



**Escuela Universitaria de
Ingeniería
Técnica Industrial
Universidad Zaragoza**

PROYECTO FINAL DE CARRERA

ILUMINACIÓN CON LEDs

AUTOR

JOSÉ LUIS GRANDE RUIZ DE LA TORRE

DIRECTOR

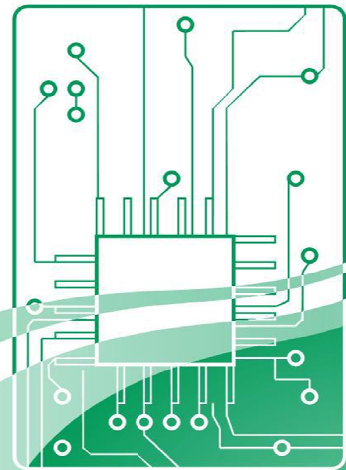
LUIS PORTA ROYO

ESPECIALIDAD

Electrónica

CONVOCATORIA

SEPTIEMBRE 2014



RESUMEN

El objeto del presente trabajo es el estudio de la iluminación con LEDs, también conocida como iluminación de estado sólido.

Los diodos emisores de luz (*light-emitting diodes*) o LEDs son fuentes luminosas a base de semiconductores. A diferencia de los diodos semiconductores de silicio, que emiten una débil radiación infrarroja, los LEDs están fabricados con otros materiales, como el Nitruro de Galio e Indio, seleccionados para que emitan, de forma eficiente, radiación de una longitud de onda determinada del espectro de luz visible.

Aunque los LEDs emiten luz monocromática de estrecho ancho de banda, a partir de uno o varios LEDs de luz monocromática, mediante diferentes técnicas, se consigue producir luz blanca. La técnica más extendida emplea un LED azul cubierto parcialmente con una o varias capas de distintas sustancias fluorescentes o fosforescentes, denominadas fósforos. Los fósforos absorben parte de la luz azul del LED, son excitados por ella y emiten luz verde, amarilla o roja. La mezcla de la luz azul del LED con la emitida por los fósforos, da sensación de luz blanca. Otra técnica consiste en mezclar la luz de tres o cuatro LEDs monocromáticos: rojo, verde y azul (en algunos casos también amarillo) para producir luz de apariencia blanca.

La tecnología LED es muy reciente. Los primeros LEDs, de luz roja, aparecieron en la década de 1960. En 1993 apareció el LED azul y en 1994 se consiguió por primera vez producir luz blanca de forma eficiente. El uso de LEDs en el campo de la iluminación general está creciendo muy rápidamente a medida que los dispositivos ganan en eficiencia y se hacen más económicos, pero es en algunos aspectos, una tecnología poco madura, con mucho margen de progresión y que aun necesita perfeccionar su regulación.

Los LEDs son fuentes luminosas con ventajas comparativas respecto a sus tecnologías competidoras: son energéticamente eficientes, producen luz de buena calidad para reproducir colores, no contienen mercurio, emiten sólo luz del espectro visible, sin componentes infrarrojas ni ultravioletas, tienen una vida útil muy larga, se encienden y apagan casi inmediatamente y pueden producir luz de diferentes tonalidades, incluso algunos dispositivos pueden variar de tonalidad.

Tienen también algunas limitaciones que no tienen otras tecnologías. Como todos los dispositivos semiconductores de potencia, los LEDs requieren una gestión térmica correcta, que mantenga en todo momento al dispositivo a una temperatura baja, para lo que se necesita disipar el calor eficientemente. El sobrecalentamiento deteriora a los LEDs alterando la intensidad y tonalidad de la luz y disminuyendo drásticamente la vida útil de los dispositivos.

Los LEDs operan a tensión continua baja y requieren corriente constante. Para funcionar con la red eléctrica, necesitan fuentes de alimentación o drivers.

INDICE

RESUMEN	2
INDICE.....	3
1.- INTRODUCCIÓN: ILUMINACIÓN DE ESTADO SÓLIDO	5
2.- HISTORIA	7
3.- EXPECTATIVAS DE EVOLUCIÓN DE LA EFICIENCIA Y PRECIO DE LOS LEDS	11
4.- TÉCNICAS DE GENERACIÓN DE LUZ BLANCA MEDIANTE LEDS.....	13
4.1.- CONVERSIÓN MEDIANTE FÓSFOROS	13
4.2.- SISTEMA DE MEZCLA DE COLORES	16
4.3.- SISTEMAS HÍBRIDOS	18
5.- LA FUENTE DE LUZ BLANCA CON EFICIENCIA DEL 100%	19
6.- CONCEPTOS Y DEFINICIONES DE LA ILUMINACIÓN CON LEDS.....	20
6.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ILUMINACIÓN CON LEDS	20
6.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES.	21
LÚMENES Y VATIOS.....	21
DEFINICIONES	22
LÁMPARAS Y LUMINARIAS LED.....	23
7.- FÍSICA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES EN LOS LEDS.....	25
7.1.- CRISTALES COVALENTES. SEMICONDUCTORES	25
7.2.- DOPAJE DE SEMICONDUCTORES	27
7.3.- SEMICONDUCTORES “EXTRÍNSECOS” TIPO N Y TIPO P	28
7.4.- UNIÓN P-N.....	29
7.5.- TEORÍA DE BANDAS. BANDA DE ENERGÍA Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CRISTAL	30
7.6.- MATERIALES SEMICONDUCTORES USADOS EN LOS LED	33
7.7.- RECOMBINACIONES RADIATIVAS NO RADIATIVAS	35
7.8.- SEMICONDUCTORES DE BANDA PROHIBIDA DIRECTA Y DE BANDA PROHIBIDA INDIRECTA.....	37
7.9.- HETEROESTRUCTURA Y POZOS CUÁNTICOS	38
7.10.- SUSTRATOS.....	39
8.- GESTIÓN TÉRMICA EN LOS LEDS	41
8.1.- EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LOS LEDs.....	42
8.1.1.- DISMINUCIÓN DE LA TENSIÓN DIRECTA.....	43
8.1.2.- DISMINUCIÓN DEL FLUJO LUMINOSO	43
8.1.3.- VARIACIÓN DEL TONO DE LUZ EMITIDA	44
8.1.4.- EFECTOS A LARGO PLAZO DE LA TEMPERATURA	45
8.1.5.- ACORTAMIENTO DE LA VIDA ÚTIL.....	45
8.2.- DISEÑO TÉRMICO DE LAS LÁMPARAS Y LUMINARIAS LED	46

9.- ALIMENTACIÓN, CONEXIÓN Y CONTROL DE LOS LEDS	50
LÚMENES EN FRÍO Y LÚMENES EN CALIENTE	51
9.1.- ALIMENTACIÓN DE LOS LEDS	53
9.2.- CONEXIÓN DE LOS LEDs	55
9.2.1.- CONEXIÓN DE LEDS EN SERIE	55
9.2.2.- CONEXIÓN DE LEDS EN PARALELO	55
9.2.3.- CONEXIÓN DE LEDS EN SERIE/PARALELO	56
9.2.4.- CONEXIÓN DE LEDS EN MATRIZ	57
9.3.- DRIVERS PARA LEDs.....	58
9.3.1.- TIPOS DE DRIVERS DE LEDS Y PARÁMETROS IMPORTANTES	60
9.3.2.- CIRCUITOS ELECTRONICOS EMPLEADOS EN LOS DRIVERS.....	61
9.3.3.- LEDS DE ALTERNA	64
9.4.- ATENUACIÓN O CONTROL DE LA LUMINOSIDAD (Dimming)	65
9.4.1.- ATENUACIÓN POR RECORTE DE LA SEÑAL DE FASE DE LA RED.....	66
9.4.2.- ATENUACIÓN POR CONTROL DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE DIRECTA	67
9.4.3.- ATENUACIÓN POR CONTROL PWM.....	68
9.5.- CARACTERÍSTICAS ADICIONALES DE LOS DRIVERS DE LEDS	69
9.5.3.- AJUSTE DE LA TONALIDAD DE LA LUZ BLANCA.....	70
9.5.4.- REALIMENTACIÓN TÉRMICA.....	70
9.5.5.- CONTROL REMOTO.....	71
9.5.6.- UNIDAD DE EMERGENCIA.....	71
10.- EL COLOR EN LA ILUMINACIÓN CON LEDS.....	72
10.1.- SISTEMAS DE MEDIDA DEL COLOR.....	72
10.1.1.- EL SISTEMA MUNSELL.....	72
10.1.2.- SISTEMA DE COLOR C.I.E.	74
10.2.- TEMPERATURA DE COLOR.....	76
10.3 LA VARIABILIDAD DE LA PERCEPCIÓN DEL COLOR: ELIPSES DE MACADAM	77
10.4.- EL ÍNDICE DE REPRODUCCIÓN CROMÁTICA.....	80
10.4.1.- EL IRC CON FUENTES LUMINOSAS LED	85
11.- OLEDs	92
APENDICE 1 INFORMACIÓN COMERCIAL DE PRODUCTOS LED.....	93
APENDICE 2. TIPOS DE BASES Y LÁMPARAS ESTÁNDAR	94
BIBLIOGRAFÍA	100
LIBROS.....	100
ARTÍCULOS	100
WEBS ESPECIALIZADAS	101
REFERENCIAS Y NOTAS	103

1.- INTRODUCCIÓN: ILUMINACIÓN DE ESTADO SÓLIDO

Los diodos emisores de luz (*light-emitting diodes*) o LEDs son fuentes luminosas a base de semiconductores. A diferencia de los diodos semiconductores convencionales, de silicio o germanio, que emiten radiación infrarroja muy alejada del espectro visible, los LEDs están fabricados con otros materiales seleccionados para que emitan radiación de una longitud de onda determinada del espectro de luz visible. Aunque los LEDs emiten luz monocromática de estrecho ancho de banda, a partir de uno o varios LEDs de luz monocromática, mediante diferentes técnicas, se consigue producir luz blanca. El objeto del presente trabajo es el estudio de la iluminación con LEDs, también conocida como iluminación de estado sólido.

Los LEDs aparecieron como componentes electrónicos prácticos en la década de 1960. Los primeros LEDs emitían luz roja de baja intensidad. Hoy en día hay disponibles LEDs que emiten luz monocromática de gran intensidad en una amplia gama de longitudes de onda desde el infrarrojo pasando por la mayor parte del espectro de luz visible hasta el ultravioleta. Empezaron a usarse como luces indicadoras en dispositivos electrónicos. Hoy en día, tras 50 años de intenso desarrollo tecnológico, los LEDs son la tecnología dominante para luces indicadoras.

En 1994 se consiguió por primera vez producir luz blanca de forma eficiente con LEDs y su uso en el campo de la iluminación general con luz blanca está creciendo muy rápidamente a medida en que ganan en eficiencia y se hacen más económicos. Según la conclusiones de un estudio del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) publicado en 2009, la iluminación de estado sólido, como se conoce a la producción de luz blanca con LEDs, "casi con seguridad desplazará a todas las tecnologías de iluminación tradicionales, incluyendo a las de tipo incandescente, fluorescente y de descarga de alta intensidad en el mundo desarrollado en redes eléctricas, así como a la iluminación de queroseno en el mundo no desarrollado sin redes eléctricas".¹ Esta afirmación es probablemente algo aventurada y para comprobar si se cumple tendremos que esperar aun bastantes años.

En 2014 los equipos de iluminación con LEDs ofrecen un rendimiento (lm/W) superior al de las lámparas incandescentes, y comparable al de las de los fluorescentes compactos, pero todavía inferior al de los tubos fluorescentes, y lámparas de descarga, pero su precio sigue siendo claramente superior a las otras tecnologías. Está generalmente aceptado que el tiempo de vida útil² de los equipos de iluminación con LEDs es superior al de todas las otras tecnologías, aunque este dato es particularmente difícil de evaluar y no existe un método estándar de medirlo. Con el estado actual de la tecnología, la iluminación con LEDs es especialmente adecuada y está ganando mercado muy rápidamente, en aplicaciones en las que se requiere iluminación direccional de intensidad baja a media, como lámparas de escritorio, iluminación de mostradores, luces de

automóviles, motos y bicicletas, luces empotradas en techos o cielos rasos o iluminación de senderos, sustituyendo sobre todo a lámparas reflectoras incandescentes y halógenas.

Un estudio del departamento de energía de los Estados Unidos estima que en ese país, para 2030 los LEDs serán el tipo de tecnología dominante, en torno al 70%, en iluminación residencial, en la que habrá desplazado totalmente a las lámparas incandescentes y convivirán con las lámparas fluorescentes compactas. En iluminación comercial, los fluorescentes lineales seguirán siendo dominantes, pero los LED supondrán en torno al 30%. En el campo de iluminación de exterior, los LED serán la tecnología dominante conviviendo con las lámparas de descarga de sodio de alta presión y las de halogenuros metálicos y habrán desaparecido prácticamente las de vapor de mercurio³.



GSL lámparas de uso general (rosca normal E27)

Reflector o foco: incluye los Reflectores parabólicos aluminizados (PAR) de rosca Edison E14 y E27, y los reflectores multifaceta (MR16 a 12V, GU10 a 220V)

CFL lámparas de "bajo consumo" de tipo fluorescente compacto

HID descarga de alta intensidad:

HPS vapor de sodio de alta presión

MH halogenuros metálicos

MV Vapor de mercurio

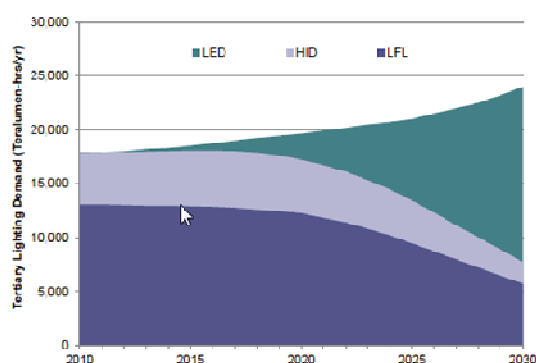


Figura: Evolución prevista de la demanda anual de iluminación (en TeraLúmenes-hora) en la Unión Europea en aplicaciones no residenciales (comercial y exterior) y reparto por tecnologías. Fuente: Center for Law and Social Policy (CLASP)

En la figura anterior se observa que la tecnología LEDs en aplicaciones de iluminación no residenciales (comercial y exterior) es sólo testimonial en 2014, pero se espera que en 2030 proporcione las dos terceras partes de la iluminación total. Se espera que desde 2010 a 2030 la demanda de iluminación en Europa aumente en un 30%, pero con la mejora esperada de la eficiencia de las fuentes luminosas, sobre todo las de tecnología LED, se espera que el consumo de energía eléctrica para esas aplicaciones disminuya en un 24%.

2.- HISTORIA



El primer descubrimiento documentado sobre la emisión de luz al hacer circular una corriente eléctrica a través de un cristal de material semiconductor data de 1907 y se debe al científico británico Henry Joseph Round (1881-1966). Round, fue uno de los pioneros del desarrollo de la radio, que trabajó como colaborador de Marconi desde 1902. Durante las dos guerras mundiales realizó importantes estudios para los servicios de inteligencia militar británicos sobre radiolocalización en la primera guerra mundial y sobre SONAR en la segunda.

Round descubrió la electroluminiscencia de algunos semiconductores, mientras realizaba estudios sobre detectores de radio. En sus experimentos hacía circular corriente eléctrica a través de cristales de diferentes semiconductores, como el carburo de silicio (SiC) y observó que en algunos casos se producía un resplandor de luz de color amarillo, que en otras ocasiones era anaranjado, verde o azul. Sorprendido por este fenómeno, publicó una breve nota describiéndolo en la revista *Electrical World*⁴ en 1907.



La siguiente referencia a estudios sobre el mismo asunto se debe al científico e inventor ruso Oleg Vladimírovich Lósev (1903 - 1942) que merece ser considerado como el inventor del LED, pese a que su temprana muerte y la Guerra Mundial impidieron que sus descubrimientos tuvieran suficiente difusión y fueran continuados.

Lósev fue un científico autodidacta. Estudió varios cursos universitarios pero no consiguió ninguna titulación. Realizó sus investigaciones en el Laboratorio de Radio de la ciudad de Nizhniy Novgorod y después en el Instituto Médico de Leningrado, donde ocupaba un modesto puesto de técnico. Murió en 1942 durante el sitio de Leningrado en la II Guerra Mundial.

Lósev observó la emisión de luz al circular corriente por diodos rectificadores de cristal de óxido de Zinc y carburo de silicio utilizados en receptores de radio y divulgó los detalles de su descubrimiento en 1927 en un informe, que se publicó en la revista *Telefonía de Rusia*, bajo el título de "Detector luminoso de carburo de silicio y detección con cristales"⁵⁶. En su primer artículo ya estableció el umbral de corriente para iniciar la emisión de luz y registró el espectro de luz emitido. Lósev publicó varios artículos más sobre el asunto entre 1927 y 1930. En ellos concluyó que la luz no estaba producida por incandescencia, observó similitudes con la descarga en tubos de gas, midió la característica corriente-voltaje del dispositivo, y utilizó la teoría cuántica de Einstein para explicar la acción del LED y denominó al proceso de emisión "efecto fotoeléctrico inverso".

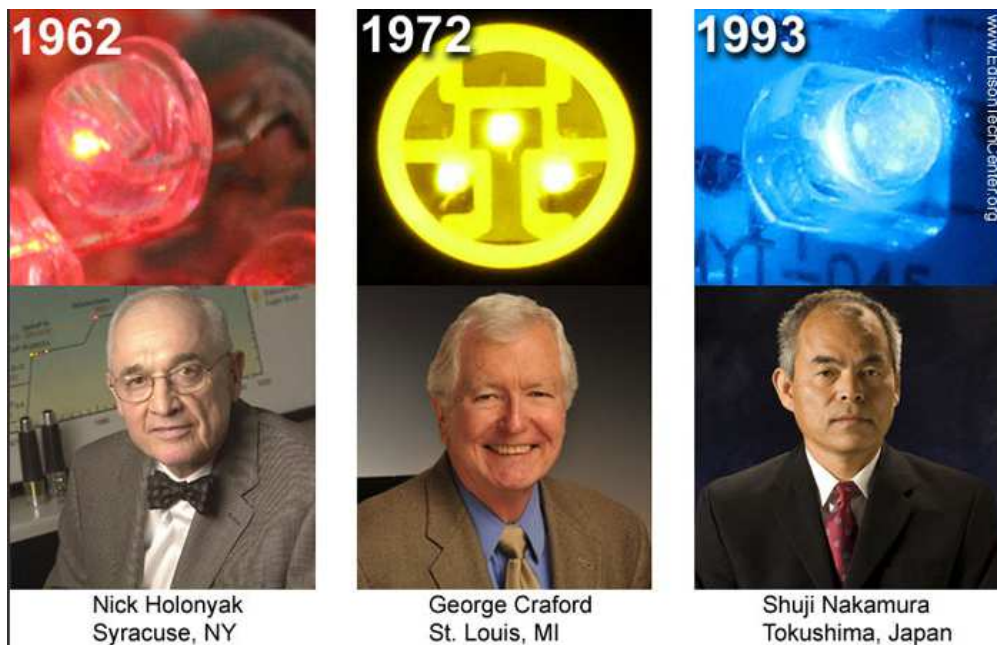
También patentó el relé de luz "Light Relay" y vislumbró el gran potencial de su uso en telecomunicaciones.

Los prometedores descubrimientos de Lósev cayeron en el olvido y el desarrollo definitivo del LED tuvo que esperar hasta 1960. Su desarrollo estuvo inicialmente ligado a del laser.

En 1960 se presentó el primer laser, el laser de rubí, y comenzó una intensa investigación en varios centros de distintos países para producir un laser con diodos semiconductores

En 1961 dos investigadores de Texas Instruments: Bob Biard y Gary Pittman descubrieron y patentaron el LED infrarrojo mientras trabajaban en la invención del laser de diodo.

El laser de diodo, que tiene un LED en su núcleo, fue dado a conocer en 1962.



Ese año, cuatro grupos de investigación en Estados Unidos informaron simultáneamente sobre láseres con diodos semiconductores basados en cristales de arseniuro de galio (GaAs). Tres de los cuatro artículos de investigación publicados por estos grupos aparecieron en el mismo número de la revista *Applied Physics Letters* del 1 de diciembre de 1962. Los autores fueron Robert Hall y Nick Holonyak Jr⁸ de dos laboratorios de la compañía General Electric, Marshall Nathan de IBM⁹ y Robert Rediker del Massachusetts Institute of Technology¹⁰. De los cuatro prototipos de diodo, tres emitían en la banda infrarroja, mientras que el de Holonyak, era un diodo de fosfuro-arseniuro de galio (GaAsP) que emitía luz roja.

Nick Holonyak, que trabajaba en el laboratorio de General Electric en Syracuse (Nueva York), está considerado como el padre del LED, por ser el primero en producir un dispositivo LED práctico. Los primeros LEDs de Holonyak eran extremadamente caros y sólo se usaban en equipos de laboratorio y aparatos electrónicos de medida.

En 1968, la compañía química Monsanto de San Luis (Misuri. EEUU) comenzó la fabricación en masa de LEDs rojos y ese mismo año Hewlett Packard empezó a usar los LEDs de Monsanto como indicadores en sus equipos.

En 1972, M. George Craford, un ingeniero de la compañía Monsanto, inventó el primer LED amarillo. Más tarde Craford pasó a trabajar para Hewlett Packard, donde dirigió un grupo pionero en el uso de Arseniuro de galio-aluminio (AlGaAs) para LEDs rojos de gran luminosidad y fosfuro de aluminio-galio-indio (AlInGaP) para los de color naranja y verde, con los que se logró multiplicar por diez la luminosidad de los LEDs desarrollados por Holonyak.

Durante la década de 1970, la Compañía estadounidense de electrónica Fairchild Semiconductor desarrolló métodos de producción de dispositivos semiconductores que permitieron abaratar enormemente su coste. A partir de ese momento, los LEDs comenzaron a generalizarse sustituyendo a las lámparas indicadoras incandescentes y de neón y en *displays* de siete segmentos, en televisiones, radios, teléfonos, calculadoras y relojes.

En 1976 Thomas P. Pearsall desarrolló los primeros LEDs de alta eficiencia y luminosidad que emitían en las longitudes de onda infrarrojas adecuadas para las transmisiones de fibra óptica.

En 1987 los LEDs de AlGaAs de HP eran lo suficientemente brillantes como para reemplazar a las bombillas incandescentes de las luces de freno de los vehículos y de los semáforos. Por primera vez los LEDs desplazaban a las lámparas de incandescencia en una aplicación de iluminación.

En 1990 HP comenzó a producir LEDs de AlInGaP que ofrecían una luminosidad al menos doble que la de los de AlGaAs. HP también obtuvo éxitos con materiales de GaP, inicialmente en LEDs verdes en 1993 y el año siguiente los empleó como sustrato transparente con el que se logró multiplicar por cuatro la eficiencia de los LEDs rojo-anaranjados de AlInGaP para intermitentes de coche.

Al comienzo de la década de 1990 se empezaron a producir LEDs azules, de muy poca luminosidad a base de SiC, en los laboratorios de Siemens, Sanyo y Cree, con lo que se completó el espectro de colores de los LED. El desarrollo de LEDs azules de alta luminosidad se realizó en Japón.

En 1988 investigadores de la compañía química japonesa Nichia comenzaron a estudiar el Nitruro de Galio GaN como material para LEDs

En 1993 el ingeniero japonés Shuji Nakamura, que trabajaba para Nichia en los laboratorios de la ciudad de Tokushima, consiguió producir el primer LED azul de alta luminosidad utilizando GaN. Estos LEDs azules eran 100 veces más brillantes que los de SiC producidos por Cree.

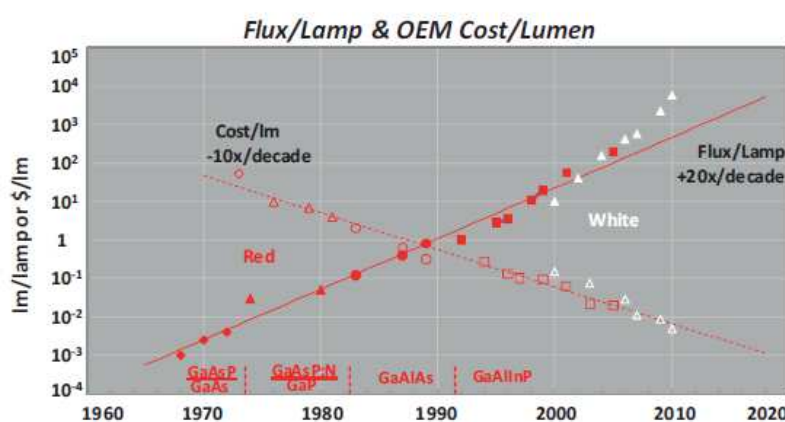
La aparición de los LEDs azules de alta luminosidad llevó muy rápidamente a los investigadores de Nichia al desarrollo del primer LED de luz blanca, que empleaba una cubierta parcial de fósforo sobre un LED azul.

Yoshinori Shimizu y Yasunobu Noguchi desarrollaron el fósforo YAG (óxido de itrio y aluminio) que, excitado por la luz azul, produce luz amarilla y Kensho Sakano logró el primer LED blanco combinando el fósforo YAG con un LED azul. La luz amarilla del fósforo, mezclada con la azul del LED, da como resultado una luz de apariencia blanca. Esta técnica se sigue empleando en la mayoría de los LEDs blancos que existen en el mercado.

En 1995, el investigador de Nichia Naruhito Iwasa, que había participado antes en la producción del LED azul, consiguió el LED verde de Nitruro de Indio y Galio (InGaN)

3.- EXPECTATIVAS DE EVOLUCIÓN DE LA EFICIENCIA Y PRECIO DE LOS LEDS

La eficiencia de los LEDs está creciendo y su precio bajando de forma exponencial. De modo similar a la predicción conocida como ley de Moore, según la que el número de transistores que pueden integrarse en un circuito crece de forma exponencial (se doblan cada dos años), Roland Haitz hizo un estudio sobre la evolución de la eficiencia, luminosidad y coste de los LEDs monocromáticos, que se conoce como Ley de Haitz. Según este estudio, cada diez años, el coste por lumen se divide por diez y la cantidad de luz emitida por un encapsulado LED se multiplica por 20. Esta rapidísima evolución se atribuye al desarrollo en paralelo de varias tecnologías sobre semiconductores y a los continuos avances en óptica y en ciencia de materiales.



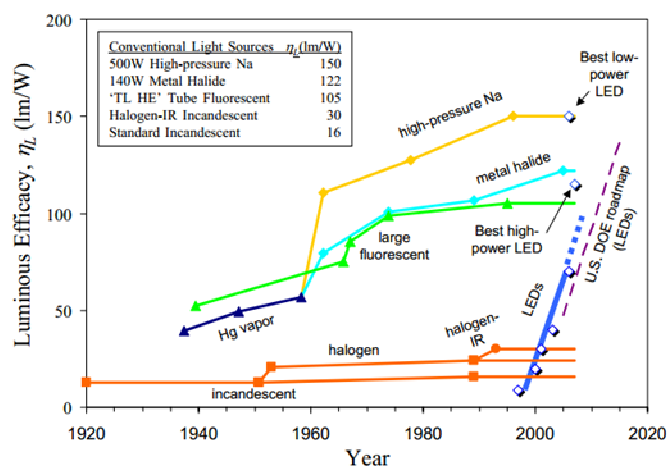
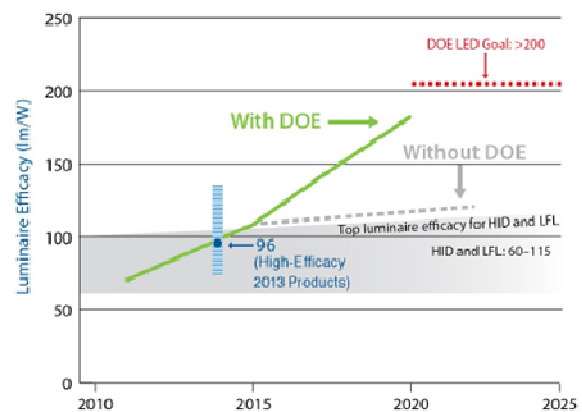
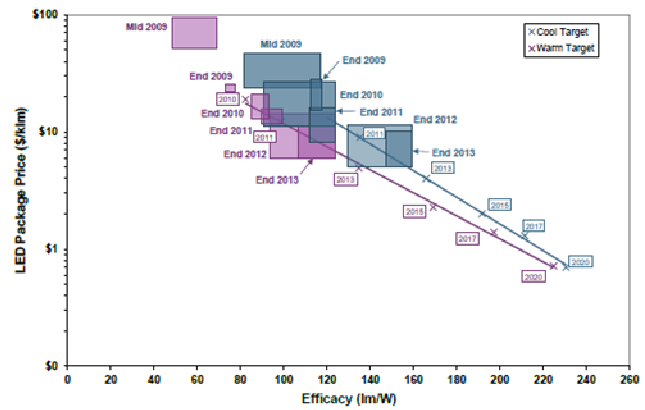
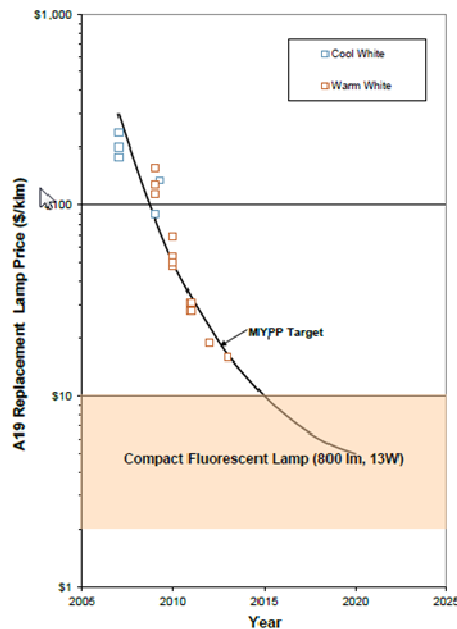
¹¹ Gráfica de la "ley de Haitz" sobre la evolución de la eficiencia y coste de los LED. Obsérvese que la escala del eje Y es logarítmica. El estudio se inició con LEDs monocromáticos rojos y se continuó incluyendo LEDs blancos.

Cuadro comparativo de la eficacia luminosa, temperatura de color y vida útil esperada de los LED con otras tecnologías de iluminación.

Tipo de producto	Eficacia Luminosa (lm/W)	Temperatura de color(K)	Vida útil (horas)
Lámpara LED A19 (blanco cálido)1	94	2700	30,000
Lámpara LED PAR38 (blanco cálido)2	78	3000	50,000
Downlight LED 6" (blanco cálido)3	87	3500	60,000
Luminaria cuadrada de techo empotrable LED 2' x 4' (blanco cálido)3	118	3500	75,000
Luminaria suspendida LED (blanco cálido)4	119	3500	75,000
Luminaria OLED 5	52	3500	15,000
HID (alta potencia)6	115	3100	15,000
Fluorescente lineal 6	108	4100	25,000
HID (baja potencia) 6	104	3000	15,000
Fluorescente compacto	73	2700	12,000
Halógeno	20	2750	8,400
Incandescente	15	2760	1,000

Notas:

1. Basado en la lámpara A19 Philips premiada.
2. Basado en los datos del folleto informativo de la lámpara Cree LRP38-10L-30K.
3. Basado en los datos del folleto informativo de la luminaria Cree CS14-40LHE-35K.
4. Basado en los datos del folleto informativo de la luminaria Cree CS18-80LHE-35K.
5. Basado en luminarias Acuity.
6. Incluye pérdidas en el balasto.



En las figuras anteriores se expone las expectativas de evolución de la eficacia en lm/W y del coste en dólares/klm de la iluminación con LEDs comparada con otras tecnologías.¹²

4.- TÉCNICAS DE GENERACIÓN DE LUZ BLANCA MEDIANTE LEDS

A diferencia de las lámparas incandescentes, o las de descarga de vapor de mercurio o Sodio de alta presión, los LEDs no son fuentes de luz blanca. Los LEDs emiten luz en una gama muy estrecha de longitudes de onda del espectro visible, produciendo una luz prácticamente monocromática. Esta es la razón por la que los LEDs son tan eficientes para aplicaciones de luz de colores, como los semáforos o las señales indicadoras. Sin embargo, para la iluminación se necesita luz blanca.

El potencial de la tecnología LED para la producción de luz blanca de eficiencia muy superior a los métodos tradicionales está impulsando importantísimos proyectos de investigación y desarrollo, en muchos casos con apoyo de organismos públicos, como el Departamento de Energía de los Estados Unidos.

La luz blanca a partir de LEDs se puede lograr mediante varios métodos:

- a) La conversión mediante fósforo. Es este método, un chip de luz azul o de luz ultravioleta próxima se cubre con una capa de sustancias fluorescentes o fosforescentes, denominadas comúnmente fósforos, que al ser excitados por la luz del LED, absorben una porción de esa luz azul o UV y emiten un espectro más amplio de luz blanca. Este es básicamente el mismo método empleado en los tubos fluorescentes.
- b) Mezcla de colores: RGB o RGYB. En el sistema RGB, se mezcla la luz generada por tres LEDs monocromáticos (rojo, verde y azul). En el RGYB se añade un cuarto color (amarillo). Variando la potencia relativa de los diferentes LEDs monocromáticos se puede conseguir luz de cualquier tonalidad, incluyendo luz blanca de diferentes temperaturas de color.
- c) Sistema híbrido. En algunos casos se usan al mismo tiempo LEDs blancos a partir de LEDs azul+fósforo con otros monocromáticos, por ejemplo rojos para mejorar la eficacia y la reproducción cromática

4.1.- CONVERSIÓN MEDIANTE FÓSFOROS

Es el sistema más comúnmente usado en las lámparas de LED en la actualidad.

En los modelos más comunes, un LED azul se cubre parcialmente con uno o varios fósforos. Los fósforos son sustancias que se excitan por la luz azul y emiten luz amarilla de amplio ancho de banda, o luz amarilla y roja. La luz amarilla, o amarilla y roja de los fósforos, mezclada con la azul del LED, da como resultado una luz de apariencia blanca.

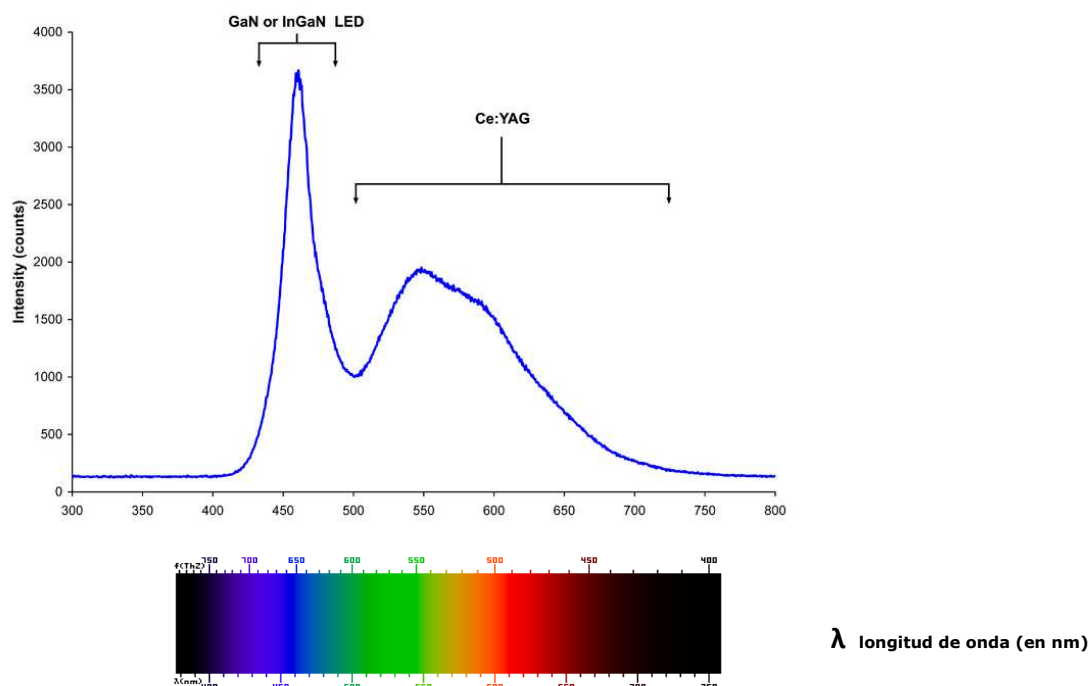
La luz emitida por el fósforo al ser excitado tiene siempre longitudes de onda más largas y, por tanto, energías menores que la luz excitadora (azul o

ultravioleta en el caso de los LED). Este desplazamiento hacia longitudes de onda mayores se llama **desplazamiento de Stokes** e implica necesariamente una pérdida de energía, que limita la eficiencia de este tipo de fuentes luminosas.

Una amplia gama de fósforos se desarrollaron para su aplicación en lámparas fluorescentes. En los años 90 se desarrollaron los tubos fluorescentes trifósforo, en los que tres tipos distintos de fósforo absorben la luz ultravioleta generada por la descarga en el vapor de mercurio y emiten luz de banda ancha centrada respectivamente en el rojo, verde y azul. Esta misma tecnología está siendo utilizada en el desarrollo de las lámparas de luz blanca con LEDs.

