 16 muestra cómo se modifica la curva de depreciación luminosa para diferentes lámparas fluorescentes. Los trifósforos son más estables que las que contienen halofosfatos. En ocasiones se usa un recubrimiento protector para reducir la degradación de los fósforos, con lo que se reduce el porcentaje de depreciación luminosa de la lámpara.



*Figura 16. Depreciación luminosa en función de las horas de operación (basado en un ciclo de encendido de 3 horas)*

La degradación fotoquímica del vidrio que constituye el bulbo también acrecienta la depreciación luminosa, así como el depósito de material emisoro desprendido de los cátodos en los extremos de los tubos, lo que reduce la transmisión de radiación UV y por lo tanto la estimulación de los fósforos, lo que resulta en una reducción del flujo luminoso proporcionada por la lámpara a medida que ésta envejece.

#### *Influencia de la temperatura*

En las lámparas fluorescentes la temperatura constituye un factor crucial, ya que determina la presión del mercurio contenido en el tubo de descarga.

Una lámpara fluorescente contiene una considerable cantidad de mercurio líquido que es el que se vaporizará para permitir su funcionamiento. El vapor en exceso (por encima de lo que determina la presión de vapor para la correspondiente temperatura) tenderá a condensarse en el punto más frío de la lámpara. Si algún punto dentro del bulbo está significativamente más frío que el resto, todo el mercurio líquido tiene mayor probabilidad de concentrarse allí. La presión de vapor del mercurio en el interior del bulbo dependerá de la temperatura de este punto frío. Ésta, a su vez, estará determinada por las características constructivas de la lámpara, por su potencia, por la temperatura ambiente, por el diseño de la luminaria en la cual esté alojada la lámpara, por la mayor o menor circulación de aire sobre ella, etc.

Los efectos de la temperatura sobre la presión de vapor del mercurio se manifiestan como variaciones en el flujo luminoso y las características cromáticas de la lámpara. Las lámparas que emplean amalgamas de mercurio en lugar de mercurio líquido permiten ampliar el rango útil de temperatura ambiente en el que puede operar, ya que las amalgamas actúan como estabilizadores de la presión de vapor.

Las altas temperaturas ambiente no solamente disminuye el flujo luminoso de las lámparas fluorescentes, sino además pueden cambiar sus características eléctricas y ponerlas fuera de

los rangos de diseño del balasto, lo que permitiría un mayor flujo de corriente que afectaría de manera negativa la vida de la lámpara.

A medida que la temperatura de operación se incrementa, aumentan tanto el flujo luminoso de la lámpara como su consumo de potencia. Sin embargo, esta potencia empieza gradualmente a disminuir cuando la temperatura supera los 32 °C. El flujo luminoso continúa incrementándose más allá de este valor, hasta que la temperatura llega aproximadamente a los 38 °C, punto en el que se inicia un rápido descenso. La eficacia de la lámpara, alcanza su máximo aproximadamente a los 40 °C, como se muestra esquemáticamente en la Figura 17. Dado que las temperaturas dentro de una luminaria son en general mayores que el valor óptimo para la lámpara y, que la pérdida de flujo luminoso al elevar la temperatura es casi lineal, se puede estimar esta pérdida sabiendo que ésta será del orden del 1% por cada incremento de 1.1 C en la temperatura ambiente por arriba de 38°C.

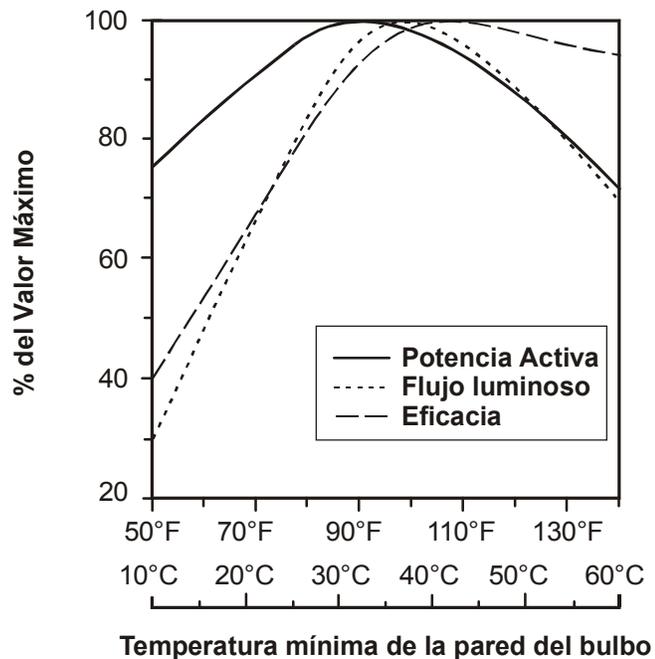


Figura 17. Eficacia luminosa y su dependencia con la temperatura mínima de la pared del tubo de descarga

### Encendido

El encendido de las lámparas fluorescentes se produce en dos etapas: en primer lugar, los electrodos deben ser calentados —precaldeo— hasta su temperatura de emisión; en segundo lugar, debe aplicarse a la lámpara una tensión suficiente para iniciar la ionización del gas y permitir el establecimiento del arco.

Algunos sistemas de encendido emplean una tensión aplicada entre uno de los electrodos y “tierra” para facilitar la ionización.

A medida que se reduce la temperatura ambiente, el encendido de las lámparas fluorescentes se hace más lento y dificultoso. Para lograr un encendido confiable a bajas temperaturas, se requiere un valor más elevado de tensión de alimentación.

Con el advenimiento de las lámparas fluorescentes se desarrollaron numerosos sistemas de encendido que contemplaban las condiciones de uso de cada lámpara:

- En primer lugar, el encendido por “precalentamiento” que requiere una llave, ya sea manual o automática, que conecte y desconecte el sistema de encendido. El encendido por precalentamiento es ampliamente utilizado en las lámparas fluorescentes compactas.
- En segundo término, el sistema de “encendido instantáneo”, que requiere una elevada tensión de circuito abierto proporcionada por el balasto. Para funcionar en circuitos de balastos magnéticos, se requieren lámparas de encendido instantáneo especialmente construidas. Se han desarrollado balastos electrónicos que tienen la capacidad de proporcionar encendido instantáneo a una gran variedad de tipos de lámparas fluorescentes.
- Finalmente, el más usado de los sistemas de encendido es el denominado de “encendido rápido”, que funciona sobre la base del calentamiento permanente de los electrodos, por lo que no requiere de elevadas tensiones ni llaves de encendido.

#### *Lámparas fluorescentes compactas*

Las lámparas fluorescentes compactas han surgido como consecuencia del uso de fósforos activados con tierras raras y con la contribución de la electrónica, las cuales, conservando la eficacia y vida de las fluorescentes lineales, pueden competir con las lámparas incandescentes aún en el hogar.

Estas lámparas fueron originalmente diseñadas para ser intercambiadas con las lámparas incandescentes de 25 a 100 W, pero ya hoy en día existen lámparas compactas de diferentes potencias, color, tamaños y formas similares a las incandescentes, incluso hasta contienen reflectores incorporados que pueden reemplazar a las fluorescentes lineales en luminarias pequeñas. En ellas se usan los tubos T-4 y T-5 de forma curvada o plegada de manera compacta y plana, o bien dos o más tubos paralelos de pequeño diámetro, interconectados entre sí y con un solo casquillo. Existen muchas técnicas de sellado, conexión entre tubos y de recubrimiento interior, que permiten la obtención de diferentes tamaños y flujos luminosos. La parte del tubo es a menudo encerrada en una cápsula de vidrio o plástico con forma cilíndrica o esférica.

Las fluorescentes compactas han tenido en estos últimos años gran auge y se las conoce como lámparas de bajo consumo, aunque en realidad la diferencia con las lámparas fluorescentes lineales radica en su menor tamaño, forma y la posibilidad de que pueden adaptarse a una instalación diseñada para lámparas incandescentes. Por ejemplo, una lámpara fluorescente compacta frente a una incandescente consume una cantidad de energía

4 veces menor aproximadamente para igual flujo luminoso, dependiendo del tipo de lámpara, y tiene una vida de 3 a 10 veces mayor, según el modelo.

La construcción compactada de estas lámparas requiere tubos de menor diámetro y longitud que los que se utilizan en las lámparas convencionales lineales para igual flujo luminoso, lo que da como resultado una mayor carga en la pared de estas lámparas compactas. Los tubos angostos en las lámparas compactas tienen campos elevados, de modo que la descarga es más corta por lo que los tubos deben ser plegados para alcanzar la longitud apropiada.

Uno de los logros fue la utilización de fósforos de banda estrecha, más estables y resistentes a altas densidades de radiación ultravioleta. Debido a la alta densidad de potencia en estas lámparas, se usan fósforos con alto rendimiento para lograr mejoras en la depreciación luminosa y reproducción de color, obteniéndose valores de la temperatura de color correlacionada entre 2700 K y 6500 K.

Originalmente las lámparas compactas incluían un balasto inductivo convencional — compacta integrada—, lo que traía como consecuencia un peso bastante mayor que las lámparas incandescentes. Dado que gran parte de este peso estaba dado por el balasto, surgió la idea de separar la lámpara del balasto con el fin de hacerla más liviana, eficiente y práctica. La separación lámpara–balasto o sistema modular tiene como ventaja la posibilidad de reponer la lámpara sin necesidad de hacer lo mismo con el balasto, teniendo en cuenta que el tiempo de duración del balasto es mucho mayor que el de la lámpara, aproximadamente en una relación de 3 a 10. Sin embargo la aparición de balastos electrónicos de menores dimensiones y peso, junto al aumento de vida de las lámparas compactas, ha llevado en estos últimos años a la fabricación masiva de lámparas compactas integrales con balastos electrónicos.

Las lámparas fluorescentes compactas (LFC) actuales tienen rangos de potencia entre 5 a 55 W, con flujo luminoso entre 250 a 4800 lm. Sus dimensiones varían entre 100 a 540 mm de longitud máxima, dependiendo de la potencia y construcción. Las LFC que incluyen el balasto tienen rosca tipo Edison permitiendo reemplazar directamente a una incandescente, mientras que aquellas modulares tienen casquillos especiales a fin de que no sean intercambiadas con una incandescente sin tomar los recaudos necesarios.

Las ventajas de estas lámparas en general respecto de las incandescentes son: menores potencias a igual flujo luminoso, de tamaños comparables, livianas, con buena reproducción de color, alta eficacia luminosa y larga vida. Sin embargo, son en general más sensibles a las variaciones de temperatura del ambiente que las fluorescentes tubulares lineales. La vida nominal de los buenos modelos (por ejemplo que cumplen con la normativa ELI) varía entre 6000 y 12000 horas, similar a la de las fluorescentes lineales.

### *Aplicaciones*

En sus varias formas, las lámparas *fluorescentes* dominan las aplicaciones comerciales e industriales: Respecto a las incandescentes comunes, ofrecen la posibilidad de grandes ahorros de energía con un incremento de su vida entre 6 a 10 veces. Se recomiendan en interiores de uso prolongado, de difícil acceso para el reemplazo de la lámpara, excepto en

locales con alta frecuencia de encendido. Tienen amplias aplicaciones en edificios de oficinas, escuelas, hospitales, supermercados, etc. donde la altura del cielorraso no es excesivo o que no haya conflictos de los artefactos con la estética del local, por ejemplo restaurantes elegantes, ambientes del hogar, etc. En los últimos 20 años, la llegada de lámparas fluorescentes compactas ha aumentado las posibilidades de aplicación a hogares, comercios y otros usos donde una menor dimensión es deseada. Al mismo tiempo la disponibilidad de modelos de distintas temperaturas de color y de altos índices de rendimiento cromático aumenta las aplicaciones de estas lámparas.

## 6. Lámparas de inducción

Las lámparas sin electrodos usan un campo electromagnético (EM) desde afuera del tubo en lugar de la aplicación de una tensión adentro para iniciar la descarga. Se clasifican de acuerdo al método usado para generar este campo electromagnético en lámparas con descarga inductiva y descarga de microondas, aunque sólo se describirán las primeras.

