

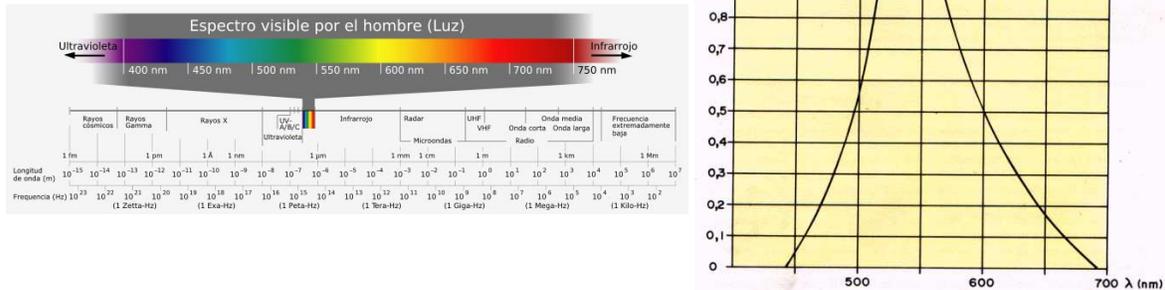
# Capítulo 2

## CÁLCULO DE ILUMINACIÓN PARA UNA CASA-HABITACIÓN.

### 2.1 Tipos de iluminación.

La luz es la energía radiante calculada respecto a su capacidad para estimular el sentido de la vista de un observador. De todos los componentes del ojo, el más importante es la retina. Es aquí donde se realiza la percepción de la imagen ya que es la última de diez capas internas en el ojo. Las nueve primeras están compuestas de neuronas, en su mayor parte, y son atravesadas por los fotones provenientes del exterior. La retina está constituida por una enorme cantidad de captadores fotosensibles, cada uno de los cuales da en cada momento información correspondiente de la intensidad y el color de la radiación incidente. Estos captadores fotosensibles son de dos tipos: conos y bastones; se los conoce con estos nombres debido a su forma. Los conos y bastones son las terminaciones de una gran cantidad de fibras nerviosas que forman el nervio óptico, el cual se encarga de transmitir todas las informaciones a las superficies estriadas del cerebro. Los conos poseen un enlace nervioso individual con el cerebro, mientras que los bastones van unidos a un mismo conducto nervioso por grupos que pueden llegar a ser miles de ellos. De aquí que los conos den mensajes sensoriales más precisos y que los bastones tengan una mayor sensibilidad, incluso con niveles de energía luminosa muy bajos.

El ojo humano solo percibe radiaciones con longitudes de onda entre 380 y 780 nanómetros con diferente sensibilidad dependiendo del grado de luminosidad. La respuesta visual es máxima en la zona verde-amarilla del espectro visible, correspondiendo a una longitud de onda de  $555[nm]$ , de esta forma la mayor eficiencia de las fuentes de luz se tiene cuando emiten radiaciones cercanas a esta longitud de onda.



**Ilustración 23**

*Espectro Visible, Sensibilidad Relativa del ojo en función de la longitud de onda*

*Fuente: Internet*

La Fotometría se encarga de la medida de la luz como el brillo percibido por el ojo humano y la radiometría mide la luz en términos de potencia absoluta. Mediante la fotometría se determinó la función de sensibilidad espectral (sensibilidad relativa del ojo humano)  $V_{\lambda}$ , esta función es diferente dependiendo de las condiciones de iluminación en que se encuentre el observador, en una buena iluminación (visión fotópica) la curva alcanza su pico en  $\lambda = 555[\text{nm}]$  y en mala iluminación (visión escotópica) es en  $\lambda = 507[\text{nm}]$ . Una magnitud fotométrica corresponde a la radiación del espectro electromagnético visible.

El flujo luminoso (F) se define como el flujo radiante dentro del espectro visible y descrito por la curva de sensibilidad relativa del ojo humano.

$$F = 683 \int F_{r\lambda} V_{\lambda} d\lambda$$

Se mide en lumen  $[lm]$  que se define como el flujo luminoso producido por el flujo radiante de  $\frac{1}{683} [W]$ , emitido en la longitud de onda de  $555[\text{nm}]$ .

La eficacia luminosa incluye dos términos, la eficacia luminosa de la radiación (K) es la relación entre el flujo luminoso y el flujo radiante. La eficacia luminosa (n) de la fuente de luz, es la relación entre el flujo luminoso y la potencia absorbida por la fuente.

$$K = \frac{F}{F_r} \left[ \frac{lm}{W} \right] \qquad n = \frac{F}{P} \left[ \frac{lm}{W} \right]$$

La intensidad luminosa (I) en una dirección determinada es el flujo luminoso emitido en un ángulo sólido que contiene dicha dirección. La unidad de medición para esta magnitud es la candela [cd] que es la unidad base del Sistema Internacional de Unidades (SI) por lo que las distintas unidades fotométricas se derivan de ésta. La más reciente definición para la candela es la luz producida por una fuente luminosa de 540[THz] con una potencia de  $\frac{1}{683}$ [W] sobre una esfera completa centrada en la fuente de luz. La frecuencia de 540[THz] corresponde a una longitud de onda de 555[nm].

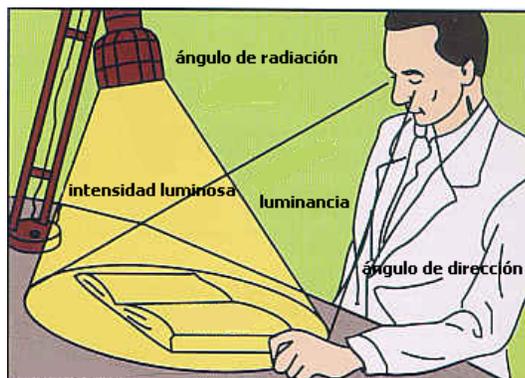
$$I = \frac{F}{\Omega} [cd]$$

La iluminancia (E) es el flujo luminoso recibido por unidad de superficie, también se conoce como nivel de iluminación. Se mide en lux [lx] que es igual a lumen por metro cuadrado [ $lm/m^2$ ].

$$E = \frac{F}{S} [lx]$$

La luminancia es la relación entre la intensidad luminosa de una fuente de luz, en una dirección, y la superficie de la fuente proyectada según dicha dirección.

$$L = \frac{I}{S \cos \alpha} \left[ \frac{cd}{m^2} \right] \qquad \alpha \text{ es el ángulo de dirección}$$



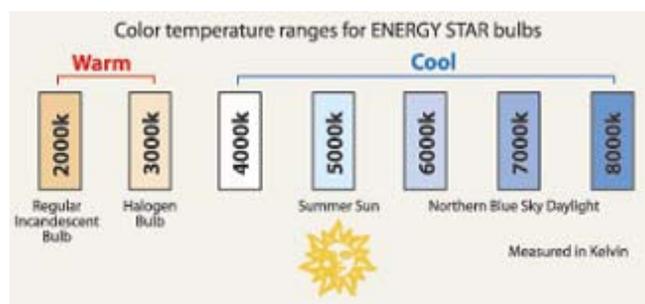
*Ilustración 24*  
*Términos fotométricos*  
*Fuente: Internet*

La vida o duración de una fuente de luz es el tiempo medido en horas de funcionamiento que transcurre hasta que se considera inútil según un determinado criterio. Se tiene la vida media, que es cuando la fuente deja de emitir luz. La vida útil es el tiempo que transcurre antes de que la fuente de luz deje de cumplir un determinado nivel de flujo luminoso. Los fabricantes suelen ofrecer productos con una vida útil hasta que el flujo luminoso se reduce en un 80% de su valor inicial.