Los fósforos más comunes son compuestos inorgánicos dopados con metales de tierras raras. El fósforo que primero se ha utilizado en LEDs es el conocido como YAG, un "fósforo amarillo" de polvo de cristal artificial de granate de itrio y aluminio $Y_3Al_5O_{12}$ dopado con Cerio trivalente.

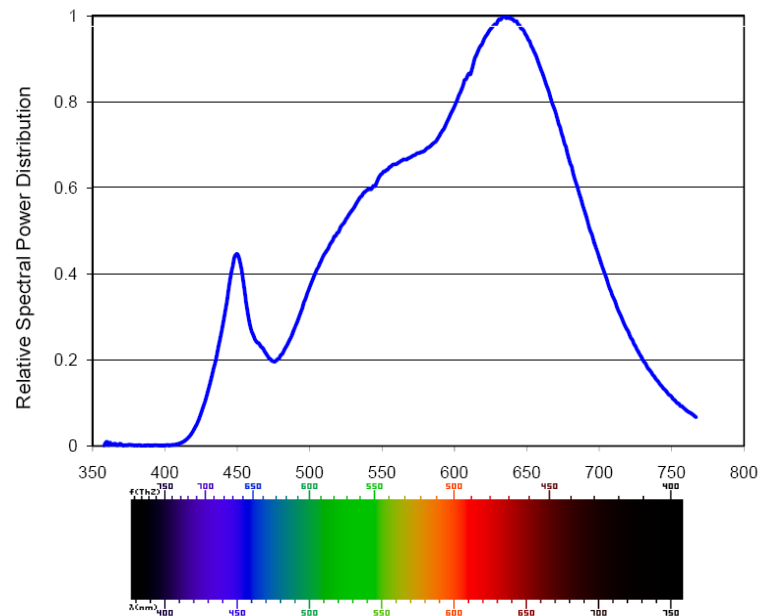
Los LEDs blancos más comunes actualmente usan un LED azul de InGaN, que emite con una longitud de onda de unos 460nm, que excita a un "fósforo amarillo" de YAG: Ce+3. Este fósforo, al ser excitado, convierte una porción de la luz azul en una luz amarilla de banda ancha. La mezcla de la luz azul del LED y la amarilla de banda ancha del fósforo dan la impresión de una luz blanca fría.



Los fabricantes han logrado mejorar la calidad de color de la luz generada por este método añadiendo un segundo fósforo (rojo, o uno rojo y otro verde) produciendo luz blanca cálida, de una temperatura de color más baja en torno a los 2700-3000K, próxima a las de las lámparas incandescentes y con un Índice de Reproducción Cromática más alto. Los fósforos que emiten en la región del verde, están basados en otra tierra rara, el Europio divalente ($Eu+2$). En 2013

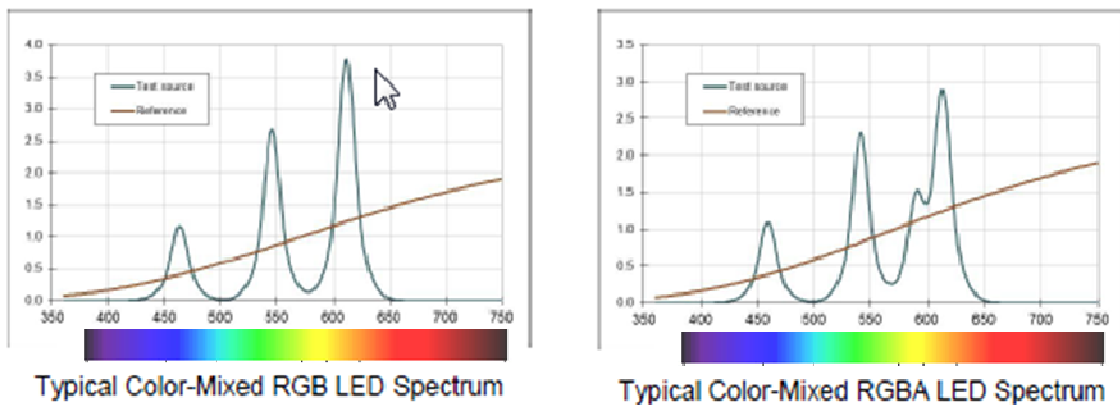
se han conseguido encapsulados LED blanco con fósforos con eficacias de hasta 160 lm/W para luz blanca fría y de hasta 130 lm/W para emisiones de luz blanca cálida. Se estima que con esta tecnología se podrán alcanzar los 200 lm/W

LXW9-PW30 (3000K) at Test Current, Thermal Pad Temperature = 25°C



También se están desarrollando LEDs de luz blanca basados en LEDs de luz violeta o ultravioleta próximo con tres fósforos: rojo, verde y azul.

4.2.- SISTEMA DE MEZCLA DE COLORES



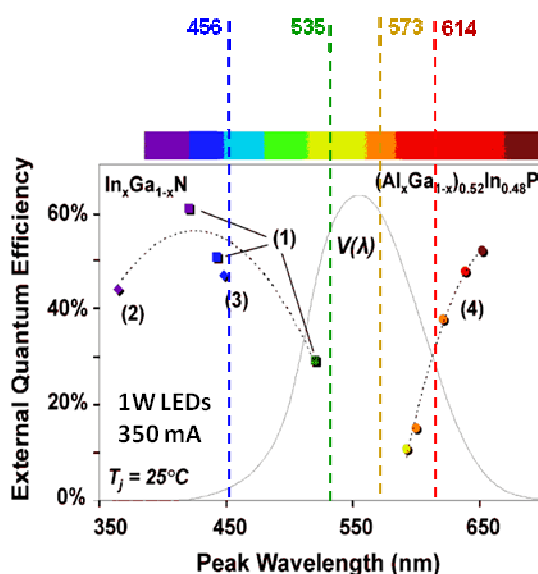
Espectro de emisión de sistemas RGB y RGBA comparados con los del cuerpo negro, ambos con temperatura de color 3000 K

Consiste en producir luz de apariencia blanca de distintas tonalidades mezclando la luz de tres o cuatro LEDs monocromáticos:

- RGB rojo, verde y azul
- RGBA rojo verde ámbar y azul.

La producción de luz blanca mediante la mezcla de emisiones de luces monocromáticas es potencialmente el método más eficiente posible. Además, jugando con la potencia relativa de cada emisor monocromático, permite el control del tono de la luz, lo que abre aplicaciones no sólo en el campo de la decoración sino también como método de mejorar la productividad de los trabajadores. En la actualidad no se han conseguido lámparas RGB de suficiente potencia y eficiencia y este método prácticamente sólo se utiliza en aplicaciones de decoración.

En 2014 existen encapsulados led de mezcla de colores con rendimientos en torno a 133 lm/w para RGB y de 85 lm/W par RGBA. Se estima que para 2020 se podrían alcanzar los 191 lm/w con RGB y 153lm/W con RGBA.



Courtesy of M. Krames, Philips-Lumileds

El problema principal que limita el desarrollo de esta tecnología es que actualmente la eficiencia de los LEDs verdes y amarillos es muy inferior a la de los azules.

Las longitudes de onda de emisión que se han considerado ideales en

estudios teóricos para mezcla de colores son:

- RGB: azul 450-63 nm, verde 545 nm y rojo 610-12 nm
- RGBA: azul 456-59 nm, verde 535-39 nm, ámbar/amarillo 573-90 y rojo 614-15 nm

Sin embargo con la tecnología actual los LEDs verdes emiten en torno a 525 nm y los ámbares en torno a 590 nm y sus eficiencias son muy inferiores a los de los azules y rojos. El desajuste entre las longitudes de onda ideales incide negativamente en la calidad de reproducción cromática de las fuentes luminosas de esta tecnología.

Es necesario conseguir LEDs verdes y amarillos mucho más eficientes, que emitan en las longitudes de onda de 535 y 573 nm para que la generación eficiente de luz blanca por mezcla de colores sea eficiente y consiga altos índices de reproducción cromática. Si se lograran LEDs verdes y ámbar más eficientes, se podrían lograr rendimientos de hasta 250 lm/W

TABLE 3.1 ESTIMATED EFFICACIES FOR AN RGB CM-LED WITH CCT OF 3000K AND CRI OF 85 ($R_g > 0$)

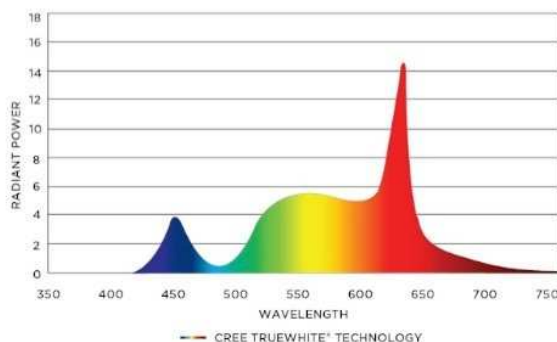
Emissions	Blue LED		Green LED		Red LED	
Peak Wavelength (nm)	463		546		612	
FWHM (nm)	20		20		20	
PCE (%)	Current	Target	Current	Target	Current	Target
	55	80	22	35	44	55
LER (lm/W)	400					
Efficacy (lm/W)	Current			Target		
	133			191		

TABLE 3.2 ESTIMATED EFFICACIES FOR AN RGBA CM-LED WITH CCT OF 3000K AND CRI OF 85 ($R_g > 0$)

Emissions	Blue LED		Green LED		Amber LED		Red LED	
Peak Wavelength (nm)	459		539		590		615	
FWHM (nm)	20		20		20		20	
PCE (%)	Current	Target	Current	Target	Current	Target	Current	Target
	55	80	22	35	8	20	44	55
LER (lm/W)	402							
Efficacy (lm/W)	Current				Target			
	85				153			

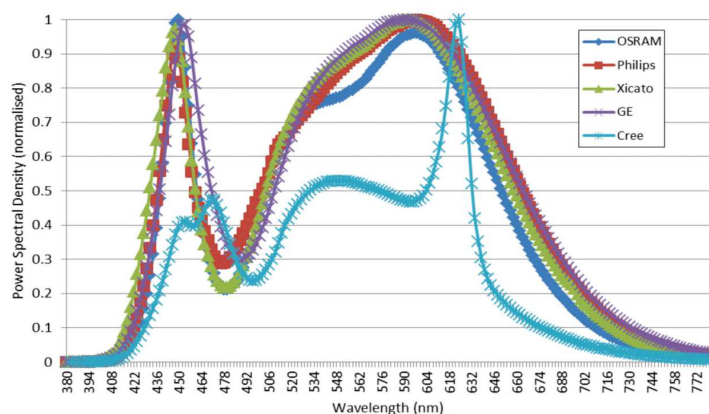
4.3.- SISTEMAS HIBRIDOS

Mezclan la luz de LEDs blancos convencionales, a partir de LEDs azules con fósforo amarillo o verde, con otros monocromáticos, normalmente rojos, para mejorar el índice de reproducción cromática y la eficiencia.



Esta técnica la ha empleado Cree en su línea de productos Cree Truewhite y Osram en la línea Brilliant Mix (Con esa tecnología se consiguen índices de reproducción cromática de 93-95. El uso de un LED rojo en vez de un fósforo que convierta la luz azul en roja tiene ventajas obvias: se eliminan las pérdidas de Stokes y la emisión del LED tiene un menor ancho de banda, con lo que no se desperdicia luz en longitudes de onda donde el ojo humano es poco sensible. Este sistema tiene sin embargo otros inconvenientes, ya que los LEDs rojos a base de AlGaInP tienen un comportamiento térmico muy diferente que los LEDs azules de GaN lo que hace necesario un sistema de control y añade complejidad al conjunto.

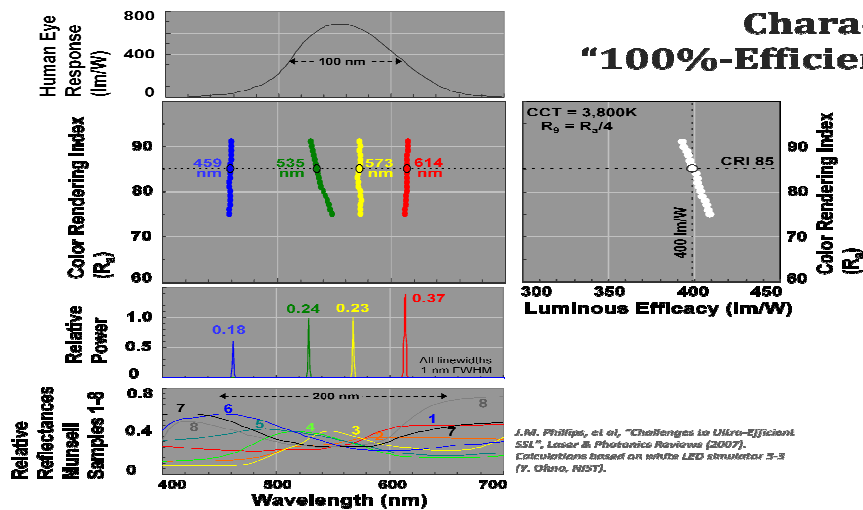
En un estudio comparativo de 5 módulos (downlight) de LED blanco frío¹³ se estudiaron cuatro productos con tecnología de conversión por fósforo de Osram, Philips, GE y Xicato con uno de Cree que utiliza el sistema híbrido en el que se mezcla la luz de 24 LEDs blancos (led azul+ fósforo) con la de 14 LEDs rojos. Con esta técnica, el módulo de Cree logra un IRC más alto (92,4) y un R9 (respuesta al rojo profundo) muy superior (56,1)



En las figuras vemos la distribución espectral de la luz de los 5 módulos del estudio y algunos datos técnicos. Puede observarse que la distribución espectral es muy similar en 4 de ellos y notablemente distinta en el de Cree, los LEDs rojos son responsables del pico de 620 nm.

Company	Model	CCT	Luminous Flux (Lumens)	CRI/Ra	R9	x	y	System Power (W)	Power Factor	System Lm/W
OSRAM	PrevaLED Core C-Z2	3968.6	2426.8	83	11.1	0.3831	0.3821	28.295	0.9002	85.8
Cree	LMH6	4039.4	2395.3	92.4	56.1	0.3807	0.3834	25.131	0.9111	95.3
Philips	Fortimo SLM G2	3855.3	2362.8	84.8	25.8	0.3883	0.3849	27.156	0.9359	87.0
Xicato	XSM8040-2000/C42A	4018.2	2386.4	81.1	14.6	0.3802	0.3783	46.1	0.51	51.8
GE	Infusion	3992.6	2439.3	83.1	25.1	0.3797	0.3729	34.7	0.92	70.3

5.- LA FUENTE DE LUZ BLANCA CON EFICIENCIA DEL 100%



Algunos estudios científicos han definido teóricamente la "fuente de luz ideal" basada tecnología LED con mezcla de colores con la máxima eficiencia posible. Se han elegido para ella unos parámetros de índice de reproducción cromática en torno a 85 y de temperatura de color de 3800K basándose en los usos de consumo de iluminación tanto comercial como doméstica. Con estudios de simulación, se ha llegado a la conclusión de que con esta tecnología podría alcanzarse hipotéticamente una eficacia luminosa máxima de 400 lm/W. A este valor se le ha asignado una eficiencia del 100%, con idea de realizar comparaciones entre las distintas tecnologías de iluminación actuales y futuras.

Los principales laboratorios de investigación en las tecnologías de iluminación de estado sólido están en la actualidad intentando conseguir eficiencias del orden del 70-100% en LEDs de luz blanca con elevado Índice de Reproducción Cromática.

6.- CONCEPTOS Y DEFINICIONES DE LA ILUMINACIÓN CON LEDS

6.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ILUMINACIÓN CON LEDS

Potencialidades/Ventajas

- Alta eficiencia /bajo consumo: Fuente luminosa energéticamente eficiente y con un gran potencial de mejora. (potencialmente superior al resto de las tecnologías)
- Calidad de la luz: Alto índice de reproducción de los colores.
- Duración: Vida útil muy larga.
- Baja emisión de calor. Es una fuente de luz fría, pues no emite radiación infrarroja. Tampoco emite radiación ultravioleta.
- Respuesta instantánea y resistencia a un enorme número de ciclos (encendido/apagado) sin perjuicio para su rendimiento y duración.
- Diferentes tonos de luz (fría, cálida) para ajustarse a todo tipo de ambientes. En algunas versiones, puede cambiarse la tonalidad de la luz del dispositivo.
- Regulable. La tecnología LED permite la regulación de la intensidad luminosa
- Poco contaminante. No contiene mercurio ni otras sustancias peligrosas.
- Resistencia muy superior a la de las lámparas o los tubos fluorescentes.
- Direccionalidad: Su naturaleza direccional hace a los LEDs especialmente eficaces para algunas aplicaciones como iluminar a cortas distancias y áreas pequeñas o para reducir la contaminación luminosa en la iluminación de calles.

Limitaciones/Inconvenientes:

- Coste. El precio es más alto que en las otras tecnologías de iluminación, aunque se está reduciendo muy rápidamente.
- Inmadurez. Es una tecnología muy nueva y su regulación no está tan perfeccionada como otras tecnologías más maduras. Existe un gran número de productos en el mercado cuya calidad es difícil de comparar.
- Gestión térmica crítica. Los LEDs son dispositivos semiconductores de potencia y son muy sensibles a sufrir daños por el calor. La gestión térmica es un aspecto fundamental. Para mantener refrigeradas matrices de LEDs de alta potencia deben usarse grandes disipadores de calor. Puede ser poco fiable en aplicaciones de iluminación de exteriores que impliquen grandes variaciones de temperatura entre el invierno y el verano.
- Materiales escasos. Los metales de tierras raras utilizados en los fósforos de los LEDs pueden ser objeto de monopolios de control de precios por determinadas naciones.
- Envejecimiento. La vida útil anunciada es difícilmente comprobable. Con el paso del tiempo la luminosidad se va reduciendo y se producen cambios en la tonalidad de la luz, sobre todo con una deficiente gestión térmica.

6.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES.

LÚMENES Y VATIOS

El flujo luminoso, o potencia luminosa emitida por una fuente, en el Sistema Internacional de Medidas, se mide en lúmenes (símbolo: lm).

El flujo luminoso contempla la sensibilidad variable del ojo humano a las diferentes longitudes de onda de la luz. Es distinto del flujo radiante, que considera toda la radiación electromagnética emitida por la fuente sin considerar si tal radiación es visible o no.

Las primeras fuentes luminosas eléctricas fueron las de tecnología incandescente. Una lámpara incandescente de 100 vatios de potencia eléctrica emite aproximadamente 1300-1400 lúmenes. Con sólo esa tecnología se generalizó la costumbre de asimilar el flujo luminoso de una lámpara incandescente con su consumo eléctrico en vatios (40W, 60W, 100W). Hoy en día, con varias tecnologías en el mercado y con las lámparas incandescentes a punto de desaparecer, esa equivalencia ha dejado de tener ningún sentido, pero sigue arraigada en la población de cierta edad.

Aún es común indicar en las lámparas de uso doméstico de tecnología fluorescente compacta o LED, como medida de su flujo luminoso, la potencia en vatios de la lámpara incandescente a la que sustituyen, además de su flujo luminoso en lúmenes. Así, el prospecto de una lámpara Philips que aparece en apéndice 1 de este trabajo indica 13W (75W) y más adelante, 1055 lm. El fabricante nos dice que esta lámpara consume 13W de potencia eléctrica y emite 1055 lm, aproximadamente lo mismo que una lámpara incandescente de 75W.

La eficiencia de una fuente luminosa es la relación entre el flujo luminoso emitido y la potencia eléctrica consumida y se mide en lm/W.

En el ejemplo anterior podemos comparar la eficiencia de la tecnología incandescente y la LED en el momento actual.

La eficiencia de la lámpara incandescente es de $\frac{1055lm}{75W} = 14lm/W$ mientras que en la LED de Philips del ejemplo es de $\frac{1055lm}{13W} = 81lm/W$, una eficiencia excelente comparada con otras lámparas LED del mercado y casi seis veces mejor que la equivalente incandescente.

DEFINICIONES



Nivel de componentes (sin fuente de alimentación o driver)

- LED es un dispositivo semiconductor de unión p-n que cuando se polariza directamente emite luz no coherente en el espectro de radiación ultravioleta, visible o infrarroja.
- Encapsulado LED (*LED package*): conjunto de uno o más LEDs, que incluye la conexión para cableado u otro tipo de conexiones eléctricas, interfaces térmicas, mecánicas, o eléctricas y opcionalmente, un elemento óptico. No incluye un casquillo o base estandarizada. El dispositivo no se puede conectar directamente a la red eléctrica.
- Matriz de LEDs (*LED array*): conjunto de LEDs o encapsulados LED, en una placa de circuito impreso o sustrato, normalmente con elementos ópticos e interfaces térmicas, mecánicas y eléctricas adicionales, que está preparado para conectarse como carga de un driver LED. No incluye fuente de alimentación ni casquillo o base estandarizado. El dispositivo no se puede conectar directamente a la red eléctrica.

Subconjuntos y sistemas (incluyendo el conductor)

- Lámpara LED (de sustitución) (*replacement / retrofit LED lamp*): conjunto con un casquillo o base estandarizada. Hay dos categorías generales de las lámparas LED:
 - lámpara LED integrada: conjunto integrado, compuesto de encapsulados o matrices de LEDs, driver, casquillo o base estándar, y otros componentes ópticos, térmicos, mecánicos y eléctricos. El dispositivo está diseñado para conectarse directamente a la red eléctrica a través de un portalámparas o base hembra estándar.
 - Lámpara LED no integrada: conjunto compuesto por una matriz o encapsulados de LEDs, y un casquillo o base estándar. El dispositivo está diseñado para conectarse al driver de LEDs de una luminaria a través de un portalámparas estándar. El dispositivo no se puede conectar directamente a la red eléctrica.
- Módulo LED: conjunto integrado compuesto por encapsulados o matrices de LEDs, driver y otros componentes ópticos, térmicos, mecánicos y eléctricos. El dispositivo está diseñado para conectarse directamente a la red eléctrica a

través de un conector personalizado compatible con la luminaria LED para el cual fue diseñado y no utiliza una base estándar ANSI.

- Driver de LEDs: dispositivo compuesto por una fuente de alimentación y circuitos de control de LEDs diseñado para recibir la alimentación de la red eléctrica y alimentar a un encapsulado, una matriz o una lámpara LED no integrada.
 - Fuente de alimentación: dispositivo electrónico capaz de proporcionar y controlar la corriente, voltaje o potencia dentro de los límites de diseño.
 - Circuitos de control: componentes electrónicos diseñados para controlar una fuente alimentación mediante el ajuste de la tensión de salida, corriente de salida o ciclo de trabajo con objeto de controlar la cantidad y características de la energía eléctrica suministrada a un encapsulado o una matriz de LEDs. Los circuitos de control no incluyen una fuente de alimentación.
- Luminaria LED (*LED luminaire*): aparato de iluminación completo que se compone de encapsulados o matrices de LEDs y un driver adecuado, junto con elementos para distribuir la luz, posicionar y proteger los elementos emisores de luz, y para conectar la unidad a la red eléctrica. Las luminarias LED están diseñadas para conectarse directamente a la red eléctrica.

LÁMPARAS Y LUMINARIAS LED

Las lámparas LEDs, al igual que las lámparas fluorescentes compactas, están diseñadas para sustituir a lámparas incandescentes o halógenas, por lo que su diseño está sometido a importantes restricciones de forma y tamaño, que necesariamente limitan su eficiencia. En una lámpara LED integrada, en el espacio de una lámpara incandescente convencional han de integrarse varias matrices de LEDs dispuestas de forma que proyecten la luz en un volumen adecuado, más un disipador de calor y un driver. Las restricciones de espacio y forma dificultan en gran medida el diseño y la eficacia tanto del disipador como del driver.



Figura: Lámparas LED de sustitución. A la izquierda una lámpara de alta potencia para sustituir a una de sodio de alta presión con un enorme disipador de calor integrado. A la izquierda despiece de un foco LED con detalle del disipador y el driver.

Las luminarias y módulos LEDs en cambio, son productos de iluminación totalmente integrados, diseñados para reemplazar un aparato de iluminación completo (no sólo la lámpara). Dos ejemplos son una luminaria LED empotrable diseñada para sustituir una luminaria de tubos fluorescentes y un módulo *downlight* con LEDs.

En general, los módulos y las luminarias LED pueden tener un rendimiento superior en comparación con las lámparas de sustitución, ya que las restricciones de diseño impuestas por una forma existente o un espacio disponible son generalmente mucho menos importantes. Así por ejemplo, pueden usarse drivers más eficientes sin limitaciones de tamaño ni forma, que suministren alimentación a toda la luminaria, o puede usarse el cuerpo completo de la luminaria como parte de un disipador calor mucho más eficaz, sobre todo en potencias elevadas, como en iluminación de exteriores.

Las lámparas LED de sustitución son sin duda un producto coyuntural, que está sirviendo para introducir la tecnología LED en el mercado de la iluminación doméstica y que irá siendo sustituido progresivamente por módulos y luminarias LED. Todavía existen millones de aparatos de luz diseñados para funcionar con lámparas incandescentes con bases estándar y las lámparas de esta tecnología están siendo eliminadas del mercado por normativas tendentes al ahorro energético. La industria creó primero las lámparas fluorescentes compactas y después las lámparas LED, como sustitución de las de tecnología incandescente conforme se van haciendo obsoletas, para funcionar en ese enorme parque de aparatos de iluminación que tardará bastantes años en desaparecer.



Figura: Luminarias LED de alta potencia. Aprovechamiento del cuerpo de la luminaria como parte del disipador de calor

Las luminarias y los módulos LED son en cambio productos destinados a perdurar. En esta fase inicial de implantación de la tecnología LED, las aplicaciones comerciales e industriales son un mercado importante para las luminarias LED, ya que representan alrededor del 30 por ciento de todas las instalaciones de iluminación, pero son responsables de más de la mitad del consumo total de electricidad de toda la iluminación en los EE.UU. Por el contrario, las aplicaciones de las lámparas de sustitución de propósito generales de representan casi el 70 por ciento de todas las instalaciones, pero son responsables de sólo un poco más del 30 por ciento del consumo total de energía de iluminación. Esta distinción se debe en gran parte a mayor número de horas de funcionamiento y la mayor potencia luminosa de las luminarias.

7.- FISICA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES EN LOS LEDS

Para comprender el funcionamiento de los LED, así como los materiales que lo componen, su estructura interna y los métodos de fabricación, debemos en primer lugar dejar claro que los LED son un tipo especial de diodos semiconductores y se basan en los mismos principios que los diodos rectificadores de silicio.

A continuación haremos un resumen de los principios físicos de los materiales semiconductores y de los diodos, para especificar más tarde las peculiaridades de los LEDs.

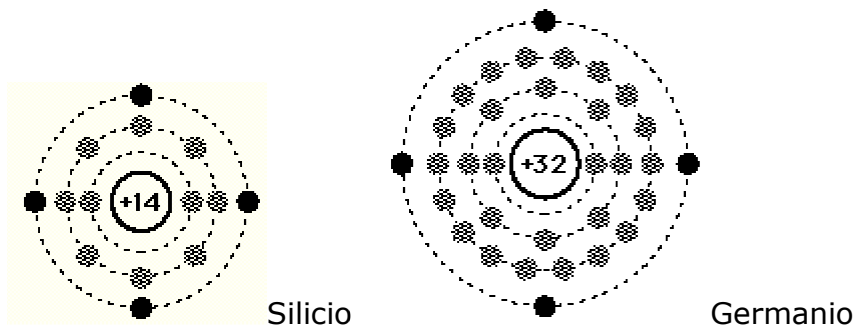
7.1.- CRISTALES COVALENTES. SEMICONDUCTORES.¹⁴

Los materiales empleados para la fabricación de componentes electrónicos se denominan semiconductores y presentan algunas propiedades eléctricas especiales: su resistividad eléctrica es intermedia entre la de los metales y los aislantes y su conductividad puede ser controlada agregando pequeñas cantidades de impurezas.

Los materiales semiconductores están formados por cristales a base de enlaces covalentes. El enlace covalente entre dos o más átomos se origina cuando cada átomo comparte electrones de su capa más o externa o nivel de valencia, con átomos vecinos de forma que todos ellos tengan en la última capa ocho electrones (octeto), situación que es muy estable.

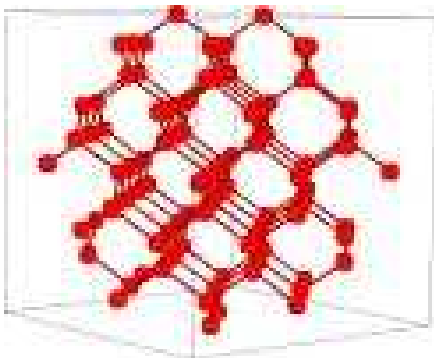
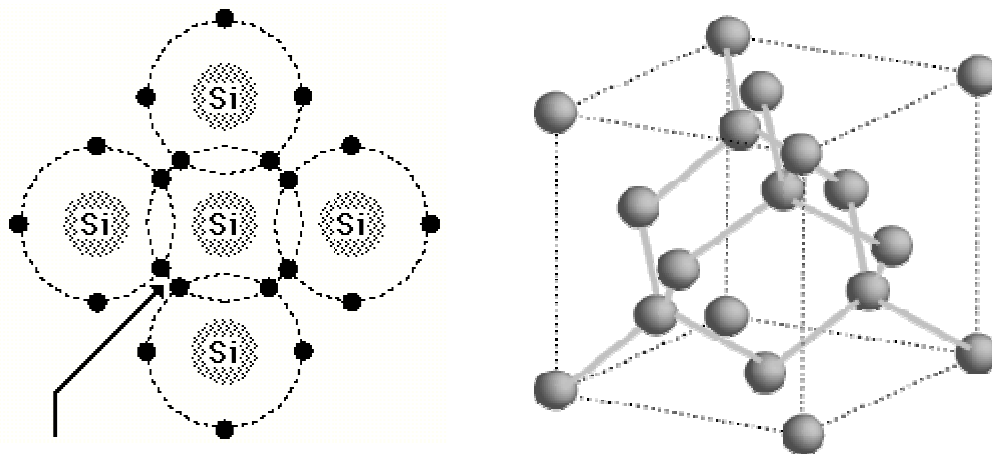
En los Cristales covalentes las uniones covalentes se producen en todas las direcciones del espacio. Los átomos están muy próximos entre sí y situados espacialmente de forma ordenada de acuerdo con un determinado patrón geométrico. La gran proximidad entre los átomos del cristal hace que los electrones de su última capa sufran la interacción de los átomos vecinos. En estas condiciones todos los electrones de valencia tienen su lugar en la red. Esto hace que se forme una malla de átomos que se denomina red cristalina, que es una estructura extraordinariamente estable. El diamante es un ejemplo de este tipo de estructura cristalina formada por átomos de carbono.

Se denominan elementos semiconductores a un grupo de elementos del sistema periódico que se caracterizan por tener cuatro electrones de valencia.



Esta propiedad se da en los elementos del grupo IV A o 14 del sistema periódico (C, Si, Ge, Sn, Pb). El elemento semiconductor más usado es el Silicio (Si), por sus buenas propiedades y por ser un elemento muy abundante en la naturaleza y por tanto muy barato. El Germanio (Ge), del mismo grupo IV A también ha sido usado en la fabricación de componentes electrónicos.

El Silicio es el material usado en la abrumadora mayoría de componentes electrónicos pero, como veremos más adelante, no resulta adecuado para los LED, por lo que ha sido necesario investigar en la fabricación de semiconductores a Base de compuestos, que resultan más costosos que el Silicio pero tienen características que los hacen útiles para la emisión de luz visible.



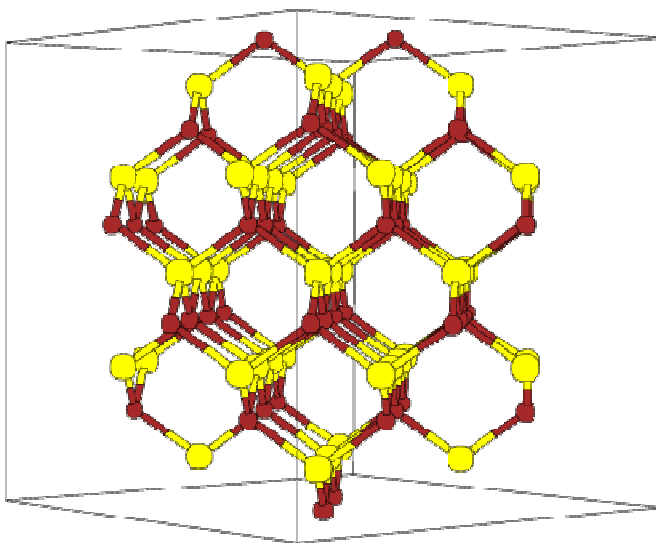
Se pueden formar cristales covalentes semiconductores con una gran variedad de compuestos formados por combinaciones de elementos que permitan completar los ocho electrones de la última capa y que presenten valores de electronegatividad¹⁵ próximos:

		13	14	15	16	
atómica		5	6	7	8	9
		10,811 3 Boro	12,01115 2, ± 4 Carbono	14,0067 1,2, ± 3,4,5 Nitrógeno	15,9994 2 Oxígeno	18,9984 2 Fluor
		13	14	15	16	17
		26,9815 3 Aluminio	28,086 4 Silicio	30,9738 ± 3,5 Fósforo	32,064 ± 2,4,6 Azufre	34,969 ± 2,4,6 Cloro
I		12				
		30	31	32	33	34
		65,37 2 Zinc	69,72 3 Galio	72,59 4 Germanio	74,922 ± 3,5 Arsénico	78,96 ± 2,4,6 Selenio
		48	49	50	51	52
		112,40 2 Cadmio	114,82 3 Indio	118,69 2,4 Estañ	121,75 ± 3,5 Antimonio	127,60 ± 2,4,6 Teluro
		80	81	82	83	84
		200,59 1,2 Mercurio	204,37 1,3 Talio	207,19 2,4 Plomo	208,980 3,5 Bismuto	(210) 4,6 Polonio
		112	114	116		
		(277)	(285)	(289)		

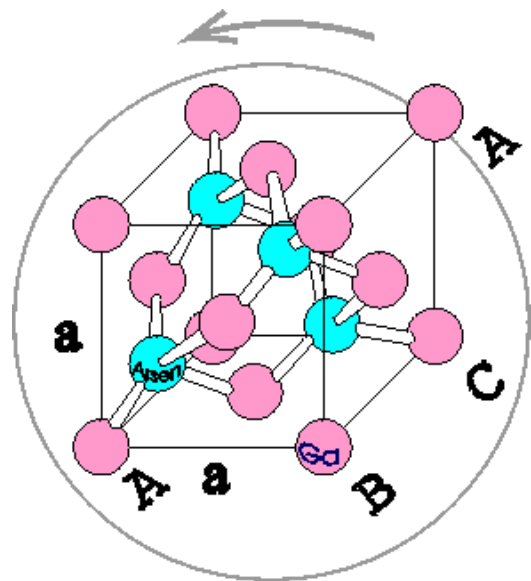
- dos elementos del grupo IV como el Carburo de Silicio SiC,

- combinaciones de elementos del grupo III (Al Aluminio, Ga Galio, B Boro, In Indio) con los del grupo V (N Nitrógeno, P Fósforo, As Arsénico, Sb Antimonio) como el Arseniuro de Galio (GaAs), Nitruro de Galio (GaN), Nitruro de Aluminio (AlN), Nitruro de Indio (InN), Fosfuro de Galio (AlP), Fosfuro de Indio (InP), Fosfuro de Aluminio (AlP)

- combinaciones de elementos del grupo II (Zn Zinc, Cd Cadmio) con los del grupo VI (O Oxígeno, S Azufre, Se Selenio, Te Telurio,). Como el Oxido de Zinc (ZnO), Telururo de Cadmio (CdTe), Seleniuro de Cadmio (CdSe) y Sulfuro de Cadmio (CdS)



Cristal AsGa As (rojo) Ga (amarillo)



Red cristalina con enlaces covalentes de un compuesto formado por un elemento del grupo VA, en rojo y otro del grupo IIIA, en amarillo, como el Arseniuro de Galio.

7.2.- DOPAJE DE SEMICONDUCTORES

En general, los cristales covalentes son malos conductores del calor y de la electricidad debido a la poca movilidad de los electrones de valencia, localizados en los enlaces covalentes de la estructura cristalina.

Para mejorar la conductividad eléctrica del semiconductor es necesario aumentar el número portadores de carga. Los portadores de carga son:

- "electrones libres" fuera de la estructura cristalina que quedarán en una capa más externa y más débilmente ligada al núcleo, la banda de conducción.
- "huecos" o enlaces vacantes de la estructura cristalina.

En un cristal semiconductor puro, o semiconductor intrínseco, la cantidad de "portadores de carga", es decir, de electrones libres o de huecos, es siempre extremadamente baja y aumenta con la temperatura.

Se llama dopaje de un semiconductor al proceso de agregarle pequeñas cantidades de impurezas, a base de otros elementos con diferente número de electrones de valencia, para aumentar artificialmente el número de electrones libres o de huecos en la estructura del cristal.