Las lámparas de descarga inductiva, conocidas como lámparas de inducción, se las asocia a lámparas fluorescentes sin electrodos ya que producen luz excitando los mismos fósforos convencionales de la fluorescentes. El principio de operación (esquemático en la Figura 18) es el siguiente:

Un equipo de radio frecuencia (1) envía una corriente eléctrica a la bobina de inducción (2), la cual es un alambre enrollado sobre un núcleo metálico o plástico. La corriente que pasa a través de la bobina de inducción genera un campo electromagnético. El campo electromagnético excita al gas mercurio (3) contenido dentro de una ampolla, el cual emite radiación UV. Esta energía UV excita la capa de fósforos que cubre la ampolla del bulbo, produciendo radiación visible (4).

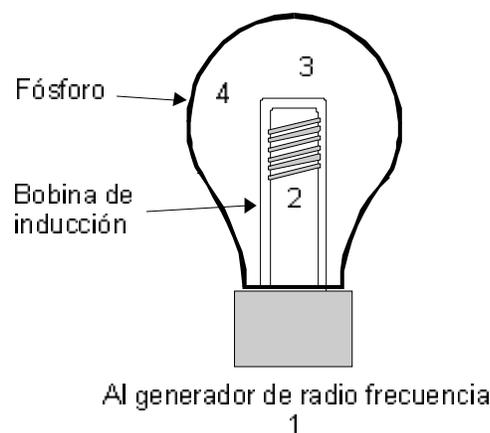


Figura 18. Esquema de una lámpara de inducción

La lámpara de inducción consta de tres componentes principales, cada uno de los cuales puede reponerse por separado:

#### *Ampolla o cámara de descarga*

Es un recinto de vidrio que contiene un gas inerte a baja presión y una pequeña cantidad de vapor de mercurio. Las paredes están recubiertas de polvos fluorescentes del mismo tipo empleado en las lámparas fluorescentes lineales, lo que posibilita la obtención de diferentes temperaturas de color. La cámara de descarga está fijada al equipo que provee la energía mediante un casquillo de plástico con cierre de seguridad.

#### *Equipo que provee energía*

Transfiere energía desde el generador de alta frecuencia a la ampolla utilizando una antena formada por una bobina primaria de inducción y un núcleo de ferrita. Este equipo, además, consta de un soporte para la antena, un cable coaxial y una varilla termoconductora.

#### *Generador de alta frecuencia*

Produce una corriente alterna de 2,65 MHz o 13,65 MHz, que se suministra a la antena. Contiene un oscilador ajustado a las características de la bobina primaria. Debido a que estas lámparas son diseños electrónicos, generan ondas electromagnéticas y por tanto producen interferencia no deseada. El valor de esta frecuencia está regulado por los países, de aquí que en Estados Unidos estas lámparas deben operar a 13, 65 MHz y están aprobadas para su uso comercial y doméstico mientras, en la Comunidad Europea operan a 2,65 MHz.

### **6.1. Características de funcionamiento**

En general se puede decir que estas lámparas tienen una eficacia entre 48 a 70 lm/W, una vida nominal de 10000 hasta 100000 horas. Su apariencia de color es blanco cálido y temperaturas de color correlacionada entre 2700 a 4000 K con un índice de reproducción de color de 80.

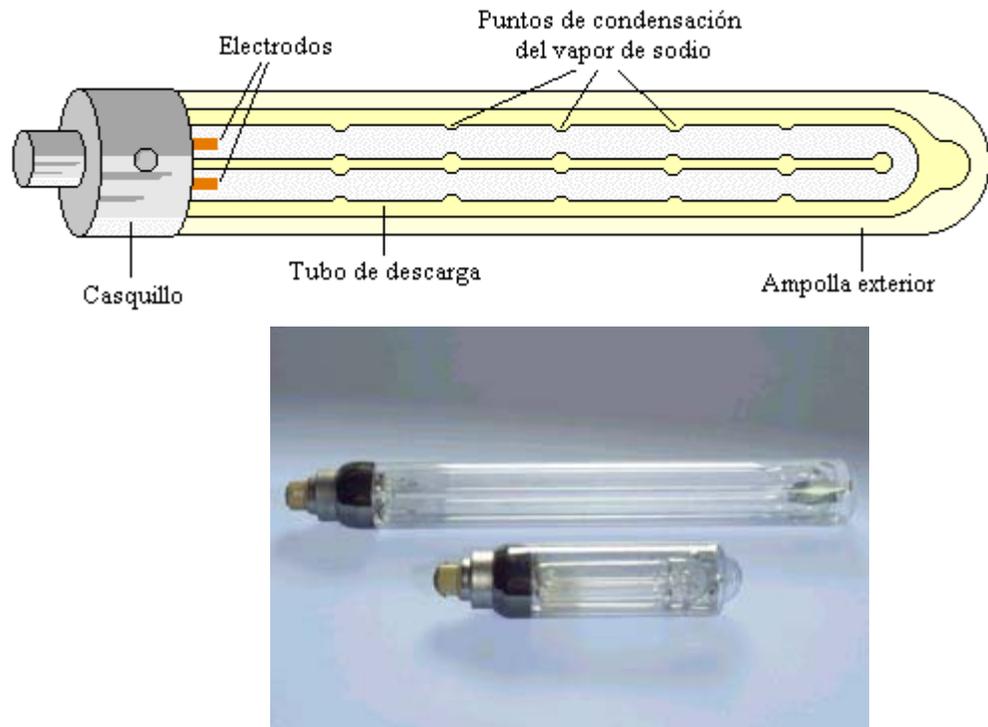
#### *Aplicaciones*

El costo de las lámparas a inducción es todavía alto con relación a cualquier otra lámpara. Por ello, su aplicación está limitada a situaciones en lugares de difícil acceso, por ejemplo en ambientes con un cielorraso muy alto requiriendo la colocación de andamios para el reemplazo de las lámparas, con un costo de reemplazo alto.

## **7. Lámpara de sodio de baja presión**

La lámpara de sodio de baja presión (Figura 19) es similar a la de mercurio de baja presión o fluorescente, pero en este caso contiene un vapor de sodio a baja presión donde se produce el arco. Para facilitar el arranque se agrega neón con una cierta proporción de

argón, de modo que la lámpara puede arrancar con una tensión de pico entre 500 y 1500 V, según el tipo de lámpara. Una vez que se ha encendido y que el gas se ha ionizado, la descarga inicial se produce en el neón, de aquí su color rojo. En operación normal, la luz producida es casi monocromática, la que consiste en una línea doble del sodio de 589,0 nm y 589,6 nm (amarillo). La Figura 20 muestra la distribución espectral para una lámpara de sodio de baja presión.



*Figura 19. Lámpara de sodio baja presión. Ejemplos de la misma.*

Aunque solo el 35 a 40% de la potencia de entrada se transforma en energía visible, es el doble de la eficacia luminosa de una lámpara fluorescente tubular. Esto se debe a que esta línea se encuentra cerca del máximo de la sensibilidad del ojo humano y a que no hay pérdidas de energía en transformación fluorescente del UV a radiación visible. Los valores de eficacia se encuentran entre 100 y 200 lm/W, dependiendo de la potencia.

Aunque es la fuente de mayor eficacia no permite discriminar los colores, con una apariencia de color amarillo, por lo que no es posible asignarle un índice de rendimiento de color. Sin embargo se le atribuye una temperatura de color correlacionada de 1800 K.

La vida nominal puede llegar hasta 14000 horas y una vida útil de hasta 18000 h. Este alto valor se debe a la baja depreciación del flujo luminoso y a su bajo índice de fallos.

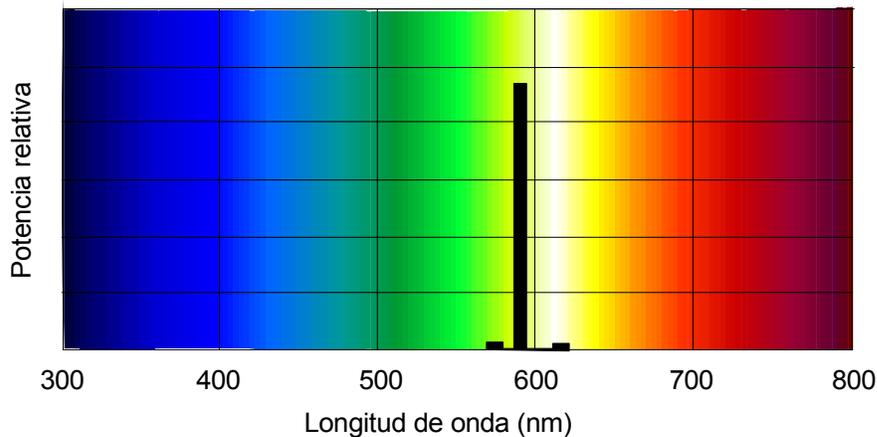


Figura 20. Distribución espectral de una lámpara de sodio de baja presión.

### Aplicaciones

Por la monocromaticidad de la luz y la consiguiente imposibilidad de discriminar los colores, este tipo de lámpara tiene escaso uso. En algunos casos, se las han utilizado en túneles y puentes donde la discriminación de color se consideró menos importante.

## 8. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)

Las lámparas de descarga de alta intensidad (HID) (Figura 21) incluyen al grupo de las conocidas lámparas de mercurio, mercurio halogenado y las de sodio de alta presión.

Todas estas lámparas producen luz mediante una descarga eléctrica de arco en un bulbo interior o tubo de descarga el cual a su vez está dentro de un bulbo exterior. El tubo de arco contiene electrodos sellados en cada extremo y contiene un gas de encendido que es relativamente fácil de ionizar a baja presión y temperatura ambiente. Este gas de encendido es generalmente argón o xenón o una mezcla de argón, neón o xenón dependiendo del tipo de lámpara. El tubo de arco también contiene metales o compuestos de halógenos metálicos que, cuando se evaporan en la descarga, producen líneas características de la energía radiante, de modo que cada tipo de lámpara de descarga de alta intensidad produce luz de acuerdo al tipo de metal contenido en el arco. Así, las de vapor de mercurio producen radiación visible excitando los átomos de mercurio, las de sodio de alta presión excitando los átomos de sodio, y las de halógenos metálicos excitando átomos y moléculas de sodio, escandio, tulio, holmio y disprosio.