La luz para iluminación resulta de la emisión de varias longitudes de onda, es decir, es la combinación de los colores del espectro visible en diferente intensidad, las lámparas incandescentes emiten mayor radiación para tonalidades cercanas al rojo y amarillo, lámparas de mercurio, halógenas y fluorescentes tienden a tener una mayor radiación para la tonalidad verde al igual que LED's para iluminación.

Existen dos parámetros que definen las propiedades de color de una fuente de luz: la apariencia de color de la fuente, que es el color que presenta la propia fuente de luz; y la reproducción cromática obtenida de dicha fuente de luz, es decir, cómo son reproducidos los colores de los objetos iluminados por la fuente de luz. La apariencia de color se obtiene a través de la correlación color temperatura (CCT) la cual describe la apariencia de color de una fuente de luz blanca en términos de temperatura en grados Kelvin. Este concepto se define como la apariencia de un cuerpo negro sometido a altas temperaturas, conforme se calienta el cuerpo negro cambia de tonalidad pasando por

rojo, naranja, amarillo, blanco y finalmente azul. El CCT de una fuente de luz es la temperatura en grados Kelvin a la cual el cuerpo negro tiene la misma tonalidad de la luz en cuestión. Con este término se puede definir el color de temperatura de una fuente de luz como cálida o fría mediante los rangos de temperatura mostrados en la ilustración.



*Ilustración 25*  
*Correlación color temperatura*  
*Fuente: Internet.*

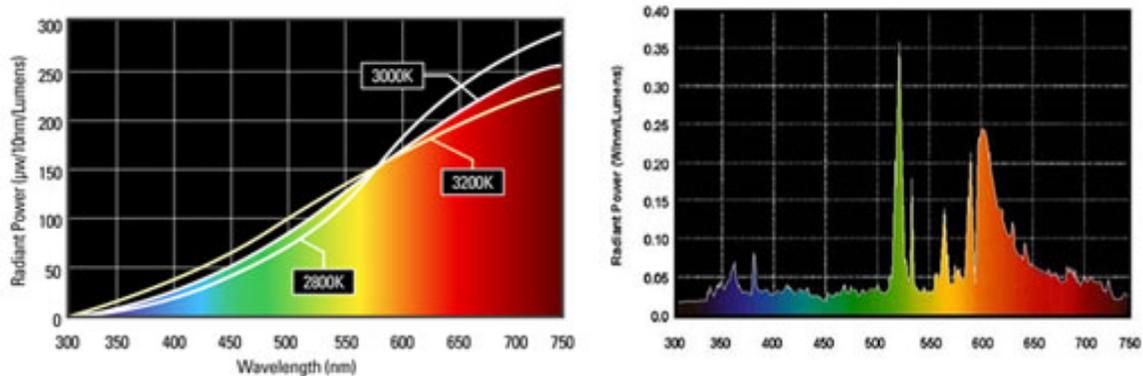
El índice de rendimiento de color (CRI) es el otro término relacionado al color de la fuente de luz, que determina la capacidad de la fuente de luz para mostrar los colores verdaderos de diferentes objetos al ser iluminados por esta fuente de luz. Mientras mayor sea el índice de rendimiento del color, más vibrante o más cercano al original aparecerán los colores de los objetos. Una fuente de luz con un índice de rendimiento del color de casi 100 tiene el mismo rendimiento que la luz de día. Por otro lado, una fuente de luz con un índice de rendimiento de color de 0 proporciona luz sin rendimiento de color, parecido a una televisión a blanco y negro. Acorde con la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) la calidad del color se integra en 3 grupos:

Grupo de rendimiento de color	Valores extremos del CRI
1 buen CRI	Mayor a 85
2 normal CRI	70 – 85
3 pobre CRI	Menor a 70

*Tabla 1*  
*Clasificación CRI*



en incandescencia. Esencialmente, la luminiscencia es la radiación luminosa emitida por un cuerpo, por efecto de un agente exterior que excita los átomos de dicho cuerpo, el número de niveles de energía posibles es reducido y la luz se emite en un número limitado de longitudes de onda, lo que origina un espectro discontinuo.



*Ilustración 27*

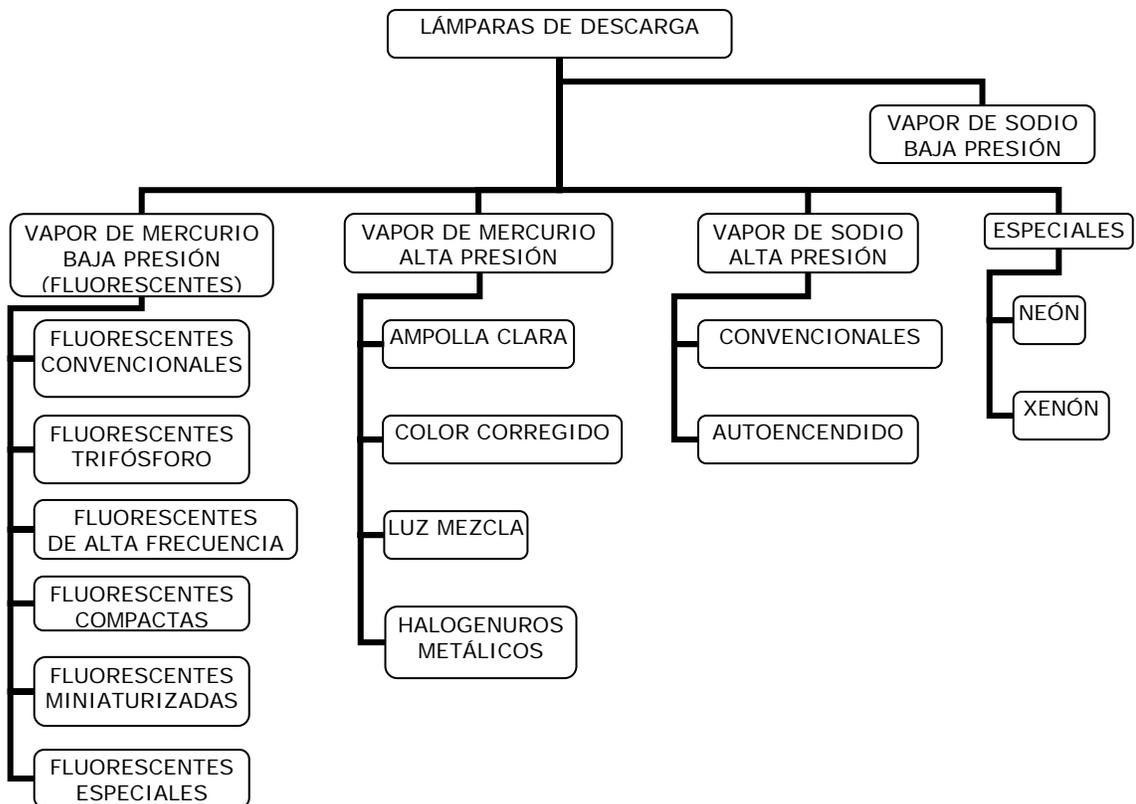
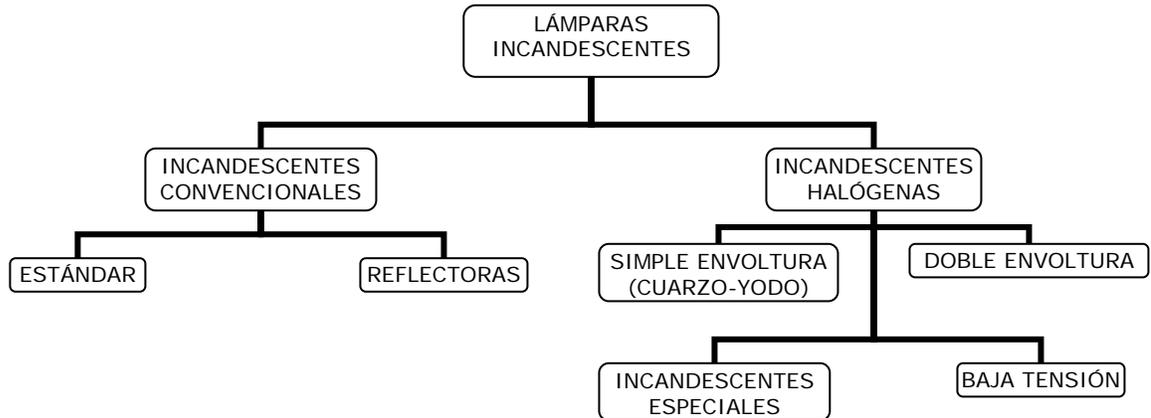
*Espectros: Incandescencia y Luminiscencia  
Fuente: Departamento de Energía de E.U.*