7.3.- SEMICONDUCTORES "EXTRÍNSECOS" TIPO N Y TIPO P

Si dopamos una porción de cristal semiconductor con impurezas de un elemento que tenga un electrón más de valencia que el de un elemento que forma el cristal, cada átomo de elemento dopante ocupará un lugar en el cristal, pero le sobrará un electrón de valencia, que no tendrá sitio en la estructura cristalina y quedará como electrón libre en la banda de conducción. A estos elementos con electrones de valencia excedentes se les llama donadores o tipo n.

El Silicio que tiene 4 electrones de valencia, se dopa con pequeñas cantidades de fósforo, que tiene cinco electrones de valencia. En un semiconductor compuesto como el Nitruro de Galio el elemento donador o dopante N suele ser el Silicio, con 4 electrones de valencia, ocupando el lugar del Galio, con tres electrones de valencia. A la porción de cristal dopado con impurezas donadoras le llamamos semiconductor tipo N

Si dopamos una porción de cristal semiconductor con impurezas de un elemento que tenga un electrón menos de valencia que el de un elemento que forma el cristal, cada átomo de elemento dopante ocupará un lugar en el cristal, pero le faltará un electrón de valencia para completar los enlaces de la estructura cristalina y quedará un hueco libre en la estructura.

A estos elementos con carencia de electrones de valencia se les llama aceptadores o tipo p. El Silicio se dopa con pequeñas cantidades de Boro, que tiene tres electrones de valencia. En el Nitruro de Galio el elemento dopante p suele ser el Magnesio, con dos electrones de valencia, ocupando el lugar del Galio, con tres. A la porción de cristal dopado con impurezas aceptadoras le llamamos semiconductor tipo P.

A continuación podemos ver los elementos dopantes n y p más comunes para distintos materiales semiconductores.

	Si	GaN	GaP	GaAs	ZnO	SiC
Dopante tipo n	P	Si en el lugar del Ga u O en el lugar del N	S o Te en lugar del P	Si en el lugar del Ga	B en lugar del Zn	N en el lugar del C
Dopante tipo p	B	Mg en el lugar del Ga	Zn en lugar del Ga	Be o Mg en el lugar del Ga	N en lugar del O	Al en el lugar del Si

7.4.- UNIÓN P-N

Cuando dos porciones de cristal semiconductor una de tipo P y otra de tipo N se colocan en contacto una con otra, se forma una unión P-N o diodo básico. En la zona de contacto, electrones libres de la zona N tienden a pasar a la zona P y recombinarse con huecos de forma espontánea, por difusión. A ambos lados de la zona de contacto disminuye la concentración de portadores de carga y se crea una zona de transición, de empobrecimiento o de vaciamiento. Este vaciamiento de portadores de carga implica que aparezca un campo eléctrico o barrera de potencial que bloquea la corriente de difusión en situación de equilibrio.

Al aplicar una tensión externa de un valor suficiente para superar la barrera de potencial, positiva en el lado P y negativa en el N (polarización directa) la zona de transición se estrecha y la corriente circulará fácilmente en ese sentido. Con polarización directa, los electrones libres de la región N son impulsados hacia la región P. Al cruzar de la zona P a la N, los electrones libres se recombinan con huecos de esta región y en ese momento emiten una radiación, que es el efecto buscado en los LED. La corriente continúa por la zona P, pues los electrones de los enlaces vecinos impulsados por el campo eléctrico pasan a ocupar los enlaces vacantes o huecos, produciendo un efecto como si los huecos fueran cargas positivas que se desplazaran desde el terminal positivo hacia la unión.

El valor de la barrera de potencial, y por tanto de la tensión de polarización directa, varía con el material de que está hecho el diodo: 0,3 V para el Ge, 0,7 V para el Si, 2-2,7 V para los LED rojos o naranjas de Fosfuro de Aluminio Galio e Indio, 3-3,5V para los LED azules, verdes y blancos de Nitruro de Galio e Indio. Una vez superada la barrera de potencial, la corriente en el diodo es proporcional a la tensión directa aplicada, es decir el diodo se comporta en esa zona como una pequeña resistencia.

En cambio, si aplicamos una polarización inversa prácticamente no circulará corriente, porque el número de portadores de carga que producirían esa corriente (huecos en la zona N y electrones en la P) es extremadamente bajo. De hecho, existirá una mínima corriente del orden de μA , independiente de la tensión inversa aplicada llamada corriente inversa de saturación.

En los diodos de silicio el efecto buscado es el de rectificación, al permitir la corriente sólo en un sentido. En los LED en cambio el efecto buscado es la emisión energía en forma de radiación electromagnética al producirse la recombinación de electrones con huecos en la unión.

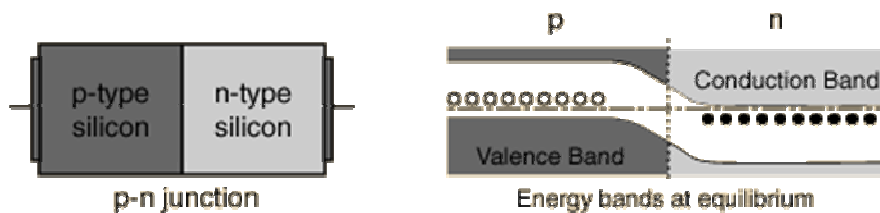


Figura: esquema de una unión PN o diodo básico. Los círculos vacíos en el lado izquierdo de la unión de arriba a la derecha, representan "huecos" o deficiencias de electrones en la red, que pueden actuar como portadores de carga positiva. Los círculos sólidos a la derecha de la unión representan los electrones disponibles desde el dopante de tipo n.

16

7.5.- TEORÍA DE BANDAS. BANDA DE ENERGÍA Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CRISTAL

En un átomo aislado los electrones pueden ocupar determinados niveles energéticos pero cuando los átomos se unen para formar un cristal, las interacciones entre ellos modifican su energía, de tal manera que cada nivel inicial se desdobra en numerosos niveles, que constituyen una banda. El nivel energético de cada electrón puede estar situado en la "banda de valencia" o en la "banda de conducción" del cristal. Un electrón que ocupe un nivel dentro de la banda de valencia está ligado a un átomo del cristal y no puede moverse libremente a través de él, mientras que si el nivel ocupado pertenece a la banda de conducción, el electrón puede moverse libremente por todo el cristal, pudiendo formar parte de una corriente eléctrica.

Entre estas dos bandas existe un hueco, llamado banda energética prohibida, cuyos niveles no pueden ser ocupados por ningún electrón del cristal. Los electrones sólo pueden salvar la banda prohibida y pasar de la de conducción a la de valencia o viceversa, en caso de que se les comunique la energía suficiente. La magnitud de la banda prohibida tiene por unidad de energía al Electrón- Voltio [eV], que es igual a la energía que adquiere una partícula cargada, cuando es acelerada en el vacío, a través de una diferencia de potencial de 1 voltio.

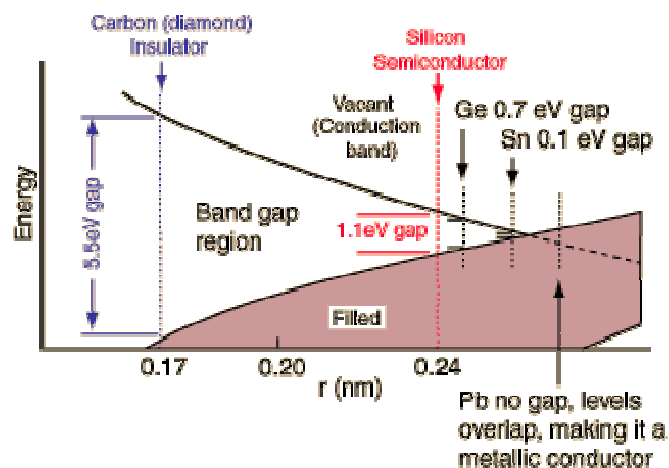
La magnitud de esa banda prohibida [E_g] permite definir otra diferencia entre los semiconductores, aislantes y conductores.

- En los conductores la banda de valencia y la banda de conducción se superponen, por lo que cualquier aporte de energía es suficiente para producir un desplazamiento de los electrones.

- En los aislantes la banda inferior menos energética (banda de valencia) está completa con los electrones más internos de los átomos, y la superior (banda de conducción) está vacía y separada por una banda prohibida muy ancha (6-10 eV), que hace imposible el salto de los electrones hacia la banda de conducción.
- En los semiconductores la estructura de bandas es muy semejante a los aislantes, pero con la diferencia de que la anchura de la banda prohibida es bastante pequeña (0,7-3 eV). Al suministrarles suficiente energía, los electrones de la banda de valencia pueden saltar la banda prohibida, y pasar a la de conducción, dejando en la banda de valencia el hueco correspondiente. Los semiconductores, que son aislantes en condiciones normales, pueden conducir la electricidad al elevarse la temperatura; Además, su conductividad puede regularse, puesto que al disminuir la energía aportada es menor el número de electrones que salte a la banda de conducción; cosa que no puede hacerse con los metales, cuya conductividad es prácticamente constante.

Periodic table
environment of
semiconductors

B	C 2p ²	N
Al	Si 3p ²	P
Ga	Ge 4p ²	As
In	Sn 5p ²	Sb
Tl	Pb 6p ²	Bi



Al aplicar una tensión externa con polarización directa a una unión p-n, electrones libres de la región n, impulsados por el campo eléctrico, pasan a la región p y se recombinan con un hueco de esta región, es decir, "caen" de la banda de conducción a la de valencia de menor energía, cruzando la banda prohibida y emitiendo un fotón de energía. La longitud de onda de esa emisión depende de la magnitud de la banda prohibida del material semiconductor.

La energía de un fotón y la frecuencia de su onda electromagnética asociada se relacionan por la fórmula conocida como «relación de Planck»:

$$E = h \cdot f; \quad f = \frac{E}{h}$$

Donde E es la energía del fotón, f la frecuencia de la onda electromagnética y h la constante de Planck

$$h = 4.13566733 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

Dado que la frecuencia f, la longitud de onda λ y la velocidad de la luz c cumplen que $\lambda \cdot f = c$ o $f = \frac{c}{\lambda}$, la relación de Planck se puede expresar como:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ y } \lambda = \frac{h \cdot c}{E}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{h(\text{eV} \cdot \text{s}) \cdot c(\frac{\text{m}}{\text{s}})}{E(\text{eV})} \cdot 10^9 = \frac{1240,7 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{E(\text{eV})}$$

7.6.- MATERIALES SEMICONDUCTORES USADOS EN LOS LED

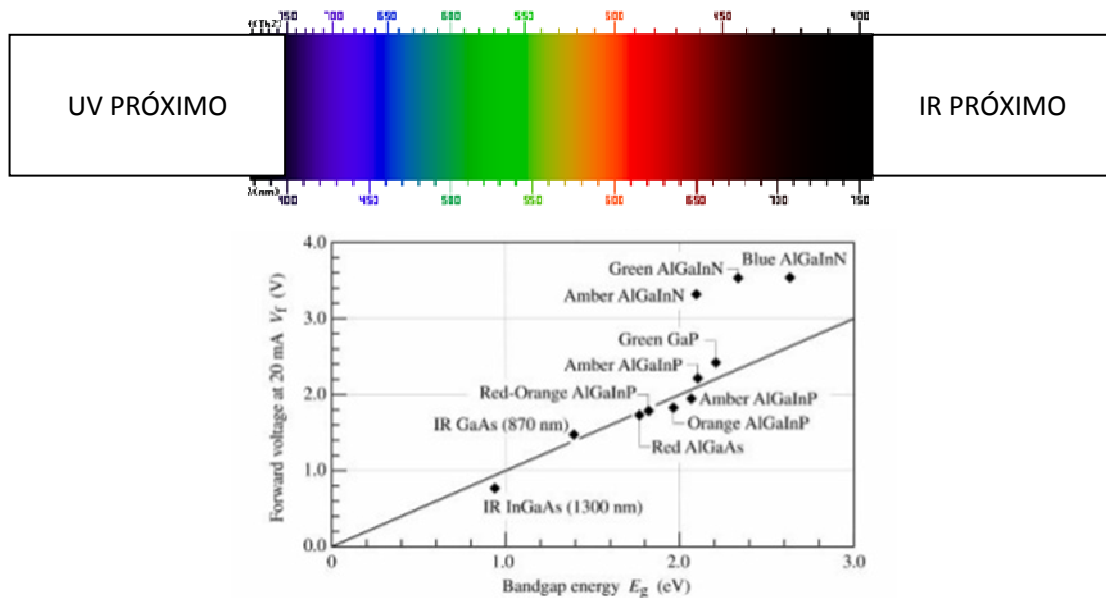
Diferentes familias de materiales semiconductores inorgánicos pueden contribuir a la generación de luz mediante tecnologías de estado sólido.

En la tabla siguiente se incluyen una serie de elementos y compuestos semiconductores con sus bandas prohibidas, y las longitudes de onda de emisión correspondientes.

Material	Símbolo	Banda prohibida (eV) a 300K	λ (nm)	luz	Grupos periódico sistema
Silicio	Si	1,11	1118	IR prox	IVA
Germanio	Ge	0,66	1880	IR prox	IVA
Carburo de silicio	SiC	2,86	434	violeta	IVA
Fosfuro de aluminio	AlP	2,45	506	verde	III-IV
Arseniuro de aluminio	AlAs	2,16	574	amarillo	III-IV
Antimoniuro de aluminio	AlSb	1,6	775	IR prox	III-IV
Nitruro de aluminio	AlN	6,3	197	UV prox	III-IV
Diamante	C	5,5	226	UV prox	IV
Fosfuro de galio (III)	GaP	2,26	549	verde	III-IV
Arseniuro de galio	GaAs	1,43	868	IR prox	III-IV
Nitruro de galio (III)	GaN	3,4	365	UV prox	III-IV
Sulfuro de galio (II)	GaS	2,5	496	verde	III-IV
Antimoniuro de galio	GaSb	0,7	1772	IR prox	III-IV
Nitruro de indio (III)	InN	0,7 ¹⁷	1772	IR prox	III-IV
Fosfuro de indio (III)	InP	1,35	919	IR prox	III-IV
Arseniuro de indio (III)	InAs	0,36	3446	IR medio	III-IV
Óxido de cinc	ZnO	3,37	368	UV prox	II-VI
Sulfuro de cinc	ZnS	3,6	345	UV prox	II-VI
Seleniuro de cinc	ZnSe	2,7	460	Azul	II-VI
Telururo de cinc	ZnTe	2,25	551	verde	II-VI
Sulfuro de cadmio	CdS	2,42	513	verde	II-VI
Seleniuro de cadmio	CdSe	1,73	717	rojo	II-VI
Telururo de cadmio	CdTe	1,44	860	IR prox	II-VI
Sulfuro de plomo (II)	PbS	0,37	3353	IR medio	II-VI
Seleniuro de plomo (II)	PbSe	0,27	4595	IR medio	II-VI
Telururo de plomo (II)	PbTe	0,29	4278	IR medio	II-VI
Óxido de cobre (II)	Cu ₂ O	2,17	572	verde	

Los primeros LEDs rojos se fabricaron con Fosfuro-Arseniuro de Galio (GaAsP) y más tarde con Arseniuro de Galio y Aluminio (AlGaAs). Los primeros LED azules se hicieron con Carburo de Silicio (SiC)

Actualmente los compuestos químicos más usados en la fabricación de LEDs son los Nitruros y Fosfuros de elementos del Grupo III A o 13 (Aluminio, Galio e Indio).



Observamos que al Nitruro de Galio (GaN) le corresponde una longitud de onda en torno a 365 nm en el ultravioleta próximo y al Nitruro de Aluminio (AlN) 197 nm también UV algo más alejado del espectro visible. Más abajo vemos que el Nitruro de Indio (InN) emite a 1772 nm en el IR próximo. Combinando en las proporciones adecuadas estos compuestos en aleaciones ternarias (InGaN o AlGaN) o cuaternarias (AlGaInN) se pueden fabricar LEDs que emitan en toda la gama que va desde el UV próximo y cubre la mayor parte del espectro visible.

Utilizando InGaN, la longitud de onda emitida puede ser controlada por la relación que se mantiene entre el GaN y el InN en la aleación. Puede emitirse en el ultravioleta cercano con combinaciones entre 0.02In/0.98Ga hasta 0.1In/0.9Ga (390 nm). Se consigue luz azul-violeta (420 nm) con 0.2In/0.8Ga, azul (440 nm) con 0.3In/0.7Ga. Con combinaciones más altas de Indio puede emitirse luz verde y aumentándola más aún, teóricamente podría llegarse hasta el rojo, pero la eficiencia disminuye al aumentar la longitud de onda. De hecho la longitud de onda del verde es demasiado larga para ese tipo de material y no se ha conseguido emitir con suficiente eficacia en la longitud de onda verde más adecuada para la generación de luz blanca que estaría entre 535 y 545 nm

En la actualidad se usan estructuras de AlGaN para fabricar LEDs ultravioletas y estructuras de InGaN y AlInGaN para fabricar LEDs azules de gran luminosidad

y verdes de menor rendimiento. Los LEDs azules, y potencialmente los UV se usan para la generación de luz blanca por conversión con fósforos.

La luz de mayores longitudes de onda, entre el ámbar y el rojo, se consigue de forma eficiente mediante LEDs de AlGaInP.

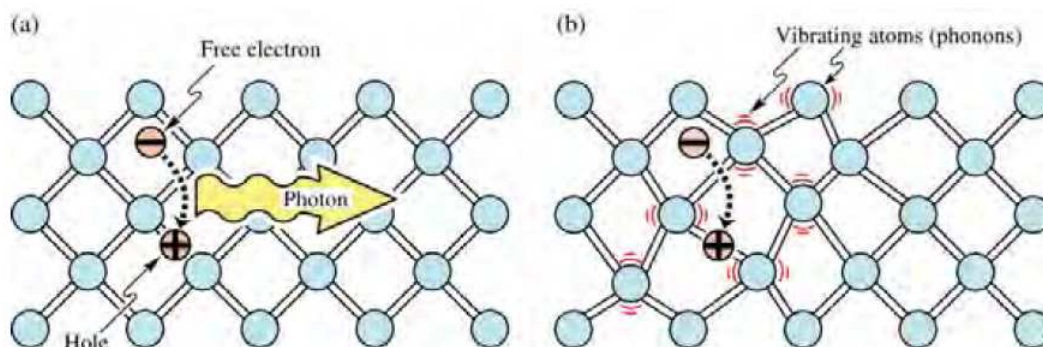
En este caso, vemos que el Fosfuro de Galio emite en torno a 550 nm, el Fosfuro de Aluminio 506 nm, ambos en la gama de la luz verde. El Fosfuro de Indio emite en 919 nm en el IR próximo. Aumentando la proporción de Indio en la aleación se consigue aumentar la longitud de onda de la luz emitida. La eficiencia de los LEDs de AlGaInP es muy buena en el rojo, pero disminuye conforme disminuimos la longitud de onda de emisión, es menor en los LEDs naranjas y menor aún en los ámbar.

Es posible que en el futuro se consiga avanzar en el uso de otros compuestos como el Óxido de Zinc (ZnO), pero las investigaciones en esos materiales están aún en fase inicial. Es posible también la utilización de Cadmio (en seleniuros, sulfuros o telururos) en la fabricación de LEDs, pero este metal pesado se considera altamente contaminante y su uso está restringido por normativas medioambientales como la directiva europea RoHS

7.7.- RECOMBINACIONES RADIATIVAS NO RADIATIVAS

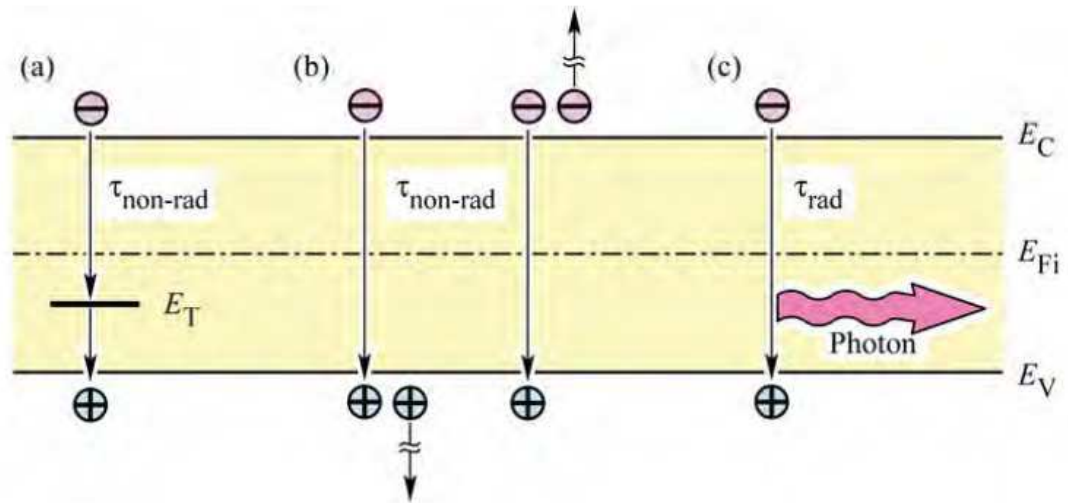
Al fenómeno expuesto, por el que un electrón se “recombina” con un hueco emitiendo un fotón de energía se le denomina recombinación radiativa y es el efecto buscado en los LEDs. Pero no en todos los casos las recombinaciones producen la deseada emisión de un fotón al exterior del cristal.

En algunos casos, los fotones emitidos no pueden escapar del cristal, son reflejados y reabsorbidos generando una pequeña cantidad de calor. En otros casos, la recombinación no produce un fotón sino un fonón (una energía cuántica análoga al fotón) cuya energía se convierte en una vibración de la red cristalina y generación de calor.¹⁸ A este fenómeno indeseado se le denomina recombinación no radiativa.



En general podemos decir que la generación de portadores libres en un semiconductor¹⁹ puede deberse a causas internas (excitación térmica) o externas (radiación electromagnética, campos intensos, inyección desde otra zona del material, etc.). Los portadores libres excitados por estímulos externos

no permanecen indefinidamente en ese estado, ya que existen diversos mecanismos que tienden a hacerlos volver al estado inicial. Son los llamados mecanismos de recombinación. La figura representa esquemáticamente varios de esos mecanismos. Entre ellos podemos señalar los siguientes:

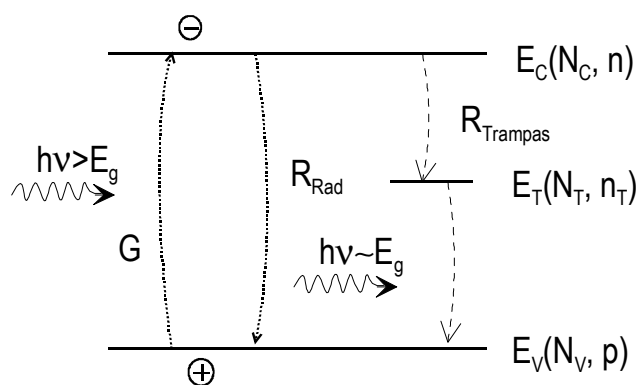


- (a) recombinación por trampas o Shockley-Read-Hall (no radiativa)
- (b) recombinación Auger (no radiativa)
- (c) recombinación radiativa

-Recombinación radiativa: encuentro directo entre un electrón y un hueco que se recombinan emitiendo un fotón de energía igual a la banda prohibida (interacción entre dos partículas).

- Recombinación Auger: la energía del electrón que se recombina es cedida como energía cinética a otro electrón de la banda de conducción (interacción entre tres partículas).

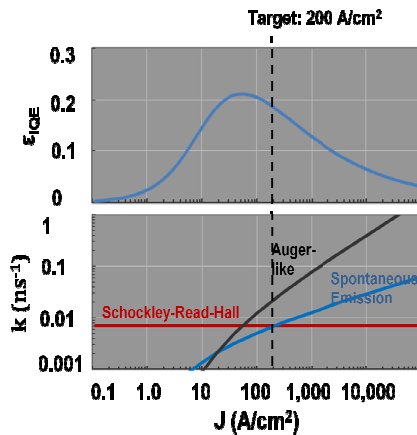
- Recombinación por trampas o niveles profundos (Shockley-Read-Hall):



debido defectos en el material semiconductor, existen niveles intermedios de energía dentro de la banda prohibida. Algunos electrones son capturados en uno de esos niveles intermedios (trampa), quedando en un estado meta estable y cediendo el exceso de energía a la red. Posteriormente dicho nivel puede capturar un

hueco de la banda de valencia, completándose así la recombinación. Toda la energía en exceso se cede a la red sin emisión de un fotón.

① Eliminate blue LED droop



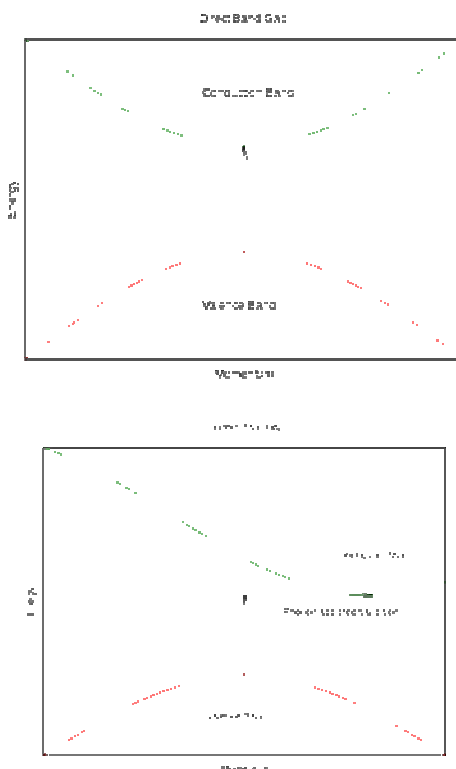
$$\eta_{QE} = \eta_{inj} \cdot \frac{Bn}{A + Bn + Cn^2}$$

↑ ↑ ↑
 Shockley-Read-Hall Spontaneous Emission Auger-like

Rate constants for 510nm LED, after U.T. Schwarz, "Emission of biased green quantum wells in time and wavelength domain," SPIE Proc 7216, 7216U-1 (2009).

Conforme aumenta la corriente a través del LED aumenta la recombinación radiativa pero se incrementa más aun la no radiativa de Auger. Por ello, en los LED azules, que son la base para la generación de luz blanca, se produce una caída de eficiencia (*droop*) a corrientes elevadas, necesarias en aplicaciones de iluminación. Eliminar esa "caída de eficiencia" y lograr optimizar el rendimiento del LED azul a corrientes normales de funcionamiento (700 mA-1 A) es uno de los principales objetivos de los científicos que trabajan en la mejora de los LED.

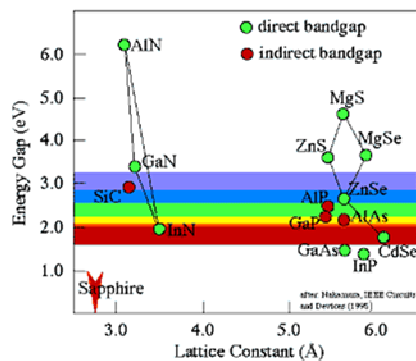
7.8.- SEMICONDUCTORES DE BANDA PROHIBIDA DIRECTA Y DE BANDA PROHIBIDA INDIRECTA



La banda prohibida de los semiconductores puede ser de dos tipos directa o indirecta.

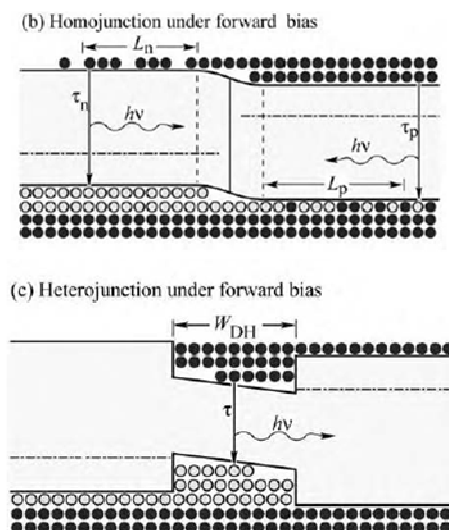
Las bandas en las que pueden encontrarse los portadores de carga se caracterizan por un vector con dos componentes: su energía y su momento. Se dice que un semiconductor es de banda prohibida directa cuando el momento de electrones y huecos es el mismo en las bandas de valencia y de conducción. En ese caso, el electrón puede pasar directamente de una banda a la otra y emitir un fotón. En cambio, si los momentos son distintos, se dice que se trata de un semiconductor de banda prohibida indirecta. En una banda prohibida indirecta no se puede emitir directamente un fotón, sino que el electrón debe pasar por un estado intermedio en el que debe modificar su momento. Esto implica la absorción o emisión de un fonón,

cuya energía se convierte en una vibración de la red cristalina y generación de calor. Una vez igualados los momentos puede producirse la recombinación con la emisión de un fotón. Este proceso hace que las recombinaciones radiativas sean mucho más lentas en los materiales con banda prohibida indirecta.



Algunos ejemplos de semiconductores con banda prohibida directa o indirecta se muestran en la tabla. Podemos ver que el Si y los Nitruros de Al In y Ga que se usan en LEDs azules son de banda prohibida directa, en cambio el SiC y los Fosfuros de Ga y Al que se emplean en los LEDs rojos son de banda prohibida indirecta.

7.9.- HETEROESTRUCTURA Y POZOS CUÁNTICOS



Para maximizar la probabilidad de que se produzcan las recombinaciones radiativas de huecos y electrones, que son las que emiten fotones, los LEDs se construyen con una estructura mucho más compleja que la representada en las los esquemas de una unión P-N simple. Los LEDs son en realidad como un sándwich de múltiples capas con materiales distintos, denominadas heteroestructuras. A las zonas de contacto entre dos materiales semiconductores distintos se les denomina heterouniones

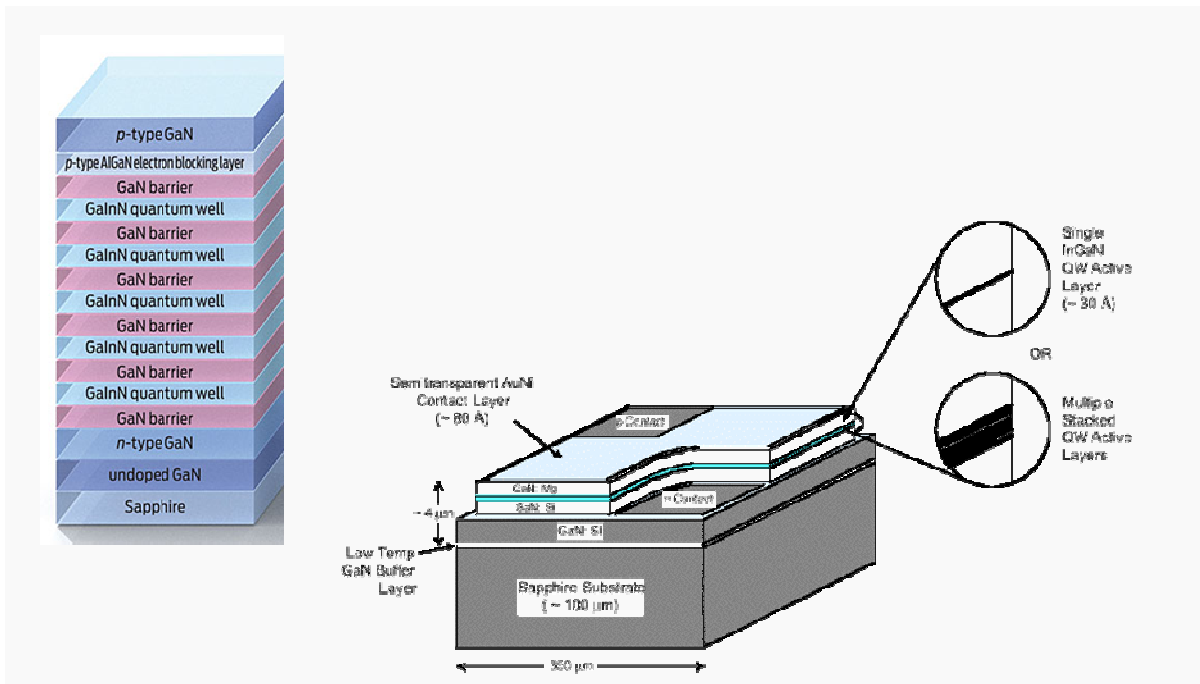
Unas capas muy finas de un material con una determinada energía de banda prohibida se "empareda" entre capas de

otro material con energía de banda prohibida más elevada, creándose heterouniones a ambos lados.

Estas heterouniones, debido a las diferentes energías de sus bandas prohibidas, se comportan como barreras que confinan a los portadores de carga (electrones y huecos) en la capa interior, de menor energía de banda prohibida, que se llama zona activa. Este fenómeno se conoce en física como pozo cuántico. La mayor concentración de portadores de carga en la estrecha zona activa, favorece la posibilidad de que se produzcan recombinaciones radiativas. Pueden fabricarse LEDs con una sola de esas capas activas o pozos cuánticos o con varias.

En el caso de los LEDs azules las capas exteriores son de Nitruro de Galio dopado con Si en la zona N y con Mg en la P. Las zonas activas o pozos cuánticos interiores son de Nitruro de Galio e Indio. La composición de las

zonas activas es la que marca la frecuencia de emisión de la luz del LED. En función de la proporción de Indio de la mezcla, se emitirá luz verde (con la máxima proporción de Indio), azul o violeta (con la mínima proporción de Indio).



7.10.- SUSTRATOS

Los LEDs, como los otros dispositivos semiconductores, se fabrican cultivando o recreciendo las capas de cristal de tipo P y N sobre un sustrato o base estable de un material con una estructura cristalina igual o muy similar a la del cristal semiconductor utilizado. Los LEDs se construyen normalmente sobre un sustrato de tipo N. Los sustratos tipo P son menos comunes.

Para que las estructuras cristalinas del sustrato y del cristal cultivado sobre él sean lo más similares posibles y así evitar irregularidades, lo ideal es usar como sustrato el mismo tipo de material (sustrato nativo). Así se hace en el caso de los dispositivos a base de Silicio. En el caso de los LEDs rojos, naranjas y amarillos a base de Fosfuros de Galio, Aluminio e Indio se usan sustratos de GaAs o GaP. Cuando se usa el primero, comúnmente en un segundo paso se sustituye el sustrato de GaAs por otro de GaP, pues este último material es transparente a la luz de las longitudes de onda entre el rojo y el amarillo, ayudando de esta forma a que más luz sea emitida fuera del encapsulado.

El tipo de sustrato empleado es un problema importante en los LEDs UV, azules y verdes a base de InGaN y AlInGaN. El sustrato ideal sería el "nativo" de GaN, pero este material es inestable y propenso a tener defectos. Se han probado varias alternativas, como el zafiro, el Carburo de Silicio o el Silicio, pero en todas ellas hay un desajuste entre las estructuras cristalinas que tiene como efecto una pérdida de eficiencia. Para compensar este problema, se usa una fina capa intermedia (o plantilla) de GaN sobre el sustrato y sobre esta plantilla se cultiva diodo propiamente dicho.

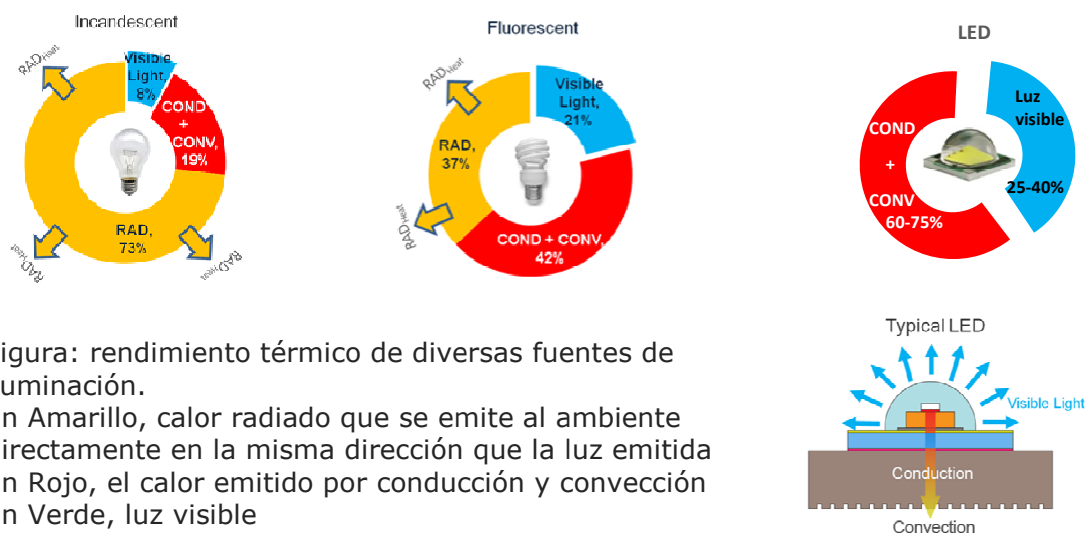
En la actualidad, la inmensa mayoría de los LEDs de Nitruros de Galio, Aluminio o Indio se fabrican sobre un sustrato de zafiro. El fabricante Cree, como excepción, siempre ha utilizado sustratos de Carburo de Silicio. Recientemente Bridgelux, Osram Opto Semiconductors, y la china Lattice Power han comenzado a producir LEDs azules de GaInN sobre sustratos de Silicio²⁰. La empresa Soraa los ha comenzado a producir sobre sustratos nativos de Nitruro de Galio.