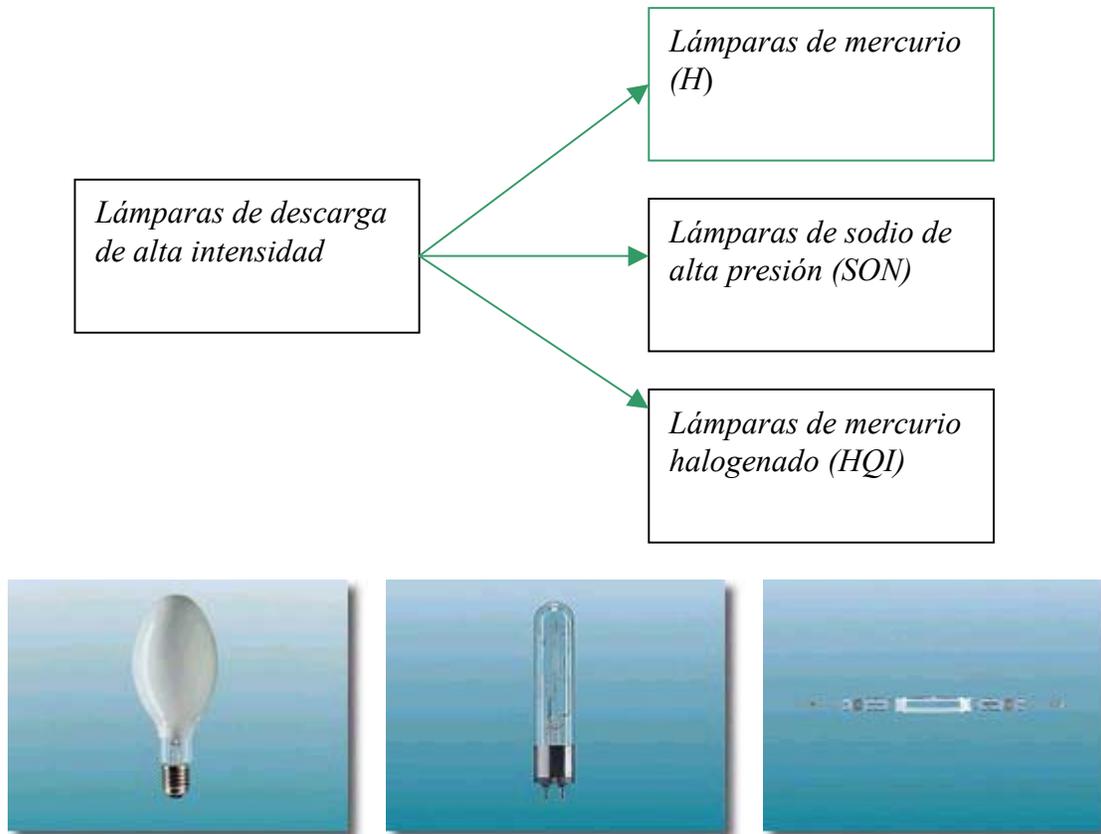


Figura 21. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID).

## 9. Lámparas de vapor de mercurio de alta presión

La Figura 22 muestra en forma esquemática las características constructivas de una lámpara de mercurio típica.

### *Tubo de descarga y ampolla exterior*

La mayoría de las lámparas de mercurio se construyen con doble envoltura:

La *interior o tubo de descarga*, está relleno de un gas inerte (argón) y una cantidad de mercurio. El arco inicial se establece por la ionización del argón, que es el gas auxiliar en esta lámpara. Una vez establecido este arco, el calor generado vaporiza el mercurio líquido presente en el tubo de descarga.

La *exterior* cumple múltiples funciones:

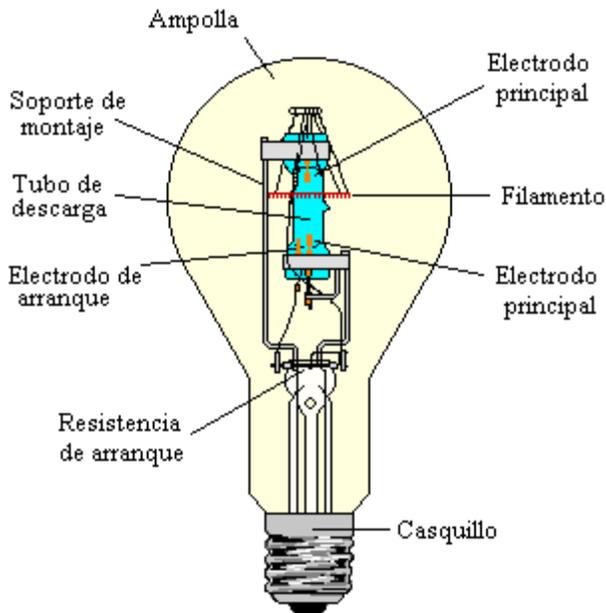
- Proteger al tubo de descarga de corrientes de aire y cambios de temperatura exterior
- Contener un gas inerte (generalmente nitrógeno) para prevenir la oxidación de las partes internas de la lámpara e incrementar la tensión de ruptura a través del bulbo
- Proveer una superficie interna que actúe de soporte para el recubrimiento de fósforo

- Actuar como filtro para quitar de la radiación emitida ciertas longitudes de onda no deseadas (UV-B y UV-C)

En general, los tubos de descarga de las lámparas de mercurio se construyen de silicio fundido, con cintas de molibdeno selladas en sus extremos que actúan como conductores de corriente. El bulbo exterior se hace generalmente de vidrio duro (borosilicato), pero puede ser de otro tipo de vidrio si la polución, el ataque químico del medio ambiente o el choque térmico no son factores decisivos para la lámpara, o bien si se desea obtener características especiales de transmisión.

### *Electrodos*

Los electrodos empleados en las lámparas de mercurio son de tungsteno espiralado, recubiertos de material emisor compuesto por varios óxidos metálicos.



*Figura 22 Esquema de una lámpara de vapor de mercurio de alta presión.*

## **9.1. Características de funcionamiento**

### *Eficacia luminosa*

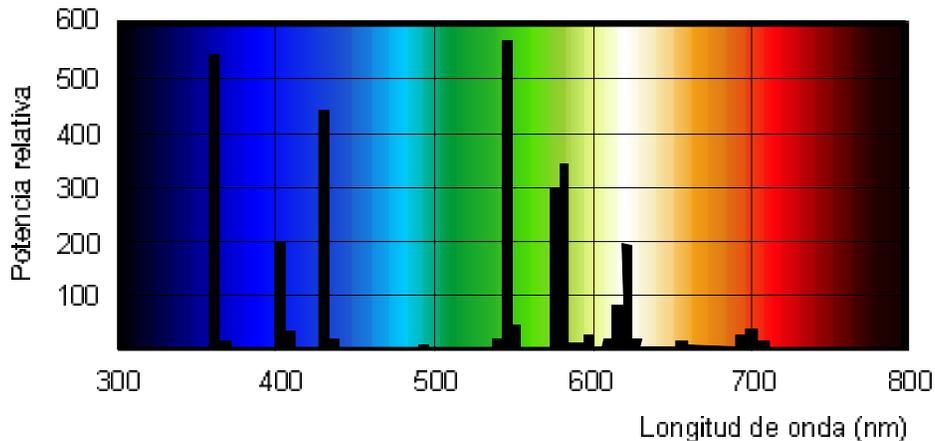
La eficacia luminosa de aquellas que contienen recubrimientos fluorescentes es mayor que las que no lo tienen. Por ejemplo una lámpara de igual potencia con recubrimiento fluorescente de 250 W llega a 51 lm/W o mayor frente a 46 lm/W en el caso que no contenga dicho recubrimiento. Además la eficacia luminosa depende de la potencia, por ejemplo para una lámpara de mercurio de alta presión de color mejorado de 80 W es de alrededor de 41 lm/W frente a 59 lm/W para un lámpara de 1 kW. Cabe observarse que la

eficacia de una lámpara de vapor de mercurio es muy inferior a las de fluorescentes y de sodio de alta presión (ver *Aplicaciones*, abajo).

### *Características cromáticas*

La distribución espectral de una lámpara de mercurio de alta presión en general se presenta en tres tipos, las de vidrio claro, las que poseen recubrimiento y, las de color mejorado. En el primer caso, hoy casi en desuso, la lámpara tiene un color blanco azulado con una temperatura de color correlacionada del orden de 6000K con cuatro líneas principales de emisión y por lo tanto un bajo rendimiento de color ( $IRC = 15$ ). La lámpara de color corregido tiene una apariencia de color más cálida, con una temperatura de color de 4300 K con índice de rendimiento de color de 48, para un potencia de 80 W, mientras aquellas con recubrimiento especial son aún más cálidas con un rendimiento de color de 52.

La figura 23 muestra la distribución espectral de una lámpara de mercurio de alta presión de color mejorado.



*Figura 23. Espectro de emisión de una lámpara de vapor de mercurio de alta presión de color mejorado.*

### *Vida*

La vida útil de una lámpara de mercurio de alta presión se encuentra entre valores de 12000 a 16000 horas, dependiendo de la potencia.

### *Encendido*

Las lámparas de mercurio de alta presión pueden encenderse por medio de un electrodo auxiliar, ya que los electrodos poseen un recubrimiento emisivo y porque la mezcla de vapor en la lámpara en frío es tal que puede arrancar con una tensión de 220 V. El gradiente de tensión entre el electrodo principal y el auxiliar, es capaz de ionizar el gas en esa zona, y formar una descarga luminosa. Cuando la descarga alcanza el otro electrodo, se incrementa la corriente, y como consecuencia se calientan los electrodos principales hasta la

temperatura apropiada de emisión de electrones por el bombardeo producido por el arco. Una vez alcanzado este punto el electrodo auxiliar deja de intervenir en el proceso.

### *Aplicaciones*

Tradicionalmente se utilizaban lámparas de vapor de mercurio para el alumbrado público y para espacios exteriores privados. Hoy día en estas aplicaciones se tienden a utilizar lámparas de vapor de sodio de alta presión por su superior eficacia. En algunas aplicaciones, por ejemplo donde se pretende resaltar el verde de plazas y jardines, esta lámpara es una opción. Sin embargo, opciones más eficientes incluyen a fluorescentes y halogenuros metálicos. Ambas ofrecen mejor reproducción de colores además de mayor eficacia, pero con menor vida útil que la lámpara de mercurio.

## **10. Lámpara de halogenuros metálicos**

Estas lámparas contienen halogenuros metálicos de cloro e yodo, además del mercurio y una mezcla de argón para el encendido. Cuando la lámpara alcanza su temperatura de funcionamiento estos halogenuros metálicos se vaporizan parcialmente dissociándose en halógenos e iones metálicos. De este modo en la lámpara se forman los siguientes elementos:

- Halogenuros metálicos no agresivos, cerca de la pared del tubo de descarga
- Iones metálicos y de halógeno en el centro de la descarga. Los iones metálicos son los que emiten radiación.
- Cuando los iones metálicos y halógenos se acercan, sea por convección o difusión, a las partes más frías del tubo se recombinan y el ciclo se repite —ciclo del halogenuro. Ambos son potencialmente agresivos pero, debido a la menor temperatura de la zona exterior, no pueden alcanzar la pared del tubo sin antes recombinarse.

El mercurio ya no actúa como generador de luz, sino como regulador.

El uso de estos metales halogenuros presentan dos ventajas:

- Los halogenuros metálicos son más volátiles a la temperatura de operación del tubo que los metales puros.
  - Aquellos metales que reaccionan químicamente con el tubo pueden ser usados en forma de halogenuros, que de este modo no lo hacen.

### **10.1. Componentes de la lámpara de halogenuro metálico**

La figura 24 muestra los elementos de una lámpara de halogenuro de mercurio.

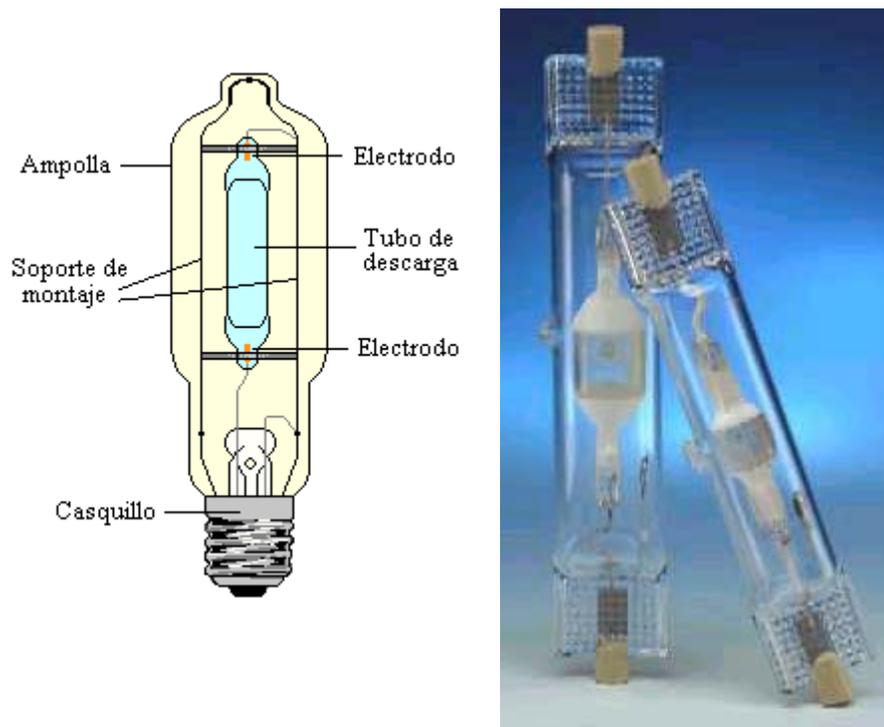
#### *Tubo de descarga y ampolla exterior*

Estas lámparas son similares en su construcción a las de mercurio pero su tamaño es menor para iguales potencias. El tubo de descarga es de cuarzo puro con transmitancia constante y

no selectiva. La temperatura del tubo suele estar por encima de 627 °C pero no debe sobrepasar los 927 °C por la cristalización del cuarzo.