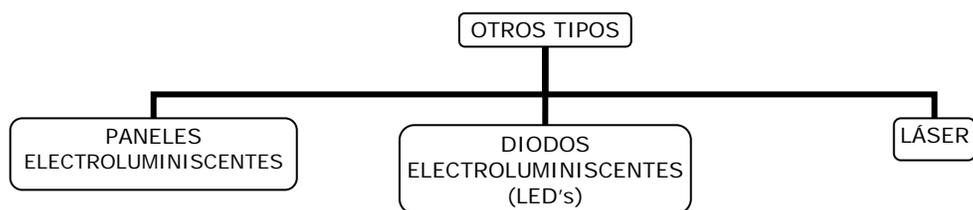
La luminiscencia se clasifica según el agente excitador en:

- ✓ Electroluminiscencia.  
Producida por la acción de un campo eléctrico en un gas o material sólido. Ejemplos de estos son lámparas de descarga, LED's.
- ✓ Fotoluminiscencia.  
Producida por la acción de otras radiaciones de distinta longitud de onda. Por ejemplo la conversión de radiación ultravioleta en visible (lámparas fluorescentes) y láseres.

Los tipos de iluminación actuales se basan en la incandescencia y luminiscencia. Las lámparas que funcionan por incandescencia, se conectan directamente a la red eléctrica, a diferencia de las lámparas de descarga que necesitan limitadores de corriente y de tensión para su encendido y funcionamiento.

Los tipos de lámparas existentes se pueden clasificar de la siguiente forma:





*Tabla 2*  
*Clasificación de lámparas*

Las lámparas incandescentes generan luz a partir del paso de una corriente eléctrica en un filamento de tungsteno contenido en una bombilla o ampolla y sellado por un casquillo. Una gran parte de energía eléctrica se convierte en calor y lo demás en energía luminosa dando como resultado una eficacia luminosa de 10 a 20  $[lm/W]$ . El espectro de emisión para lámparas incandescentes convencionales es continuo siendo la emisión de energía mayor para longitudes de onda cercanas al infrarrojo por lo que este tipo de lámparas dan una luz cálida del orden de 2700[K] y para lámparas incandescentes halógenas es un poco menos cálido del orden de los 3000 a 3200[K].

Este tipo de lámparas dan iluminación para cualquier tensión eléctrica, aunque son diseñadas para dar el mejor rendimiento y calidad a tensiones nominales. Generalmente su vida media es de 1000 a 2000 horas manteniendo un CRI cercano a 100.

Existe variedad de formas, tamaños y tensiones nominales de trabajo para estas lámparas. Para lámparas incandescentes convencionales las tensiones nominales son de 127[V] y 220[V], potencias que van desde los 25 hasta 2000[W] teniendo eficacia luminosa de 7 a 27  $[lm/W]$  y flujos luminosos desde 250 a 40000  $[lm]$ . En cuanto a lámparas incandescentes halógenas funcionan con tensiones nominales de 220[V], 127[V], 24[V], 12[V] y 6[V] dando flujos luminosos de 1000 a 44000  $[lm]$  y mismo rango de eficacia luminosa que las incandescentes convencionales.



**Ilustración 28**

*Lámparas Incandescentes: Convencionales, Reflectoras, Halógeno*  
*Fuente: proyectoyobra.com*

Las lámparas de descarga varían en cuanto a su funcionamiento y desempeño según el gas que contengan. Primeramente las lámparas de vapor de mercurio a baja presión (lámparas fluorescentes) emiten radiaciones ultravioleta cuando el gas está bajo una presión cercana a  $1[Pa]$ , el polvo fluorescente contenido en la lámpara convierte estas radiaciones en luz visible. De la composición de estas sustancias depende la cantidad y calidad de la luz y el índice de rendimiento de color.

En general este tipo de lámparas constan de un tubo de vidrio de tonalidad blanca por el polvo fluorescente (halofosfatos de calcio, fluorgermanato de magnesio, aluminatos de magnesio) de diferentes diámetros y longitudes, electrodos de tungsteno recubiertos por sustancias emisoras de electrones, un gas de llenado (gases nobles) para aumentar la probabilidad de colisión de los electrones con los átomos de mercurio para que emitan

radiación ultravioleta y sellados con casquillos denominados G (espigas) y R (un contacto).

El encendido y funcionamiento de lámparas fluorescentes se hace por medio de elementos externos, el cebador que permite el precalentamiento de los electrodos y un balastro para iniciar la descarga por medio de una sobretensión instantánea.

La luz emitida por estas lámparas es del tipo blanco cálido y luz de día ( $2700 - 6500[K]$ ), con índice de rendimiento de color de  $50 - 95$ . La vida útil de estas lámparas es de 7500 horas aproximadamente. Existen tubos fluorescentes de diferentes potencias y tamaños que en general presentan flujos luminosos de  $850 - 5400[lm]$  y eficacia luminosa de  $43 - 80[lm/W]$ .



*Ilustración 29*

*Tubos Fluorescentes con casquillos G*

*Fuente: BAW Iluminación*

Una variante de estas lámparas son las fluorescentes compactas y miniaturizadas, son de tubo estrecho de 10 a 15 milímetros, curvos con formas circulares, de “U”, de espiral o de bombilla, la sustancia fluorescente se denomina trifósforo. Incluyen el cebador y balastro dentro del empaque por lo que su conexión a la red es directa, su casquillo es en la mayoría de los caso igual al de las incandescentes y el resto es del tipo G. Tienen una vida media de 8000 horas dando luz cálida similar a las lámparas incandescentes, aunque existen versiones de  $3000 - 4000[K]$  con CRI de 85. Tienen flujos luminosos de  $250 - 1800[lm]$  y eficacia luminosa de  $50 - 81[lm/W]$ .