Cada tipo de sustrato tiene sus ventajas e inconvenientes²¹²².

- Zafiro: es la tecnología dominante. El grado de desajuste entre las estructuras cristalinas está en torno al 13%. Su principal ventaja es que es muy estable y el desajuste de los cristales se ha investigado en profundidad. La principal desventaja es su elevado coste. A largo plazo está condenado a dejar de utilizarse si se quieren alcanzar los objetivos buscados de reducción de costes.
- Carburo de Silicio: presenta varias ventajas; es muy estable, las diferencias entre las redes cristalinas son sólo de 3,5% y tiene la mejor conductividad térmica. La desventaja es su elevado coste para cualquier otro fabricante que no sea Cree, que fabrica ese material desde antes de entrar en negocio de los LEDs y es el único que lo usa como sustrato.
- Silicio: la principal ventaja es el coste, pues se pueden emplear las mismas obleas grandes que para los chips de silicio. Esto podría reducir hasta en un 70-80% el coste de producción de los LEDs. El problema es que cultivar Nitruro de Galio sobre Silicio es difícil, sobre todo porque los materiales se expanden y contraen a tasas muy diferentes y las diferencias en las estructuras cristalinas están en torno al 17%.
- Nitruro de Galio: es teóricamente el sustrato perfecto. Al ser el sustrato del mismo material que el de la unión PN, no hay desajustes térmicos, ni tampoco entre las redes cristalinas, lo que reduce las pérdidas de eficiencia causadas por esos desajustes. Sólo Soraa, la empresa de Shuji Nakamura, el inventor del LED azul, posee por el momento la tecnología para fabricarlo. Para otros fabricantes resulta muy costoso. Método HVPE
- Oxido de Zinc: es otra opción posible pero todavía está en periodo de investigación. Las diferencias entre las redes cristalinas son sólo de 2,2% y permitiría la fabricación de grandes obleas.

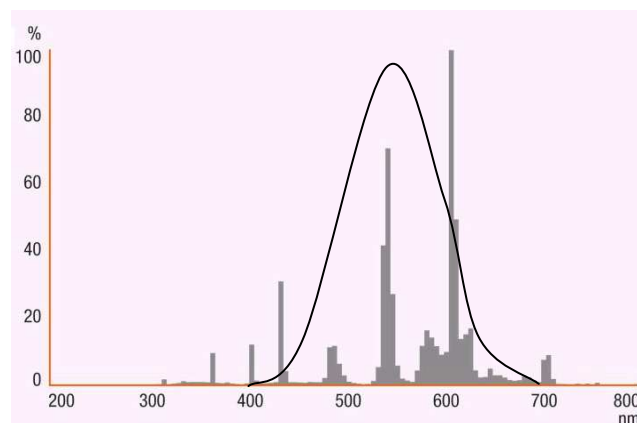
8.- GESTIÓN TÉRMICA EN LOS LEDS²³

Los LEDs son fuentes luminosas mucho más eficientes que las lámparas incandescentes tradicionales, pero también en ellos la mayor parte de la energía eléctrica se transforma en calor y solo una parte relativamente pequeña en luz.

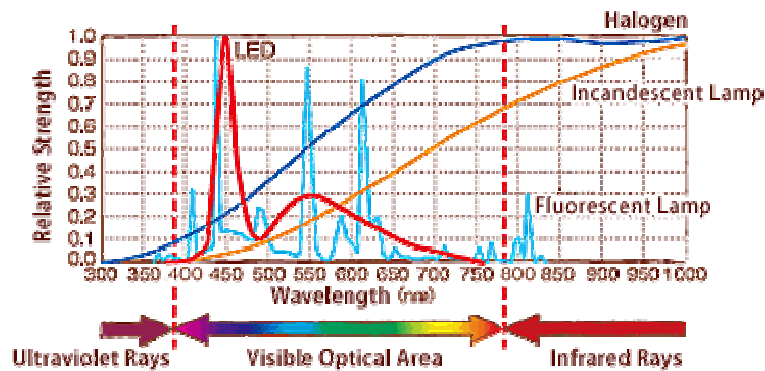


En las lámparas incandescentes en torno al 8% de la potencia eléctrica se transforma en luz visible y el resto en calor, un 78 % se radia al espacio sobre todo en forma de emisión infrarroja y un 19% se transfiere por convección a través del casquillo y por convección al aire.

En los fluorescentes la proporción de luz visible se eleva al 21%, y el calor al 79%. En torno al 37% de la se radia en forma de IR y UV y el 45 % se evacua por conducción y convección. En la gráfica vemos el espectro de emisión de un tubo fluorescente Osram LUMILUX T5 HE de temperatura de color 2700K comparado con la curva de respuesta del ojo humano (visión fotópica)



En los LEDs, con el estado actual de la tecnología entre el 25-40% de la potencia eléctrica consumida se transforma en luz visible, prácticamente no se emite radiación fuera del espectro de luz visible y el 60-75% se convierte en calor que debe ser evacuado por conducción desde el LED hacia la placa de circuito integrado y de esta hacia un disipador de calor que lo evacúa al aire circundante por convección.



24

Los LED, como todos los dispositivos electrónicos a base de semiconductores, son muy sensibles a sufrir daños por el calor. Las uniones PN deben mantenerse en todo momento por debajo de una temperatura crítica en torno a 150°C , que si se supera lleva a la destrucción del dispositivo. Por ello, en el diseño de circuitos con dispositivos semiconductores de cierta potencia es fundamental la gestión térmica que implica la inclusión de disipadores de calor bien calculados y cuando estos no son suficientes, de ventiladores mecánicos.

En el caso de los LEDs, la gestión térmica es particularmente importante, ya que las temperaturas altas tienen otros efectos negativos que deben tenerse en cuenta. Si calor producido por los LEDs no es evacuado y se les hace funcionar a altas temperaturas, se produce una reducción del flujo luminoso, disminuyendo la eficiencia del dispositivo, y una variación de las características espectrales de la luz emitida. Además, el funcionamiento continuado a temperaturas altas contribuye a la degradación de los fósforos y los componentes ópticos del encapsulado y al acortamiento de la vida útil del dispositivo. Por ello es fundamental mantener la temperatura de la unión lo más baja posible (en general siempre por debajo de 120°C) en cualquier condición de temperatura ambiente, para lograr la máxima duración, eficiencia y fiabilidad del los LEDs.

La gestión térmica de los LEDs de alta potencia es y seguirá siendo un área crucial de de investigación y desarrollo

Para mantener refrigeradas matrices de LEDs de alta potencia deben usarse grandes disipadores de calor y a veces se necesitan ventiladores. Esto aumenta el coste y los ventiladores reducen la ventaja de eficiencia energética de los LEDs, además son dispositivos propensos a los fallos que llevan al fallo de la unidad.

8.1.- EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LOS LEDs

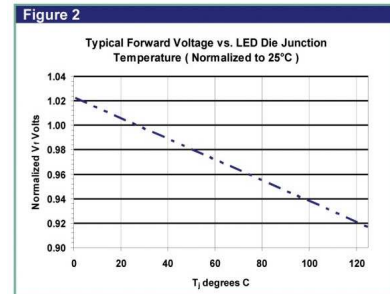
Las características de rendimiento de las fuentes luminosas con LEDs se especifican para determinada corriente y para una temperatura de la unión del Chip del LED de 25°C . Como la mayoría de los LED trabajan a temperaturas claramente por encima de los 25°C , las características nominales deben

tomarse sólo como referencia y para calcular la emisión de luz y sus características deben considerarse la temperatura de operación esperada.

A medida que un LED se calienta, varias características importantes se hacen aparentes demostrando la importancia de la gestión térmica de los LEDs²⁵.

8.1.1.- DISMINUCIÓN DE LA TENSIÓN DIRECTA

La tensión directa disminuye con la temperatura a razón de -1 a -4 mV/°C. Esta disminución de tensión directa debe tenerse cuenta al elegir el circuito de alimentación (driver). Al disminuir la tensión directa se puede incrementar la carga de los componentes del excitador (driver) del LED haciendo que estos también se calienten. En circuitos regulados mediante resistencias se incrementará la corriente directa.

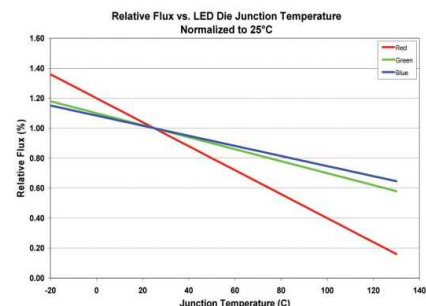
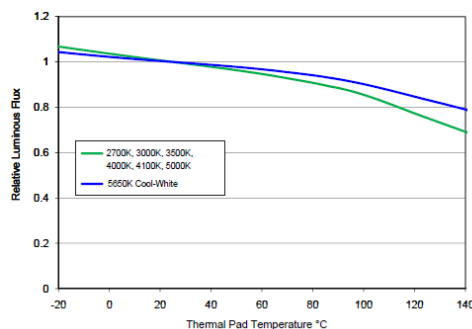


en

El sobrecalentamiento de los LED provoca efectos perjudiciales a corto y a largo plazo.

- Efectos a corto plazo (reversibles): pérdida de eficiencia, variación del tono de luz
- Efectos a largo plazo (irreversibles): degradación de componentes, acortamiento de la vida útil

8.1.2.- DISMINUCIÓN DEL FLUJO LUMINOSO



El sobrecalentamiento de un LED provoca una pérdida de eficiencia con disminución de la emisión de luz.

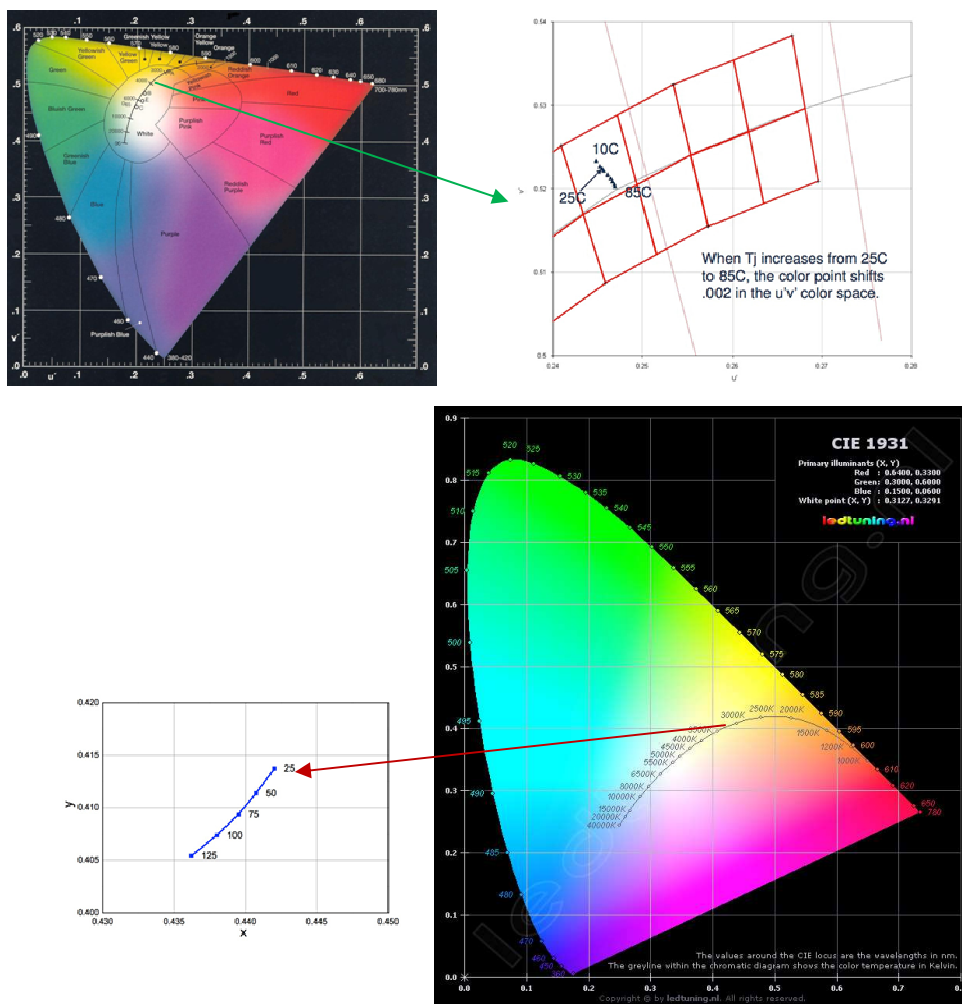
En las figura vemos el efecto de la temperatura en el flujo luminoso. La de la izquierda corresponde a LEDs blancos (Philips Lumileds Rebel) y la de la derecha a LEDs monocromáticos rojo, azul y verde. Se observa que en todos los casos el flujo máximo se produce a temperaturas bajas de la unión PN y disminuye al aumentar la temperatura. Los LEDs de color rojo, naranja, ámbar y amarillo fabricados con material AlGaInP son más sensibles a los cambios de temperatura que los LEDs azules, verdes y blancos hechos con InGaN.

8.1.3.- VARIACIÓN DEL TONO DE LUZ EMITIDA²⁶

A menudo que la temperatura del LED aumenta, la longitud de onda de la luz emitida puede variar. Conforme se eleva la temperatura los átomos de la red cristalina vibran más intensamente, esto hace que disminuya ligeramente la banda prohibida y que por tanto aumente la longitud de onda del fotón emitido. El efecto que esto tiene es que la luz de los LEDs monocromáticos se desplace ligeramente hacia el rojo. Se considera un incremento típico de 0,03 a 0,13nm por °C. El aumento de la longitud de onda puede hacer que una luz anaranjada se torne rojiza.

En los LEDs blancos a base de LED azul + fósforo, la luz azul se aumentará ligeramente su longitud de onda y por tanto también se verán afectados los fotones afectados por el desplazamiento de Stokes emitidos por el fósforo. La luz blanca es una combinación de los espectros de las dos fuentes y se ve por tanto, ligeramente alterada. Puede variar la temperatura de color de la luz blanca, que se torne ligeramente azulada y descienda su rendimiento cromático.

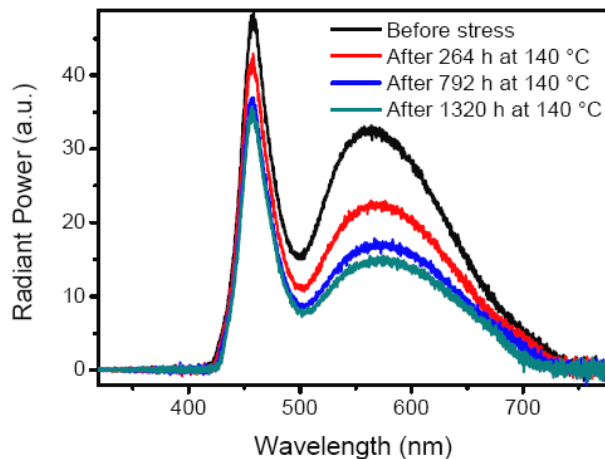
En las figuras se muestra el efecto del aumento de temperatura en los diagramas cromáticos uv y xy



Estos efectos deben tenerse en cuenta al diseñar los circuitos de alimentación y los disipadores de calor en aplicaciones que requieran longitudes de onda de

emisión específicas o una determinada temperatura de color. Los fabricantes clasifican los LEDs por su brillo y por el color de la luz emitida (binning). En la actualidad se tiende a realizar las pruebas a una temperatura de 85°C próxima a la de probable funcionamiento en vez de a 25°C.

8.1.4.- EFECTOS A LARGO PLAZO DE LA TEMPERATURA

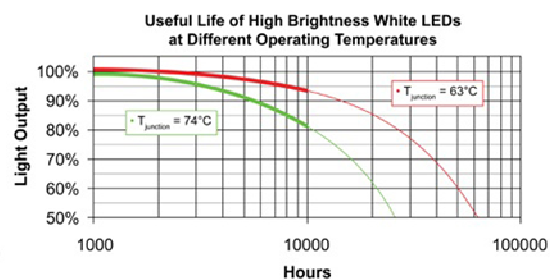
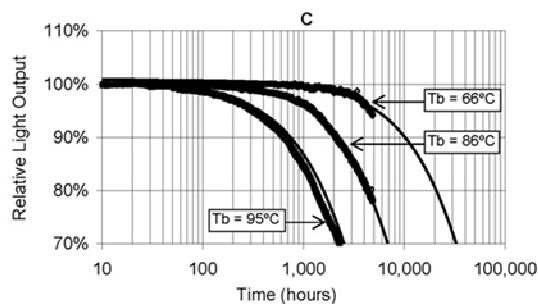


La temperatura puede jugar un papel significativo en limitar la fiabilidad de los LEDs blancos a largo plazo. Cuando los LEDs se exponen a temperaturas altas (u operan sin condiciones óptimas de disipación térmica) las propiedades ópticas del propio LED y del material usado para el encapsulado del fósforo pueden degradarse severamente. Esto puede resultar en una reducción permanente del

flujo luminoso emitido por el dispositivo y en la modificación de las características espectrales de la luz. En la figura se muestra el efecto a largo plazo en el espectro de luz emitido ²⁷

8.1.5.- ACORTAMIENTO DE LA VIDA UTIL

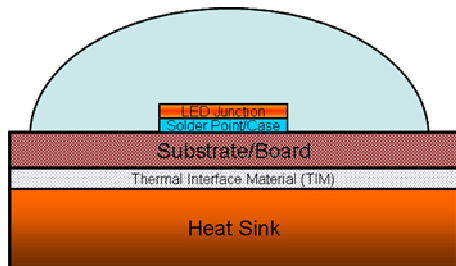
Se considera que un LED ha terminado su vida útil cuando entrega solo un 70% de la luminosidad que tenía de nuevo.



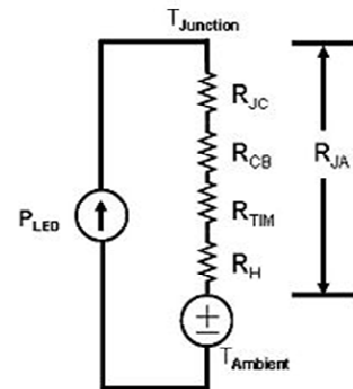
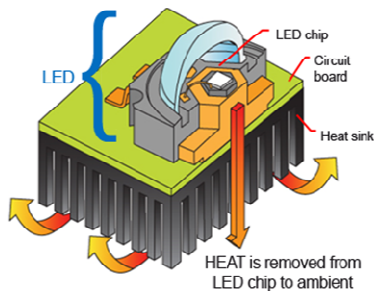
Arriba tenemos dos figuras (del *Lighting Research Center*) En la de la izquierda se observa que una diferencia de 20°C (T_b representa la temperatura de sustrato que es proporcional a la de la unión PN) en el funcionamiento continuado puede acortar la vida útil desde 32000h a sólo 7000h. En la derecha vemos que una diferencia de tan sólo 11 grados en la unión de 63°C a 74°C acorta la vida útil de 38000 a 14000h. Todos los fabricantes indican la vida útil de sus LED, pero para que ese dato sea fiable debe indicarse la temperatura de la unión para la que ese dato de vida útil tiene validez.

Si se pierde el control térmico, la unión del LED podría romperse causando un estado de completo embalamiento térmico. El resultado es normalmente el fallo catastrófico. Otros efectos de del sobrecalentamiento de los LEDs pueden ser la rotura de los cables de conexión, el desprendimiento de las soldaduras, daños en la resina epoxi de unión o que las lentes amarilleen.

8.2.- DISEÑO TÉRMICO DE LAS LAMPARAS Y LUMINARIAS LED



LED package incluyendo diseño de gestión térmica



Modelo térmico de un LED package. La potencia disipada por el LED se representa como una fuente de corriente, la diferencia de temperaturas entre la unión y el ambiente como una diferencia de potencial y las resistencias térmicas como resistencias

LED package incluyendo diseño de gestión térmica²⁸

Para mantener baja la temperatura de la unión del LED y lograr un buen rendimiento, deben considerarse todos los métodos de evacuación de calor: conducción, convección y radiación. Normalmente los LED están encapsulados en una resina transparente que es mal conductor de la temperatura. Casi todo el calor producido se transmite a través de la parte posterior del chip.

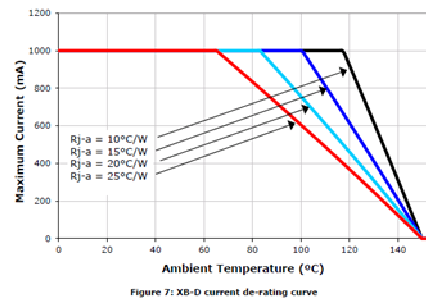
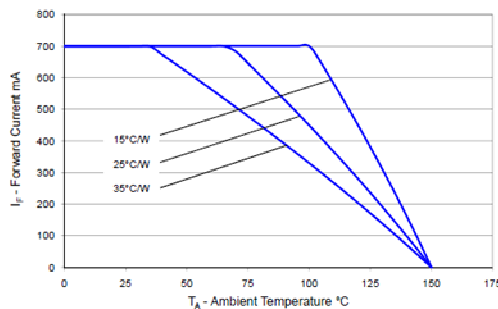
El calor es generado en la unión PN por la energía eléctrica que no se convierte en luz visible y es conducido al exterior por un camino largo, de la unión al punto de soldadura, de la soldadura a la placa de circuito, de la placa al dissipador de calor y de este a la atmósfera

La temperatura de la unión se mantendrá más baja si la impedancia térmica total es menor y si la temperatura ambiente es más baja. Para maximizar el rango de de temperaturas ambiente aceptables para una disipación de potencia dada es necesario minimizar la resistencia térmica unión-ambiente.

Los valores de resistencia térmica varían ampliamente dependiendo de los materiales usados y del fabricante de los componentes. Por ejemplo la resistencia térmica entre la unión y el encapsulado puede variar desde los 2,6°C/W hasta los 18°C/W dependiendo del fabricante.

La Resistencia térmica del "material de interfaz térmica" TIM también varía dependiendo del material usado. Los TIM más usados son la resina epoxi, la pasta térmica, el adhesivo sensible a la presión y la soldadura.

Los LEDs de potencia se suelen montar sobre placas de circuito impreso con una placa metálica interior (MCPCB), a las que se acopla un disipador de calor.



En las figuras de arriba correspondientes a LEDs de Philips Lumileds Rebel (izquierda) y Cree XB-D (derecha) se especifica la corriente máxima de funcionamiento en función de la temperatura ambiente para diferentes valores de resistencia térmica unión-ambiente

El calor conducido a través de la placa y del disipador es disipado al ambiente por convección. En el diseño del conjunto, lo más importante es la superficie, la calidad de cada componente, la presión aplicada para el montaje, el área de contacto, el tipo de TIM o su grosor o el grosor y orientación de las aletas del disipador son parámetros importantes a la hora de calcular la resistencia térmica.

Algunas consideraciones a tener en cuenta en el diseño térmico son las siguientes:

- Adhesivos: se usan para unir el Led a la placa de circuito impreso, y la placa al disipador. Utilizar un adhesivo conductor térmico puede optimizar el rendimiento térmico del conjunto
- Disipadores de calor: proporcionan un camino para que el calor se evacue desde el LED al exterior. Es importante su material y su forma

Material: la conductividad térmica del material de que está hecho el disipador afecta a la eficiencia del proceso de disipación de calor por conducción. Normalmente están hechos de aluminio, aunque en ocasiones se usa el cobre para disipadores de láminas planas.

En algunos casos se emplean termoplásticos²⁹, cuando los requerimientos de disipación de calor no son muy elevados y se necesita que el disipador tenga una forma compleja.

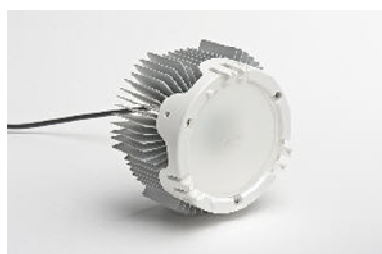
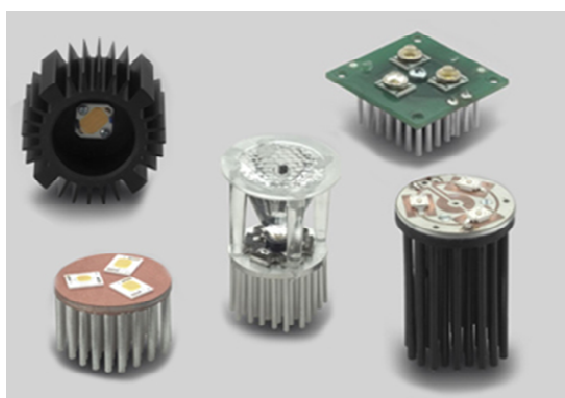
	Coeficiente de conductividad térmica (W/(m·K))	Densidad (kg/m ³)
Aluminio	180-240	2700
Cobre	372-400	8900
Hierro	80	7900
Acero	47-58	7800
Espuma de grafito	50-245 ³⁰	400-800

Se están desarrollando disipadores de nuevos polímeros y de espuma de grafito. Se han conseguido espumas de grafito que ofrecen una transferencia térmica mejor que el aluminio con un peso cuatro veces menor y a las se pueden dar formas bidimensionales complejas.

Pueden añadirse tubos de calor (heat pipes) para transferir el calor desde la placa de circuito al disipador.

Forma: la transferencia térmica se produce en la superficie del disipador. Por ello los disipadores se diseñan para que tengan una gran superficie. Esto se puede lograr usando un gran número de aletas o aumentando el tamaño del disipador.

Emisión relativa de UV con diferentes fuentes ³¹



LEDs de potencia montados sobre disipadores de calor. Abajo módulo LMH6 de Cree



Lámparas LED de sustitución (rosca Edison) con disipadores de calor. Arriba lámpara de 50 W de Microled Plus de para sustitución de lámparas de vapor de sodio para iluminación. Abajo lámpara Ambient LED A-55 de 7 vatios de Philips

La situación y la orientación del disipador de calor son muy importantes para que éste lleve a cabo correctamente su función. Deben situarse de forma que se permita la circulación de aire por las aletas. Un disipador confinado en un

espacio pequeño y cerrado como el cuerpo de una luminaria no puede hacer bien su función.

Respecto a la orientación, la óptima es aquella en la que todas las aletas están en posición vertical. Si se va a colocar el disipador en una orientación distinta a la especificada en su hoja de datos técnicos, debe aplicarse un factor de corrección a su resistencia térmica efectiva, a la hora de calcular su tamaño.



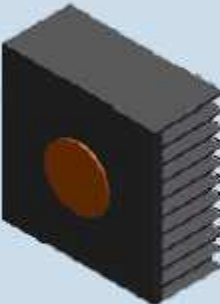



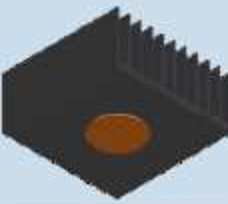

Source Orientation	Thermal Resistance (Scaled to Source Orientation Horizontal - 0°)	Image	Thermal Resistance (Scaled to Source Orientation Horizontal - 0°)	Image
Horizontal - 0°	1.00 x		1.00 x	
Horizontal - 90°	2.15 x		1.00 x	
Vertical - Up	1.23 x		0.74 x	
Vertical - Down	1.03 x		0.74 x	

Figura: efectos de la orientación de los disipadores de calor en su resistencia térmica

9.- ALIMENTACIÓN, CONEXIÓN Y CONTROL DE LOS LEDS

Los LEDs son Fuentes luminosas de baja tensión que necesitan una tensión y corriente continua constante para funcionar correctamente. La luminosidad de un LED depende de forma prácticamente lineal de la intensidad de corriente directa que circula por él.

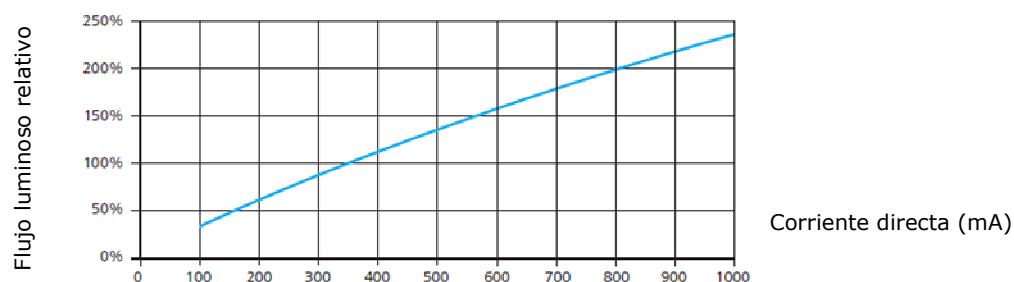


Figura. Flujo luminoso relativo en función de la corriente directa en un LED

Por tanto, para conseguir un flujo determinado de luz debemos alimentar el LED con una corriente constante que corresponda a ese flujo luminoso.

La curva característica V-I de un LED es igual a la de cualquier diodo semiconductor, con una tensión umbral más alta que en los diodos de silicio (0,7V). Los LEDs de colores rojo y naranja, a base de GaInAlP, operan con tensiones umbral en torno a 1,9V. Los LEDs a base de GaInN de color ámbar, verde o azul y los normales de luz blanca, a base de LED azul +fósforos, tienen una tensión umbral en torno a 2,8V. Los LEDs individuales para iluminación funcionan con una tensión continua en torno a 3V y una corriente de centenas de miliamperio. Si se conectan varios LEDs en serie, con la misma corriente, la tensión aplicada al conjunto de LEDs en serie será la de un LED individual multiplicada por el número de LEDs.

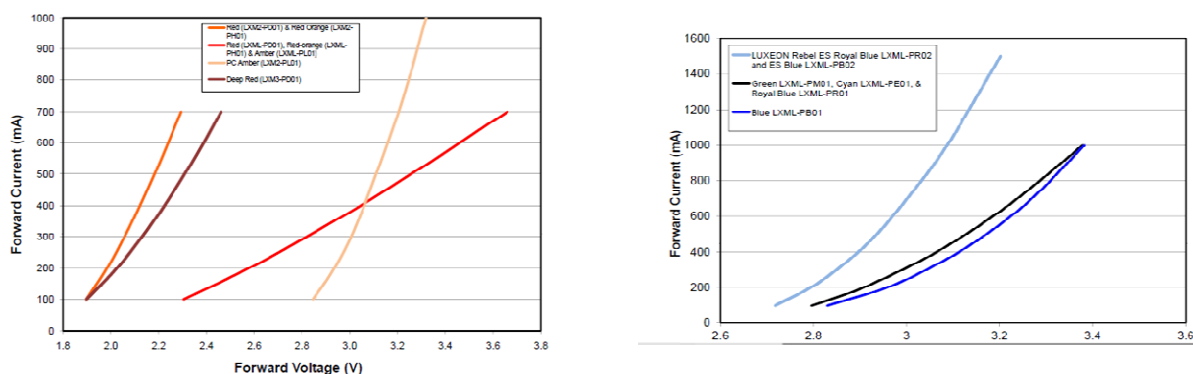


Figura. Curvas características V-I de distintos LEDs de la marca Philips Lumileds. A la izquierda corresponde a LEDs rojo, naranja y ámbar de GaInAlP y ámbar PC de GaInN, a la derecha LEDs verde y azul de GaInN

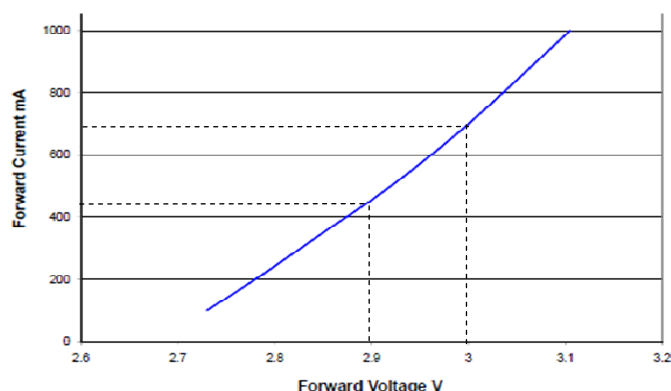


Figura. Curva características V-I de LED de luz blanca (led azul+fósforos) de la marca Philips Lumileds

Durante su funcionamiento, los LEDs deben protegerse de las fluctuaciones de tensión. Variaciones relativamente pequeñas de tensión pueden causar un cambio desproporcionado en la corriente que circula por el LED. En la gráfica de abajo de la figura vemos que un incremento de tensión del 3% (un aumento de una décima de voltio de 2,9V a 3V) supone un incremento de corriente del 50% (de 450mA a 700mA). El aumento de corriente haría a su vez variar la cantidad de luz emitida, que como se ha dicho, es proporcional a la corriente.

Los fabricantes especifican un rango de corrientes permitidas. Si se excede la corriente máxima recomendada por el fabricante, el LED brillará más, pero la potencia consumida por dispositivo aumentará, con ella aumentará la temperatura en la unión del diodo, el dispositivo se irá degradando y su vida útil se acortará. Se considera que una fuente de luz ha alcanzado su vida útil cuando la luz emitida es sólo el 70% de la que emitía de nuevo.

LÚMENES EN FRÍO Y LÚMENES EN CALIENTE

El flujo luminoso emitido por un LED depende directamente de la magnitud de la corriente directa I_f . El flujo luminoso típico para la I_f nominal (normalmente 350 mA) aparece en las hojas de datos técnicos. La potencia de entrada necesaria para alcanzar el flujo luminoso típico se expresa en la siguiente ecuación:

$P = I_f \cdot V_f$, En la que V_f es la tensión directa del LED o caída de tensión a la I_f nominal. A continuación se expresa la eficacia del LED como una razón entre el flujo luminoso típico y la potencia de entrada. Sin embargo, todos esos valores (flujo luminoso típico, I_f y V_f) están referidos a una temperatura de la unión P-N $T_j = 25\text{ °C}$. En este caso hablamos de "lúmenes en frío". Pero en una luminaria real, la unión (área activa) del LED se calienta de forma significativa, ya que en el interior del LED una parte importante de la energía eléctrica es convertida en calor que debe ser disipado. La T_j máxima permitida está entre 130 °C y 150 °C (dependiendo del tipo de LED). Temperaturas más altas dañarían irreversiblemente al chip del LED.

El flujo luminoso de los LEDs disminuye al aumentar la T_j . Por tanto, es necesario mantener la T_j en el valor más bajo posible. El termino lúmenes en caliente se usa cuando hablamos del flujo luminoso emitido por un LED a T_j de operación ($70 - 120\text{ °C}$) después de que se han alcanzado un estado

estacionario.

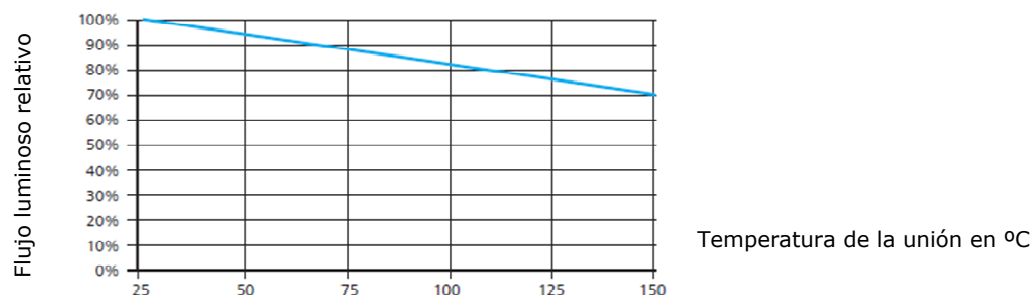


Figura. Flujo luminoso relativo en función de Temperatura de la unión en °C

Por otro lado, al elevarse la temperatura de la unión disminuye la resistencia interna del chip del LED, lo que aumenta la eficacia del LED. Esta disminución se expresa con el "Coeficiente de temperatura de la tensión" (V_T) en inglés (Figura).

Características	Unidad	Mínimo	Típico	Máximo
Resistencia Térmica, unión-punto de soldadura	°C/W		6	
Angulo de visión (FWHM) - blanco	grados		120°	
Coeficiente de temperatura de la tensión	mV/°C	-3		
Clasificación ESD (HBM para Mil-Std-883D)			Clase2	
Corriente continua directa	mA		1000	
Tensión inversa	V		5	
Tensión directa (para 350 mA)	V		3.0	3.5
Tensión directa (para 700 mA)	V		3.15	
Tensión directa (para 1000 mA)	V		3.25	
Temperatura de la unión del LED	°C			150

Características del LED Cree XP-E HEV

Tenemos un flujo luminoso relativo del 100 % a una $T_j = 25\text{ °C}$, pero sólo 70 % a $T_j = 150\text{ °C}$ (Figura 4.1.1).