La parte interior de la ampolla exterior, en el caso de las lámparas de forma ovoidal se recubre con fósforos para convertir la radiación UV en visible. Sin embargo como los halogenuros producen una pequeña cantidad de radiación UV, la radiación visible proviene principalmente de ellos. El tubo del arco tiene un recubrimiento blanco en las puntas para incrementar la vaporización del halogenuro metálico.

Muchas de estas lámparas de mercurio halogenado operan en posición vertical, y en esta posición alcanzan su mejor rendimiento. Cuando trabaja horizontalmente el arco se inclina hacia arriba debido a las corrientes de convección. Al mismo tiempo, el halogenuro metálico, que es líquido, se mueve hacia el centro del tubo del arco, con lo que la presión de vapor disminuye decreciendo la concentración del metal en el arco reduciéndose la emisión de luz. Además el arco inclinado se acerca más hacia las paredes del tubo del arco, aumentando la temperatura y reduciendo la vida de la lámpara en un 25%.



*Figura 24. Esquema de una lámpara de halogenuro metálico.*

Dado que en muchas aplicaciones es necesario la lámpara en posición horizontal, existen diseños para esta posición. En uno de estos diseños el tubo del arco tiene una forma de tal modo que sigue naturalmente la inclinación del arco. Otro diseño es un tubo de arco asimétrico con los electrodos más bajos en el cuerpo del tubo de arco de tal modo que el arco se inclina hacia la línea central del tubo. En ambos diseños la cantidad de luz emitida aumenta en un 25% y la vida en un 33% respecto de las lámparas de posición vertical.

Algunas lámparas se diseñan de forma ovoidal y de esta forma el halogenuro metálico se calienta más rápidamente respecto de las lámparas con forma cilíndrica convencional (ver Fig. 24).

### *Gas de relleno*

La mezcla de gases que se usa para el encendido consiste, generalmente de neón-argón o kriptón-argón con una presión en frío de 4000 a 5000 Pa. La desventaja de usar neón es que éste se difunde a través de la pared de cuarzo del tubo de descarga, problema que se soluciona relleno también con neón el bulbo exterior.

A esta mezcla se le suman los halogenuros metálicos y el mercurio, de modo que cada combinación empleada da como resultado lámparas con características cromáticas y de eficacia muy diferentes. Es así que pueden diferenciarse tres tipos de lámparas:

- Lámparas *trilínea*, con yoduros de sodio, talio e indio. Su nombre proviene de las tres líneas características de los tres metales mencionados, amarillo para el sodio, verde para el talio y azul para el indio. La proporción de cada uno de estos metales determina las características de esta lámpara en lo que se refiere a eficacia y rendimiento de color.
- Lámparas *multilínea*, con yoduros de tierras raras como disprosio, holmio y tulio y también con yoduros de escandio, sodio o cesio. Estos últimos se agregan para desplazar la distribución espectral o para estabilizar la descarga. Se denominan de este modo porque los metales que intervienen dan lugar a un espectro semi-continuo. El índice de rendimiento de color es en general mejor que en el caso anterior.
- Lámparas que presentan un *espectro cuasicontinuo* que emplean como halogenuros metálicos al yoduro de estaño y cloruro de estaño. En este caso los halogenuros metálicos actúan no solamente como vehículo de transporte de los átomos metálicos sino que también contribuyen a la generación de luz las partes separadas de las moléculas (radicales), formándose un espectro cuasicontinuo con líneas adicionales procedentes del mercurio gaseoso y del sodio, que se añade para estabilizar el arco. Como consecuencia es una lámpara con muy buena reproducción de color.

### *Electrodos*

En las lámparas trilineas se utiliza el óxido de torio como emisor. En las lámparas de escandio se añade al relleno yoduro de torio y en las lámparas con tierras raras kriptón para facilitar el encendido.

## **10.2. Características de funcionamiento**

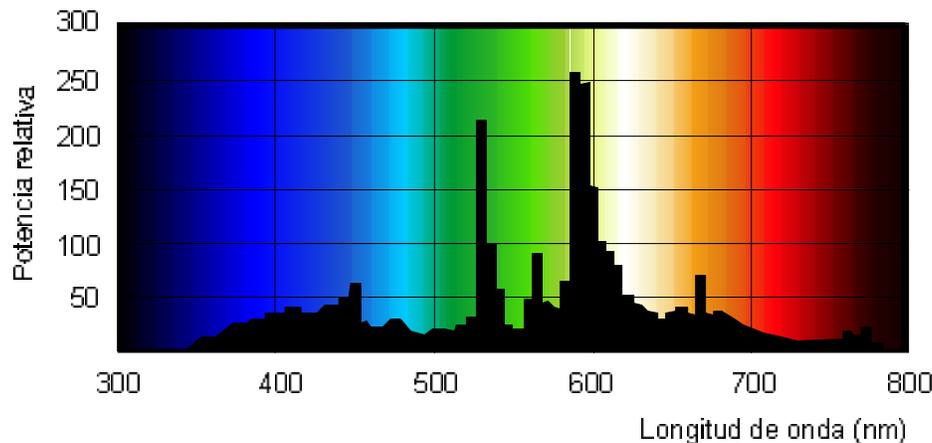
### *Eficacia luminosa*

La eficacia de estas lámparas es bastante mayor que las de mercurio de alta presión, comercialmente pueden obtenerse lámparas con eficacia de 80 a 108 lm/W, dependiendo de la potencia, sin incluir las pérdidas en el balasto.

#### *Características cromáticas*

El sistema con tierras raras para las lámparas *multilínea* permite una gama más amplia de temperaturas correlacionadas, por ejemplo 4300 K si se incluye el yoduro de sodio o 3000 K con cesio. Dentro de ellas la lámpara de disprosio tiene una temperatura de color más elevada de 5600 K. Determinados colores pueden obtenerse agregando elementos tales como, sodio para el naranja, tulio para el verde, indio para el azul y hierro para el UV.

El índice de rendimiento de color oscila entre 75 a 90, con un espectro de emisión casi continuo en el último caso. La Figura 25 muestra un espectro de emisión de este tipo de lámparas.



*Figura 25. Espectro de emisión de una lámpara de vapor de mercurio halogenado de tipo multilínea.*

También existen lámparas con recubrimientos de fósforos en la envoltura exterior, con el propósito de obtener una fuente de luz más difusa aunque el índice de reproducción de color disminuye.

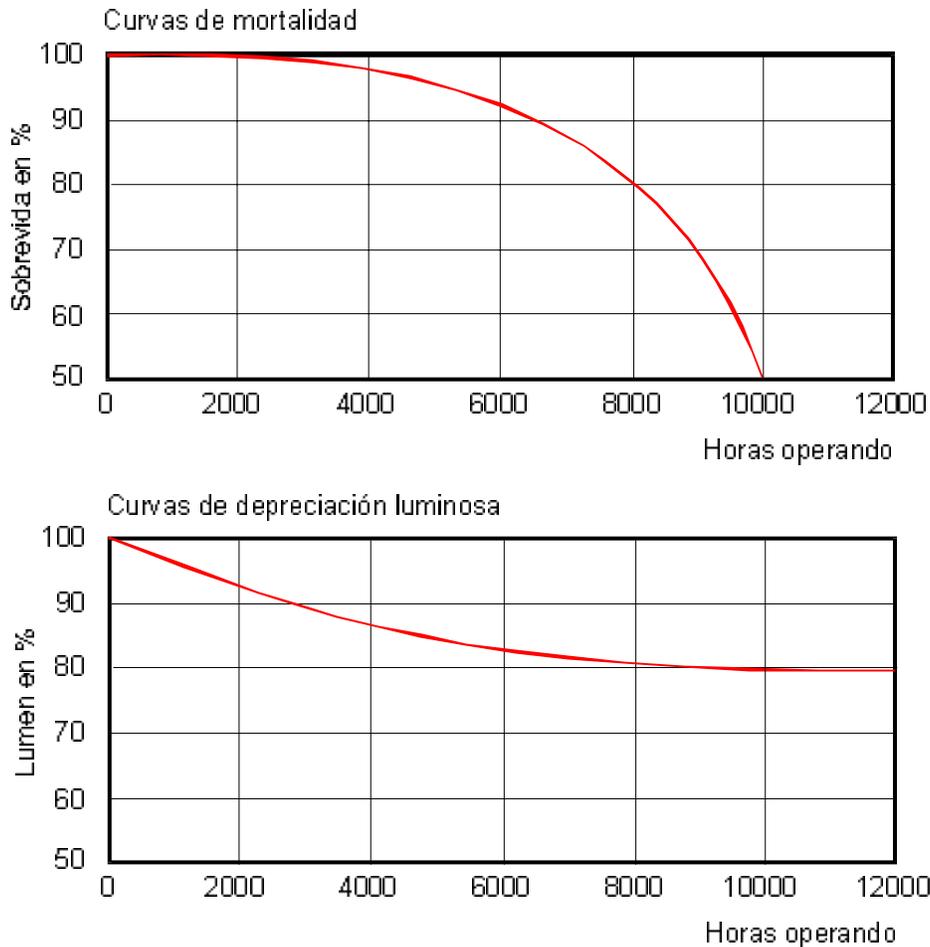
#### *Vida*

Debido a la alta temperatura de los electrodos, los óxidos que los recubren se evaporan rápidamente por lo que la vida útil de estas lámparas es menor que las restantes lámparas de descarga, pudiendo llegar hasta valores de 10000 horas.

#### *Depreciación luminosa*

Poseen una depreciación luminosa mayor respecto, por ejemplo, a las de mercurio de alta presión, lo que se debe principalmente al ennegrecimiento que sufre el tubo de descarga por la evaporación del tungsteno de los electrodos que se deposita sobre las paredes del tubo. También la depreciación de los polvos fluorescentes influye en la depreciación en el caso de lámparas recubiertas.

En la Figura 26 se muestran curvas de mortalidad y depreciación luminosa para una lámpara de mercurio halogenado.



*Figura 26. Curva típica de mortalidad y depreciación luminosa de una lámpara de mercurio halogenado.*

### *Encendido y reencendido*

En una lámpara de halogenuro metálico el encendido es más complicado que para las de mercurio de alta presión, debido a la actividad química del relleno de la lámpara por lo que no puede emplearse materiales emisores normales. En las lámparas *trilinea*, los electrodos contienen oxido de torio, que facilita el arranque y actúa como emisor termoiónico. En las

multilínea, el óxido de torio no puede usarse porque reaccionaría con el halógeno, por lo que se utiliza yoduro de torio. La mayoría de estas lámparas tiene una tensión de encendido entre 4 y 5 kV.

Después del encendido de la lámpara, el mercurio y los restantes compuestos del tubo de descarga se evaporan, disocian y generan luz como consecuencia del paso de la corriente. Este proceso tarda algunos minutos, durante este tiempo la apariencia de color cambia hasta que al final del periodo de encendido se alcanza el color definitivo. Si la lámpara se apaga, pasarán aproximadamente 10 a 20 minutos antes de que la presión dentro de la lámpara descienda lo suficiente para poder volver a arrancar.