**Ilustración 30**  
*Lámparas Fluorescentes Compactas y Miniaturizadas*  
*Fuente: General Electric*

Las lámparas de vapor de mercurio a alta presión se dividen en lámparas de mercurio, luz mezcla y halogenuros metálicos. A medida que aumenta la presión del vapor de mercurio en el interior del tubo de descarga, la radiación ultravioleta característica de la lámpara disminuye para emitir radiaciones del espectro visible desde la coloración violeta al amarillo, por lo que la luz emitida es azul-verde y se añade sustancias fluorescentes que aprovechan las radiaciones ultravioleta y las convierte en radiaciones de tonalidad roja. Los elementos de esta lámpara son el tubo de descarga generalmente de cuarzo para soportar la alta temperatura durante el funcionamiento de ésta ( $750^{\circ}\text{C}$ ), es de forma cilíndrica con los extremos semiesféricos. Electrodo principales de tungsteno similares a los de las lámparas fluorescentes, un electrodo auxiliar que es un hilo de tungsteno o molibdeno, un gas de llenado comúnmente argón o una combinación de argón con neón y la ampolla exterior (ovoide, globo o parabólica) de vidrio endurecido diseñado para soportar temperaturas del orden de  $350^{\circ}\text{C}$ , entre el tubo de descarga y ésta ampolla existe un gas de relleno (argón y nitrógeno) para proteger los componentes metálicos interiores. La sustancia fluorescente es vanadato de itrio activado con europio por su mejor resistencia a la alta temperatura que los antiguos compuestos de magnesio y porque ofrece una eficacia luminosa más elevada.

Para encenderlas se recurre a un electrodo auxiliar próximo a uno de los electrodos principales que ioniza el gas inerte contenido en el tubo y facilita el inicio de la descarga entre los electrodos principales. A continuación se inicia un periodo transitorio de aproximadamente cuatro minutos, caracterizado porque la luz pasa de un tono violeta a blanco azulado, en el que se produce la vaporización del mercurio y un incremento

progresivo de la presión del vapor y el flujo luminoso hasta alcanzar los valores normales. Si en estos momentos se apagara la lámpara no sería posible su reencendido hasta que se enfriara, puesto que la alta presión del mercurio haría necesaria una tensión de ruptura muy alta.

La vida útil esta determinada considerando un factor de mantenimiento de flujo del 80% del inicial y periodos de 3 horas por encendido, la vida útil alcanza 8000 horas. El máximo índice de rendimiento de color es de 60 dando una temperatura de color de  $3500 - 4500[K]$ . Permiten flujos luminosos de  $2000 - 125000[lm]$  con eficacia luminosa de  $40 - 63[lm/W]$ . Necesitan un balastro que absorbe el exceso de la tensión de red sobre la tensión de arco de la lámpara para alimentaciones de  $220[V]$  y elevar la tensión para alimentaciones inferiores.



*Ilustración 31*

*Lámpara de Vapor de Mercurio a alta presión*

*Fuente: Internet*

Las lámparas de luz mezcla son el resultado de la combinación de una lámpara incandescente con una de descarga. Estas lámparas ofrecen un índice de rendimiento de color de 60 y una temperatura de color de  $3600[K]$ . La duración está limitada por el tiempo de vida del filamento que es la principal causa de fallo. Respecto a la depreciación del flujo hay que considerar dos causas. Por un lado se tiene el depósito de partículas en la ampolla por el wolframio evaporado y por otro la pérdida de eficacia de los polvos fosforescentes. En general, la vida útil se sitúa en torno a las 6000 horas. Su eficacia luminosa es de  $20 - 60[lm/W]$ . Una particularidad de estas lámparas es que

no necesitan balastro ya que el propio filamento actúa como estabilizador de la corriente. Esto las hace adecuadas para sustituir las lámparas incandescentes sin necesidad de modificar las instalaciones.



*Ilustración 32*  
*Lámpara Luz Mezcla*  
*Fuente: Internet*

Al añadir en el tubo de descarga yoduros metálicos (sodio, talio, indio) se consigue mejorar considerablemente la capacidad de reproducir el color de la lámpara de vapor de mercurio (lámparas de halogenuros metálicos). Cada una de estas sustancias aporta nuevas líneas al espectro, por ejemplo amarillo el sodio, verde el talio y azul el indio. Los resultados de estas aportaciones son una temperatura de color de  $3000 - 6000 [K]$  dependiendo de los yoduros añadidos y un rendimiento del color de entre 65 y 85. La eficacia luminosa de estas lámparas es de  $60 - 96 [lm/W]$  y su vida media es de 10000 horas. Tienen un periodo de encendido de unos diez minutos, que es el tiempo necesario hasta que se estabiliza la descarga. Para su funcionamiento es necesario un dispositivo elevador de tensión debido a que las tensiones de arranque son muy elevadas ( $1500 - 5000 [V]$ ).



**Ilustración 33**

*Lámpara de halogenuros metálicos*

*Fuente: Internet*

La descarga en vapor de sodio a baja presión es muy similar a la del mercurio a baja presión, con la diferencia de que la temperatura en el tubo de descarga es más elevada ( $260[^\circ C]$ ) para asegurar la evaporación del sodio. Alrededor del 90% de la radiación emitida es de  $589 - 589.6[nm]$  y el resto a radiaciones infrarrojas. Debido a su cercanía al máximo de la sensibilidad relativa del ojo este tipo de lámparas presentan una elevada eficacia luminosa ( $160 - 180[lm/W]$ ). Una lámpara de vapor de sodio a baja presión tiene una vida media de 15000 horas y la depreciación de flujo luminoso que sufren a lo largo de su vida es muy baja por lo que su vida útil es de entre 6000 y 8000 horas. Esto junto a su alta eficiencia y las ventajas visuales que ofrece la hacen muy adecuada para usos de alumbrado público. En cuanto al final de su vida útil, este se produce por agotamiento de la sustancia emisora de electrones como ocurre en otras lámparas de descarga. Aunque también se puede producir por deterioro del tubo de descarga o de la ampolla exterior. En estas lámparas el tubo de descarga tiene forma de U para disminuir las pérdidas por calor y reducir el tamaño de la lámpara. Está elaborado de materiales muy resistentes ya que el sodio es muy corrosivo y se hacen unas pequeñas hendiduras para facilitar la concentración del sodio y que se evapore a la temperatura menor posible. El tubo está encerrado en una ampolla al vacío con objeto de aumentar el aislamiento térmico. De esta manera se ayuda a mantener la elevada temperatura de funcionamiento necesaria en la pared del tubo ( $270\text{ }^\circ C$ ).

El tiempo de arranque de una lámpara de este tipo es de aproximadamente diez minutos. Es el tiempo necesario desde que se inicia la descarga en el tubo en una mezcla de gases inertes (neón y argón) hasta que se vaporiza todo el sodio y comienza a emitir luz.



**Ilustración 34**

*Lámpara de Vapor de Sodio a baja presión*

*Fuente: nsp-co.com*

Las lámparas de vapor de sodio a alta presión tienen una distribución espectral que abarca casi todo el espectro visible proporcionando una luz blanca dorada mucho más agradable que la proporcionada por las lámparas de baja presión. Tiene una temperatura de color de  $2100[K]$  y capacidad para reproducir los colores mejor que las lámparas a baja presión con CRI de 65 a 80. Tienen una eficacia luminosa de  $130[lm/W]$ . La vida media de este tipo de lámparas es de 20000 horas y su vida útil oscila entre 8000 y 12000 horas. Entre las causas que limitan la duración de la lámpara, además de la depreciación del flujo, es por fugas en el tubo de descarga y del incremento progresivo de la tensión de encendido necesaria hasta niveles que impiden su correcto funcionamiento. Las condiciones de funcionamiento son muy exigentes debido a las altas temperaturas ( $1000[^\circ C]$ ), la presión y las agresiones químicas producidas por el sodio que debe soportar el tubo de descarga. En su interior hay una mezcla de sodio, vapor de mercurio que actúa como amortiguador de la descarga y xenón que sirve para facilitar el arranque y reducir las pérdidas térmicas. El tubo está rodeado por una ampolla al vacío. La tensión de encendido de estas lámparas es muy elevada y su tiempo de arranque es muy breve.