Partiendo de la ecuación:

Eficacia = flujo luminoso relativo para T_j / $(V_f + \Delta V) \cdot I_f$,

En la que $\Delta V = (T_j - 25) \cdot V_T$,

Podemos calcular la eficacia del LED Cree XP-E HEV que tiene un flujo luminoso = 114 lm a $T_j = 25\text{ °C}$ cuando circula por él la corriente directa nominal de 350 mA (Figura) de la siguiente manera:

$\Delta V = (25 - 25) \cdot (-0.003) = 0\text{ V}$, por tanto

Eficacia = $114 / ((3 + 0) \cdot 0.35) = 108.57\text{ lm/W}$ para $I_f = 350\text{ mA}$, $T_j = 25\text{ °C}$.

Ahora calculamos la eficacia del LED a $T_j = 150\text{ °C}$, alimentado por la misma corriente (de la Figura 4.1.1 obtenemos un flujo luminoso = 79.8 lm a $T_j = 150\text{ °C}$):

$\Delta V = (150 - 25) \cdot (-0.003) = -0.375\text{ V}$, por tanto

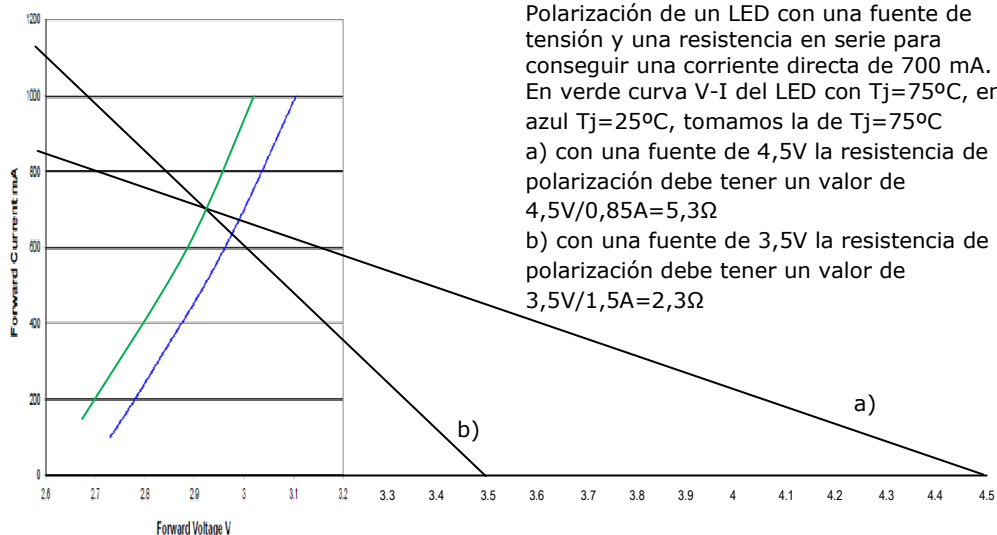
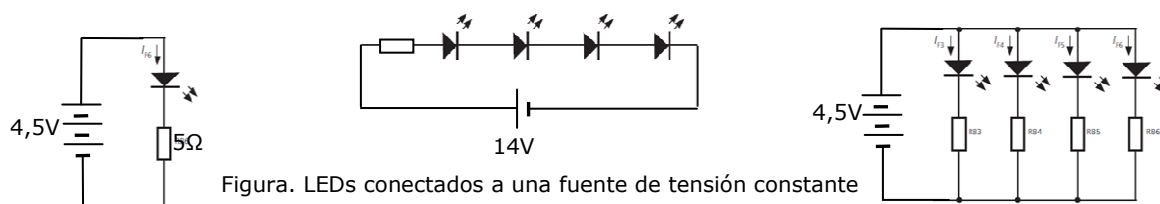
Eficacia = $79.8 / ((3 - 0.375) \cdot 0.35) = 86.86\text{ lm/W}$ para $I_f = 350\text{ mA}$, $T_j = 150\text{ °C}$.

La comparación de resultados nos muestra una ligera disminución de la potencia consumida cuando la unión está a temperatura alta pero un descenso relativamente pronunciado del flujo luminoso. Combinando los dos efectos vemos que la eficacia del LED disminuye al incrementarse la temperatura de la unión. En condiciones reales la T_j siempre será superior a 25°C, por tanto el parámetro de lúmenes en frío es atractivo pero inútil. En la práctica, la eficacia de los LED como fuentes luminosas es siempre inferior y depende de la temperatura ambiente. Por tanto durante el diseño de una luminaria hay que emplear el parámetro de lúmenes en caliente.

9.1.- ALIMENTACIÓN DE LOS LEDs

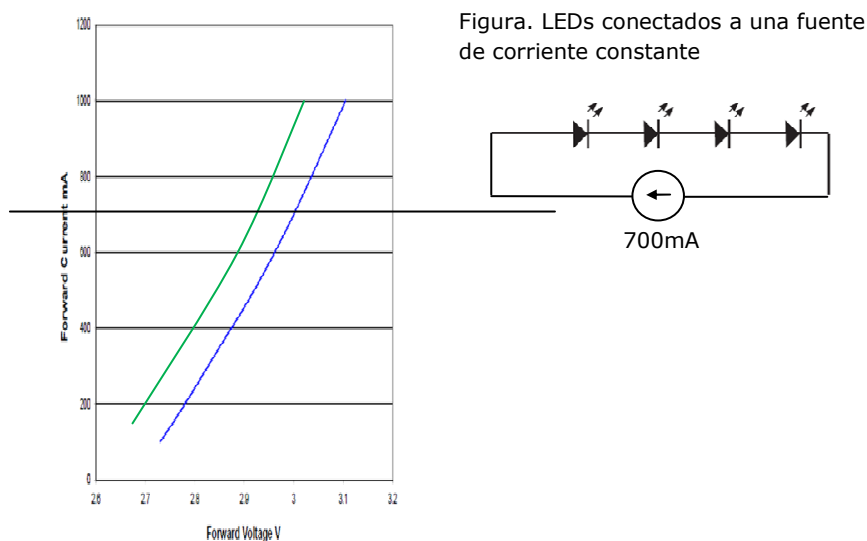
Al operar con una tensión continua baja, los LEDs pueden adaptarse fácilmente a diferentes fuentes de energía (red, baterías...). Para adaptar los valores de la fuente de energía a las necesidades de los LEDs se requiere siempre un circuito de alimentación, que suele llamarse driver.

Cuando los LEDs se conectan a una fuente de tensión continua, como en una linterna, el circuito de alimentación más básico es extremadamente sencillo. Cada LED necesita entre 3 y 3,5V de tensión directa, con una tolerancia que varía con cada dispositivo. Para alimentar un solo LED necesitamos una fuente de tensión de algo más de 3,5 V, por ejemplo tres pilas de 1,5V en serie. Para ajustar la tensión desde los 4,5V de las pilas en serie al valor preciso del LED, conectamos en serie con el LED una resistencia de polarización. Si tenemos que alimentar varios LEDs, por ejemplo 4, una opción es conectarlos en serie, a una fuente de tensión de algo más de 13-14 V con una resistencia de polarización. También podemos conectar los LED en paralelo, con una resistencia de polarización en cada rama, a una fuente de tensión continua de 4,5V. La resistencia de polarización consume potencia y disminuye la eficiencia energética del conjunto. Para minimizar las pérdidas de potencia en la resistencia se debe ajustar el valor de la fuente de tensión lo máximo posible a la tensión directa del LED y normalmente siempre se conectan varios LEDs en serie.



Los LEDs son realmente dispositivos más complejos y la polarización a tensión constante resulta poco adecuada. Como veremos, la potencia eléctrica disipada en el LED hace subir la temperatura. Al aumentar la temperatura disminuye la tensión directa (la curva se desplaza hacia la izquierda), variando el punto de trabajo. Adicionalmente el flujo luminoso disminuye al incrementarse la temperatura.

Una fuente de tensión constante de valor adecuado, con una resistencia de polarización es el modo más simple de alimentar un LED, pero para cualquier aplicación mínimamente exigente que requiera un control de la luminosidad del dispositivo, es más apropiada una fuente de corriente constante.



9.2.- CONEXIÓN DE LOS LEDs

Un solo LED no entrega luz suficiente para la mayoría de aplicaciones. Por tanto se conectan varios LEDs juntos para alcanzar los lúmenes de emisión deseados. Existen cuatro modos básicos de conectar LEDs:

- En serie
- En paralelo
- En serie/paralelo
- En matriz

9.2.1.- CONEXIÓN DE LEDS EN SERIE

Cuando varios LEDs se conectan en serie todos emiten aproximadamente la misma cantidad de luz independientemente de que tengan diferentes caídas de tensión directa debidas a ligeras diferencias en su curva característica V-I. Esta conexión requiere un *driver* LED de corriente constante. Permanece estable en el caso de uno o varios LEDs de la tira entren en cortocircuito. Es un tipo de conexión ideal tanto para un control por corriente directa como para un control PWM. Se utiliza cuando se requiere una temperatura de color y un IRC estables.

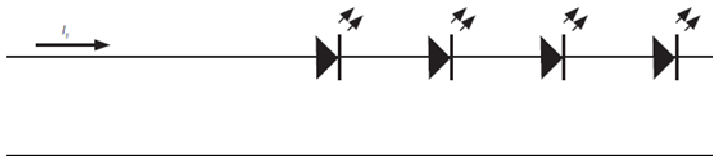


Figura. LEDs conectados en serie

Ventajas:

- Por todos los LEDs circula misma corriente, por tanto la temperatura de color (CCT) y el IRC permanecen estables.
- Elevada eficacia. No necesita resistencias de polarización.
- El circuito no se ve afectado si un LED se cortocircuita
- Conexión ideal tanto para control por corriente directa como para control PWM

Inconvenientes:

- Si un LED falla y queda en circuito abierto, toda la tira se apaga
- El driver es más caro

9.2.2.- CONEXIÓN DE LEDS EN PARALELO

Tantas ramas como LEDs, y cada LED se conecta en serie a una resistencia de polarización. Esta conexión requiere un *driver* de tensión constante. En caso de fallo de un LED (circuito abierto o cortocircuito) el resto de los LEDs siguen luciendo. Se emplea principalmente para luces decorativas, cuando no se requiera un IRC o una CCT estables.

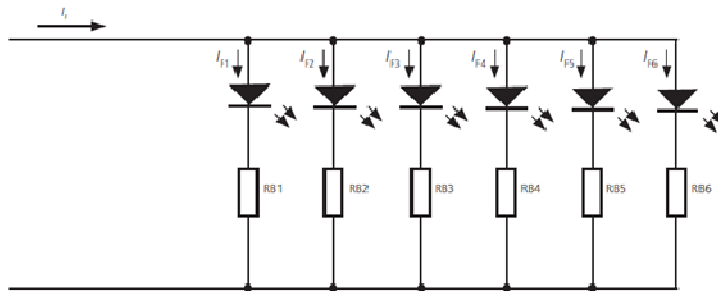


Figura. LEDs conectados en paralelo

Ventajas:

- Driver más barato
- A prueba de fallos si un LED falla y queda en circuito abierto

Inconvenientes:

- Baja eficiencia (por el consumo de las resistencias de polarización)
- Inestable si un LED falla y queda en cortocircuito
- No puede utilizarse para control por corriente directa

9.2.3.- CONEXIÓN DE LEDS EN SERIE/PARALELO

Al igual que en la conexión paralelo, se conectan los LEDs en varias ramas con una resistencia de polarización en cada una. En esta conexión, en cada rama se conectan varios LEDs en serie. Resulta más eficiente que la conexión paralelo pura, pero no tan resistente a los fallos como esta. La CCT y el IRC son más estables que en la conexión paralelo pura. Se alimenta con driver por tensión constante (barato). Esta conexión es adecuada para alimentar un gran número de LEDs, como por ejemplo en tiras largas decorativas.

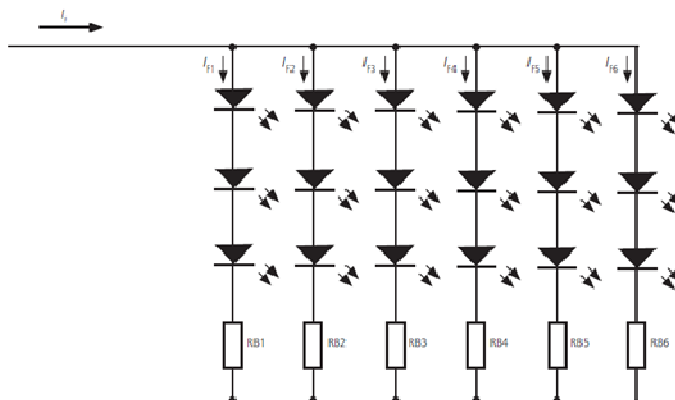


Figura. LEDs conectados en serie/paralelo

Ventajas:

- Permite alimentar un gran número de LEDs

- Sigue funcionando en caso de fallo. Si uno o varios LEDs quedan en cortocircuito, todos los demás siguen luciendo. Si uno queda en circuito abierto se apagan sólo los LEDs de su rama.

Inconvenientes:

- Menor eficiencia que en la conexión serie.
- No puede emplearse con control por corriente directa.

9.2.4.- CONEXIÓN DE LEDs EN MATRIZ

Con la conexión en matriz pueden alimentarse muchos LEDs a la vez manteniendo una CCT estable (incluso en el caso de fallo de alguno de los LEDs). La conexión de LEDs en matriz puede alimentarse tanto por corriente como por tensión constante. En caso de tensión constante hay que incluir una resistencia de polarización.

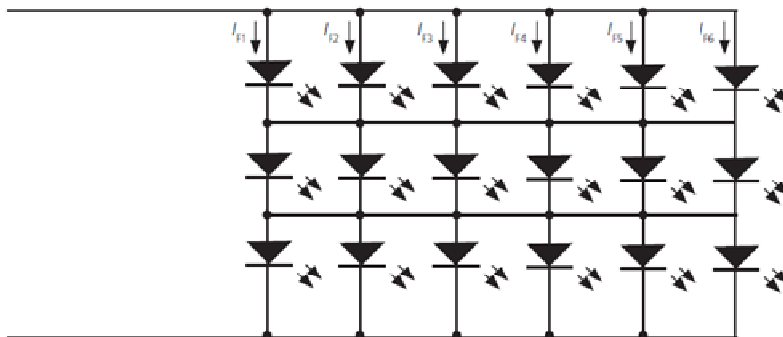


Figura. LEDs conectados en forma de matriz

Ventajas:

- Permite alimentar a la vez un número grande de LEDs
- Alta eficiencia
- Permite utilizar control por corriente directa o PWM (cuando se usa con driver de corriente constante)
- A prueba de fallos tanto si un LED queda en cortocircuito o en circuito abierto. Si un LED queda en circuito abierto el resto de LEDs sigue luciendo, si uno queda en cortocircuito se apagan todos los LEDs de su fila y el resto sigue luciendo.

Inconvenientes:

- Exige un diseño bastante complejo de la placa de circuito impreso

9.3.- DRIVERS PARA LEDs

Los LEDs, como todos los dispositivos electrónicos, para funcionar conectados a la red eléctrica, necesitan una fuente de alimentación, controlador o driver, que convierta la tensión alterna de la red en una tensión continua de valor adecuado y que regule la corriente que circula por el dispositivo. El driver convierte la alimentación alterna de 220 V/50 Hz, en la caso de Europa, en una alimentación continua de valor adecuado y protege al LED de fluctuaciones de tensión o corriente. Existen drivers que proporcionan una tensión constante (normalmente 10V, 12 V o 24V) y otros que entregan una corriente constante (350mA, 700mA y 1A).

Algunos drivers incluyen características que dan valor añadido a la luminaria, permitiendo la atenuación del flujo luminoso, control remoto, sensor de presencia, etc. Estos drivers requieren circuitos electrónicos más complejos.

Comparando las características de un circuito de alimentación para LEDs con los balastos de fuentes luminosas de otras tecnologías, vemos que los drivers de LEDs son relativamente sencillos. Las luces de descarga de alta intensidad (HID) son difíciles de alimentar, ya que requieren una tensión de encendido muy alta (del orden de 20 kV) en caliente. La mayoría de los balastos no pueden entregar este voltaje, haciendo imposible un reencendido en caliente. También sufren de la desventaja adicional de la inestabilidad del arco, impidiendo la atenuación por debajo del 50% de la potencia máxima. Las fuentes de luz LED no tienen ninguno de estos inconvenientes y por tanto sus circuitos de alimentación son más simples.

Las necesidades de alimentación de los LEDs no son demasiado diferentes a las de otros dispositivos electrónicos. Varias topologías de convertidores de energía existentes en el mercado para otras aplicaciones se utilizan en controladores LED con potencias que van desde 50 a 250W, que cubren todas las aplicaciones. El tamaño y potencia de los drivers de LEDs existentes en el mercado tiene una gama muy amplia que va desde los pequeñísimos drivers integrados en el interior de las lámparas LED de sustitución, diseñadas para sustituir a las tradicionales incandescentes, hasta drivers para alimentar cientos de LEDs en una luminaria.

A la hora de diseñar un driver, además de su funcionalidad, deben tenerse en cuenta otros factores, como el cumplimiento de normativas de compatibilidad electromagnética, eficiencia energética, vida útil esperada o coste.

Para poder comercializarse, cualquier dispositivo electrónico debe cumplir normativas relativas a Compatibilidad Electromagnética, es decir, deben poder funcionar en forma satisfactoria en su entorno electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo lo que se encuentra en dicho entorno. Esto incluye varios aspectos fundamentales:

- Emisión de interferencias Electromagnética (EMI): Está limitado por normativas nacionales e internacionales el nivel de las perturbaciones en forma radiada ó conducida que los dispositivos puedan causar en su entorno. Una forma común de perturbaciones conducidas es la introducción en la red de señales armónicas. Para medir la distorsión armónica se emplea el parámetro de distorsión armónica total THD, que es la relación entre la suma de las potencias de todos los armónicos dividida por la potencia de la señal de la red. Las perturbaciones conducidas se limitan mediante filtros y las radiadas mediante un adecuado diseño de la placa de circuito impreso.
- Susceptibilidad Electromagnética (EMS) ó Inmunidad Electromagnética: Para poder comercializarse los dispositivos deben poder funcionar correctamente dentro del entorno electromagnético para el cual ha sido diseñado ó concebido sin verse afectados por las perturbaciones desde dicho entorno, tanto en forma radiada como conducida.
- Factor de potencia.

Otros factores a tener en cuenta son la eficiencia energética, el coste y la vida útil. La iluminación con LEDs es una tecnología que compite en el mercado con otras más asentadas. La iluminación con LEDs es potencialmente la tecnología más eficiente, y la que tiene vida útil más larga, pero está todavía en desarrollo y resulta aún cara en la comparación. En la búsqueda de objetivos de eficiencia, coste y vida útil, deben tenerse en cuenta todos los componentes de los equipos, y entre ellos, los drivers son muy importantes.

Dos características que definen la calidad de una lámpara o luminaria son la eficiencia medida en lúmenes/vatio y su vida útil en miles de horas de funcionamiento hasta que falle o su eficiencia se reduzca por debajo del 70% de la nominal. En ambos aspectos, la contribución del driver al conjunto es fundamental. Al diseñar un driver y elegir sus componentes deben considerarse los tres objetivos, eficiencia, vida útil y coste.

Si una lámpara o luminaria LED se espera que tenga una vida útil de 30.000 horas, todos y cada uno de los componentes del driver deben elegirse con una vida útil igual o superior, lo cual es a veces muy difícil. En muchos casos, las luminarias se venden como un conjunto cerrado incluyendo al driver, que se espera que alcance la vida útil deseada sin mantenimiento. El caso más extremo está en las lámparas LEDs de sustitución, en las que un pequeño circuito driver está integrado en el interior de la lámpara, al igual que ocurre en lámparas de sustitución de otras tecnologías, como las halógenas de alterna o las fluorescentes compactas.

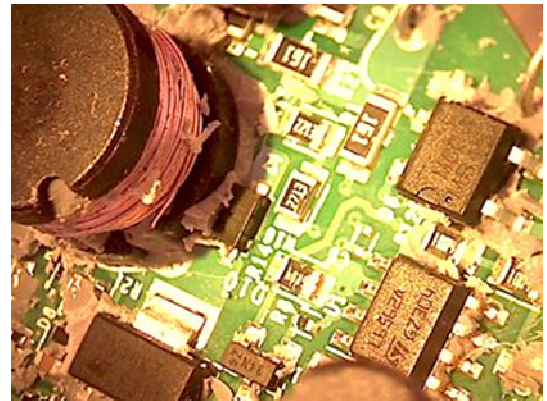


Figura. Lámpara de sustitución Cree LED BR30 flood light (equivalente a 65W) con detalle de su driver integrado

Como estudiamos en otro capítulo, la gestión térmica es fundamental para garantizar la eficiencia y vida útil de los LEDs. La gestión térmica debe incluir también a los drivers, pues sus circuitos son también una fuente de calor, al que contribuyen especialmente algunos componentes como los MOSFET en circuitos de conmutación. Los drivers en una luminaria a menudo están situados muy próximos a los LEDs y el calentamiento de un elemento influye necesariamente en el del otro.

Otros componentes de los drivers, como los condensadores electrolíticos, ven reducida drásticamente su vida útil con temperaturas elevadas, por lo que se hace fundamental una adecuada gestión térmica para lograr una vida útil del conjunto muy larga. Se considera que la vida útil de un condensador electrolítico se multiplica por dos si disminuimos 10°C su temperatura. Por ejemplo tienen una vida útil de 5000 h a 105°C que se prolonga hasta 20.000 h a 85°C

9.3.1.- TIPOS DE DRIVERS DE LEDS Y PARÁMETROS IMPORTANTES ³²

En función del tipo de señal de salida, existen tres grupos de drivers:

- **Corriente constante (CC)** – Los LEDs se conectan normalmente en serie. El driver entrega un valor preciso de intensidad. Es el método ideal para atenuación.
- **Voltaje constante (CV)** - Los LEDs se conectan normalmente en paralelo. Es el driver ideal para tiras de LEDs decorativas. No es recomendable para atenuación de luz.

- **Especial (CC+CV)** – Pueden conectarse los LEDs tanto en serie como en paralelo. Es una solución más cara.

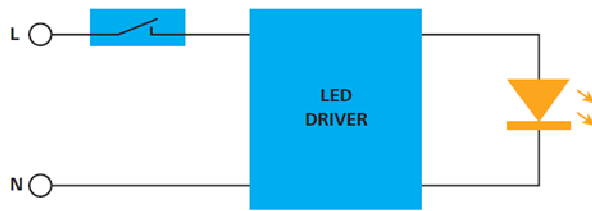


Figura. Esquema básico de conexión de una fuente de iluminación con LEDs

Los parámetros más importantes de un driver de LEDs son:

- **Voltaje de entrada:** a menudo se diseñan drivers multivoltaje o de "entrada universal", que pueden funcionar en cualquiera de las redes eléctricas existentes en el mundo. En dispositivos bifásicos entre 110V y 240 V con un margen de tolerancia de al menos +/- 10%.
- **Corriente/Voltaje nominal** - corriente o voltaje de salida predefinido.
- **Potencia nominal** – potencia de salida driver.
- **Eficacia** - Proporción entre la potencias de salida y entrada en porcentaje- un valor alto indica un driver mejor.

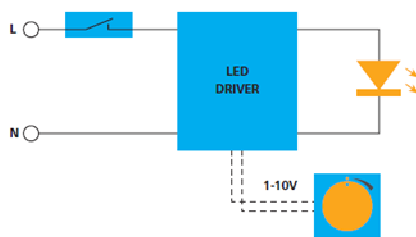


Figura. Atenuación 1-10V

9.3.2.- CIRCUITOS ELECTRONICOS EMPLEADOS EN LOS DRIVERS³³

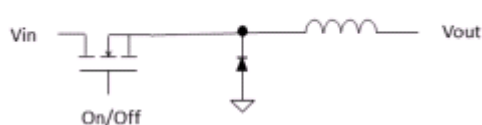
En los drivers para LEDs al igual que en la mayoría de las fuentes de alimentación para aparatos electrónicos, se emplean fuentes de alimentación conmutadas por su elevada eficiencia y flexibilidad.

La elección de la frecuencia de conmutación es un factor importante en el diseño de los circuitos. Una frecuencia de conmutación elevada permite usar bobinas más pequeñas pero implica el uso de filtros más grandes para reducir las componentes armónicas generadas. Un compromiso está entre los 100 y los 300kHz.

Las fuentes de alimentación conmutadas se basan en dos circuitos básicos: los convertidores DC-DC conmutados llamados *buck* y *boost*.

El buck es un convertidor conmutado reductor, es decir entrega un voltaje de salida regulado siempre inferior al de entrada.

Buck



El MOSFET funciona como interruptor, La bobina atenúa la variación de la corriente en la salida. El diodo en anti paralelo cierra el circuito cuando el interruptor esta en off. Para atenuar la variación de tensión de salida suele incluirse un condensador en paralelo con la carga.

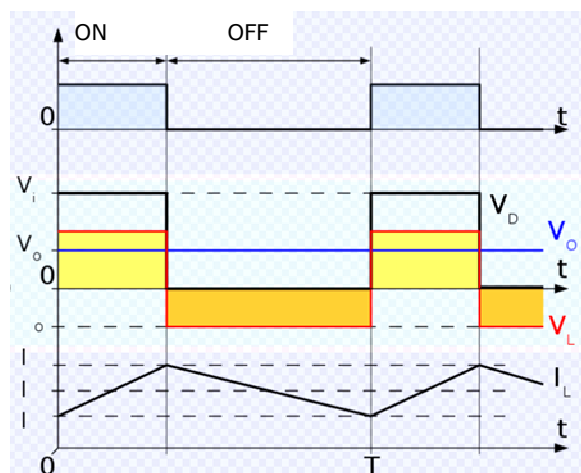
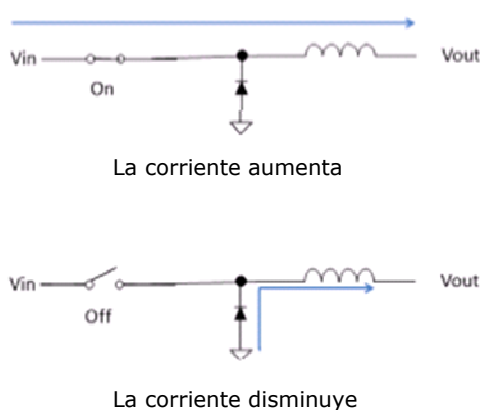


Figura. Convertidor buck. Circuito básico

Si usamos una muestra de la corriente de salida como señal de realimentación para un circuito integrado de modulación de anchura de pulsos, podemos construir un regulador de corriente constante para alimentar LEDs como el de la figura siguiente.

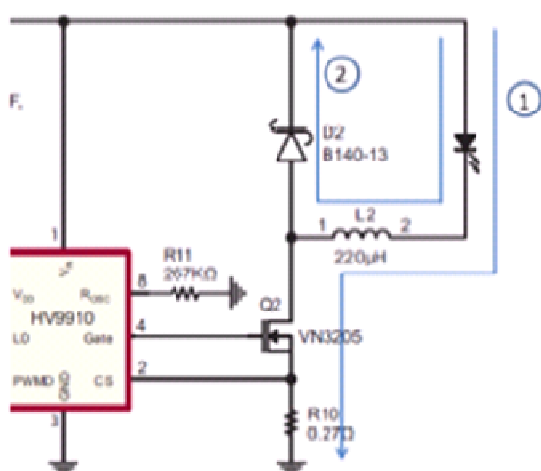


Figura. Regulador de corriente para LED con Convertidor buck.

La resistencia R10 convierte en señal de tensión la intensidad de salida y la introduce como señal de realimentación en la patilla 2 del CI. Éste genera la

tensión de puerta del interruptor MOSFET y varia la anchura del pulso en para compensar las variaciones de corriente.

Una posibilidad es un circuito de dos etapas una primera de control del factor de potencia y una segunda con un convertidor conmutado en semipunto con aislamiento. Esta opción permite elevada eficiencia, pero es poco utilizada. Normalmente se utilizan convertidores conmutados sin aislamiento por su simplicidad y reducido tamaño.

El *boost* es un convertidor conmutado elevador, es decir entrega un voltaje de salida regulado siempre superior al de entrada.

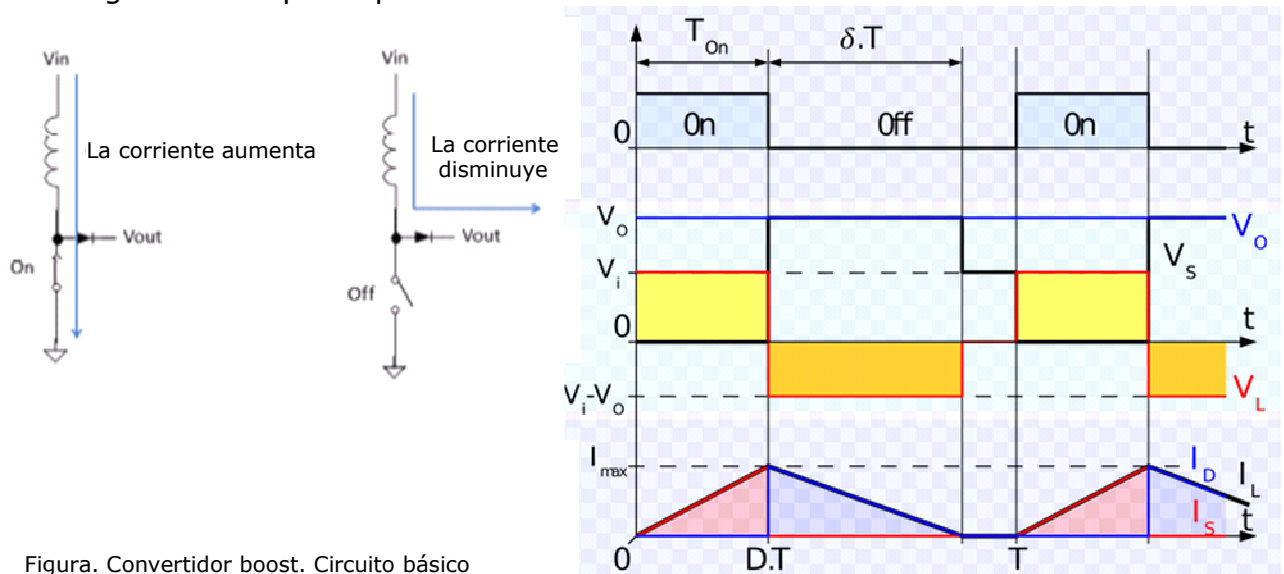
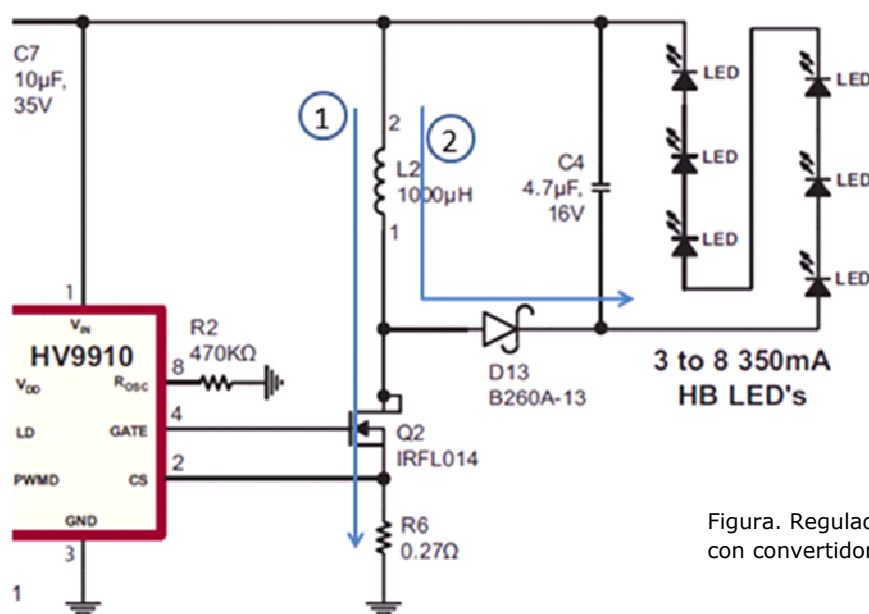


Figura. Convertidor boost. Circuito básico



El condensador C4 se carga a una tensión superior a la de la entrada y alimenta a la carga cuando el interruptor está en OFF.

Figura. Regulador de corriente para LED con convertidor boost.

Un diseño de driver LED común es el llamado boost + buck. Tiene tres etapas:

- Un filtro y un rectificador con puente de diodos que entrega una señal rectificada de onda completa.
- Un convertidor conmutado elevador “*boost*” con control del factor de potencia que convierte la señal rectificada de onda completa en una señal continua regulada de alta tensión (400-500V)
- Un regulador basado en el convertidor conmutado reductor “*buck*” que reduce el nivel de tensión hasta el voltaje requerido por el circuito con LEDs en serie o paralelo.³⁴

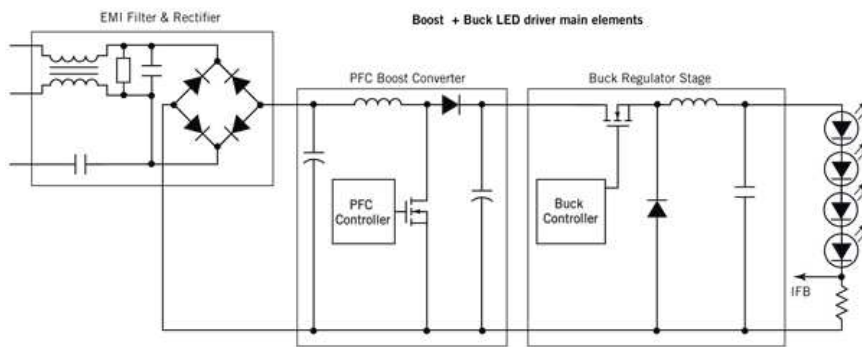
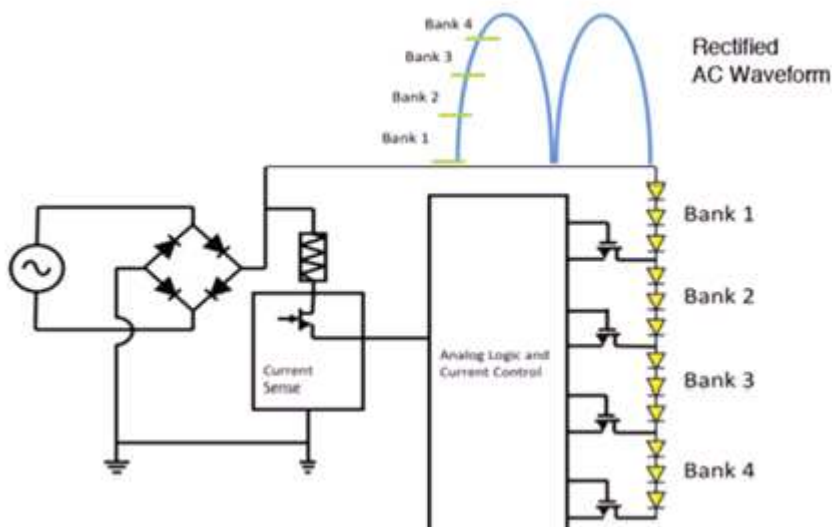


Fig. 1. Boost+Buck LED driver main elements

9.3.3.- LEDS DE ALTERNA

Se conoce como LEDs de alterna a circuitos con LEDs y otros elementos que permiten su conexión directa a la red rectificada sin necesidad de circuitos regulares. Los LEDs están agrupados en grupos que van entrando en funcionamiento conforme la señal de la red va alcanzando unos determinados voltajes. Un circuito integrado va conectando los grupos de LEDs conforme varia la señal. Se considera que la oscilación de la luminosidad no se percibe.



9.4.- ATENUACIÓN O CONTROL DE LA LUMINOSIDAD (Dimming)

La atenuación de la luminosidad de una fuente luminosa o *dimming* puede realizarse de manera automática o manual. La atenuación automática busca normalmente mantener el nivel de iluminación de un espacio, compensando la variación de la luminosidad natural. La atenuación manual ofrece a los usuarios la flexibilidad de cambiar las características del espacio para hacerlo más agradable y productivo. En los dos casos la atenuación permite ahorrar energía.

A nivel doméstico, la atenuación se desarrolló para fuentes de luz incandescente, sobre todo halógenas. Debido a las características de estas fuentes luminosas, la atenuación funciona muy bien. Al accionar el mando de un atenuador con una luz incandescente, la variación de brillo se percibe como progresiva a la vez que la tonalidad de luz se va haciendo más cálida hasta desvanecerse. La atenuación se consigue normalmente recortando de la señal alterna de la red, lo que implica que la corriente por el filamento de la lámpara se hace variar a una frecuencia del doble de la de la red (100 Hz), pero el ojo humano no percibe ningún efecto de parpadeo de la luz.

Conforme se han ido desarrollando otras tecnologías de iluminación, como fluorescentes o de descarga de alta intensidad, y se les ha aplicado atenuación, el resultado ha sido mucho más deficiente, cuando no imposible.

Como veremos, los LEDs permiten atenuar la luz de forma satisfactoria usando métodos relativamente simples. La eficiencia energética del dispositivo prácticamente no disminuye y la vida de la lámpara no se ve afectada por la atenuación, como a veces ocurre fluorescentes atenuados con frecuencia. Por el contrario, la atenuación puede alargar la vida útil de los LEDs, ya que se reducen las temperaturas de operación de los dispositivos.