### *Aplicaciones*

Las lámparas de descarga de halógenos metálicos tienen cualidades que las distinguen de otras lámparas: combinan alta eficacia con color de luz blanca, similar a la luz diurna, con excelente reproducción de colores. A diferencia de las lámparas fluorescentes que también tienen estas cualidades, éstas producen un alto flujo luminoso a partir de una lámpara relativamente pequeña. Por ello, se ha ampliado su utilización como reflector en el exterior de los edificios, en estadios, y en otros lugares donde se requiere un alto nivel de iluminancia. Los principales inconvenientes son el costo relativamente alto y una vida, si bien alta (hasta 10000 horas, en algunos modelos aún mayores), menor que otras lámparas de descarga. Cuando se busca economía, tanto en términos de eficacia luminosa, costo de lámpara y larga vida útil, mientras que el color de luz o la reproducción de colores son menos importantes, se utilizan lámparas de sodio de alta presión, que se describen a continuación.

## **11. Lámpara de sodio de alta presión**

En la Figura 27 se muestra la construcción de este tipo de lámpara.

La lámpara de sodio de alta presión radia en todo el espectro visible, en contraste con las lámparas de sodio de baja presión, que solo radia el doblete D del sodio en 589 nm. Las lámparas de sodio estándar, con una presión del sodio entre 5 a 10 kPa, poseen en general una temperatura de color entre 1900 a 2200 K y un índice de rendimiento de color de 22. A medida que la presión del sodio aumenta por arriba de 27 kPa, la línea de radiación D (589 nm) del sodio es absorbida por el gas circundante más frío y reemitida como un espectro casi continuo a ambos lados de las líneas D, haciéndose éstas cada vez más débiles. Esto resulta en una región “negra” de 20 nm de ancho en la zona de 589 nm, como se observa en la *Figura 28*.

Incrementado la presión del vapor de sodio incrementa el porcentaje de longitudes de onda larga emitidas, mejora el índice de rendimiento del color hasta un valor de 65, aunque la eficacia y la vida disminuyen.

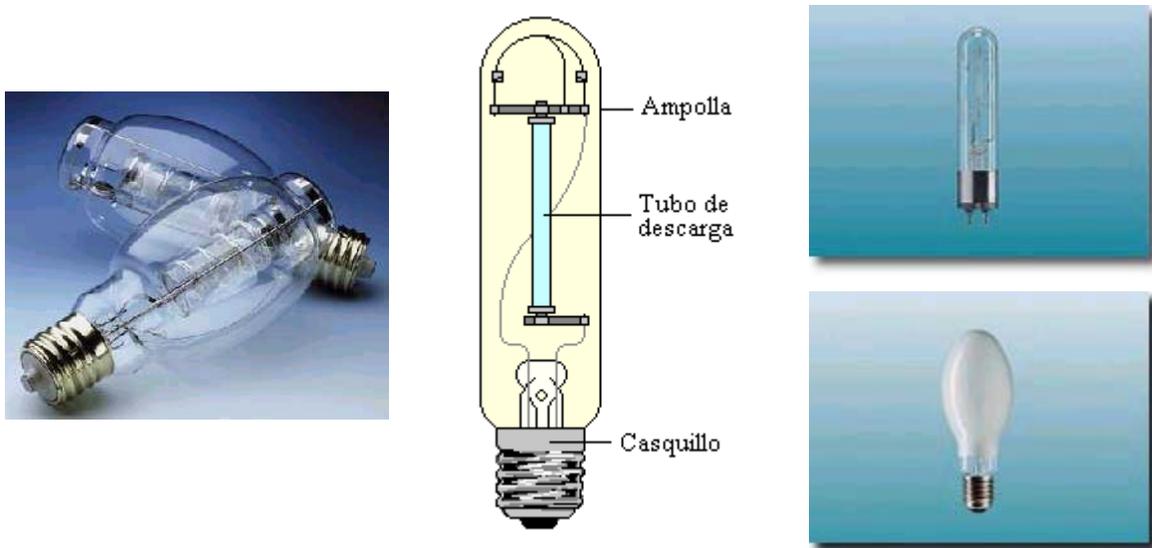


Figura 27. Esquema de una lámpara de vapor de sodio de alta presión.  
Ejemplos de la misma

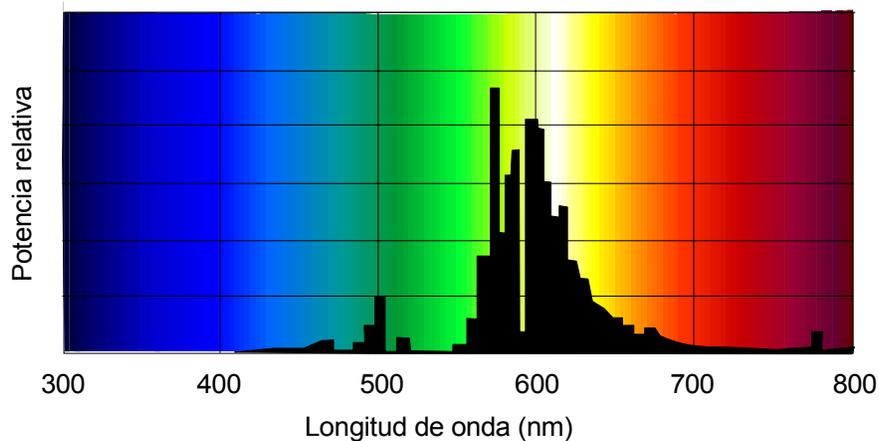


Figura 28. Distribución espectral de la radiación emitida por una lámpara de vapor de sodio de alta presión.

### 11.1. Componentes de la lámpara de sodio de alta presión

#### *Tubo de descarga*

Como ya se indicó anteriormente se construyen dos envoltorios o cápsulas, la interior, donde se produce el arco, se construye con alúmina policristalina, sintetizada en forma de tubo, la cual no reacciona con el sodio, con alta resistencia a la temperatura y alto punto de fusión. Esta sustancia es translúcida, insensible al vapor de sodio caliente (1500 K) con un

punto de fusión de 2300 K. A pesar de que este material es translúcido, provee una buena transmisión de radiación visible en más del 90%.

### *Gas de relleno*

El tubo de arco contiene xenón como gas de encendido con una presión en frío de 3 kPa, y una pequeña cantidad de una amalgama de sodio-mercurio la cual es parcialmente vaporizada cuando la lámpara alcanza la temperatura de operación. Las presiones del vapor de sodio y mercurio para la lámpara estándar en régimen normal de funcionamiento son de 10 kPa y 80 kPa respectivamente. El mercurio actúa como un gas amortiguador para aumentar la presión del gas y reducir las pérdidas térmicas de la descarga al disminuir la conductividad térmica del vapor caliente. El mercurio no produce ninguna radiación significativa.

### *Ampolla exterior*

El bulbo externo de borosilicato puede estar al vacío o lleno de un gas inerte. Sirve para prevenir ataques químicos de las partes metálicas del tubo interior así como el mantenimiento de la temperatura del tubo del arco, aislándolo de los efectos de la temperatura ambiente. Las lámparas de sodio estándar tienen formas tubulares u ovoides, siendo la de forma tubular siempre de vidrio claro. El tipo de vidrio usado depende de la potencia de la lámpara.

Muchas de estas lámparas pueden operar en cualquier posición, la misma no tiene efecto sobre el flujo luminoso.

## **11.2. Características de funcionamiento**

### *Eficacia*

Como se indicó la eficacia decrece a medida que la presión de vapor del sodio aumenta debido al ensanchamiento y posterior desaparición del doblete del sodio, con lo que se elimina la radiación en la zona donde el sistema visual es más sensible.

Otro factor que influye en la eficacia es la composición y presión del gas amortiguador y de arranque en el tubo de descarga. Como la conductividad térmica del sodio es alta, la eficacia luminosa es baja, pero a fin de contrarrestar este efecto se usan gases de amortiguación y arranque de baja conductividad térmica, a presiones mucho mayores que el vapor de sodio.

Si se aumenta la presión del xenón desde 20 kPa a 200 kPa, la eficacia luminosa aumenta entre un 10 a 15%, sin cambiar sus características de color, aunque la desventaja es que se necesitan ayudas extras para el arranque.

La eficacia de todas estas lámparas está en un rango entre 80 a 130 lm/W, dependiendo de la potencia de la lámpara y de las propiedades de reproducción del color. La lámpara de sodio “blanco” tiene una eficacia de 43 lm/W, valor un 45 % menor de las de sodio de alta

presión estándar. Las mismas poseen un tubo de descarga de óxido de aluminio sintetizado, alojado en una envoltura tubular de vidrio transparente al vacío.

#### *Características cromáticas*

La típica apariencia de color de una lámpara de sodio de alta presión no cambia apreciablemente hasta el 50% de su flujo luminoso. Debajo de este valor prevalece el color amarillo, característico del sodio de baja presión. Las lámparas de sodio de alta presión estándar, con presiones del sodio entre 5 a 10 kPa, tienen una temperatura de color de 1900 a 2200 K y un índice de rendimiento de color de 22 aproximadamente.

El color de luz se puede modificar aumentando la presión del vapor de sodio, siendo éste el caso de la lámpara de sodio blanco, en la cual el índice de rendimiento de color aumenta hasta 80 con una presión del vapor de sodio de 95 kPa. La misma tiene una apariencia de color blanco cálido (temperatura de color correlacionada entre 2500 a 2800 K). Con presiones de vapor intermedias se consiguen lámparas con características intermedias entre la de sodio blanco y la estándar, como es el caso de las lámparas de sodio de alta presión de color mejorado.

#### *Vida y depreciación luminosa*

La vida útil para estas lámparas es de aproximadamente 16000 horas dependiendo de su diseño. Sin embargo este valor está limitado por el aumento en la tensión, aunque lento, que ocurre durante su vida. Este aumento es principalmente debido al ennegrecimiento de los extremos del tubo de arco debido a la dispersión del material emisor del electrodo. La parte ennegrecida absorbe radiación, la cual calienta los extremos del tubo de arco y vaporiza las amalgamas de sodio adicional. Esto incrementa la presión en el tubo de arco y consecuentemente la tensión del arco. La difusión de sodio a través de los extremos sellados de tubo de arco y la combinación de sodio contenido en el arco con impurezas del tubo limitan también la vida de estas lámparas.

En la Figura 29 se muestran curvas típicas de mortalidad y depreciación luminosa para una lámpara de sodio de alta presión en función de las horas de operación..

#### *Encendido y Reencendido*

Debido a que estas lámparas no tienen un electrodo de encendido por su menor diámetro, se suministra un pulso de alta tensión, entre 1,5 a 5 kV, mediante un ignitor, para ionizar al gas de encendido que es el xenón. Una vez encendida, la lámpara se calienta en 10 minutos aproximadamente, durante el cual va cambiando de color. Una vez que se ha establecido el arco, la tensión del mismo es baja por la baja presión de vapor. El color inicialmente es blanco por la descarga del xenón, cambiando luego a amarillo después de unos veinte segundos. Durante este tiempo el sodio se evapora y poco a poco se involucra en la descarga.

Debido a que la presión de operación en estas lámparas es menor que en el caso de las de mercurio, el tiempo de reencendido es menor. Sin embargo, como se ha dicho, necesita un

pico de tensión bastante grande para arrancar, de modo que si se interrumpe la tensión de la red no puede encender de inmediato. La lámpara debe enfriarse lo suficiente para que la presión de vapor de sodio en el bulbo de descarga sea tal que el impulso producido por el arrancador permita iniciar la descarga. Este tiempo es en general menor de 1 minuto y se calienta en 3 a 4 minutos. En las lámparas que tienen un arrancador incorporado este tiempo puede ser mayor, ya que estos dispositivos se desconectan después de cada encendido por medio de un interruptor bimetálico que debe enfriarse antes de poder funcionar nuevamente. El periodo de enfriamiento puede durar de 10 a 15 minutos.