**Ilustración 35**

*Lámpara de Vapor de Sodio a alta presión*

*Fuente: Internet*

Las lámparas de xenón presentan un espectro continuo y completo dando una luz fría o de luz de día ( $5000-6000[K]$ ), con emisiones importantes de infrarrojo y ultravioleta, están rellenas únicamente de xenón que permite una eficacia luminosa elevada y buen CRI. Su encendido es instantáneo, emitiendo desde el primer momento flujo luminoso nominal, para lograr esto, se necesita una tensión de arranque extremadamente elevada del orden de  $10-40[kV]$ . La descarga se efectúa en el interior de un tubo de cuarzo, entre dos electrodos de tungsteno, siendo la distancia entre ellos el origen de los dos tipos de lámparas de xenón. Por una parte se tiene las lámparas de arco corto dando eficacias luminosas de  $15-40[lm/W]$ , y las lámparas de destellos usadas en fotografía (flash), faros, proyecciones cinematográficas con eficacia luminosa de  $20-30[lm/W]$ .



**Ilustración 36**

*Lámpara de Xenón*

*Fuente: Internet*

Las lámparas de neón, conocidos como tubos de neón por ser de gran longitud en relación con su diámetro necesitan de una alta tensión para encenderse, se usa neón y argón para producir una tonalidad roja y azul y sustancias fosforescentes para completar la gama de colores a elegir dependiendo del color que se desea. No existen dimensiones normalizadas, teniendo tensiones de trabajo de  $250 - 600[V]$  dependiendo del diámetro, el gas de relleno y la presión del mismo. La vida útil de estos tubos de neón es de 20000 horas y no se ve afectada por el número de encendidos ya que los electrodos carecen de sustancia emisora de electrones.



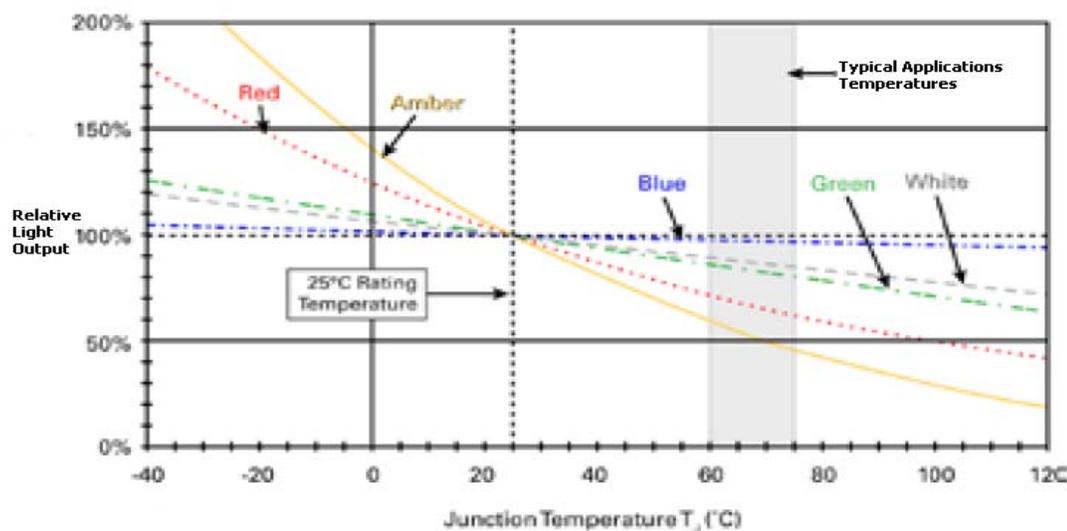
*Ilustración 37*  
*Lámpara de Neón*  
*Fuente: Internet*

Los LED's solo emiten radiaciones del espectro visible, y la intensidad para las longitudes de onda se determina de acuerdo a la temperatura del color que emitirá el LED, las características lumínicas son cambiantes por ser una tecnología en desarrollo y se mencionarán más adelante acorde a las existentes en el mercado.

Lo que respecta a la vida útil de un LED, se ha establecido que cuando un LED emite el 70% o 50% del valor de flujo luminoso inicial ha cumplido con su vida útil, estos límites se abrevian como  $L_{70}$  para iluminación general y  $L_{50}$  para iluminación de decoración. Los periodos de vida útil de lámparas tradicionales se determinan por procedimientos de prueba establecidos en estándares. Por ejemplo, lámparas fluorescentes compactas son probadas acorde al estándar LM-65, publicado por la Sociedad Norteamericana de Ingeniería de Iluminación (IESNA), este proceso toma 15 meses en ser completado (10000 horas). Una prueba con este procedimiento para LED's no es práctico para el largo periodo de vida útil de estos, tomaría 5 o 6 años completar la prueba, además de

que los productos probados serían obsoletos por que es una tecnología en desarrollo. Para evaluar la vida útil de LED's el IESNA desarrolla un procedimiento de prueba consistente en poner en funcionamiento los LED's por 6000 horas. Después de las primeras 1000 horas se mide el flujo luminoso y normalizado a 100% debido a que muchos LED's tienden a incrementar su flujo luminoso durante este periodo, luego se toman lecturas del flujo luminoso hasta cumplir con las 5000 horas restantes. Las mediciones tomadas se comparan con el valor inicial, si no se alcanzaron los límites  $L_{70}$  y  $L_{50}$ , las mediciones obtenidas son extrapoladas para obtener los valores de estos límites.

La calidad de la luz y la vida útil están estrechamente relacionadas con la temperatura en lámparas de LED's las cuales deben incluir disipadores de calor en contacto directo con el LED. La primer causa en la depreciación del flujo luminoso es el calor generado en la *juntura*<sup>2</sup> del LED. Los LED's no emiten calor por radiación infrarroja por lo que se debe transmitir el calor por conducción, si el calor se queda en el LED, el flujo luminoso y la vida útil disminuyen y se altera el color de temperatura de la luz blanca del LED. La siguiente ilustración muestra la variación de los flujos luminosos para diferentes colores conforme varia la temperatura de la juntura del LED.

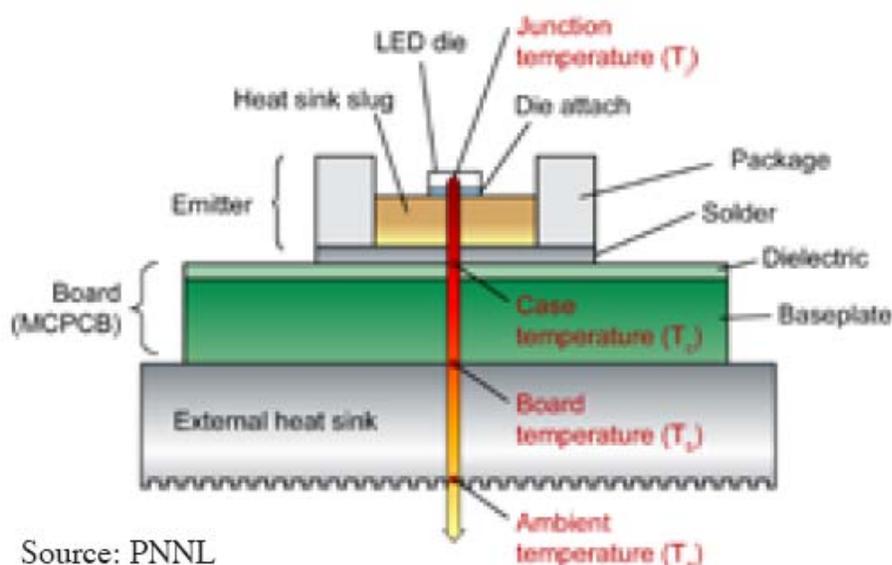


**Ilustración 38**

Gráfica de variación de flujo luminoso a la temperatura de juntura  
Fuente: Pacific Northwest National Laboratory

<sup>2</sup> Juntura. Es la frontera que delimita las regiones del material P y N en un diodo y donde se encuentra la región de agotamiento característica de cualquier unión P-N.