No obstante por varios motivos, se observan deficiencias de funcionamiento en muchos de los dispositivos atenuadores actualmente en el mercado, como un desagradable efecto de parpadeo o una atenuación que se percibe como poco progresiva.

Los atenuadores de luz para LEDs reducen la luminosidad de forma aproximadamente lineal, pero la percepción del ojo humano a los cambios de nivel de iluminación sigue una función aproximadamente cuadrática. El ojo humano percibe con dificultad una atenuación pequeña de la luminosidad. De hecho, se ha comprobado en experimentos que más de la mitad de las personas no perciben en absoluto una variación del 20% del nivel de iluminación. (Del 100% al 80%)

³⁵Aproximadamente se cumple que:

$$\text{variación del nivel de iluminación percibido \%} = 100x\sqrt{\text{variación real de iluminación \%}}$$

Siguiendo esta fórmula:

- Una disminución del nivel de iluminación a la décima parte (10%) se percibe como una atenuación al 32%
- Una disminución del nivel de iluminación al (5%) se percibe como una atenuación al 22%

- Una disminución del nivel de iluminación a la centésima parte (1%) se percibe como una atenuación al 10%

Debido a esta característica de nuestra visión, la atenuación lineal del nivel de iluminación se percibe como deficiente. No se percibe prácticamente hasta llegado a un punto y en el último tramo se percibe una atenuación brusca.

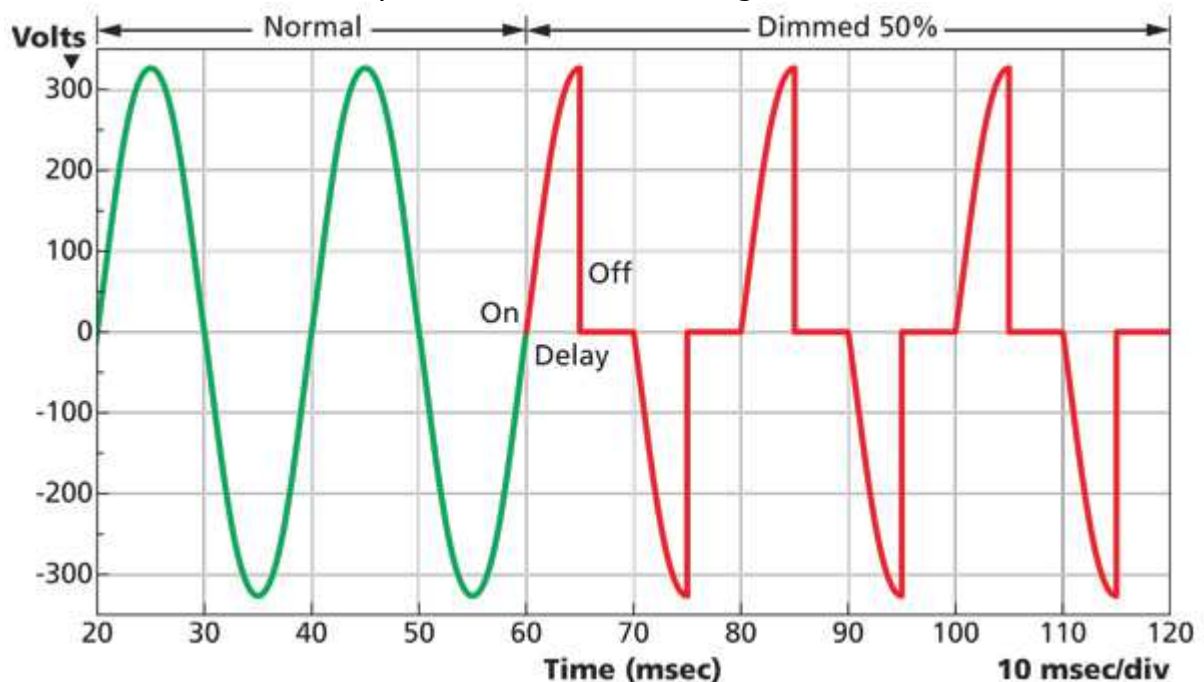
Para que pueda percibirse como adecuada y progresiva la atenuación debe llegar a niveles muy bajos del 1% de la luminosidad máxima e incluso mayores, pero la atenuación de LEDs se va haciendo más difícil a esos niveles.

En cualquier caso, aunque no se perciba claramente, una atenuación pequeña supone una reducción prácticamente lineal del consumo, por lo que tiene sentido aplicarla para ahorrar energía cuando la luminosidad máxima no sea necesaria para la actividad que se desarrolla.

Existen tres métodos de conseguir la atenuación de la intensidad luminosa con LEDs: recortando la señal alterna mediante reguladores de fase con triacs o tiristores, regulando la intensidad de corriente o mediante modulación por anchura de pulsos.

9.4.1.- ATENUACIÓN POR RECORTE DE LA SEÑAL DE FASE DE LA RED

Muchos de los atenuadores de luz existentes en el mercado y más aun los equipos antiguos que hay en hogares y negocios, se diseñaron para lámparas incandescentes halógenas y emplean dispositivos de control de fase que recortan la señal alterna mediante tiristores o triacs. La atenuación de luz por este método funciona muy bien con las luces halógenas.



Existen en el mercado lámparas LED que se han diseñado para reemplazar a lámparas halógenas del mismo formato (por ejemplo las MR 16), y se anuncian

como totalmente compatibles con las luminarias y equipos existentes, incluyendo los transformadores y los atenuadores de luz, pero cuando las lámparas halógenas se reemplazan por lámparas LEDs, el funcionamiento de la atenuación es a veces claramente deficiente. Sin embargo, las deficiencias de funcionamiento que se pueden ver en el práctica, normalmente no se deben a las características de la fuente LED, sino que más bien son el resultado de los problemas de compatibilidad de fuente LED con equipos heredados. Muchos de los drivers incorporados en las lámparas LED, no están diseñados para funcionar con estos atenuadores tan bien como las lámparas halógenas

La regulación de fase no es un sistema adecuado para LEDs. Este tipo de regulación produce en los LEDs efectos mucho más complejos, lo que conduce a problemas técnicos significativos, el más importante es un efecto parpadeo desagradable. Este parpadeo perceptible, se debe a que la conmutación en la regulación se produce a una frecuencia demasiado baja, concretamente al doble de la frecuencia de la red (100 Hz en las redes eléctricas europeas) a niveles elevados de atenuación se puede percibir una desagradable oscilación de la luminosidad a esa frecuencia.

9.4.2.- ATENUACIÓN POR CONTROL DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE DIRECTA

Dado que los LEDs emiten más o menos luz en función de la magnitud de la corriente directa, la forma más sencilla de controlar la intensidad de la luz emitida por un LED es variando el valor de la intensidad de la corriente directa. La figura siguiente muestra el flujo luminoso relativo en función de la corriente directa. El cambio del flujo luminoso depende del cambio de la corriente directa de forma casi lineal; por lo tanto el cálculo de un algoritmo de control es muy sencillo.

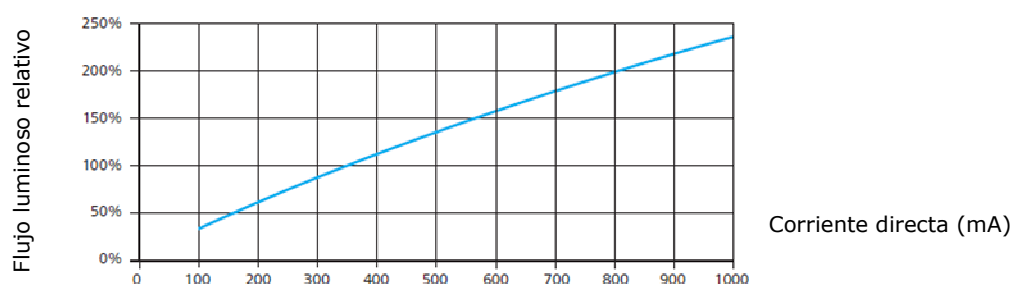
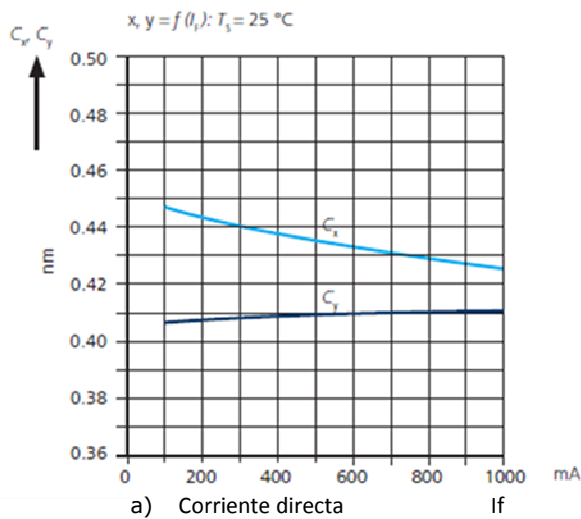


Figura. Flujo luminoso relativo en función de la corriente directa

Sin embargo, la alteración del valor de la intensidad de corriente directa conlleva un desplazamiento en las coordenadas cromáticas, lo que afecta directamente a parámetros cualitativos de la luz emitida (Índice de reproducción cromática IRC, temperatura de color CCT)

Desplazamiento de las coordenadas cromáticas

$$x, y = f(I_f): T_s = 25^\circ\text{C}$$



Desplazamiento de las coordenadas cromáticas

$$x, y = f(T_j): I_f = 350\text{ mA}$$

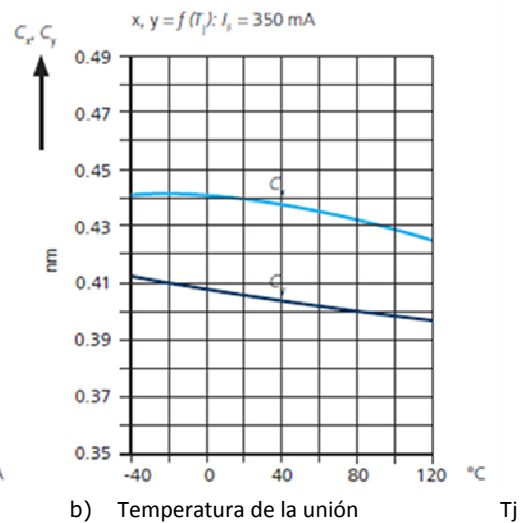


Figura: desplazamiento de las coordenadas cromáticas LED OSRAM LCW W5PM

Tenemos $C_x = 0.440$ y $C_y = 0.408$ (correspondientes a CCT = 2985 K) a $I_f = 350\text{ mA}$. Si disminuimos I_f a 100 mA, las coordenadas cromáticas se desplazan $C_x = 0.448$ y $C_y = 0.406$ (correspondientes a CCT = 2838 K), lo que supone una diferencia de 147 K (Figura).

Esta diferencia se incrementa al considerar el desplazamiento de las coordenadas cromáticas con la variación de la temperatura de la unión. A 20°C tenemos $C_x = 0.436$ y $C_y = 0.406$ (correspondientes a CCT = 3036 K), y a 100°C tenemos $C_x = 0.428$ y $C_y = 0.399$ (CCT=3121 K), lo que supone una diferencia de 85 K. Esto puede suponer una diferencia en Temperatura de color de la luz apreciable y en algún caso desagradable, sobre todo si atenúan simultáneamente varias luminarias.

Ventajas del control por corriente directa:

No hay parpadeo.

Desventajas:

La temperatura de color (CCT) cambia al atenuar la luz. En todo caso se observa que el cambio sigue el mismo patrón que en las luces incandescentes y halógenas, al que estamos habituados, es decir al disminuir la luminosidad, la luz toma un tono más cálido y al aumentar la luminosidad un tono más frío.

9.4.3.- ATENUACIÓN POR CONTROL PWM

Otra forma de controlar la intensidad de luz de una fuente LED es el método de modulación de anchura de pulsos (PWM). El principio de PWM se basa en alimentar al LED con una corriente constante que es conectada y desconectada periódicamente. La proporción entre la duración de los periodos de encendido y apagado definirá la intensidad de la luz del LED. La frecuencia de conmutación es suficientemente elevada como para que el ojo humano perciba un flujo de luz constante de una intensidad dependiente del ciclo de trabajo de la PWM. En la figura siguiente se muestra ejemplos de señal PWM con ciclos de trabajos del 50 % y del 70 %, respectivamente.

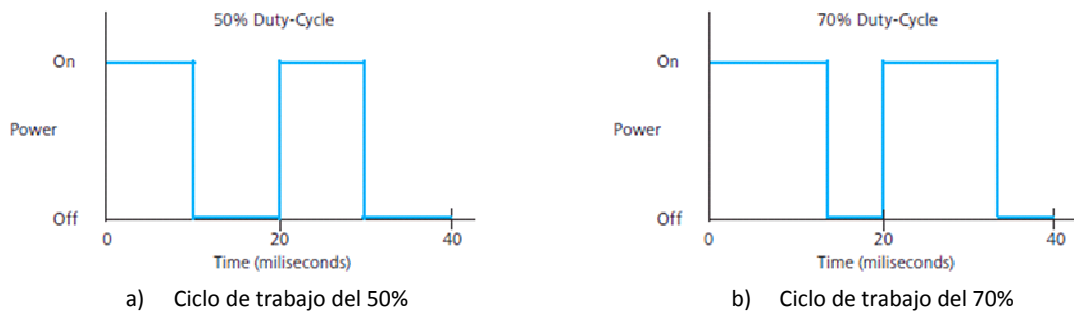


Figura: Ejemplos de señal modulada por anchura de pulsos (PWM)

Ventajas de la modulación por anchura de pulsos (PWM):

Temperatura de color (CCT) estable durante todo el rango de atenuación de luz.

Inconvenientes:

Puede aparecer un efecto de parpadeo cuando la luz de la luminaria se atenúa.

9.5.- CARACTERÍSTICAS ADICIONALES DE LOS DRIVERS DE LEDS

36

9.5.1.- INTERFAZ ANALÓGICA

Es el método más sencillo para controlar el brillo de una luminaria. Las interfaces analógicas se utilizan en la industria de iluminación exclusivamente para atenuadores de luz. Es el sistema de regulación más utilizado para el comercio minorista (por ejemplo, puntos de luz en las tiendas). Su inconveniente es que no es posible apagar la luminaria por medio de la atenuación analógica.

Hay dos tipos fundamentales de interfaces analógicas:

- TE / LE – Por flanco de subida o de bajada (regulación mediante tiristores) - sólo puede atenuarse una luminaria.
- Atenuación 0-10 V, 1-10 V - admite controlar más de una luminaria simultáneamente.

9.5.2.- INTERFAZ DIGITAL

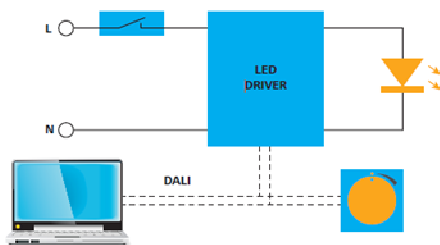


Figura. Interfaz DALI

Las interfaces digitales ofrecen la posibilidad de conectar varios drivers LED a través de una interfaz digital, y controlarlos de forma independiente. También permite leer el estado de cada luminaria. Las Interfaces digitales son compatibles con los atenuadores de luz, sensores de presencia, controles remotos, sistemas de iluminación escénica, ajuste del tono de la luz blanca, etc. Se trata de la solución ideal para instalaciones o

proyectos con gran número de luminarias de diversos tipos.

Interfaces digitales utilizados en la industria de iluminación:

- DALI-Digital Addressable Lighting Interface (Interfaz digital direccionable para iluminación). El más utilizado
- DSI-Digital Signal Interface (Interfaz de señal digital)
- DMX-Digital Multiplex
- KNX- estándar internacional para todas las aplicaciones de control de viviendas y edificios

9.5.3.- AJUSTE DE LA TONALIDAD DE LA LUZ BLANCA

Si duplicamos algunos componentes electrónicos dentro del driver, podemos conectar y controlar dos tipos de LEDs con diferente temperatura de color (blanco frío y blanco cálido). Esto permite ajustar la temperatura de color de la luz emitida por la luminaria dependiendo de las horas del día o de las actividades que se están realizando, consiguiendo siempre el ambiente más agradable.

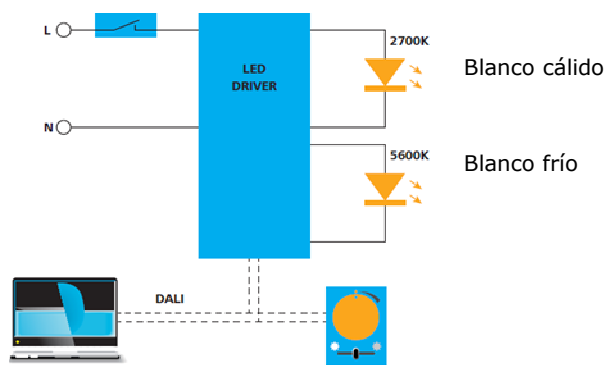


Figura. Ajuste de la tonalidad de la

9.5.4.- REALIMENTACIÓN TÉRMICA

Incluyendo un sensor de temperatura en el sistema de control de la luminaria, se puede disminuir la corriente de alimentación en función de la temperatura real de los LEDs, con el fin de evitar un sobrecalentamiento en caso de temperatura ambiente excesiva. De esta manera se puede preservar fácilmente la vida útil de la fuente de luz LED

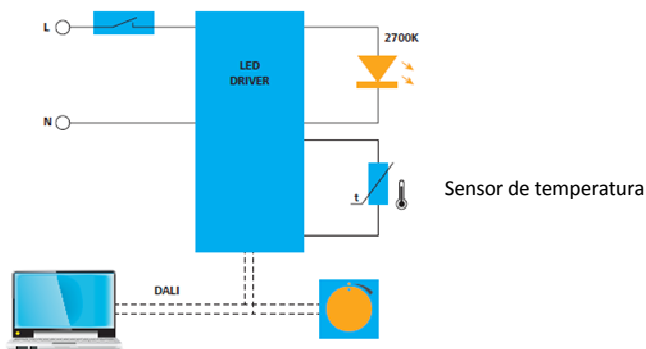


Figura. Realimentación térmica

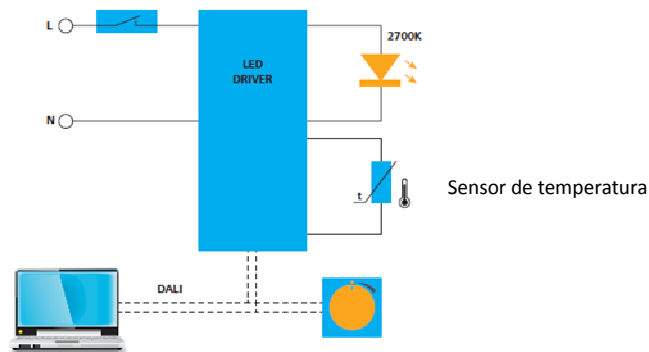


Figura. Realimentación térmica

9.5.5.- CONTROL REMOTO

El driver de una luminaria LED puede incluir una función de control remoto para controlar las funciones de la luminaria mediante un mando inalámbrico

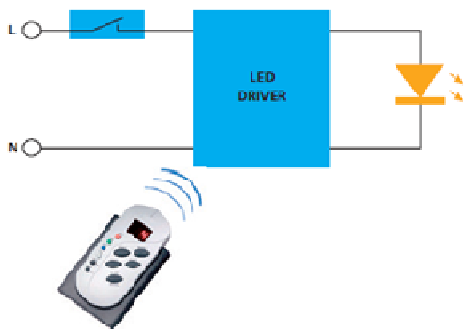
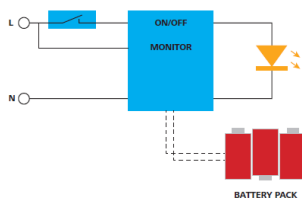


Figura. Control remoto

9.5.6.- UNIDAD DE EMERGENCIA

Un driver o controlador LED con función de emergencia comprueba continuamente la señal de la red (Figura) y en caso de apagón, el driver comienza a suministrar energía a la luminaria desde unas baterías. Normalmente las baterías de las unidades de emergencia tienen capacidad para alimentar a la luminaria en el modo de emergencia de 1 a 3 horas.



10.- EL COLOR EN LA ILUMINACIÓN CON LEDS

10.1.- SISTEMAS DE MEDIDA DEL COLOR

10.1.1.- EL SISTEMA MUNSELL

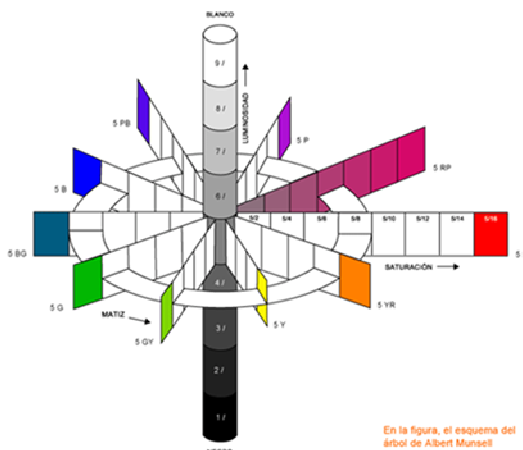
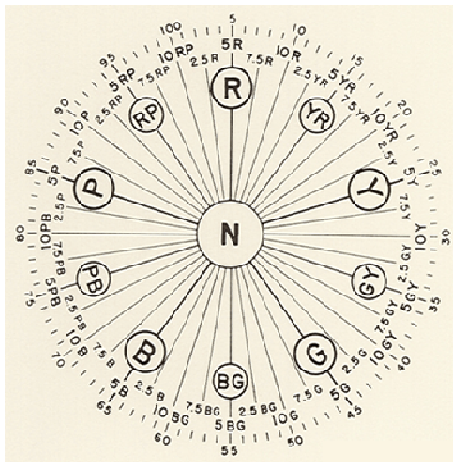
Albert H. Munsell, un profesor de arte que enseñaba en el Rochester Institute of Technology (Rochester, Nueva York) a finales de 1800 y principios de 1900, creó una notación de color - el sistema de color de Munsell - para definir una gama muy amplia de colores.

Para definir los colores, Munsell empleó tres parámetros:

- el tono o matiz (en inglés *hue*) que es la longitud de onda dominante del color y la cualidad que lo distingue de los demás. No tiene cuenta si el color es oscuro o claro, fuerte o débil.
- la luminosidad, es decir la claridad u oscuridad (*value*)
- la saturación, es decir la intensidad o pureza del color (*chroma*). También se puede definir por la cantidad de gris que contiene: mientras más gris, más neutro es un color, es menos brillante o menos "saturado".

Siguiendo el modelo del círculo de color de Newton, el sistema Munsell

representa los colores en un círculo dividido en 100 partes iguales, una para cada tono o matiz. Cada tono se define por una o dos letras y un número. Las letras son las iniciales en inglés de cinco colores puros: R (rojo), Y (amarillo), G (verde), B (azul), P (morado), y dos letras para los colores intermedios entre dos puros: YR (amarillo-rojo o naranja), GY (verde-amarillo), BG (azul-verde), PB (morado-azul), RP (rojo-morado). La definición del tono se completa con unos números de 1 a 10 a intervalos de 0,5. El 5 corresponde al color puro. Así un rojo puro sería 5R, y un rojo ligeramente amarillento sería 7.5R.



En la figura, el esquema del árbol de Albert Munsell

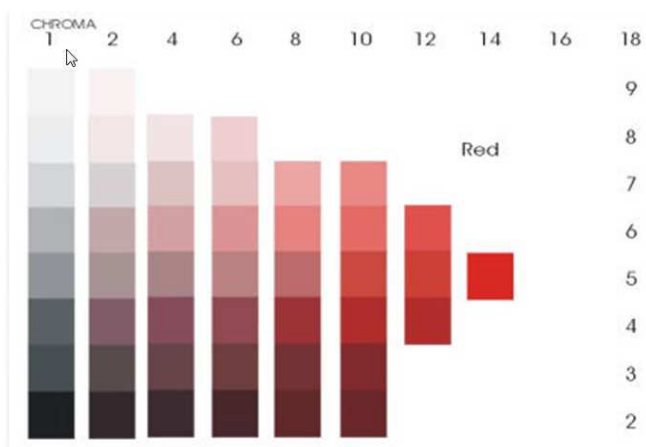
Dentro del círculo se asigna una unidad de distancia radial para cada diferencia perceptible en la saturación del color. Puesto que hay mayores diferencias perceptibles en algunos matices, la figura se puede hinchar, por ejemplo hasta 24 valores para algunos matices, y

sólo en hasta 10 de otros. Un rojo grisáceo o poco saturado sería por ejemplo un 4 y un rojo intenso un 13.

Perpendicular al plano formado por el matiz y la saturación está la escala de brillo dividida en valores desde 0 (negro) hasta 10 (blanco).

Un color ocupa un punto en el espacio de color así definido, y está especificado en la forma tono luminosidad/saturación. Por ejemplo:

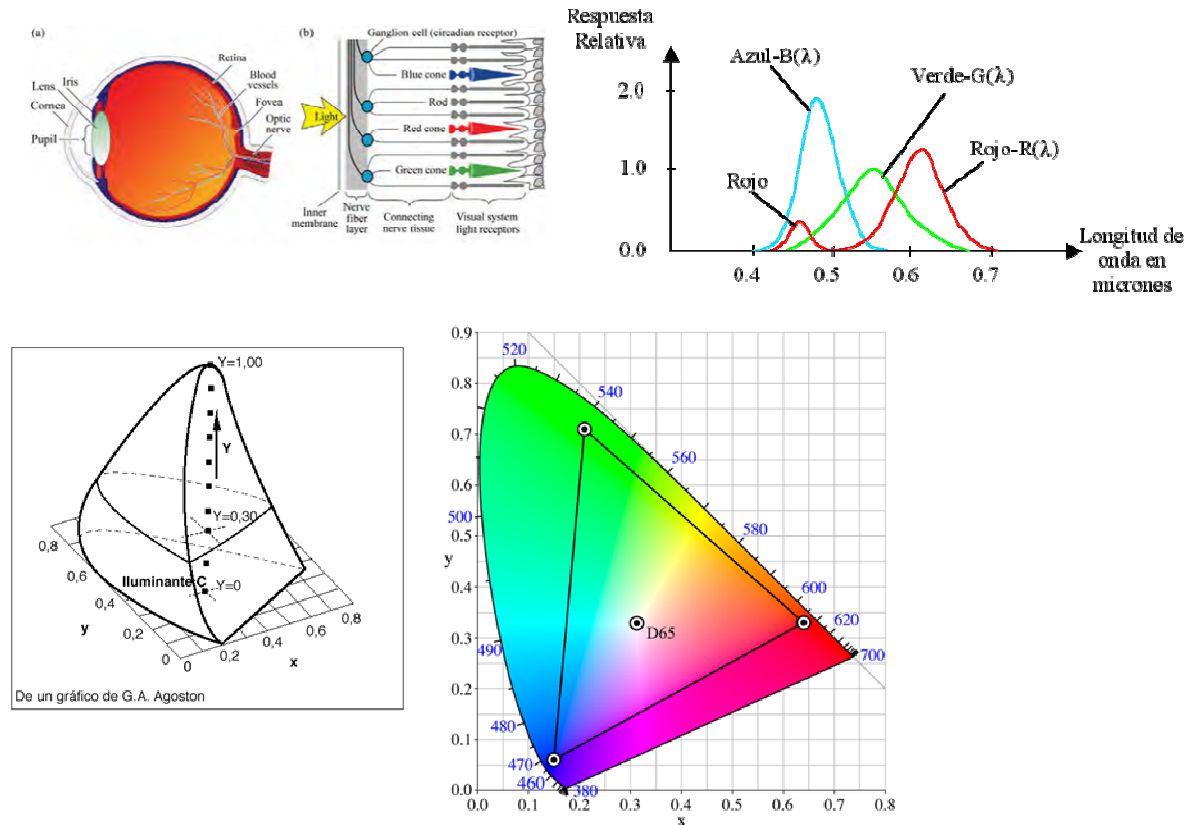
7.5R 6/4 es un rojo ligeramente amarillento claro y grisáceo (poco saturado)



4.5R 4/13 es un rojo muy ligeramente violáceo, oscuro y muy intenso.

El sistema MUNSSELL incluye una gran colección de muestras de color que permite la comparación, con muestras adyacentes basadas en las diferencias de color percibidas.

10.1.2.- SISTEMA DE COLOR C.I.E.³⁷



La CIE (Comisión Internacional sobre la Iluminación o *Commission internationale de l'éclairage* en francés), es la autoridad internacional en luz, iluminación, y color, fue creada en 1913 y tiene su sede en Viena. En 1931, la CIE desarrolló un sistema de caracterización de colores. El sistema CIE caracteriza los colores por un parámetro de luminancia Y que se representa en el eje z, y dos coordenadas de color x e y, las cuales especifican un punto sobre el diagrama de cromaticidad. Este sistema ofrece más precisión en la medida del color que el de Munsell, porque los parámetros están basados en la distribución de energía espectral (SPD) de la luz emitida por el objeto coloreado, y está factorizado por las curvas de sensibilidad, del ojo humano (mostradas en la parte superior derecha de la figura).

Como el ojo humano tiene tres tipos diferentes de conos sensibles al color, la respuesta del ojo se describe mejor en términos de tres "valores triestímulos".

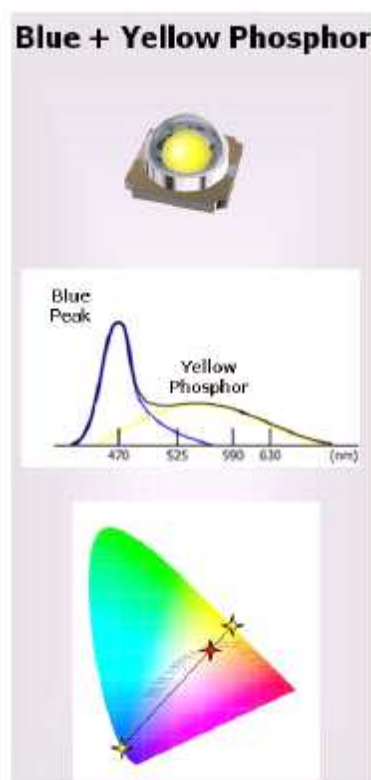
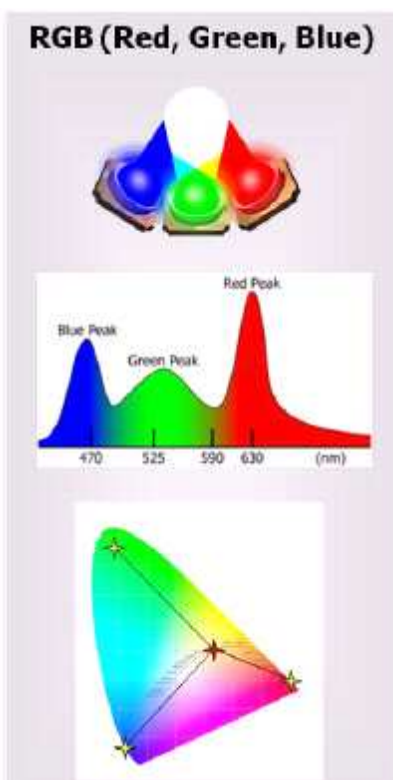
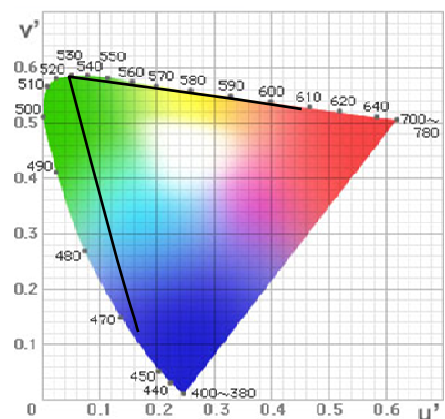
Cualquier color puede ser expresado en términos de dos coordenadas de colores x e y.

Los colores que se pueden obtener por combinación de un determinado conjunto de tres colores primarios (tales como azul, verde y rojo de una pantalla de televisión a color) están representados sobre el diagrama de cromaticidad por el triángulo construido uniendo las coordenadas de los tres colores.

Los colores espectrales están distribuidos alrededor del borde del diagrama y está indicada su longitud de onda en nm. El borde corresponde a los colores con máxima saturación. La luz blanca ocupa el centro de la figura. El diagrama representa el "espacio de color" que incluye todos los tonos percibidos por el ojo humano. Un aspecto clave en el estudio de la colorimetría es que la percepción del color es una función aditiva en el espacio de color. Para el ojo humano dos fuentes de luz formadas a partir de diferentes longitudes de onda pueden ser percibidas como un solo color. Estas dos fuentes luminosas tendrán el mismo color aparente para un observador cuando tengan los mismos valores triestímulo, sin importar que distribución espectral de luz se ha usado para producirlas. La figura anterior es la versión CIE de 1931. En este diagrama resulta evidente que el verde ocupa demasiado espacio comparado con los otros colores. Para subsanar entre otras esa deficiencia, se hicieron revisiones al diagrama en 1960 y 1976.

En la versión de 1976, conocida también como diagrama de cromaticidad $u'-v'$, la distancia entre puntos del diagrama es aproximadamente proporcional a la diferencia de color percibida. No obstante, la versión de 1931 sigue siendo la más ampliamente usada.

Aplicando estos conceptos a la generación de luz blanca con LEDs, en la figura siguiente vemos que se pueden usar múltiples configuraciones de fósforos y LEDs monocromáticos para producir las mismas coordenadas x e y en el espacio de color de la CIE. El perfil espectral de cada configuración es



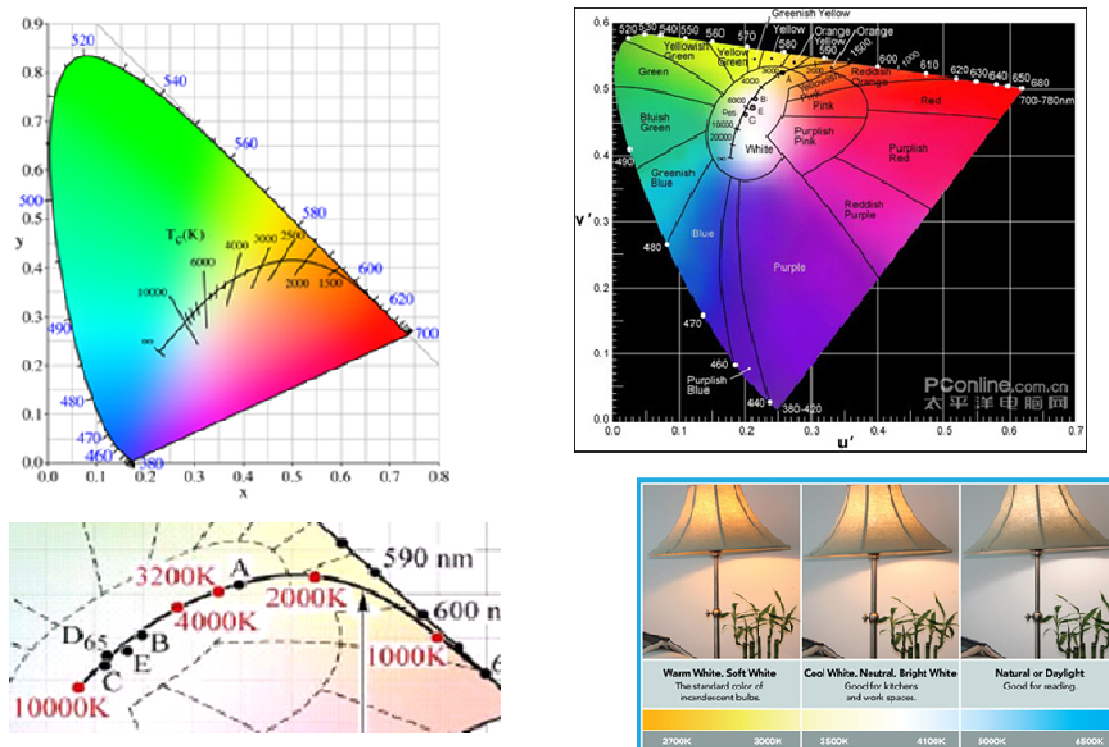
significativamente distinto, pero el observador lo percibe como el mismo color aparente.

10.2.- TEMPERATURA DE COLOR

Cuando un objeto alcanza una temperatura muy alta, se vuelve incandescente, primero luce en color rojo, luego amarillo, blanco y finalmente azul. Esto ocurre porque la longitud de onda asociada con el pico de radiación, se hace progresivamente más corta con el incremento de temperatura.

El color emitido por una fuente de luz blanca se define comparando su espectro luminoso con el de la luz que emitiría un emisor ideal o "cuerpo negro"³⁸ calentado a una temperatura determinada, se conoce como temperatura de color correlativa CCT y se expresa en Kelvin.