### Aplicaciones

La alta eficacia luminosa, larga vida y baja depreciación luminosa explican la amplia difusión de *lámparas de sodio de alta presión* para la iluminación de grandes espacios interiores, iluminación vial, parques, y en situaciones donde el ahorro y el bajo mantenimiento son prioridades.

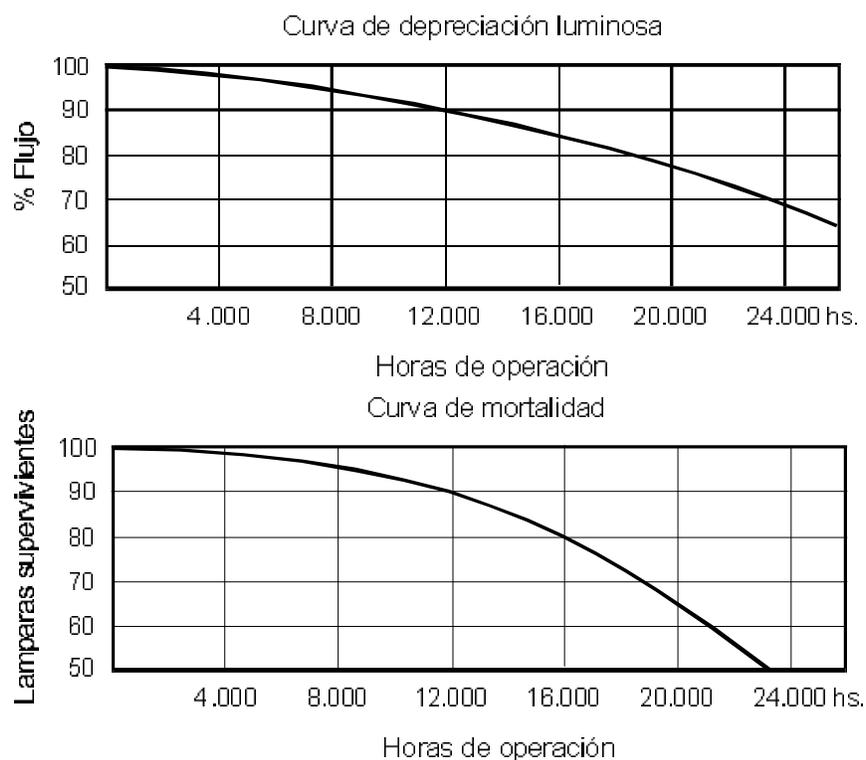


Figura 29. Curva típica de mortalidad y depreciación luminosa para una lámpara de sodio de alta presión.

## 12. Comparación entre las lámparas de alta intensidad

En las Figuras siguientes 30 a 32 se comparan los tiempos de encendido, el flujo luminoso en función de la potencia y del tiempo de vida para todas las lámparas de alta intensidad.

En la Figura 30 se observa que, a diferencia de la lámpara de mercurio, la lámpara de sodio de alta presión, el tiempo de encendido y reencendido es mucho menor, usualmente ésta reenciende en menos de 1 minuto y se calienta en 3 o 4 minutos. Esto se debe a que la presión de operación es mucho menor.

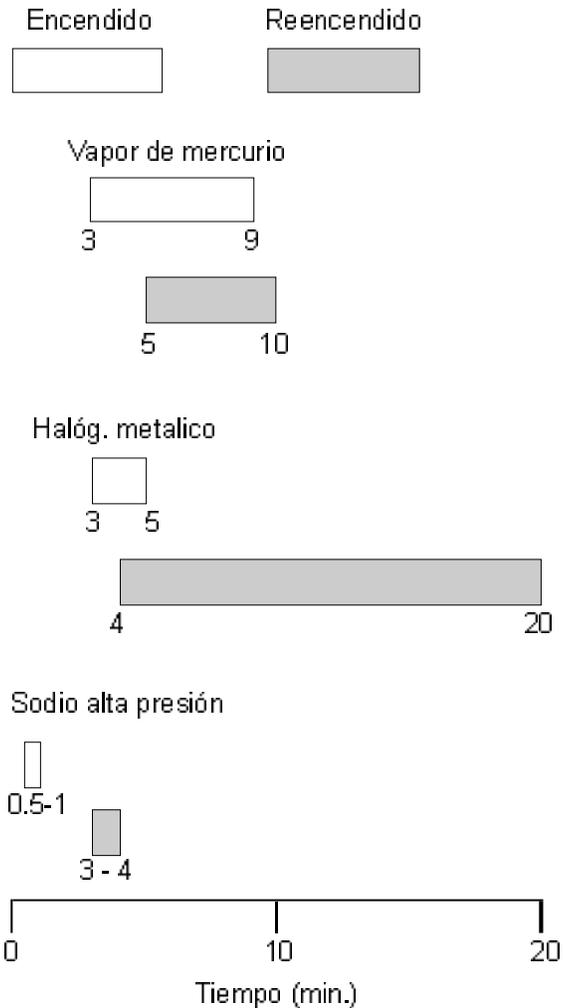


Figura 30. Comparación de tiempos de encendido y reencendido entre las distintas lámparas de alta intensidad.

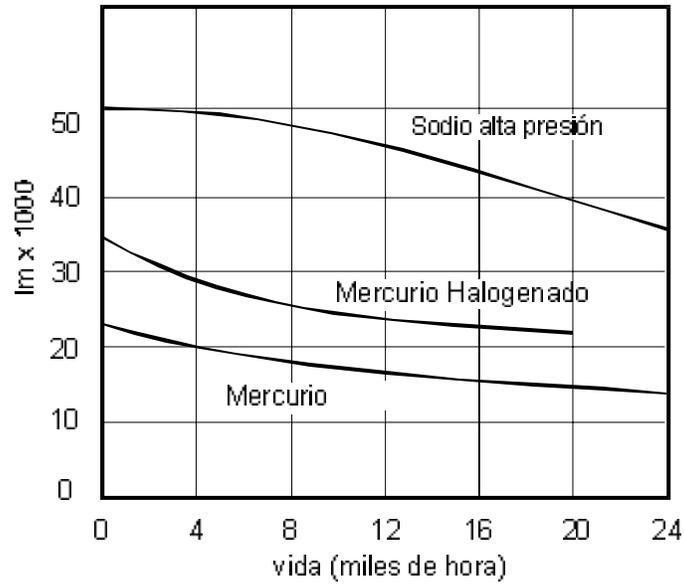


Figura 31. Flujo luminoso en función del tiempo (horas) de operación para lámparas de descarga de alta intensidad.

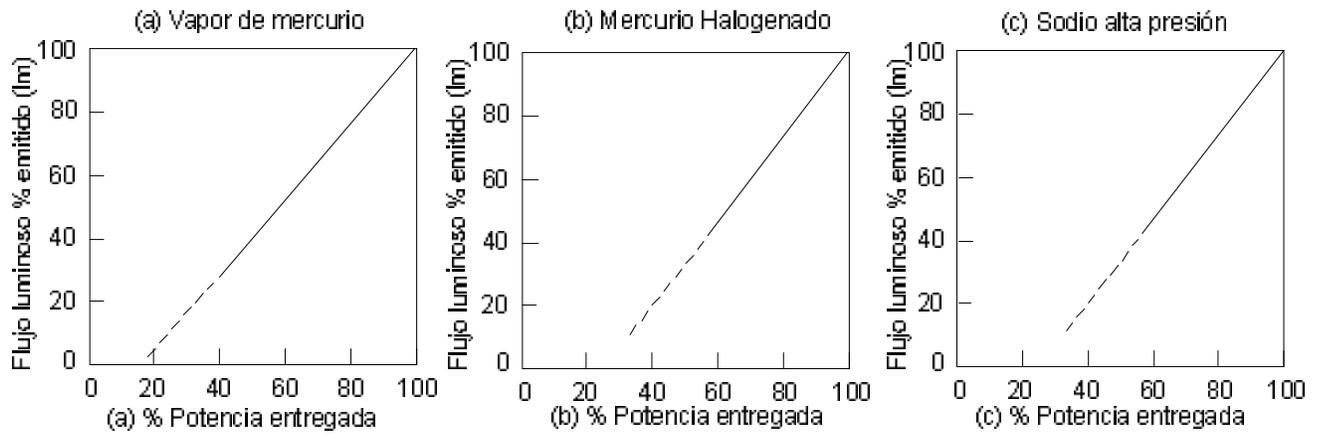
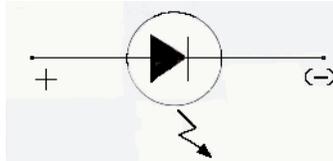


Figura 32 Flujo luminoso en función de la potencia para lámparas de descarga de alta intensidad a) vapor de mercurio, b) mercurio halogenado, c) sodio de alta presión. Las líneas punteadas representan áreas donde ocurren cambios de color significativos.

### 13. LED (Light Emitting Diode)

Un LED es un componente electrónico de estado sólido que comenzó a ser producido en la década del 60. La sigla LED se debe a la expresión “light emitting diode” o, en español, diodo emisor de luz. Este tipo de semiconductores pertenece a la familia de los diodos. Los diodos tienen la particularidad que conducen la corriente eléctrica mas fácilmente en un sentido que en otro. La simbología perteneciente a un LED se representa en la Figura 33.



*Figura 33. Simbología de un LED*

Este tipo de semiconductores son del tipo p-n. La adición de impurezas selectivas a un cristal semiconductor puede producir un exceso de electrones libres en la banda de conducción. Estos son semiconductores tipo-n. Semiconductores tipo-p se logran usando otras impurezas que producen excesos de agujeros (ausencia de un electrón) en la banda de valencia, donde un agujero tiene una carga igual y opuesta a la del electrón. En el material tipo-p los electrones son conductores de carga minoritaria mientras los agujeros la mayoritaria. La inversa ocurre para el material tipo-n. Existen técnicas para preparar un cristal único casi perfecto en el cual se produce el cambio de conductividad entre la parte tipo-p a la tipo-n dentro de una pequeña región de transición. Esto es lo que se llama unión p-n. Cuando se aplica una diferencia de tensión en una unión p-n desde la región *p* a la *n*, los agujeros fluyen hacia el lado tipo-n y los electrones hacia el lado tipo-p. Un electrón en una banda (banda de conducción) se combina con un agujero de otra banda (banda de valencia) produciéndose la emisión de un fotón de energía electromagnética. Los materiales que componen la unión p-n determinan el salto de energía y la eficacia del LED.

#### 13.1. Detalles constructivos de un LED

Una lente clara o difusa, hecha con una resina epoxi, cubre el chip semiconductor y sella al LED en forma de cápsula. La misma provee también un control óptico a la luz emitida, ya que incrementa el flujo luminoso y reduce las reflexiones en la superficie del semiconductor, logrando de este modo una variedad de distribuciones angulares. Los componentes que conforman un LED se pueden observar en la Figura 34.

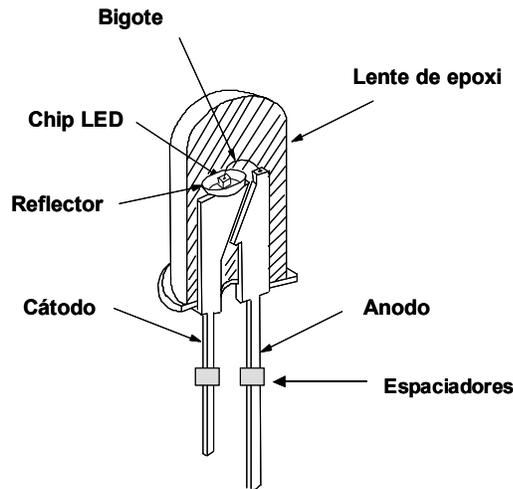


Figura 34. Componentes de un LED

Un LED difiere tanto de una lámpara incandescente como de una de descarga. No incluye ningún filamento como las incandescentes, que pueden romperse o quemarse, ni electrodos como la mayoría de las lámparas de descarga. Figura 35 compara un LED y una incandescente.