La temperatura de la juntura se ve afectada por la corriente del LED, la trayectoria de transmisión del calor, y la temperatura ambiental. En general, entre mayor sea la corriente del LED, mayor será el calor generado en la juntura. La cantidad de calor a disipar en el LED depende de la temperatura ambiente y de los elementos disipadores de calor. Un típico LED de potencia consta de un emisor, un núcleo de metal para circuito impreso (MCPCB), y un disipador de calor externo. El emisor contiene la unión P-N, el lente de concentración de fotones, encapsulado y una placa de metal para transferir el calor de la unión P-N al exterior. La placa de metal esta soldada al MCPBC el cual contiene una capa de material dieléctrico adherida a presión con una base de sustrato de metal (aluminio). EL MCPBC se fija mecánicamente a un disipador externo que se acopla al chasis de la luminaria. El tamaño del disipador depende de las características térmicas del LED. La ilustración muestra los elementos mencionados y la flecha amarilla-roja indica el camino que sigue el calor.



### Ilustración 39

Elementos que conforman un LED de potencia  
Fuente: Pacific Northwest National Laboratory

## **2.2 Parámetros que intervienen en el cálculo de Iluminación.**

Un sistema de iluminación debe producir luz en cantidad y calidad suficientes para efectuar las funciones propias del espacio que se ilumina. Se debe cumplir con rendimiento o eficacia visual, comodidad, placer visual y economía.

La cantidad de luz se debe fijar estableciendo 3 niveles de iluminación que determinan la cantidad de luz y el mantenimiento para cumplir con estos niveles. Primero se tiene la iluminación media inicial que es la obtenida en el momento en que se pone en servicio por primera vez el sistema de iluminación, luego se tiene la iluminación media en servicio, correspondiente a la obtenida entre el momento inicial y la intervención para el mantenimiento y por ultimo la iluminación media mínima que se obtiene en el momento en que se necesita dar mantenimiento.

Existe una gran cantidad de recomendaciones de iluminación para los distintos tipos de tarea que se pretenden iluminar acorde a organismos nacionales e internacionales. Aparte de la cantidad y calidad se considera la uniformidad de la iluminación la cual implica la distribución de luminarias en el campo visual, deslumbramiento y modelado.

Lo que respecta a la economía el sistema de iluminación debe ser eficaz energéticamente, es decir, utilizar fuentes de luz apropiadas a las tareas que se desempeñan en determinado espacio, conservar en óptimas condiciones el equipo de alumbrado y utilizar racionalmente el sistema de iluminación mediante controles apropiados.

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) fijó en 1931 las características de tres fuentes luminosas (A, B, C) con una repartición espectral como sigue:

✓ Fuente A.

Corresponde a una bombilla con filamento de tungsteno y atmósfera gaseosa puesta a punto por el Bureau of Standards Americano con una temperatura de color de  $2848[K]$ .

✓ Fuente B.

Se refiere a una atmósfera ligeramente nublada que se ha descartado por no tener utilidad.

✓ Fuente C.

Es una fuente luminosa de  $6770[K]$ , con un espectro correspondiente al de un cielo cubierto (mezcla de sol con cielo azul) y se obtiene usando filtros líquidos de absorción en la fuente A. En 1956, la CIE definió tres fuentes adicionales con las siguientes temperaturas de color partiendo de C.

✓ Fuentes  $D_{55}(5560[K])$ ,  $D_{65}(6500[K])$ ,  $D_{75}(7500[K])$ .

Estas fuentes D son parecidas a la composición espectral del cielo medio y abarcan un intervalo espectral mayor que las fuentes A y C.

Las fuentes C, D y W cuya temperatura de color es  $5500[K]$  para la última, se denominan blancos patrón ya que son referencias para definir los colores complementarios y para la construcción de los diagramas cromáticos, todas estas intentan reproducir la luz de día.

La CIE establece niveles de iluminación recomendados para el desempeño de tareas afines al área correspondiente usando fuentes C y D. Para una residencia se establece el siguiente conjunto de niveles de iluminación.

Tareas visuales concretas:	Nivel de Iluminación recomendado (lux)
<i>Juegos de mesa</i>	300
Cocinas:	
<i>Fregaderos</i>	700
<i>Hornos y superficies de trabajo</i>	500
<i>Lavadoras, tablas de planchar</i>	500
Salones de escritura, estudio:	
<i>Libros, revista y periódicos</i>	300
<i>Escritura a mano, copias defectuosas</i>	700
<i>Pupitres de estudio</i>	700
Costuras:	
<i>Trabajos ocasionales, telas bastas de alto contraste</i>	300
<i>Trabajos ocasionales, telas finas</i>	500
<i>Trabajo continuo, telas ligeras o medias</i>	1000
<i>Telas oscuras, detalles finos, bajo contraste</i>	2000
Tocadores, maquillajes, afeitados: sobre los espejos	500
Taller, bancos de trabajo	700
Alumbrado general:	
<i>Vestíbulos, pasillos, escaleras, descansos</i>	100
<i>Cuartos de estar, comedores, salas, bibliotecas</i>	100
<i>Cocina, lavadora, cuarto de baño</i>	300

*Tabla 3*  
Niveles de Iluminación recomendados para una residencia

La luminancia de los alrededores de la tarea visual debe ser en lo posible menor que la luminancia de la tarea de la misma sin llegar a ser un tercio menor del valor. Una buena distribución de luminarias con la correcta luminancia permite que el observador efectúe las tareas de manera cómoda sin perder atención por deficiencia de luz o mala distribución, también se mejora el rendimiento visual si además de controlar los

contrastes de luminancia se procura crear contrastes de color en la zona de trabajo, sobre todo cuando los contrastes de luminancia son bajos.

Un problema que se presenta en el nivel de iluminación es el deslumbramiento, es la condición de la visión que produce molestias, reducción o ambas, en la habilidad para ver objetos debido a una inconveniente distribución o nivel de luminancias o a variaciones extremas de las mismas en el espacio o en el tiempo. El valor de luminancia para el cual se presenta deslumbramiento es de  $2000[cd/m^2]$  correspondiente a una iluminación horizontal aproximada de  $10000[lux]$ .

La apariencia general de un espacio, las personas y objetos que se encuentran dentro de éste, se iluminan de modo que sus formas y texturas sobresalen nítida y agradablemente, lo que se logra con un alumbrado ni demasiado direccional que pierde sombras duras y ásperas ni demasiado difuso con que se produce la sensación de relieve, a esta técnica de posicionamiento y direccionamiento de luminarias se conoce como modelado.