La curva que representa la variación del color de la luz emitida por un radiador de cuerpo negro, como consecuencia del incremento de su temperatura se conoce como curva de Planck. En la figura siguiente está representada sobre los diagramas de cromaticidad CIE de 1931 y 1976

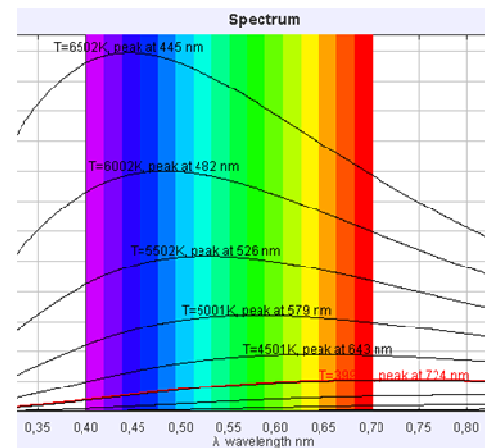
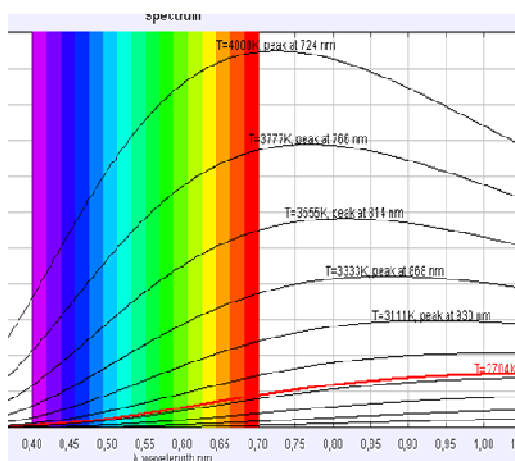


No existe una norma general para clasificar las diferentes tonalidades de la luz blanca por temperaturas de color. La norma UNE. EN 12464-1 sobre iluminación con LEDs en lugares de trabajo en interior, las clasifica como:

Apariencia de color	Temperatura de color correlacionada T_{CP} K
Cálida	inferior a 3 300 K
Intermedia	3 300 K a 5 300 K
Fria	superior a 5 300 K

White	Warm	2580-3710K (ANSI 2700, 3000, 3500K)	>80
	Neutral	3711-4745K (ANSI 4000, 4500K)	>70
	Cool	4746-7040K (ANSI 5000, 5700, 6500K)	>70

El límite entre la blanca cálida y la intermedia o neutra a veces se pone en 3300 K y otras veces hasta en 3700 K y la luz blanca fría en algunas clasificaciones comienza en los 4500 K y otras en los 5300 K. A veces se emplea el término luz de día para referirse a la tonalidad más azulada con CCTs entre 5000 y 6500 K.

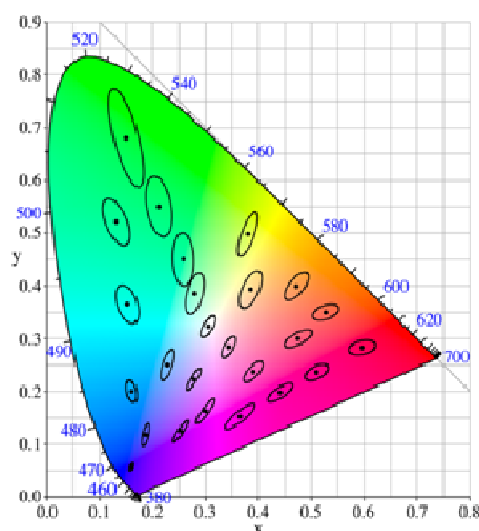


Espectros de emisión del radiador de cuerpo negro 2700-6500K

10.3 LA VARIABILIDAD DE LA PERCEPCIÓN DEL COLOR: ELIPSES DE MACADAM^{39 40}

David MacAdam, un investigador de Kodak publicó en 1942 un estudio sobre la percepción humana de las diferencias de color⁴¹.

Los experimentos de MacAdam se basaron en la observación visual de la llamada Diferencia de Color apenas perceptible (JND) entre dos colores muy similares. Diferencia apenas perceptible se define como la diferencia de color, donde el 50% de los observadores notan la diferencia y el 50% de los observadores no ven la diferencia.



MacAdam calculó y representó en el espacio de color de la CIE 1931 las zonas con desviaciones típicas de la coincidencia de color (SDCM). Estas, tienen forma de elipse y su tamaño y orientación varían dependiendo de su ubicación en el diagrama de espacio de color. Son más grandes en la zona del verde y más pequeñas en el rojo y el azul. Cabe señalar que las elipses SDCM a menudo se muestran en el diagrama de espacio de color

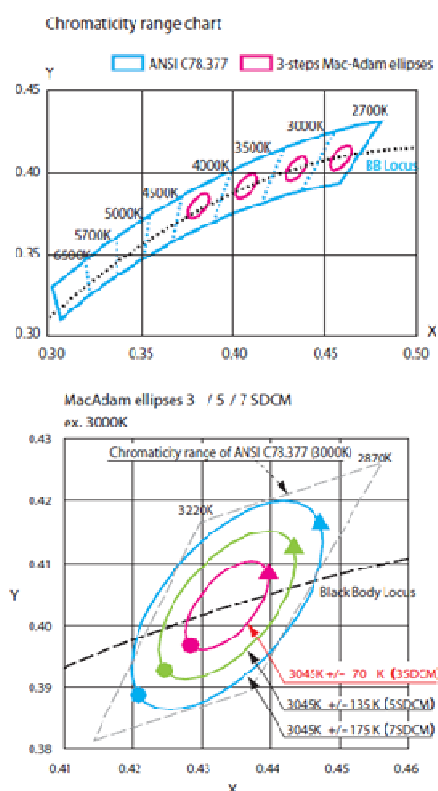
de la CIE amplificadas diez veces (véase la imagen), ya que de otro modo serían demasiado pequeñas para ser vistos claramente en un diagrama CIE completo.

La metodología de MacAdam ha sido muy útil para la industria de iluminación. La luz blanca emitida por cada fuente luminosa individual, fluorescentes o de LEDs, de un mismo fabricante y un mismo modelo, presenta inevitablemente variaciones de tonalidad y luminosidad, pero los diseñadores o fabricantes de luminarias necesitan garantizar que una instalación tiene una iluminación constante y uniforme. Si se seleccionaran para una luminaria un conjunto de LEDs sin fijarse más que en sus datos de luminosidad y CCT nominales, habría una mezcla inaceptable de temperaturas de color y niveles de brillo. Para corregir esto se ha establecido el *binning* o agrupamiento de dispositivos de iluminación.

La métrica empleada para expresar la medida de la diferencia de color en un agrupamiento (*bin*) de LEDs, es el número de desviaciones típicas de coincidencia de color (SDCM) en el espacio de color de la CIE en que se encuentran las emisiones de todos los LEDs del agrupamiento. Si las coordenadas de cromaticidad de todos los LEDs de un agrupamiento caen dentro de 1 SDCM (o "elipse de Mac Adam de 1 paso"), la mayoría de la gente no verá ninguna diferencia en el color de los LEDs. Si la variación de color es tal que la variación de la cromaticidad se extiende a una zona que es el doble de grande (2 SDCM o una elipse de MacAdam de 2 pasos), se comenzará a ver cierta diferencia del color. Una elipse de MacAdam de 2 pasos es mejor que una de 3 pasos, y así sucesivamente.

Los experimentos de MacAdam demostraron que el tamaño de una elipse SDCM es bastante pequeño, lo que significa que el sistema de visión humano es muy bueno discriminando diferencias de color cuando se ven dos fuentes de luz al mismo tiempo.

Si consideramos el tamaño de la elipse SDCM de 1 paso a una temperatura de color de 3.000 K arbitraria, la variación de CCT es de ± 30 K, y la variación de coordenadas $u'v'$ correspondiente es de $\pm 0,001$ (las coordenadas de cromaticidad en el espacio de color uniforme de la CIE 1976). En otras palabras, si consideramos dos LEDs con una diferencia CCT de más de 60K, lo más probable es percibamos una diferencia de color. La tabla de abajo relaciona el número de pasos de la elipse SDCM, con las variaciones de CCT y de las coordenadas de cromaticidad de una fuente luminosa de temperatura de color de 3000K.



<u>SDCM</u>	<u>CCT</u>	<u>@</u>	<u>3000K</u>	<u>ΔUV</u>
1x			$\pm 30K$	± 0.0007
2x			$\pm 60K$	± 0.0010
4x			$\pm 100K$	± 0.0020
7-8x		$\pm 175K$		± 0.0060

Dentro de la industria de la iluminación, existen varias normas y especificaciones sobre la variación de cromaticidad máxima de cada agrupamiento o *bin*. Una norma extendida marca agrupar a los LEDs dentro de cuadriláteros que abarcan una elipse de MacAdam de 7 pasos con centro en el punto de la curva del cuerpo negro que corresponde a la temperatura de color correlativa CCT nominal⁴². Otras especificaciones más estrictas dictan que los agrupamientos queden dentro de cuadrilátero en torno a una elipse de MacAdam de 4 pasos⁴³.

Es normal que los fabricantes anuncien como índice de calidad de sus productos que sus LEDs están agrupados por ejemplo con una tolerancia de elipse de MacAdam de 4 pasos (o 4xSDCM). Debe tenerse en cuenta que esto es mejor que los LED que se han agrupado para 5 o 7 pasos, pero todavía se notará una diferencia de color entre los LEDs suministrados con esa especificación.

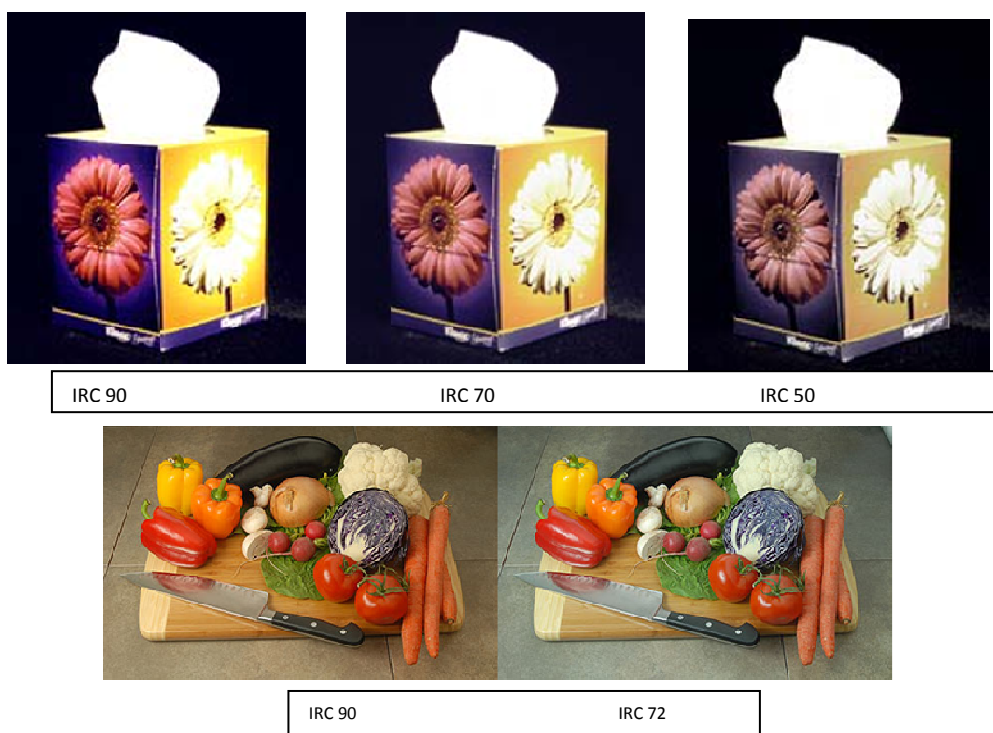
10.4.- EL ÍNDICE DE REPRODUCCIÓN CROMÁTICA

Una característica importante de una fuente de luz blanca es su capacidad para mostrar los auténticos colores de los objetos, como frutas, plantas, prendas de vestir o la piel humana, que están siendo iluminados por esa fuente. Con colores auténticos, queremos decir los colores tal como se muestran cuando son iluminados por la luz del sol.

La necesidad de medir esta característica de la luz blanca surgió con la generalización del uso en oficinas de las luces fluorescentes en los años 1950s, que en sus primeras versiones producían una luz bajo la que el color de la piel o la ropa presentaba unos cambios de tonalidad desagradables respecto a la luz natural. La CIE comenzó en 1948 un proceso para desarrollar un método para evaluar la calidad de la representación de los colores de las fuentes de luz.

La primera versión del Índice de Reproducción Cromática se publicó en 1965 y posteriormente se revisó en 1974 para incluir los "efectos psicofisiológicos de la adaptación cromática". Índice de Reproducción Cromática en siglas IRC es la traducción generalmente aceptada del inglés *Color Rendering Index* o CRI. Puede tener un valor máximo de 100 que corresponde a luz natural o incandescente.

En las figuras, vemos un mismo objeto iluminado por fuentes luminosas de distintos IRCs y podemos ver claramente que los colores de los objetos aparecen más vivos y ricos cuando son iluminados por una fuente de IRC elevado



Un IRC muy elevado (90 o superior) es fundamental en lugares como museos o galerías de arte. Un IRC alto es también importante en comercios de ropa o alimentos o en restaurantes y en menor grado en hogares u oficinas. Su importancia es mucho menor en iluminación exterior, en lugares como calles o aparcamientos y resulta totalmente irrelevante cuando las luces blancas se usan como señales o indicadores.

En 1986, una guía de CIE sobre iluminación interior incluía esta tabla orientativa:

IRC	Ejemplos de uso
> 90	Galerías de arte
80 – 90	Hogares, restaurantes, industria textil
60 – 80	Oficinas, colegios, industria ligera
40 – 60	Industria pesada
20 – 40	Exteriores

Obviamente, esta lista estaba muy influenciada por las tecnologías de iluminación dominantes en ese momento, que incluía lámparas fluorescentes de halofosfatos en interiores, lámparas de descarga de vapor de mercurio en naves industriales y lámparas de vapor de sodio de baja presión para iluminación de carreteras. La mejora de la tecnología en los fluorescentes, y la aparición o generalización de otras tecnologías que ofrecen similares o mejores rendimientos con mejor reproducción cromática, como las lámparas de halogenuros metálicos o los LEDs de luz blanca, permiten establecer estándares más exigentes en todos los ámbitos

La capacidad de reproducción de colores de una fuente de luz se evalúa comparándola con la capacidad de reproducción de colores de una fuente luminosa de referencia⁴⁵.

Para calcular el IRC, la fuente de referencia se elige:

- Si el punto cromático de la fuente a evaluar se encuentra en la curva de Planck, la fuente de referencia es un radiador de cuerpo negro con la misma temperatura de color que la fuente evaluada
- Si el punto cromático de la fuente a evaluar se encuentra fuera de la curva de Planck, la fuente de referencia es un radiador de cuerpo negro de Planck, con la misma temperatura de color correlativa que la fuente

evaluada. Es decir, una fuente de Planck cuyo punto de cromaticidad esté a la menor distancia posible del de la fuente de prueba.

- Como alternativa, se puede utilizar como fuente de referencia uno de los iluminantes estandarizados por la Comisión Internacional de la Iluminación CIE⁴⁶.

Idealmente, la fuente de prueba y la fuente de referencia deben tener las mismas coordenadas de cromaticidad y flujo luminoso.

Por convención, se asume que la fuente de referencia del cuerpo negro de Planck tiene propiedades de rendimiento cromático perfectos y por lo tanto su índice de rendimiento cromático es $IRC = 100$. Esta convención se acordó porque la luz natural se parece mucho a la fuente de cuerpo negro de Planck. Cualquier iluminante distinto de la fuente de referencia tiene necesariamente un índice de rendimiento cromático inferior a 100.

Como el IRC depende sensiblemente de la elección de la fuente de referencia, la selección de la fuente de referencia es de importancia crítica en el cálculo de los IRCs de las fuentes de prueba. Debido a que el espectro de emisión de una lámpara incandescente es muy cercano al de un radiador de cuerpo negro de Planck, estas lámparas tienen el IRC más alto posible y por lo tanto las mejores propiedades de rendimiento cromático de todas las fuentes de luz artificial. Las lámparas incandescentes halógenas de cuarzo se utilizan en lugares donde la representación de color es de gran importancia, como por ejemplo en los museos, galerías de arte y tiendas de ropa. La desventaja de las lámparas de cuarzo-halógenas es su elevado consumo.

Además de la fuente de prueba y la fuente de referencia, las muestras de color de prueba son fundamentales en la determinación del IRC de una fuente de prueba. Muestras de prueba de color se podrían derivar de objetos reales, por ejemplo, fruta, flores, madera, muebles y ropa. Sin embargo, en aras de la normalización internacional, se eligió un conjunto específico de 14 muestras de prueba de color con el propósito de determinar el IRC.

Estas 14 muestras de prueba de color son un subconjunto de una colección más grande de muestras de prueba de color creada por Munsell.

Name	Appr. Munsell	Appearance under daylight	Swatch
TCS01	7,5 R 6/4	Light greyish red	
TCS02	5 Y 6/4	Dark greyish yellow	
TCS03	5 GY 6/8	Strong yellow green	
TCS04	2,5 G 6/6	Moderate yellowish green	
TCS05	10 BG 6/4	Light bluish green	
TCS06	5 PB 6/8	Light blue	
TCS07	2,5 P 6/8	Light violet	
TCS08	10 P 6/8	Light reddish purple	
TCS09	4,5 R 4/13	Strong red	
TCS10	5 Y 8/10	Strong yellow	
TCS11	4,5 G 5/8	Strong green	
TCS12	3 PB 3/11	Strong blue	
TCS13	5 YR 8/4	Light yellowish pink	
TCS14	5 GY 4/4	Moderate olive green (leaf)	

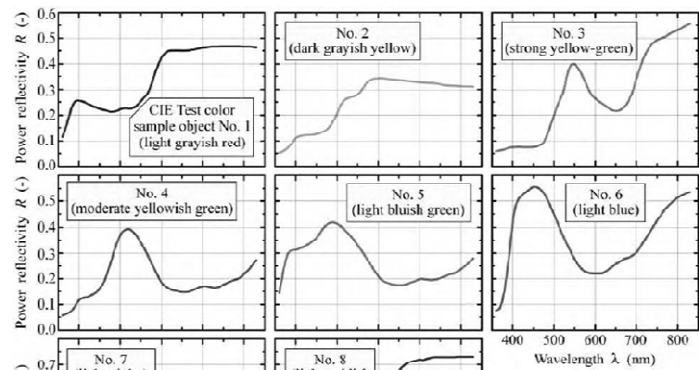


Fig. 19.4. Power reflectivities of CIE test-color samples used to calculate the general color rendering index (data after CIE, 1995).

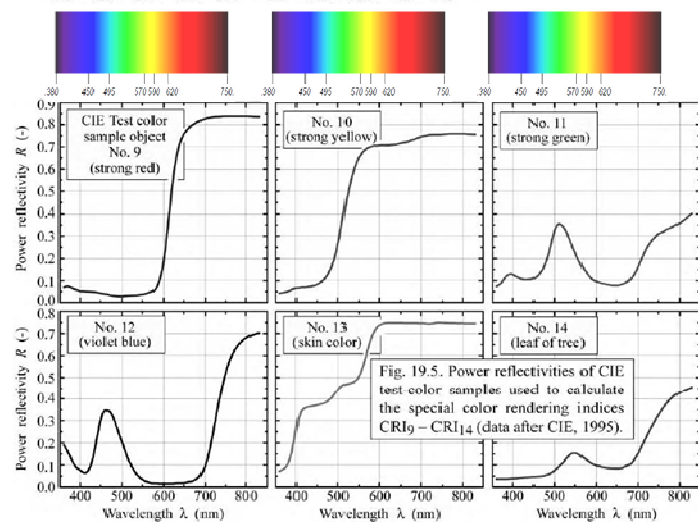


Fig. 19.5. Power reflectivities of CIE test-color samples used to calculate the special color rendering indices $CRI_9 - CRI_{14}$ (data after CIE, 1995).

El IRC general de la CIE o R_a es un promedio calculado de acuerdo con

$$R_a \text{ o IRC general} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 IRC_i$$

En el que los IRC_i son los IRCs para un juego de las 8 primeras muestras de color de prueba en colores pastel (claros). Los índices especiales de rendimiento cromático (los de cada muestra) se calculan por:

$$IRC_i = 100 - 4.6 \Delta E_i^*$$

Donde ΔE_i^* representa el cambio de color cuantitativo que ocurre cuando una muestra de color de prueba es iluminada primero por una fuente de referencia y después por la fuente de prueba. Los índices especiales de rendimiento cromático se calculan de forma que tengan un valor de 100 cuando no haya diferencia en la apariencia de color.

Se estableció el factor 4,6 para que el IRC general fuera 60 cuando se usaba como fuente de prueba una lámpara fluorescente estándar de luz blanco cálido con un radiador de cuerpo negro como fuente de referencia.

Además de esas muestras de color (con números 1-8) usadas para calcular el índice de reproducción cromático general, se utilizan seis muestras más (con números 9-14) para evaluar en más detalle las capacidades de representar colores de una fuente luminosa. De estas muestras suplementarias, cuatro tienen colores saturados, la 13 es un rosa pálido para representar la piel humana y el 14 es un color verde hoja.

Una iluminación con IRC entre 85 y 90 se considera que es muy buena representando el color de los objetos y las fuentes luminosas con IRC 90 o superior son excelentes y son las únicas que se emplean para tareas en las que se necesita una discriminación de colores muy precisa.

Estudios académicos sobre el tema han llegado a la conclusión de que diferencias en el IRC menores a 5 puntos pasan prácticamente desapercibidas y pueden considerarse irrelevantes. Así, podemos decir que no hay apenas diferencia entre un IRC 90 o 93.

El IRC ha sido durante 40 años un método útil para evaluar la calidad de representación de colores de las fuentes de luz fluorescente y de descarga de alta intensidad y para fomentar la mejora de esas tecnologías. Su implantación sirvió para promover el desarrollo y comercialización de fósforos a base de tierras raras para lámparas fluorescentes y hoy en día los IRCs de las lámparas fluorescentes están entre 85 y 95. Para diseñadores y consumidores en lo referente a tecnologías fluorescente y de descarga, es suficiente con saber que un índice 90 o superior es bueno y uno menor de 80 es malo.

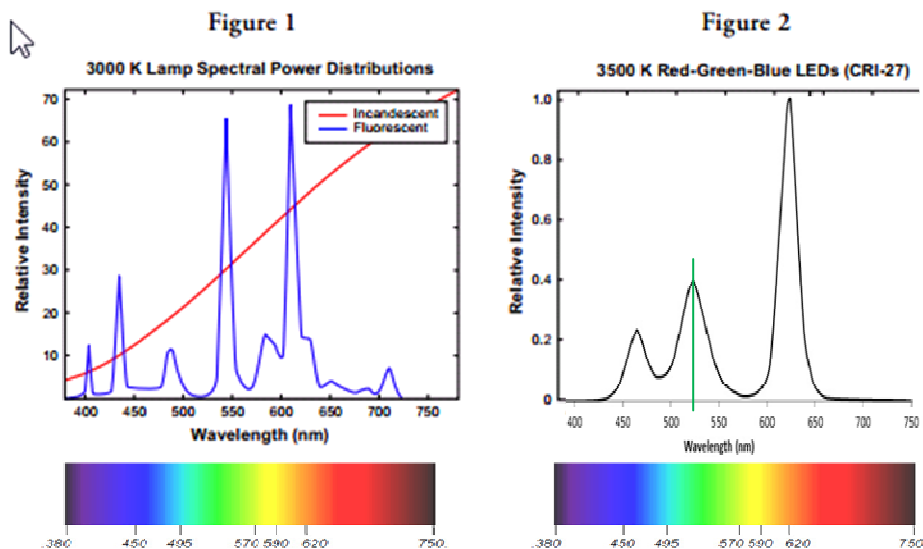
Fuente luminosa	CCT (K)	IRC	lm/W	Fuente luminosa	CCT (K)	IRC	lm/W
Incandescente convencional	2800	100	6-16	Vapor de mercurio	3600	40-60	40-75
Incandescente halógena	3200	100	16-30	Vapor de sodio baja presión	1800	-44	200
Fluorescente compacto	2700-5000	80-90	46-80	Halogenuro metálico	4200-5400	75-95	75-125
Lámpara LED blanco frío	5000	75-80	60-90	Vapor de sodio alta presión	2100	25	100-150
Lámpara LED blanco cálido	2700	80-85	60-90	Fluorescente de halofosfato blanco frío	4200	50-75	50-75
Lámpara LED de IRC alto	2700	90-95	50-59	Fluorescente trifósforo blanco frío	4080	89	85-108
Sistema LED híbrido	2700-4000	93-98	110	Fluorescente trifósforo blanco cálido	2940	80	75-95

10.4.1.- EL IRC CON FUENTES LUMINOSAS LED⁴⁷

REPRODUCCIÓN CROMÁTICA DE LAS FUENTES LED RGB

Con la llegada de la iluminación con LEDs (o de estado sólido) surgieron debates que han puesto en cuestión la validez de IRC. El problema surge sobre todo cuando se mide el IRC de fuentes LED RGB, que generan luz blanca a base de mezclar en determinadas proporciones la luz de LEDs monocromáticos rojos, verdes y azules. Fuentes de luz de esta tecnología con una calidad de reproducción de colores muy agradable a la vista, tienen IRCs sorprendentemente bajos.

En 2005 se presentó la primera luminaria comercial LED RGB. Generaba una luz blanca cuya temperatura de color podía variarse desde 3000 a 6500 Kelvin. La calidad de luz que generaba impresionó a los asistentes a la presentación muy favorablemente por sus propiedades de reproducción cromática, a simple vista claramente superiores a la de los LEDs de luz blanca fría a base de fósforo amarillo YAG, que en ese momento tenían un IRC en torno a 75. En cambio, para la fuente RGB, el IRC variaba desde 25 a 3000K, hasta 40 a 6500K. Esa fuente sólo cumplía por tanto los estándares de la CIE para uso en iluminación exterior, como las de vapor de mercurio o sodio, cuya calidad de reproducción de colores es a simple vista muchísimo más deficiente. Este IRC tan bajo resulta a primera vista sorprendente si se compara el espectro de emisión de las fuentes LED RGB con el de una lámpara fluorescente trifósforo, que emplea una técnica de generación de luz similar.



Comparando los espectros de emisión, resulta extraño que la fuente fluorescente tenga un IRC entre 85 y 90 y la LED RGB para una CCT similar tan solo 27. Estudiando los espectros en más detalle, la diferencia está en las longitudes de onda de los picos de emisión. Para los fluorescentes se calculó que las longitudes de onda dominantes ideales eran 450 nm (azul), 545 nm (verde) y 610 nm (rojo).

En cambio las longitudes de onda de los LEDs usados en fuentes RGB son 465 nm, 525 nm y 615 nm. El problema principal es el LED verde. Si su longitud de onda fuera 545 nm en vez de 525 el IRC subiría hasta 85.

En estudios sobre mezcla de colores con LED considerando un cuarto color, el amarillo (RGYB), se llegó a la conclusión de que las longitudes de onda ideales serían 456-459 nm (azul), 535 nm (verde), 573 (amarillo) y 614 nm (rojo)

El problema es que existe un hueco en el espectro de emisión, en los verdes y amarillos, en el que no se ha logrado fabricar LEDs eficientes. Actualmente la eficiencia de los LEDs verdes y amarillos es muy inferior a la de los azules y rojos. Esas longitudes de onda resultan demasiado cortas para LEDs a base de AlInGaP y demasiado largas para los de InGaN. La longitud de onda de LEDs verdes de InGaN de una eficiencia razonable es como máximo de 530 nm con la tecnología actual.

La luz blanca producida por luminarias LED RGB con cambio de color, tiene una apariencia muy buena pero, con los LEDs verdes actuales, está condenada a tener valores de IRC inaceptablemente bajos. La CIE reconoció en 2007⁴⁸ que el IRC es deficiente para evaluar ese tipo de fuentes luminosas y recomendó el desarrollo de un nuevo sistema de medición del rendimiento cromático para todas las fuentes de luz blanca.

Científicos de la agencia de normalización de los EEUU (NIST) desarrollaron un índice con 15 muestras de color llamado CQS y se han propuesto otros, pero no se ha alcanzado ningún acuerdo general para reemplazar el IRC, ni parece que esto vaya a lograrse en breve.

Muestras de colores del índice CQS



CALIDAD DE REPRODUCCIÓN CROMÁTICA DE LAS FUENTES LED AZUL+FÓSFORO

El rendimiento óptico de esta arquitectura LED es bastante eficaz por dos razones. En primer lugar, los LED InGaN azules son muy eficientes en convertir la energía eléctrica que se les suministra en la potencia óptica. La eficacia luminosa de un LED se define como la potencia óptica en vatios radiantes de la luz que sale del LED dividida por la potencia eléctrica de entrada en vatios. Para un LED azul típico de InGaN, la eficiencia es del 30-35%. A pesar de esta alta eficiencia, los LEDs azules tienen muy poca eficacia luminosa porque el ojo es poco sensible a las longitudes de onda azules. De hecho, la sensibilidad de los ojos es lo que hace que el indicador principal de mérito sea la eficacia medida en lúmenes por vatio en lugar de la eficiencia. Para corregir esto, se añadió al LED azul un fósforo amarillo, cuyo espectro de emisión se ajusta bien a la

curva de respuesta espectral del ojo, $V(\lambda)$. Así se consiguió un LED que emite luz blanca fría. La mayor parte de la eficacia luminosa de un LED blanco se debe a la luz amarilla emitida por el fósforo y muy poca se debe a la luz azul que atraviesa el fósforo (Fig. 4).

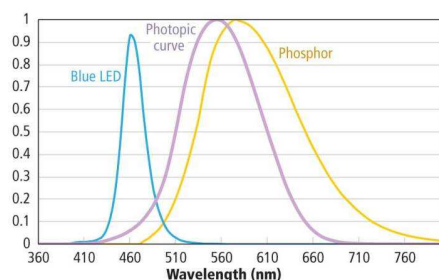
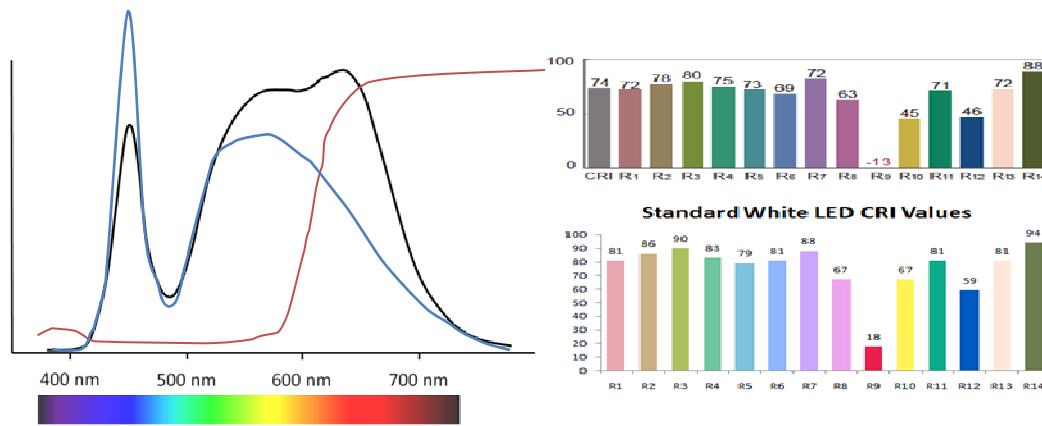


Fig. 4.

Si no nos preocupara el rendimiento cromático o que las coordenadas de cromaticidad del LED estuvieran cerca de la curva de Planck, podríamos fabricar un LED de eficacia luminosa súper alta usando un fósforo, cuyo espectro de emisión coincidiera con la curva $V(\lambda)$ tan estrechamente como sea posible y luego hacer la capa de fósforo lo suficientemente gruesa como para que toda la luz azul del LED azul sea absorbida por el fósforo.

Aunque haciendo coincidir el espectro de emisión de un LED con la curva $V(\lambda)$ lo más posible lograremos una luz muy eficiente y por lo tanto brillante, no produciremos luz blanca. Por eso, necesitamos un poco de luz en los extremos azul y rojo del espectro, aunque la luz en esas longitudes de onda aporte poco a la luminosidad percibida por el ojo. Para los LED de luz blanca fría esto es bastante fácil de lograr, simplemente dejando pasar suficiente de la luz azul del LED a través del fósforo.

Los LEDs de luz blanca fría convencionales a base LED azul y fósforo amarillo de YAG tienen IRCs del orden de 70-75. Además, estos LEDs blancos convencionales, tienen especial dificultad para mostrar el rojo profundo, por lo que dan un IRC muy bajo para la muestra 9. Una buena reproducción del rojo saturado se considera necesaria para representar con fidelidad el color de la madera o el de la piel humana. Por ello, se ha establecido como normal, en fuentes de luz con LED, indicar además del IRC general o R_a , el correspondiente a la muestra 9 (R_9). Algunos estándares marcan un mínimo exigible en ese índice.⁴⁹

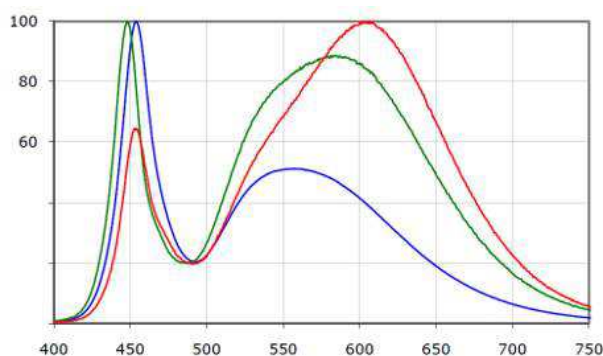


A la derecha: distribuciones espectrales de emisión típicas de una fuente de luz blanca cálida (En negro) y blanca fría (en azul) con LEDs blancos convencionales a partir de LED azul+ fósforos. En rojo: espectro de la muestra 9 (rojo fuerte) del Índice de Reproducción Cromática de la CIE

A la derecha: ejemplos de IRCs especiales de LEDs blancos convencionales para las 14 muestras de color

En general, en lo que respecta a LEDs a base de LED azul+fósforos, cuanto más alto es el IRC más baja es la eficacia luminosa (lúmenes/vatio). Aunque un $IRC > 80$ se ha venido considerando como suficientemente bueno para uso doméstico, recientemente se han introducido estándares muy exigentes, que promueven IRCs 90 o superiores.

Los LEDs de luz blanca cálida se consiguieron añadiendo otros fósforos verde o rojo y verde. Así, además de una luz más agradable para uso doméstico, se consiguieron IRCs superiores a los de luz blanca fría, en torno a 80-85. En estos LEDs, la luz emitida por el fósforo debe tener suficiente potencia en el extremo rojo del espectro para crear la temperatura de color blanco cálido. Para un LED de 2700K, se eligen fósforos con un amplio espectro de emisión que tengan el pico de emisión en torno a 590 a 630 nm. Conforme se usan fósforos cuyo pico de emisión está más alejado de la longitud de onda del azul excitador, aumentan las pérdidas por desplazamiento de Stokes. Además, los fósforos rojos actuales generan una gran cantidad de luz más allá de 650 nm, donde el ojo humano es muy poco sensible, lo que contribuye poco a la eficacia luminosa



de los LED. Esta es la razón por la que LEDs con una temperatura de color más baja presentan una menor eficacia luminosa que los LEDs de la misma familia con temperaturas de color más frías.

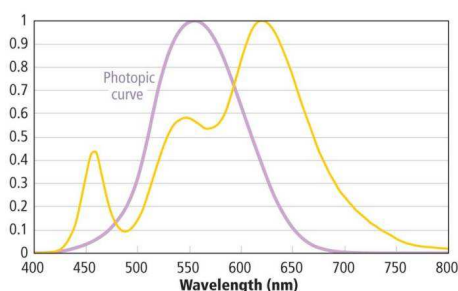
En la figura vemos superpuestos tres

espectros correspondientes lámparas LED Cree XR-E de diferentes temperaturas de color y CRI. En azul con temperatura de color de 5000K y CRI 75, en verde 3700K y CRI 75-80 y en rojo 2600K y CRI 80.50

ALTO IRC, TEMPERATURA DE COLOR CÁLIDA

Los LEDs con baja temperatura de color un IRC alto son deseables en aplicaciones residenciales de calidad. Para lograr esa combinación, se necesita más luz de longitud de onda larga (600-700 nm) con respecto a longitudes de onda medianas y cortas.

Se han utilizado varios métodos para conseguir fuentes de luz blanca con LEDs y fósforos con IRCs altos, 90 y superiores.⁵¹



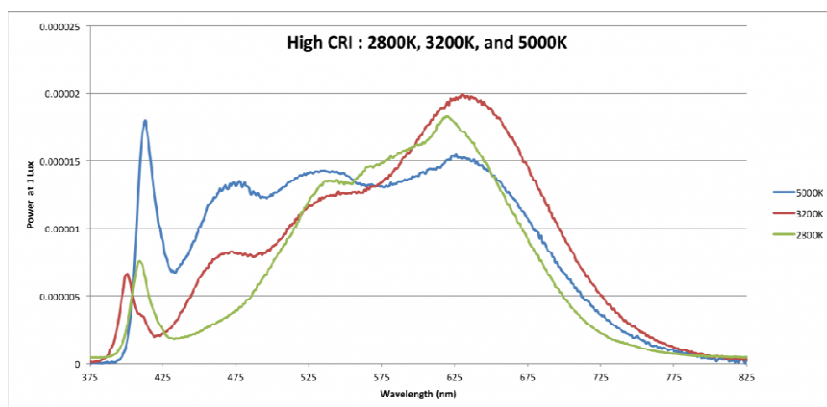
Un método consiste en usar un LED azul con una combinación de dos fósforos. El fósforo principal se desplaza hacia el lado azul del espectro y se añade un segundo fósforo rojo con un ancho de banda deseablemente más estrecho y un pico de emisión en torno a 610-620 nm. Este segundo fósforo añade la necesaria potencia al extremo rojo del espectro.