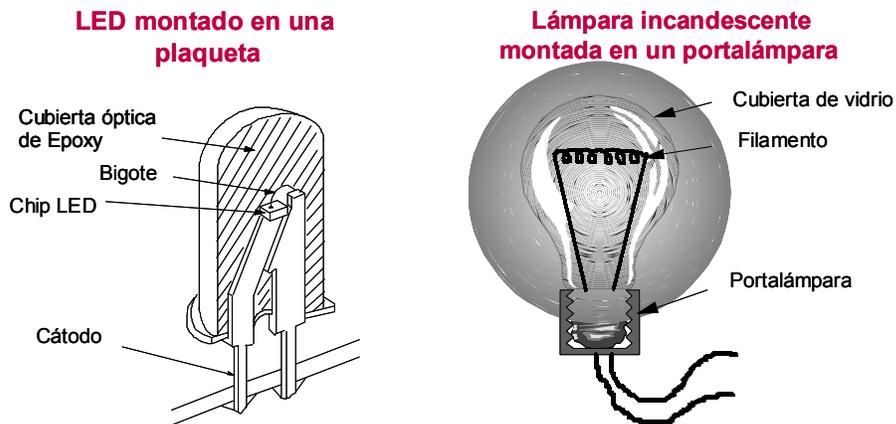
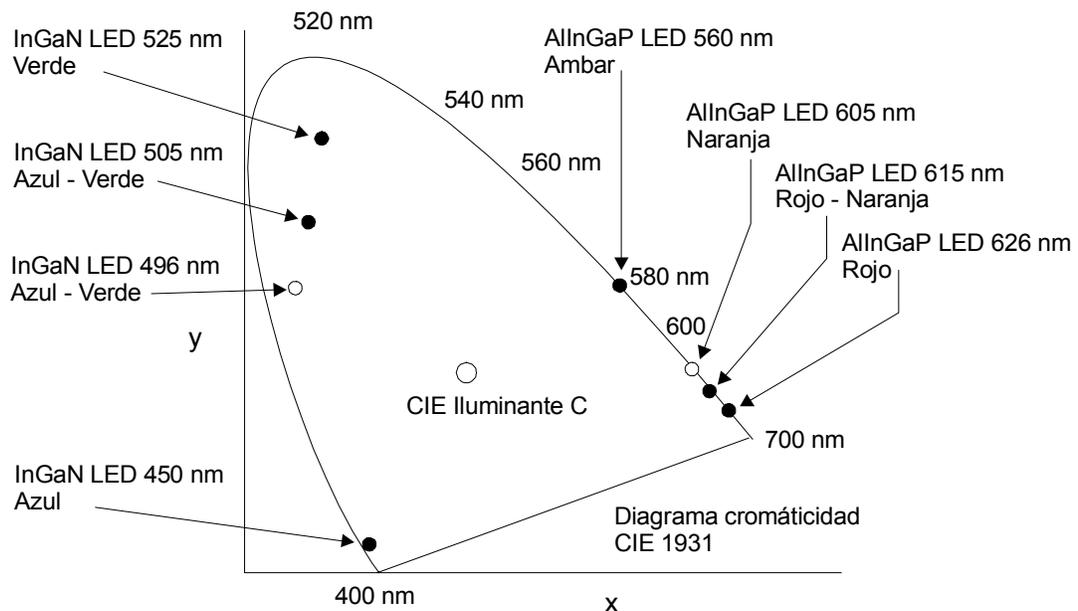


Figura 35. LED vs. Lámpara incandescente

Los primeros LEDs que se fabricaron estaban basados en semiconductores de arseniuro de galio (GaAs) y fosfuro de galio (GaP). Sin embargo hoy en día estos han sido reemplazados por materiales más prometedores: AlInGaP y InGaN. El fosfuro de aluminio indio galio (AlInGaP) es usado para desarrollar longitudes de onda largas (590 a 630 nm) en el rojo, amarillo y ámbar, dependiendo de la cantidad utilizada de cada elemento, mientras el nitruro de indio galio (InGaN) se usa para lograr cortas longitudes de onda (470 a 525 nm) para el azul y el verde. La tabla 8 muestra las características de LEDs de AlInGaP y InGaN.

	<i>AlInGaP</i>	<i>InGaN</i>
<i>Salto de energía</i>	1,6 a 2,31 eV	3,4 eV (azul)
<i>Pico de longitud de onda</i>	585 nm (ámbar)	460 nm (azul) 520 nm (verde)
<i>Eficacia luminosa</i>	20 a 25 lm/W (ámbar)	6 lm/W (azul) 30 lm/W (verde)

La distribución espectral de un LED es pequeña, con anchos de banda de 17nm para los LEDs de AlInGaP y 35 nm para InGaN. Esto significa que los LEDs producen luz altamente saturada y casi monocromática. El color de un LED se especifica con su longitud de onda dominante, como se muestra en la Figura 36 en la que se ubican diferentes LEDs dentro del diagrama de cromaticidad de la CIE de 1931. Los LEDs de AlInGaP producen colores rojos (626 a 630 nm) , rojo-naranja (615 a 621 nm), naranja (605 nm) y ámbar (590 a 592 nm), mientras los de InGaN producen colores verdes (525 nm), azul-verde (498 a 505 nm) y azul (470 nm).



*Figura 36. Longitud de onda dominante para diferentes LEDs indicadas en el diagrama de cromaticidad de la CIE 1931.*

### 13.2. Evolucion de los LEDs

Antiguamente los LEDs tenían una eficiencia muy limitada (0,1 lm/W) y no servían para iluminación, sino que se los utilizaba sólo para indicación y de manera decorativa (el ejemplo más claro es en los televisores: el indicador de si el TV está encendido o en posición stand-by; o las lucecitas de los equipos musicales). Estos LEDs eran de color rojo y utilizaban la tecnología GaAsP. A medida que fueron evolucionando los conocimientos de aplicación de diversas tecnologías, se han obtenido LEDs de alto rendimiento. Los LEDs con tecnología InGaN es muy nueva aún (1998) y son fabricados por solamente dos o tres

empresas en el mundo. Con los nuevos materiales, los LEDs han alcanzado una mayor eficacia luminosa, 30 lm/W para el LED verde InGaN y 10 lm/W para el LED InGaN azul.

En el futuro irá aumentando la eficacia de los LEDs. Actualmente existen desarrollos en laboratorio de LED con 100 lm/W de rendimiento, aunque en producción se están haciendo con 40 o 50 lm/W. Desde los 1960 hasta hoy el rendimiento de los LEDs ha crecido 400 veces, como puede observarse en la Figura 37.

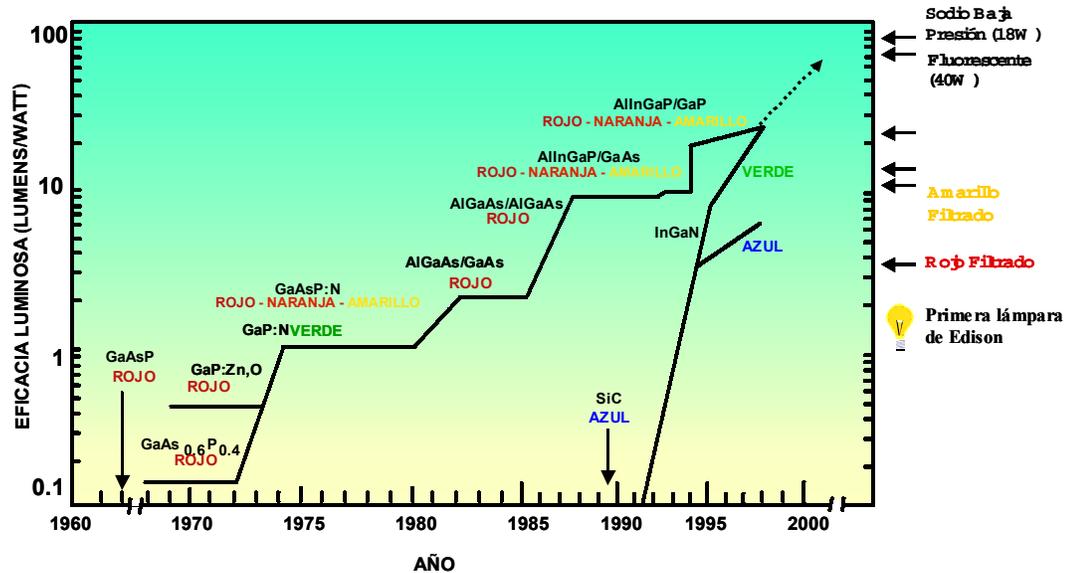
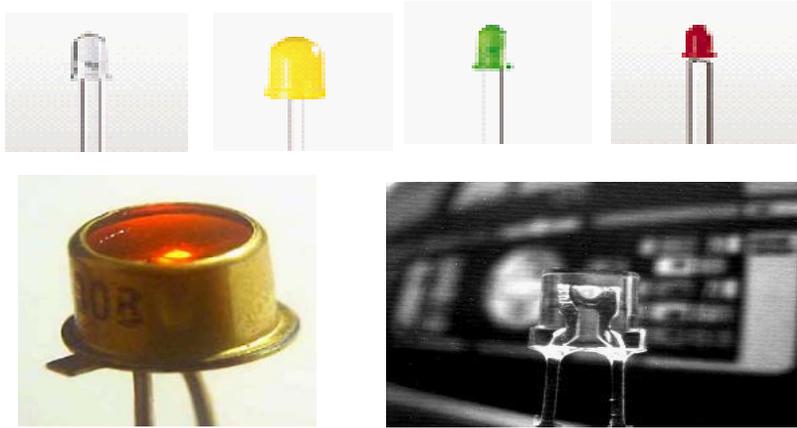


Figura 37. Evolución del rendimiento de los LED.

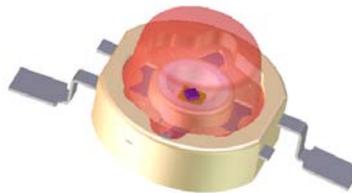
Paralelamente, los costos de los LEDs disminuyen un 20% cada año gracias a estos avances.

Otro de los aspectos importantes para graficar la evolución de estas tecnologías es el de la corriente que se podía hacer circular por el chip semiconductor sin que este se quemara. Los LEDs más conocidos, los de Ø5mm, soportan una corriente de hasta 20 mA. Actualmente existen en el mercado LEDs de alto rendimiento que soportan corrientes de 300mA y de hasta 1A. Distintos tipos de LED se muestran en la Figura 38.



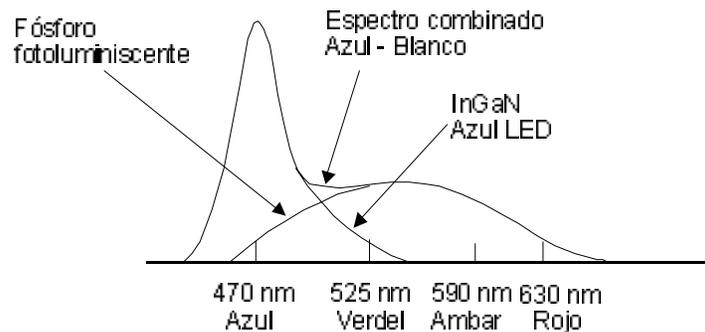
*Figura 38. Tipos de LED*

Los LEDs de alto rendimiento tienen un formato especial en donde tiene que adicionársele un disipador térmico. Son por lo general del tipo montaje superficial. En la *Figura 39* vemos este tipo de LED.



*Figura 39. LED de alto rendimiento*

Con la aparición del LED azul en el año 1990, se hizo posible la creación del LED blanco de banda ancha. Estos LEDs blancos se construyen con el agregado de un fósforo al LED azul. Parte de la luz azul es convertida por el fósforo en un ancho espectro amarillo, lo que resulta en una luz de apariencia blanca azulada (Figura 40). Los LEDs blancos también pueden ser generados mediante la mezcla de LEDs azul, verde y rojo.