### **2.2.1 Interiores y Exteriores.**

La iluminación domestica interior debe proporcionar la luz suficiente para realizar las actividades propias de cada espacio y cuarto que varían desde una tarea de dificultad visual a una iluminación de decoración, manteniendo la armonía estética y personal.

Los niveles de iluminación se fijan acorde a los niveles recomendados por el CIE teniendo como base temperaturas de color cálidas o las deseadas por el observador acorde a sus gustos de iluminación y decoración.

El tipo de lámparas usuales para interiores son incandescentes convencionales, incandescentes halógenas, lámparas de vapor de mercurio (fluorescentes, fluorescentes compactas), y como se propone en este trabajo lámparas de LED's.

En cuanto a las luminarias, la elección depende de consideraciones estéticas y propias del diseño y forma de las lámparas que se utilizan. Existen para lámparas incandescentes, luminarias empotradas con reflector o aros de sujeción, luminarias para lámparas con reflector incorporado, superficiales, suspendidas y portátiles para lámparas de pie y sobremesa. Para lámparas incandescentes halógenas por su tamaño usan armazones direccionales o fijos, incrustaciones en cavidades hechas en techo o pared, lámparas fluorescentes utilizan luminarias empotradas con difusor o superficiales con cierre de difusor o regletas apantalladas por molduras usados en muebles de cocina.

El alumbrado puede enriquecer o arruinar el diseño de un interior por la interacción de las luminancias creadas sobre las superficies del entorno. Una superficie de alta luminancia parecerá más lejana que una de baja, por lo que una pared debidamente iluminada ampliará el espacio adyacente en su dirección, mientras que la misma cantidad de luz concentrada en un candelabro en medio de un espacio contraerá el mismo. De la misma manera, una pared con baja luminancia y con bajo nivel de alumbrado parecerá más cercana que una de alta luminancia, por ejemplo un techo

pobre en luminancia parecerá visualmente de baja altura. En superficies extensas las de gran iluminación alejan y las de poca acercan, en fuentes puntuales el efecto es contrario.

Para iluminaciones exteriores el propósito es tener iluminación suficiente para entradas, decoración en patios, jardines, delimitar caminos. Para este propósito se utilizan algunos tipos de lámparas para interiores y para alumbrado masivo se utilizan lámparas de vapor de mercurio a alta presión al igual que de sodio. Las luminarias comúnmente usadas son candelabros que proporcionan una estética adecuada a exteriores, luminarias empotradas a pared, montadas con reflectores, y postes.

## 2.3 Lámparas de LED's existentes en el mercado.

Existen una gran cantidad de compañías a nivel mundial que fabrican lámparas de LED's así como las respectivas luminarias. Algunas por tener desarrolladores de tecnología en Estados Unidos, Europa y Asia proporcionan al mercado LED's con mayores flujos luminosos, mayor vida útil entre otras ventajas y marcan la pauta para la producción masiva.

Actualmente la demanda de LED's para iluminación en nuestro país no es la suficiente para encontrar una gran variedad de este tipo de lámparas para uso doméstico, sin embargo las ventajas que presenta el uso de LED's incrementa la demanda de estos y por consecuencia su disponibilidad.

Las características eléctricas de las lámparas existentes de LED's permiten que se conecten directamente a la red eléctrica para sustitución inmediata de las fuentes de luz tradicionales, es decir, sustituyen lámparas incandescentes y fluorescentes compactas para distintas potencias, también hay lámparas tipo MR16 para tensiones de trabajo de 12[V]. Las características lumínicas son variables, existen una amplia variedad de flujos luminosos, temperaturas de color, índice de rendimiento de color, ángulos de radiación, considerando la aplicación de la lámpara. A continuación se muestran las características de lámparas existentes en el mercado.

- ✓ Usan LED's de baja potencia de 5[mm] y LED's de alta potencia de diferentes magnitudes desde 1[W] hasta 32[W], cuando se usa LED's de alta potencia puede ser un simple LED o un conjunto.
- ✓ Las tensiones de trabajo abarcan desde los 12–24[V] de tensión directa o alterna hasta 260[V] de tensión alterna lo que permite sustituir tubos fluorescentes por tubos de LED's.

- ✓ La temperatura de color incluye las tonalidades cálidas, luz de día y frías ( $2800 - 6500[K]$ ) y tonalidades roja, azul, verde y amarillo, con índices de rendimiento de color no menores a 60.
- ✓ Los ángulos de radiación del haz de luz van desde  $15^\circ$  a  $110^\circ$ . Algunas lámparas usan lentes para dar una mayor eficacia luminosa.
- ✓ Rango de vida útil de 12000 a 50000 horas.
- ✓ Flujo luminoso dependiente del color de temperatura abarcando el rango de  $120 - 2100[lm]$ .
- ✓ Eficacia luminosa en el rango de  $20 - 75[lm/W]$ .

Las luminarias y las propias lámparas incluyen elementos metálicos óptimos para disipación de calor ya que los LED's de alta potencia son susceptibles a cambios de temperatura y variar el flujo luminoso si no se tiene el disipador.



**Ilustración 40**

*Lámparas de LED's MR16: Varios LED's de 5mm, LED de 5W, LED's de 1W  
Fuente: Haiyan Chaohong Electric Science and Technology Co., Ltd*



**Ilustración 41**

*Lámparas de LED's: Sustitución de lámparas incandescentes, fluorescentes compactas y tubos*  
*Fuente: microluz.es, doubulb.com*



**Ilustración 42**

*Ejemplos de luminarias: 4 lámparas MR16, luminaria para techo, luminaria para pared*  
*Fuente: microluz.es*



**Ilustración 43**

*Aspecto de la iluminación con LED's*  
*Fuente: Internet*

## 2.4 Comparación de los diferentes dispositivos para iluminación.

Los mejores LED's blancos pueden alcanzar o exceder la eficacia luminosa de lámparas fluorescentes compactas, sin embargo, actualmente muchos LED's blancos son marginalmente mas eficaces que lámparas incandescentes. El mejor LED de luz cálida disponible puede producir cerca de  $45-50[lm/W]$  al igual que lámparas fluorescentes en comparación con lámparas incandescentes que producen  $12-15[lm/W]$ . Un buen sistema de iluminación a base de LED's combinado con las luminarias correctas, manejo térmico y diseño óptico pueden producir más de  $700[lm]$  usando solamente  $12[W]$  para dar una eficacia luminosa de  $58[lm/W]$ . Si por el contrario, se tiene un diseño pobre, mala distribución y colocación de luminarias aunque se usen los LED's más potentes, la eficacia no será mejor que una iluminación por incandescencia.

Light Source	Typical Luminous Efficacy Range in lm/W (varies depending on wattage and lamp type)
Incandescent (no ballast)	10-18
Halogen (no ballast)	15-20
Compact fluorescent (CFL) (incl. ballast)	35-60
Linear fluorescent (incl. ballast)	50-100
Metal halide (incl. ballast)	50-90
Cool white LED 5000K (incl. driver)	47-64*
Warm white LED 3300K (incl. driver)	25-44*

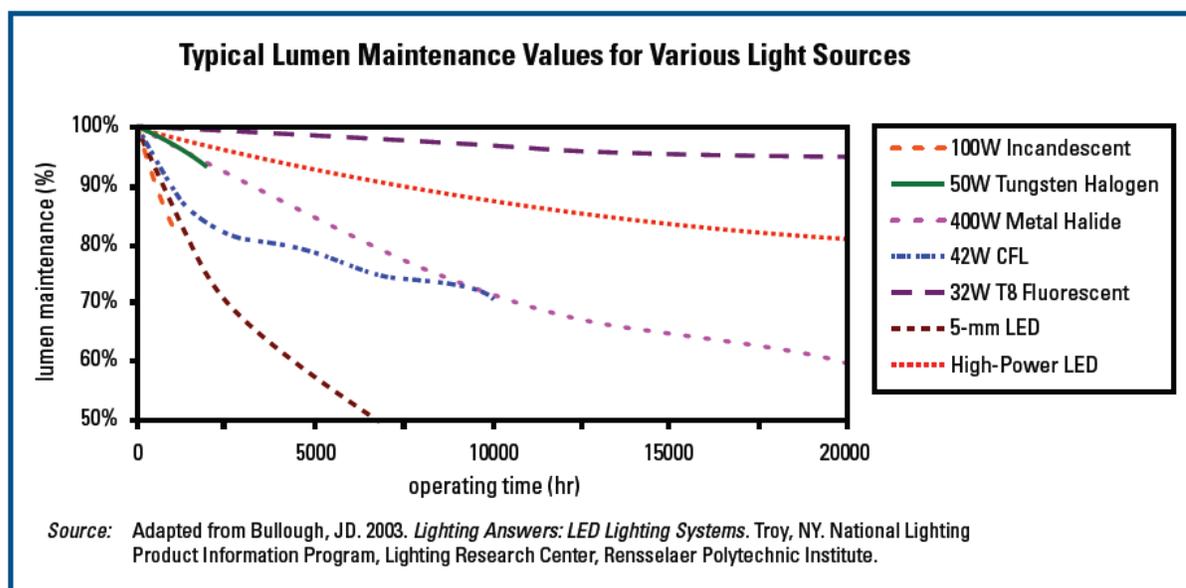
\*As of October 2007.

**Tabla 4**

*Eficiencias Luminosas de cada tipo de iluminación hasta Octubre de 2007.*

*Fuente: Departamento de Energía de E.U.*

Al contrario de otras fuentes luminosas, los LED's no se “queman”, sino que disminuyen su flujo luminoso conforme transcurren los años. La calidad de luz que ofrece (vida útil) un LED se espera que sea de 30000 a 50000 horas. Una lámpara incandescente no supera 1000 horas, lámparas fluorescentes compactas entre 8000 y 10000 horas y los mejores tubos fluorescentes hasta 30000 horas.



**Ilustración 44**

*Gráfica de mantenimiento de flujo luminoso en el tiempo de diferentes fuentes luminosas  
Fuente: Departamento de Energía de E.U.*

La temperatura del color y el índice de rendimiento de color son aspectos importantes en la calidad de la luz. Hasta hace poco, casi todos los LED's tenían una alta temperatura de color superior a  $5000[K]$  correspondientes a luz fría, una luz blanca-azul. Ahora existen LED's de luz de día y cálida aunque son menos eficaces que las de luz fría pero que se encuentran a par de lámparas fluorescentes compactas. Para iluminación de interiores las luces cálidas ( $2700-3000[K]$ ) y en algunos casos luz neutral ( $3500-4000[K]$ ) son las apropiadas. EL CRI proporcionado por lámparas de LED's oscila entre 70 y 90 dependiendo de la temperatura de color como se observa en la tabla siguiente. Lámparas incandescentes dan una temperatura de color de  $2700[K]$  y un CRI cercano a 100. Y del tipo fluorescente compacta proporcionan una temperatura de color de  $2700-3000[K]$  con un CRI de por lo menos 80. Para interiores se recomienda un CRI mayor a 80.

CCT	CRI	70-79	80-89	90+
2600-3500 K		23-43 lm/W		25 lm/W
3500-5000 K		36-73 lm/W	36-54 lm/W	
> 5000 K		54-87 lm/W	38 lm/W	

Sources: Manufacturer datasheets including Cree XLamp XR-E, Philips Lumileds Rebel, Philips Lumileds K2.

*Tabla 5*

*Índice de rendimiento de color (CRI) para lámparas de LED's según la temperatura de color*

*Fuente: Departamento de Energía de E.U.*

El costo de LED's para iluminación ha variado drásticamente. LED's de buena calidad tienen un costo elevado en comparación a las fuentes luminosas tradicionales, sin embargo, los costos disminuyen rápidamente. En 2001, el costo de LED's de luz blanca era superior a los US\$200 por kilolumen, en 2007 el precio promedio disminuyó a US\$30 por kilolumen, la ventaja económica del uso de LED's se observa al comparar los costos del reemplazo de lámparas, luminarias y mantenimiento con el ahorro de energía y la vida útil de los LED's.

Debido a la naturaleza de la emisión de luz, los LED's son más eficientes que otras fuentes de iluminación para determinadas aplicaciones. Las lámparas incandescentes y fluorescentes emiten luz en todas direcciones, parte de la luz generada por la lámpara es absorbida por el armazón o ilumina un área sin utilidad, es común que el 40% de la luz generada se pierda en candelabros, armaduras, laminas de soporte, etc. Lámparas de LED's emiten luz en una dirección específica, reduciendo la necesidad de reflectores y difusores que pueden absorber luz. La iluminación direccional que se hace por medio de cavidades en techos y paredes es usada ahora para iluminación general de cocinas, pasillos, baños y otras áreas del hogar en sustitución de diversas configuraciones de lámparas incandescentes y reflectoras. En la siguiente tabla se observa un comparativo de la iluminación obtenida mediante cavidades para un foco incandescente de 65[W],

una lámpara fluorescente compacta en espiral de 13[W] y una lámpara de LED de prueba.

Comparison of Recessed Downlight Lamping Options			
	65W BR-30 Flood	13W 4-pin Spiral CFL	LED 2
Luminaire light output, initial (lumens)	570	514	730
Luminaire wattage (W)	65	12	12
Luminaire efficacy (lm/W)	9	42	60
CCT (Kelvin)	2700 K	2700 K	2700 K
CRI	100	82	95
Center beam candlepower (candela)	510 cd	154 cd	280 cd
Beam angle (degrees)	55°	120°	105°
Average luminance at 55° (cd/sq meter)	16161	11862	14107
Dimmable	Y	N	Y

Based on photometric reports for three products.

**Tabla 6**  
Comparación de iluminación mediante cavidades  
Fuente: Departamento de Energía de E.U.



**Ilustración 45**  
Emisión de Luz: Formas de emisión para diferentes tipos de iluminación, uso de cavidades en una cocina  
Fuente: Departamento de Energía de E.U.

En resumen, los LED's son diferentes de otras fuentes de iluminación por ser dispositivos semiconductores que no están compuestos de vidrio para contenerlos, ni filamentos, electrodos o gases. Son dispositivos construidos con pequeños chips de aproximadamente  $1[mm^2]$  con varias capas de materiales semiconductores, montados en disipadores de calor y encapsulados en lentes transparentes. Como resultado se tiene una fuente de luz de 7 a 9 milímetros capaz de producir 30–150[*lm*] por mucho más tiempo que cualquier otra fuente luminosa y ser agrupados en un espacio muy pequeño para obtener el nivel de iluminación deseado. La emisión de luz es direccional permitiendo así reducir significativamente la pérdida de luz, son resistentes por estar compuestos de elementos duros y rígidos, son de encendido instantáneo con capacidad de switcheo de alta frecuencia, fáciles de controlar y no emiten radiaciones infrarrojas o ultravioleta.