*Figura 40. Distribución espectral de un LED azul-blanco*

### 13.3. Beneficios

Los beneficios que trae esta tecnología para la iluminación son innumerables. Vamos a tratar de describir algunos de ellos.

- *Bajo consumo:* Una lámpara LED requiere menor potencia para producir la misma cantidad de luz. El beneficio es notable cuando se trata de luz de color. Una lámpara incandescente de 100 W con filtro rojo produce 1 W de luz roja (por ej. en un semáforo). Para generar la misma cantidad de luz roja, un LED sólo requiere 12 W.
- *Baja tensión:* Generalmente se alimentan a 24V de corriente continua, adaptándose perfectamente a la mayoría de las fuentes de alimentación de los equipos, y reduciendo al mínimo los posibles riesgos de electrocución.
- *Baja temperatura:* Por su alto rendimiento, el LED emite poco calor. Además, los procesos de su operación no requieren el calor, como las lámparas incandescentes y hasta cierto punto las de descarga, por lo cual opera a baja temperatura.
- *Mayor rapidez de respuesta:* El LED tiene una respuesta de funcionamiento mucho más rápida que el halógeno y el fluorescente, del orden de algunos microsegundos, ello lo hace ideal para funcionar con un estrobo (sistemas estroboscópicos), aumentado así las prestaciones de este último.
- *Sin fallos de iluminación:* Absorbe las posibles vibraciones a las que pueda estar sometido el equipo sin producir fallos ni variaciones de iluminación. Esto es debido a que el LED carece de filamento luminiscente evitando de esta manera las variaciones de luminosidad del mismo y su posible rotura.
- *Mayor duración:* La vida de un LED es muy larga en comparación con los demás sistemas de iluminación:

	<i>Vida media, horas</i>
LED	100.000
Fluorescente	20.000
Halógeno	4.000
Incandescente común	1.000

La depreciación luminosa es mínima en relación a las lámparas halógenas y las fluorescentes:

<i>Pérdida de luminosidad</i>	<i>-20%</i>	<i>-30%</i>
LED	45.000 h	100.000 h
Fluorescente	5.000 h	20.000 h
Halógena	1.500 h	4.000 h

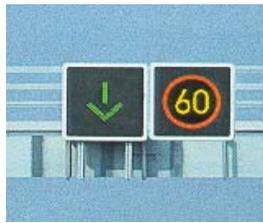
### **13.4. Aplicaciones**

Desde hace muchos años se emplean los LED como lámparas indicadoras, debido a su robustez mecánica, larga vida, pequeño tamaño y bajo consumo. Como fuente luminosa, su uso es relativamente reciente y es particularmente útil cuando se requieren luces de colores. Se puede decir que el mercado de señalización está siendo transformado con la aparición de estas fuentes de luz, por ejemplo en los semáforos: rojo, amarillo y verde; como luces de autos: pueden reemplazar a las incandescentes tanto para luces de freno o de posición; en iluminación infrarroja: su larga vida y robustez permite usarlas para situaciones de seguridad, en conjunción con cámaras infrarrojas o detectores donde la visión nocturna es necesaria. El desarrollo de LEDs de color blanco de características adecuadas (mayor eficacia) puede aumentar las posibles aplicaciones de este tipo de fuente luminosa.

Día a día vemos nuevas aplicaciones de la tecnología de LED. Entre las aplicaciones más difundidas podemos señalar algunas en la Figura 41:



SEMAFOROS



SEÑALES DE TRAFICO



PANELES DE INFORMACIÓN AL PASAJERO



BALIZAMIENTO



SEÑALIZACIÓN EN PISTAS DE ATERRIZAJE EN AEROPUERTOS



DEMARCAACION DE CAMINOS

CARTELERIA INTELIGENTE PARA AUTOPISTAS



ILUMINACIÓN DE EMERGENCIA

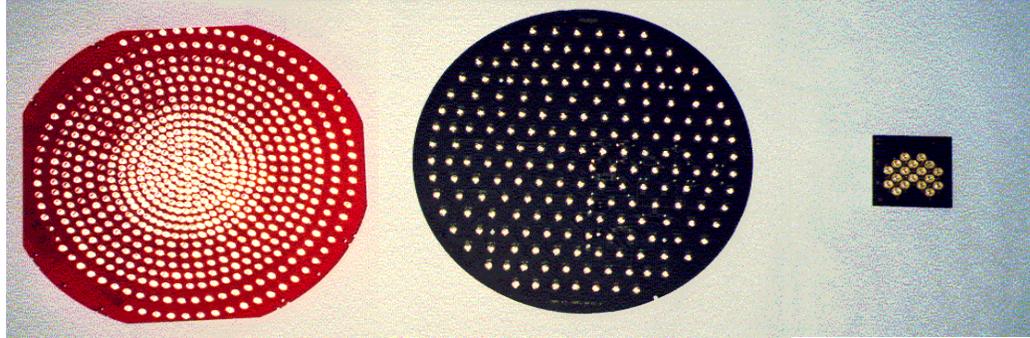


PANELES DE VIDEO COLOR

*Figura 41. Aplicaciones de los LEDs*

Considerando que los semáforos requieren luces de colores y que los LEDs generan luces de color directamente, esta aplicación fue una de las primeras para los LEDs. Asimismo, se ha visto varios avances tecnológicos para esta aplicación.

En el año 1993, para reemplazar una lámpara incandescente de 100W se necesitaban 700 LEDs de  $\varnothing$  5mm (Figura 42, izquierda). Para el año 1996 ya se necesitaban solamente 200 LEDs del mismo tamaño (Figura 42, centro). En la actualidad, esa cantidad se redujo a sólo 18 LEDs de alto flujo luminoso (Figura 42, derecha, a la misma escala)



*Figura 42. Evolución en las lámpara para semáforos*

En este caso también trae beneficios en cuanto a la seguridad. Por no poseer reflector metálico en su interior, carece del llamado Efecto Fantasma que consiste en el virtual apagado de las tres lámparas del semáforo cuando el conductor queda entre medio del semáforo y el Sol. En el caso de las lámparas a LED, la incidencia de los haces del Sol sobre ellas no produce efecto fantasma. Otro aspecto fundamental es que permite el desarrollo de semáforos más compactos y estancos, lo que evitará pérdidas causadas por el vandalismo.

Con todas estas virtudes y la única desventaja, por el momento y por poco tiempo mas, del costo, el LED puede ser la fuente de iluminación artificial estrella del futuro.

#### **14. Criterios de selección de lámparas**

Las características fotométricas, cromáticas, eléctricas y de duración junto al programa de actividades y objetivos del espacio a iluminar, así como las consideraciones arquitectónicas y económicas constituyen los condicionantes a la hora de elegir las fuentes luminosas.

De esto se desprende que, si bien no es posible dar reglas estrictas cuando se elige una lámpara, sí es importante poseer criterios claros de elección a fin de poder priorizar aquellas características más relevantes al caso en cuestión.

Los criterios de elección se pueden dividir en:

- Criterios de eficacia
- Criterios cromáticos
- Criterios de duración

##### *Criterios de eficacia*

La eficacia es la característica fotométrica más importante en cuanto a las consideraciones energéticas, ya que cuanto más eficiente es una lámpara se necesita menos energía para producir la misma cantidad de luz. La eficacia las lámparas de *sodio de baja presión* tiene el mayor valor (SBP, hasta 200 lm/W), luego le siguen las de *sodio de alta presión* (SAP,

hasta 130 lm/W) y luego las *fluorescentes lineales* (hasta 100 lm/W). Generalmente otros criterios inciden antes de elegir una lámpara de alta eficacia. Por ello, y tal como hemos señalado antes, las lámparas SBP tienen escasos usos por su luz monocromática sin capacidad de reproducción de colores. A veces se le asigna un valor negativo al índice de reproducción cromática (IRC). Cuando se valoriza el rendimiento a pesar del bajo IRC, se eligen las SAP, como solución de compromiso, por ejemplo en el alumbrado público y para la iluminación de grandes espacios exteriores, donde se requiere altos niveles de iluminación y el IRC se considera menos importante. Cuando se busca una lámpara compacta, con buena reproducción de colores, las *lámparas fluorescentes compactas* (LFC) son una opción interesante, por lo cual se la utilizan con mayor frecuencia en las viviendas y ciertas aplicaciones comerciales. Las LFC se limitan a potencias bajas (típicamente menores a 26 W, aunque existen algunos modelos especiales de mayor potencia) y de bajo flujo luminoso. Cuando se requiere alta eficacia (hasta 100 lm/W) y excelente reproducción de colores con alto flujo luminoso, las de *halogenuros metálicos* son ideales.

#### *Criterios cromáticos*

Desde el punto de vista de la reproducción cromáticas las fuentes que presentan el mayor índice son las *incandescentes halógenas y convencionales* (IRC = 100), pero éstas tienen baja eficacia. Hoy días existen modelos de lámparas fluorescentes (denominados trifosforados) y de mercurio halogenado con IRC aproximadamente 80, acercándose al de las incandescentes pero con una eficacia muy superior a las incandescentes, pero inferior a las SAP. Se eligen estas lámparas para la iluminación de interiores y de exteriores donde el IRC es tan importante como la eficacia.

#### *Criterios de duración*

Las lámparas de inducción son las de mayor vida, luego las de mercurio de alta presión y sodio de alta presión (de 16.000 a 24.000 h). Siguen las lámparas fluorescentes y de mercurio halogenado (de 6.000 a 10.000 h, aunque algunos modelos nuevos superan estos valores). Las incandescentes comunes constituyen el grupo más desfavorable, con una vida nominal de 1000 h.

### **Bibliografía**

CEI, 1996. *Aplicaciones Eficientes de Lámparas*. Cuadernos de eficacia energética en iluminación N° 1. Comité Español de Iluminación.

Bierman A., 1998. "LEDs from indicators to illumination", *Lighting Futures* Volume 3 Number 4, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.

Bullough J., Huang Kun y K. Conway, 2000. *Lighting Transformations: Optimizing the design and use of light emitting diodes for visually critical applications in transportation and architecture: Summary of LEDs and traffic signal technology*, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.

- Cayless M.A. y A.M. Marsden, 1983. *Lamps and Lighting*, Third Edition Ed. Arnold.
- Coaton J.R. y A.M. Marsden, 1997. *Lamps and Lighting*. Ed. Arnold.
- CIE, 1986. *Guide for Interior Lighting*, 2nd Edition, N° 29.2, Commission International de l'Eclairage.
- De Boer J. y D. Fisher, 1978. *Interior lighting*, Ed. Philips Technical Library.
- Ducharme A., 2001. "A thousand points of light, at least", *LD+A Journal*, July, 57-59
- Henderson S. T. y A.M. Marsden, 1979. *Lamps and Lighting*, Ed. Arnold.
- IES, 2000. *The IESNA Lighting Handbook*. 9<sup>th</sup> Edition. Illuminating Engineering Society North America.
- IES, 1996. *Museums and art gallery lighting: a recommended practice*, IES RP 30-96. Illuminating Engineering Society North America.
- Meyer Chr. y H. Nienhuis, 1988. *Discharge Lamps*. Philips Technical Library.
- Murdoch I.B., 1985. *Illumination Engineering: From Edison's Lamp to the Laser* Macmillan Pub. Comp, Collier Macmillan Pub.
- Narendran N., J. D. Bullogh, N. Maliyadoga y A. Bierman, 2000. "What is useful life for white LEDs?", IES (Illuminating Engineering Society) Annual Conference, paper N° 52, Washington, August.
- Osram, 2000. *Catálogo General de Luz*. El Programa ELI agradece la autorización y gentileza de Osram de Argentina en la reproducción de especificaciones y figuras de algunos de sus productos.
- Osram-Sylvania, 2001. *Product Catalog Online*.
- Philips, 2001. *Catálogo General de Lámparas*. El Programa ELI agradece la autorización y gentileza de Philips de Argentina en la reproducción de especificaciones y figuras de algunos de sus productos.