El deseable ancho de banda de emisión estrecho tiene por objeto evitar desperdiciar potencia en longitudes de onda por encima de 650 nm donde la del ojo humano es menor. En el caso del amarillo o el verde, no se requiere que la luz emitida sea de banda estrecha, pues el ojo humano tiene sensibilidad en una gama más amplia de longitudes de onda en esta región.

Por el momento no se han conseguido fósforos rojos de un ancho de banda de emisión adecuado. Con este método, se han logrado IRCs hasta 95, pero a costa de reducir la eficiencia en lm/W.

Un efecto similar se consigue si se utiliza, en vez de un LED azul, uno violeta o ultravioleta próximo, en ambos casos se necesita un fósforo adicional que convierta la luz del LED en luz azul. Las pérdidas por desplazamiento de Stokes son en esos casos aún mayores que en los LEDs azules, lo que hace disminuir la eficacia de la fuente luminosa.

Toshiba (Japón) (TRI-R) y Sora (EEUU) (vp3 vivid color), producen fuentes de luz de luz blanca de elevado IRC con LEDs violeta y tres fósforos (azul, verde y rojo).



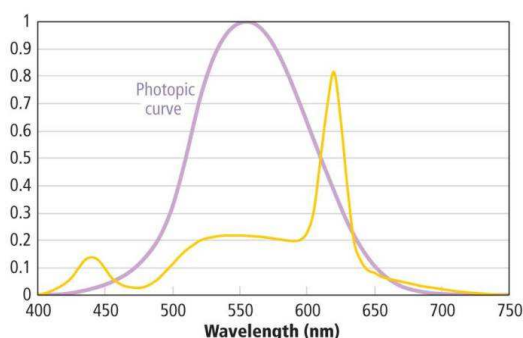
En la figura de abajo,⁵² se muestra el espectro de emisión de LEDs blancos a base de un LED que emite en el límite entre el violeta y el UV, aproximadamente 400 nm con una mezcla de fósforos rojo verde y azul consiguiendo luz blanca con diferentes temperaturas de color.

Los diferentes espectros se consiguen variando las concentraciones relativas de los fósforos rojo, verde y azul. El resultado de de estos nuevos LEDs produce una luz con IRC muy alto (superior a 98 según el autor del artículo) haciéndoles ideales para aplicaciones especiales como la espectroscopia en medicina

Los LEDs UV con fósforos RGB presentan algunos inconvenientes. El material del encapsulado del LED se degrada más rápidamente cuando está expuesto a luz ultravioleta y la pérdida de energía en la conversión de luz (por el llamado desplazamiento de Stokes) es mayor, lo que disminuye la eficiencia del dispositivo.

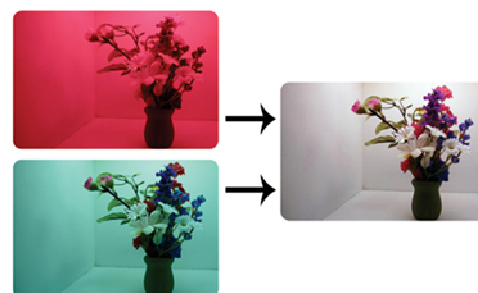
Por el momento, no se ha logrado producir un fósforo rojo que absorba la luz azul o del UV próximo y que emita una luz de banda estrecha centrada en los 610nm. Se busca una banda estrecha de luz roja para optimizar la eficiencia.

Otro método de conseguir IRCs altos son los SISTEMAS HIBRIDOS en los que se mezcla la luz de LEDs azules con fósforo amarillo o verde, con luz de LEDs monocromáticos rojos, para mejorar el índice de reproducción cromática manteniendo una elevada eficiencia.

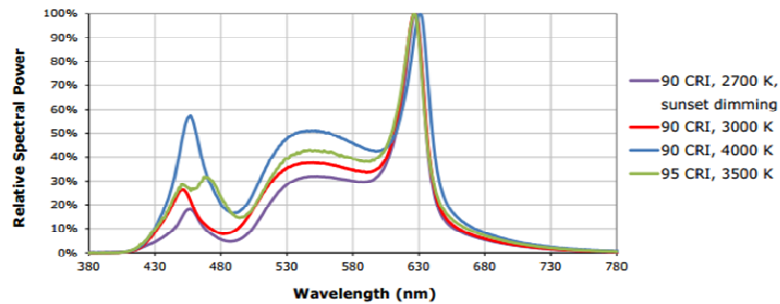


Las luminarias Osram Brilliant Mix mezclan la luz de LEDs blancos

especiales a base de LEDs azules con fósforo verde (que denominan EQ white) con LEDs monocromáticos rojos para generar luz blanca cálida. El fósforo verde supone pérdidas muy pequeñas por desplazamiento de Stokes, por la proximidad entre las longitudes de onda de la luz azul excitadora y la verde emitida por el fósforo. Osram afirma lograr con este método IRCs muy altos combinados con elevadas eficacias (> 110 lm/W), en luces blancas cálidas entre 2700 K y 4000 K.

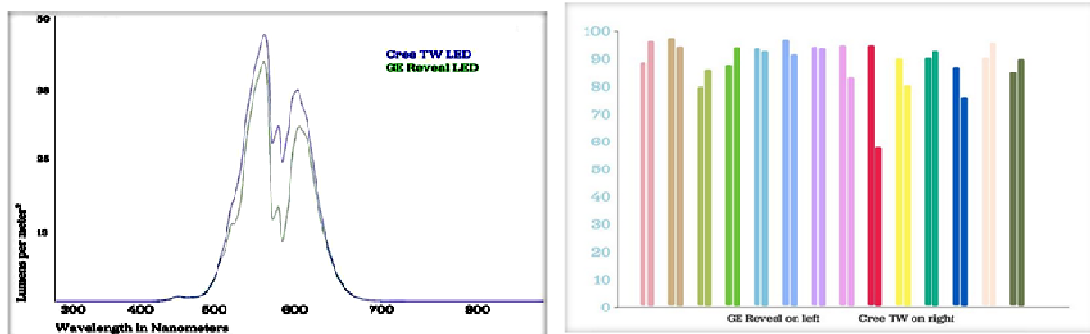


Espectro de emisión
de módulos LED Cree
TMH2



Cree en su línea True White ha producido luz blanca cálida con IRC y eficacia elevada mezclando en sus luminarias LEDs rojos con LEDs que ellos denominan “amarillo no saturado” es decir que emiten luz amarilla de amplio espectro, (LED azul + fósforo amarillo).

Otro método de mejorar el IRC empleado por fabricantes como Cree o GE consiste en añadir un filtro de óxido de neodimio que elimina el exceso de amarillos potenciando los rojos y verdes.⁵³



Espectro de emisión y IRCs especiales de fuentes luminosas Cree True White y GE Reveal con filtros de óxido de neodimio

En ambos casos se consiguen IRCs muy elevados, la fuente de GE Reveal se anuncia con un IRC 90, y la de Cree TW Series LED con IRC 93. En los dos casos este elevado IRC se logra a costa de disminuir la eficacia. Comparado con el LED Cree estándar, que produce 84 lúmenes por vatio, el LED de la serie TW solo produce 59 lúmenes por vatio. El GE Reveal de modo similar alcanza solo los 52 lúmenes por vatio.

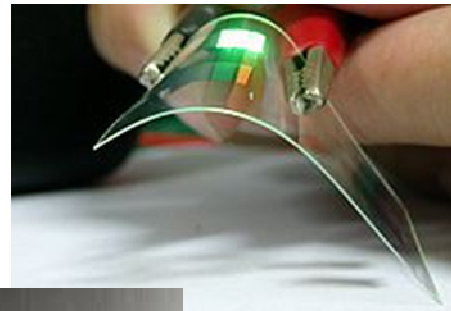
11.- OLEDs

Los OLEDs (*Organic Light Emitting Diodes*) son diodos emisores de luz (LED) en la que la capa emisora electroluminiscente es una película de compuesto orgánico que emite luz en respuesta a una corriente eléctrica. Esta capa de semiconductor orgánico se encuentra entre dos electrodos; normalmente, al menos uno de estos electrodos es transparente. Kodak introdujo los OLED como pantallas digitales en sus cámaras en 1989 y hoy en día se basan en esa tecnología las pantallas de muchos dispositivos portátiles, con gran calidad y eficiencia. Se está desarrollando esta tecnología para crear paneles de luz blanca para la iluminación.

Las "lámparas" OLED son en realidad paneles que emiten la luz de forma homogénea en toda la superficie del panel, a diferencia de los LEDs que son fuentes puntuales. Los paneles OLED emiten luz de muy buena calidad de diferentes temperaturas de color y permiten la variación de la tonalidad.

Los paneles pueden ser flexibles, adoptar diferentes formas o ser transparentes. Varias empresas producen paneles OLED para iluminación como Philips, Osram, LG y Lumiotec. Por el momento, sólo se fabrican en muy pequeñas cantidades y su precio es todavía muy elevado, por lo que no son productos comerciales reales, y sólo se emplean en luminarias de superlujo o como productos de diseño para profesionales de la iluminación.

Se está llevando a cabo un intenso esfuerzo de investigación para mejorar la eficiencia y reducir el coste de los paneles OLED. Hay dos familias principales de OLED: los basados en moléculas pequeñas y los que emplean polímeros.



A la izda. prototipos de paneles OLED, a la derecha dispositivo OLED flexible. Abajo luminaria OLED de sobremesa



APENDICE 1 INFORMACIÓN COMERCIAL DE PRODUCTOS LED

Bombilla

13 W (75 W) Casquillo E27, Blanca cálida

Especificaciones

Características de la bombilla

- Forma: Estándar
- Casquillo: E27
- Voltaje: 220 - 240 V
- Regulable

Consumo de energía

- Vataje: 13 W
- Equivalencia en vatios: 75 W
- Etiqueta de bajo consumo: A+
- Consumo de energía por 1000 horas: 13 kW·h

Características de la luz

- Emisión de luz: 1055 lúmenes
- Ángulo de apertura: 310 grado
- Color: Blanco cálido
- Temperatura del color: 2700 K
- Efecto de iluminación/acabado: Blanco cálido
- Tiempo de encendido: <0,5 s
- Tiempo de encendido hasta alcanzar el 60% de luz: 100 % de luz al instante

- Consistencia del color: 6 SDCM
- Índice de reproducción cromática (IRC): 80

Duración

- Número de ciclos de apagado y encendido: 50.000
- Factor de mantenimiento del flujo luminoso: 0,7
- Vida útil media (a 3 h/día): 20 año(s)

Dimensiones de la bombilla

- Longitud: 122,6 mm
- Diámetro: 66 mm

Otras características

- Contenido en mercurio: 0 mg
- Factor de potencia: 0,6
- Corriente de la bombilla: 62 mA

Valores nominales

- Potencia nominal: 13 W
- Flujo luminoso nominal: 1055 lm
- Vida útil especificada: 20000 hora(s)
- Ángulo de apertura nominal: 310 grado



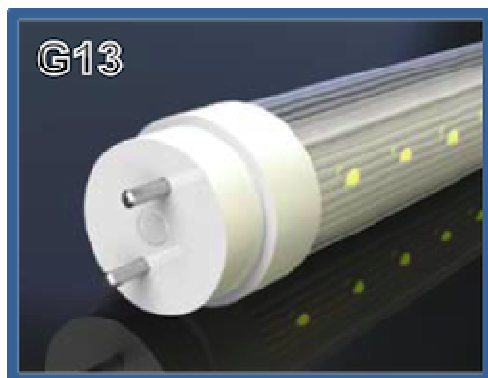
Philips LED
Bombilla

13 W (75 W)
Casquillo E27
Blanca cálida

8718291758501

APENDICE 2. TIPOS DE BASES Y LÁMPARAS ESTÁNDAR

El tipo de conexión, también llamado base o casquillo, es la parte de la lámpara que se conecta con la luminaria para recibir la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento y por lo tanto iluminar. Hay muchos tipos de conexiones, tanto para uso doméstico, como para uso profesional. Aquí mostramos las más habituales en el uso doméstico y profesional.



Medidas del casquillo con rosca Edison

La rosca Edison es el nombre que recibe el mecanismo de ajuste o fijación de una lámpara, desarrollado por Thomas Edison en 1909.

Tipo	Medida Ø	Nombre	IEC
E5	5 mm	Rosca Edison Lilliput (LES)	IEC 60061-1 (7004-25)
E10	10 mm	Rosca Edison Miniatura (MES)	IEC 60061-1 (7004-22)
E12	12 mm	Rosca Edison para Candelabro (CES)	IEC 60061-1 (7004-28)
E14	14-17 mm	Rosca Edison pequeña (SES)	IEC 60061-1 (7004-23)
E17 (110v)	14-17 mm	Rosca Edison pequeña (SES)	IEC 60061-1 (7004-26)
E26 (110v)	26-27 mm	Rosca Edison (Mediana) (ES)	IEC 60061-1 (7004-21A-2)
E27	26-27 mm	Rosca Edison (Mediana) (ES)	IEC 60061-1 (7004-21)
E40	40 mm	Rosca Edison Gigante (GES)	IEC 60061-1 (7004-24)

Conexión en bayoneta y Estándares

Es un tipo de mecanismo de acoplamiento y fijación rápida entre superficies para la interconexión de dos piezas.

Tipo	IEC	DIN
B15d	IEC 60061-1 (7004-11)	DIN 49721
BA15d	IEC 700411 A	DIN 49720
BA15s	IEC 700411 A	DIN 49720
BA20d	IEC 700412	DIN 49730
B21s-4		
B22d	IEC 60061-1 (7004-10)	
B24s-3		
GU10	IEC 60061-1 (7004-121)	
GZ10	IEC 60061-1 (7004-110)	

Conexión Bipin

Es un estándar de la CEI (Comisión Electrónica Internacional) para casquillos de bombillas.

Tipo	Estándar CEI	Distancia entre pines	Diámetro de pines
G4	CEI 60061-1 (7004-72)	4.0 mm	0,65-0,75 mm
GU4	CEI 60061-1 (7004-108)	4.0 mm	0,95-1,05 mm
GY4	CEI 60061-1 (7004-72A)	4.0 mm	0,65-0,75 mm
GZ4	CEI 60061-1 (7004-64)	4.0 mm	0,95-1,05 mm
G5	CEI 60061-1 (7004-52-5)		
G5.3	CEI 60061-1 (7004-73)	5,33 mm	1,47-1,65 mm
G5.3-4.8	CEI 60061-1 (7004-126-1)		
GU5.3	CEI 60061-1 (7004-109)	5,33 mm	1,45-1,6 mm
GX5.3	CEI 60061-1 (7004-73A)	5,33 mm	1,45-1,6 mm
GY5.3	CEI 60061-1 (7004-73B)	5,33 mm	????? mm
G6.35	CEI 60061-1 (7004-59)	6,35 mm	0,95-1,05 mm
GX6.35	CEI 60061-1 (7004-59)	6,35 mm	0,95-1,05 mm
GY6.35	CEI 60061-1 (7004-59)	6,35 mm	1,2-1,3 mm
GZ6.35	CEI 60061-1 (7004-59A)	6,35 mm	0,95-1,05 mm
G9	CEI 60061-1 (7004-129)	9,0 mm	--
G13		13 mm	

Conectores más habituales

A continuación le mostramos algunos de los conectores o casquillos más utilizados:

**Conector E14**

Utilizada en bombillas led de pequeño tamaño, como las bombillas vela o bombillas de gota.

Ejemplos: [Bombilla led 6W E14](#), [Bombilla led 4W tipo vela E14](#)

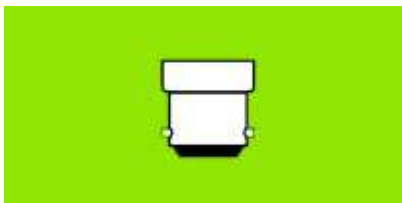
**E27**

El casquillo más extendido en Europa. Lo llevan las bombillas incandescentes, fluorescentes compactas, de halogenuros metálicos..

Ejemplos: [Bombilla led 7W E27](#), [Bombilla PAR 7W E27](#)

**E40**

Igual que las E14 y E27 pero creada para soportar potencias más elevadas.

**B22d**

Usado comúnmente en bombillas incandescentes

**GU10**

Utilizado en las dicroicas led a 220v.

Ejemplos: [Dicroica led 6W GU10](#), [Dicroica led 10W COB GU10](#)

**R7s**

Usada en bombillas halógenas rectas.

Ejemplos: [Bombillas led R7S](#)

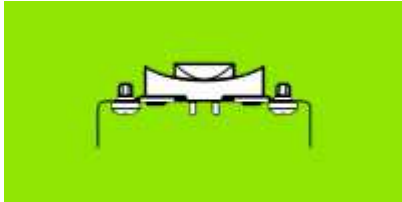
**Fa4**

Usada en bombillas halógenas rectas

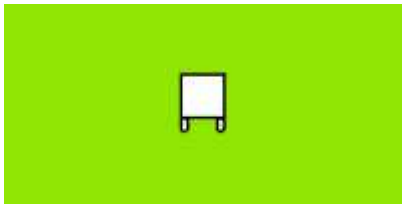
**MR16 (o GU 5.3)**

Mayormente de uso en bombillas halógenas y halógenas dicróicas a 120 V

Ejemplos: [DICROICA LED 6W](#) [DICROICA LED 1W](#)

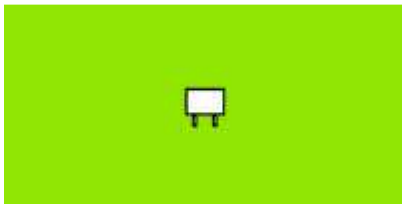
**G53**

Halógenas de parábola de reflexión ancha AR111

**G9**

Bombillas halógenas

Ejemplos: [BOMBILLA LED G9 5W SMD 36x5050 LEDS](#)

**G4**

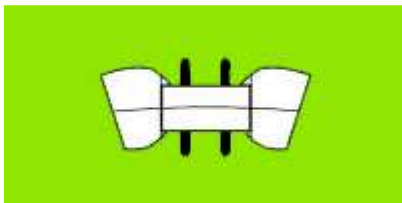
Bombillas halógenas

Ejemplos: [BOMBILLAS LED G4](#)

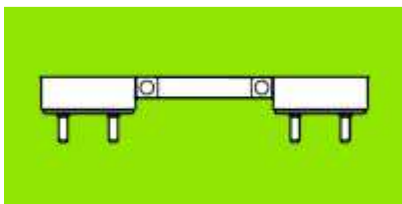
**G13**

Usada en tubos fluorescentes

Ejemplos: [TUBO LED 9W T8 60CM](#), [TUBO LED 14W T8 90CM](#)

**2GX13**

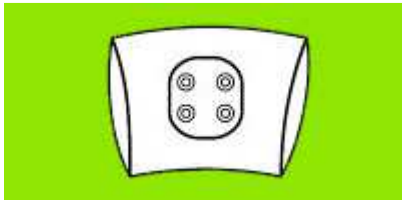
Usada en tubos fluorescentes circulares

**2G13**

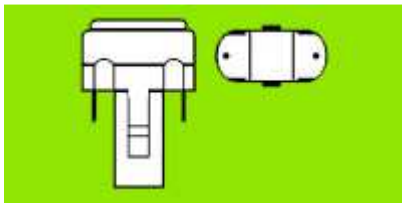
Para tubos fluorescentes dobles

**Fa6**

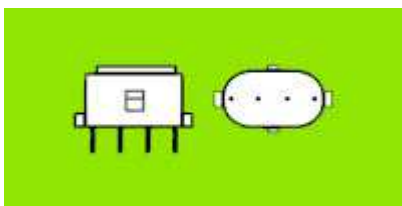
Muy poco habitual, para lámparas de descarga de mercurio a baja presión

**G10q**

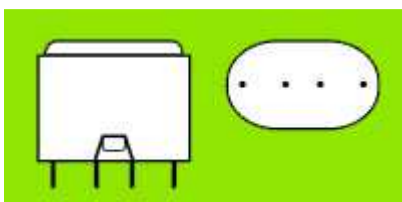
Usada en tubos fluorescentes circulares

**G23**

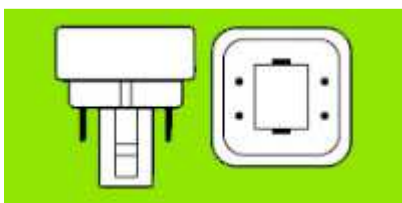
Mayormente usada en bombillas de bajo consumo

**2G11**

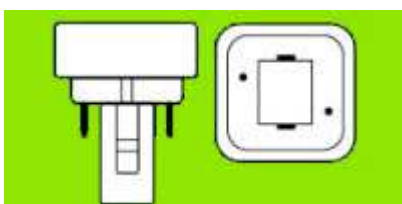
Mayormente usada en bombillas de bajo consumo dobles

**2G7**

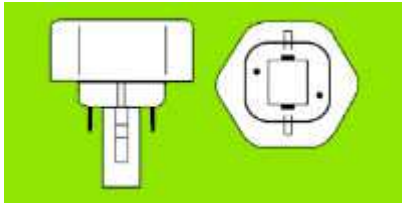
Usada en bombillas de bajo consumo

**G24q**

Usada en bombillas de bajo consumo

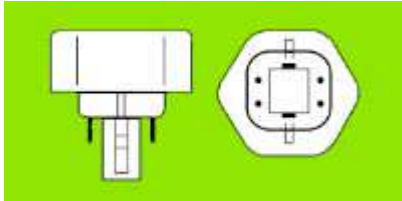
**G24d**

Usada en bombillas de bajo consumo



GX24d

Usada en bombillas de bajo consumo



GX24q

Usada en bombillas de bajo consumo

Formas de lámparas

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

Lenk, Ron y Lenk, Carol "Practical Lighting Design with LEDs" Wiley-IEEE Press (2011)

Schubert, E. Fred "Light Emitting Diodes and Solid-State Lighting" 2ª edición Cambridge University Press (2006)

ARTÍCULOS

Ashdown, Ian. "Thoughts on Color Rendering" (enero de 2014)
<http://agi32.com/blog/2014/01/05/thoughts-on-color-rendering/>

Ashdown, Ian. "Color Rendering Index and LEDs" http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/color_rendering_index.pdf

Bardsley, Norman y otros. "Solid-State Lighting Research and Development Multi-Year Program Plan" (Abril 2014) publicación del departamento de Energía de los EEUU

Barney, Scott "Simplifying the sophisticated: LED driver selection made easy" Leds magazine (Abril 2014)

Conner, Margery. "Measuring light quality for Philips and Cree LED bulbs with the MK350 spectrometer". (5 de enero de 2014).
<http://www.designingwithleds.com/>

Craford, George "Current state of the art in high brightness leds" (2007)
<http://www.aps.org/meetings/multimedia/march2007/upload/craford.pdf>

Craford, George, Holonyak, Nick. "In Pursuit of the Ultimate Lamp" Scientific American (Febrero 2001)

Green, Peter "Buck LED driver with active PFC" Revista Power Electronics (enero 2012)

Haitz, Roland 1 and Tsao, Jeffrey Y. "Solid-state lighting: 'The case' 10 years after and future prospects" Phys. Status Solidi A 208, No. 1, 17–29 (2011)

Holonyak, Nick. y Bevacqua, S. F. "Coherent (visible) light emission from Ga (As_{1-x}P_x) JUNCTIONS" Appl. Phys. Lett. 1, 82 (1962)

Keeping, Steven, "Thermal Effects on White LED Chromaticity" (2013)

Kelly, George "Understand color science to maximize success with LEDs – part 4" (LEDS MAGAZINE Febrero 2013)

Lenk, Ron "An overview of LED drivers" conferencia publicada en la web de LEDS MAGAZINE (2014)

MacAdam, David L. "*Visual Sensitivities to Colour Differences in Daylight*", J.Opt.Soc.Am. 32, 247 (1942)

Meneghesso, G. y otros. "Recent results on the degradation of white LEDs for lighting" (2010) Journal of Physics D: Applied Physics Volume 43 Number 35

Nathan, Marshall I. y Burns, Gerald "recombination radiation in GaAs by optical and electrical injection" Appl. Phys. Lett. 1, 89 (1962)

Patel, Prachi "Una nueva forma de producir LEDs baratos" MIT technology review (21 DE MARZO, 2011)

Rediker, Robert H y otros "Semiconductor maser of GaAs" Appl. Phys. Lett. 1, 91 (1962)

Round, H. J., "A note on carborundum", Electrical World 49: 309. (1907)

Sandahl, LJ y otros "Solid-State Lighting: Early Lessons Learned on the Way to Market" Publicaciones del Pacific Northwest National Laboratory (enero 2014)

Tsao, Jeffrey y otros "Solid-State Lighting: An Integrated Human Factors, Technology and Economic Perspective" revista del IEEE (Agosto de 2009)

Tsao, Jeffrey "Solid-State Lighting: Science, Technology, Economic Perspectives" Conferencia dada en Photonics West en San Francisco, CA. (Enero 2010) <http://www.sandia.gov/~jytsao/>

Widney, Doug "The Battle of the LED Substrates Heats Up" (23 de Febrero de 2012) en <http://www.greentechmedia.com/articles/>

Zheludev, Nikolay. "The life and times of the LED — a 100-year history". Nature Photonics 1

WEBS ESPECIALIZADAS

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>

<http://powerelectronics.com/lighting>

www.designingwithleds.com/

www.electronicsworld.com/news/components/led-lighting

www.edison-techcenter.org

www.ieee.org (web del Institute of Electrical and Electronics Engineers)

www.ledinside.com

www.ledsmagazine.com

www.open-photonics.com

www.sandia.gov/ (web de los Sandia National Laboratories (Albuquerque. Nuevo Méjico) Departamento de Energía de los EEUU)

www.technologyreview.es

Webs de fabricantes de LEDs

www.bridgelux.com/

www.cree.com

www.gelighting.com/LightingWeb/emea/products/technologies/led/lighting/

www.havells-sylvania.com/es

www.lighting.philips.es/lightcommunity/trends/led/

www.omslighting.com/led-academy-en

www.osram.es/osram_es/noticias-y-conocimiento/led-home/index.jsp

www.soraa.com/technology/ (fabricante de LEDs de EEUU)

www.toshiba.com/lighting/

REFERENCIAS Y NOTAS

¹ Tsao, Jeffrey y otros "Solid-State Lighting: An Integrated Human Factors, Technology and Economic Perspective" IEEE (Agosto de 2009)

² En la actualidad no existe un método estandarizado de medir la vida útil de los sistemas de iluminación con LED. Los datos de vida útil de los diferentes fabricantes deben ponerse en duda.

³ Bardsley, Norman y otros. "Solid-State Lighting Research and Development Multi-Year Program Plan" (Abril 2014) publicación del departamento de Energía de los EEUU disponible en http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf

⁴ Round, H. J. (1907), "A note on carborundum", Electrical World 49: 309. La carta de Round está fechada el 9 de febrero de 1907

⁵ La importancia de los descubrimientos de Lósev fue sacada a la luz por Zheludev, Nikolay. "The life and times of the LED — a 100-year history". Nature Photonics 1 (4): pp. 189-192. doi:10.1038/nphoton.2007.34

⁶ Telegrafiya i Telefoniya bez Provodov Nizhniy Novgorod, Rusia

⁷ Fuente de las fotografías <http://www.edisontechcenter.org/LED.html>

⁸ Holonyak, Nick. y Bevacqua, S. F. "Coherent (visible) light emission from Ga (As_{1-x}P_x) JUNCTIONS" Appl. Phys. Lett. 1, 82 (1962)

⁹ Nathan, Marshall I. y Burns, Gerald "recombination radiation in GaAs by optical and electrical injection" Appl. Phys. Lett. 1, 89 (1962)

¹⁰ Rediker, Robert H., Quist, T. M., Keyes, R. J., Krag, W. E., Lax, B., McWhorter, A. L. y Zeigler, H. J. "Semiconductor maser of GaAs" Appl. Phys. Lett. 1, 91 (1962)

¹⁰ Haitz, Roland 1 and Tsao, Jeffrey Y. "Solid-state lighting: 'The case' 10 years after and future prospects" Phys. Status Solidi A 208, No. 1, 17–29 (2011) / DOI 10.1002/pssa.201026349

¹² Figuras del informe anual : "Solid-State Lighting Research and Development Multi-Year Program Plan April 2014" para el Departamento de Energía de los EEUU (oficina para la investigación y desarrollo de la iluminación de la oficina de eficiencia energética y energías renovables.) y de Craford, George "Current state of the art in high brightness leds" <http://www.aps.org/meetings/multimedia/march2007/upload/craford.pdf>

¹³ 2000LM LED MODULE BENCH TEST Issue 64 Dec/Jan 2011/2 http://www.mondoarc.com/technology/LED/1166783/2000lm_led_module_bench_test.html

¹⁴ Texto y figuras tomadas de <http://www.iuteb.edu.ve/carreras/electri/electri1.html>

¹⁵ La electronegatividad es la tendencia o capacidad de un átomo, en una molécula, para atraer hacia sí los electrones. También se define como la fuerza de atracción entre un núcleo y un electrón de un átomo enlazado. Elementos con valores de electronegatividad distantes forman enlaces iónicos, y los enlaces covalentes se dan entre elementos con electronegatividad cercana. Esto se da en elementos próximos en el sistema periódico.

¹⁶ Texto y figuras tomadas de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

¹⁷ La banda prohibida del InN se consideraba anteriormente más alta, en torno a 1,8-2,1 eV. Fue establecida en torno a 0,7 eV por Davydov, V. y otros en Phys. Stat. Solidi (b) 230 (2002 b), R4.

¹⁸ Figura del libro "Light Emitting Diodes and Solid-State Lighting" autor Schubert, E. Fred

¹⁹ Texto y figura extraídos del texto de la asignatura electrónica física (LECCIÓN 5 PORTADORES FUERA DE EQUILIBRIO: DIFUSIÓN Y RECOMBINACIÓN). Universidad de Valencia Disponible en: www.uv.es/electfis/ef/

²⁰ Patel, Prachi "Una nueva forma de producir LEDs baratos" MIT technology review LUNES, 21 DE MARZO, 2011 <http://www.technologyreview.es>

²¹ Widney, Doug "The Battle of the LED Substrates Heats Up" February 23, 2012 <http://www.greentechmedia.com/articles/read/the-battle-of-the-led-substrates-heats-up>

²² "Beyond sapphire: LED substrates from GaN to ZnO, SiC, and Si". Solid State Technology Mayo 2012 <http://electroiq.com/blog/2012/05/beyond-sapphire-led-substrates-gan-zno-sic-si/>

²³ Extractos del texto y figuras de OMS LED Academy (capítulo 3 LED Thermal) disponible en: <http://www.omslighting.com/led-academy-en>

²⁴ http://www.rohm.com/image/image_gallery?uuid=2dcf9049-1b2d-4333-97b9-abae70b4b357&groupId=11303&t=1394500917641

²⁵ Cuadros y datos de Cooper, Julian 2007 <http://ledsmagazine.com/features/4/8/1>

²⁶ Keeping, Steven, "Thermal Effects on White LED Chromaticity" 2013

²⁷ Meneghesso, G., Meneghini, M. y Zanoni, E. "Recent results on the degradation of white LEDs for lighting" 2010 Journal of Physics D: Applied Physics Volume 43 Number 35 Disponible en: http://cms.iopscience.iop.org/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/6a0c2cbc-a7a1-11df-add2-83f7d1cdae0b/Spectra_Meneghesso_small.jpg?guest=true

²⁸ Wikimedia commons LED package.jpg

²⁹ http://www.ledinside.com/interview/2013/9/replacing_aluminum_with_thermoplastic_in_heat_sinks_cuts_cost_by_20_30 en el artículo la empresa de Taiwán Nytex Composite Products Co presenta sus disipadores de calor a base de termoplásticos combinados con aluminio. El material usado tiene menor coeficiente de conductividad que el aluminio pero presenta mejor índice de radiación y puede reducir los costes hasta un 30% respecto a los disipadores convencionales de aluminio.

<http://www.coolpolymers.com/heatsinkstms.asp>. En este artículo, la empresa californiana Cool Polymers presenta disipadores construidos con un polímero de elevada conductividad térmica.

³⁰ Datos basados en un prospecto del Oak Ridge National Laboratory del departamento de energía de los Estados Unidos publicado en <http://www.led-na.com/wp-content/uploads/2013/08/Graphite-Foam-Information.pdf>

³¹ <http://www.ledsmagazine.com/content/dam/leds/migrated/objects/news/10/1/13/SoraaFigTwo01212013.jpg>

³² Extractos del texto y figuras de OMS LED Academy (capítulo 4 LED controls) disponible en <http://www.omslighting.com/led-academy-en> OMS es un fabricante de aparatos de iluminación LED con sede en Eslovaquia

³³ Extractos del texto y figuras tomadas de Lenk, Ron "An overview of LED drivers"

³⁴ Green, Peter "Buck LED driver with active PFC" en la revista Power Electronics (enero 2012) disponible en <http://powerelectronics.com/lighting/buck-led-driver-active-pfc>

³⁵ <http://eneri-source.wikispaces.com/dimming>

³⁶ Extractos del texto y figuras tomados de :

- OMS LED Academy (capítulo 4 LED controls) disponible en: <http://www.omslighting.com/led-academy-en>
- "Thermal Management of Cree® XLamp® LEDs" disponible en: www.cree.com/XLamp

³⁷ Extractos del texto y figuras tomados del artículo "*LED Color Mixing: Basics and Background*" disponible en www.cree.com/xlamp

³⁸ Cuerpo negro o radiador ideal es un cuerpo ideal que absorbe totalmente la radiación que incide sobre él, sin reflejar ni transmitir nada. La radiación emitida por un cuerpo negro es no polarizada, isotrópica y continua y depende de la temperatura. La energía emitida para cada longitud de onda se calcula mediante la función o Ley de Planck:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}$$

³⁹ "*Talking Photometry: LED Colour Difference Metrics: SDCM & MacAdam Ellipses*"

http://www.photometrictesting.co.uk/File/blog_LED_colour_difference.php

⁴⁰ http://www.havells-sylvania.com/es_ES/lighting-help-centre/technical-information

⁴¹ MacAdam, David L. "*Visual Sensitivities to Colour Differences in Daylight*", J.Opt.Soc.Am. 32, 247 (1942)

⁴² ANSI C78.377-2008 "*Especificación para la cromaticidad en la iluminación con productos de Estado Sólido*", ENERGY STAR® Program Requirements for Solid State Lighting Luminaires

⁴³ Especificación voluntaria de calidad de las lámparas LED de la Comisión de Energía de California

⁴⁴ <http://www.lrc.rpi.edu/education/learning/terminology/cri.asp>

⁴⁵ Extractos del texto y figuras tomados de los capítulos 16-19 del libro "*Light Emitting Diodes and Solid-State Lighting*" autor Schubert, E. Fred

⁴⁶ CIE son las siglas de la Commission internationale de l'éclairage, con sede en Viena, que es la autoridad internacional en luz, iluminación, color y espacios de color.

⁴⁷ Ashdown, Ian. "Thoughts on Color Rendering" (enero de 2014) disponible en

<http://agi32.com/blog/category/color-rendering-index-cri/>

Ashdown, Ian. "Color Rendering Index and LEDs" LED Measurement Series: Building Technologies Program. Disponible en:

http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/color_rendering_index.pdf

⁴⁸ CIE Technical Report 177:2007

⁴⁹ La Comisión de Energía de California ha adoptado una especificación voluntaria de calidad de las lámparas LED que usen casquillos de rosca Edison E26 y otras bases estandarizadas por la ANSI.

Esta especificación se ha desarrollado en vista a las conclusiones de una evaluación de los programas de incentivo de las lámparas fluorescentes compactas (CFL), según las que el bajo rendimiento de las lámparas CFL era un gran obstáculo para una mayor penetración en el mercado de esos productos.

- 1) Temperatura de color y consistencia del color. La temperatura de color debe estar dentro de una elipse de Macadam de 4 pasos de los puntos de 2700K o 3000K. (Menos pasos crean una menor variación de color y un color más uniforme para cada temperatura de color). La especificación ENERGY STAR exige una tolerancia de la elipse de MacAdam de 7 pasos.
- 2) Rendimiento cromático. IRC ≥ 90 con un R9 > 50 para garantizar una mejor representación de los colores. ENERGY STAR sólo requiere CRI ≥ 80 con un R9 > 0
- 3) atenuación luminosa- no debe producir parpadeo ni ruido desde 10-100%. Los procedimientos de prueba serán los mismos que los del nuevo estándar ENERGY STAR
- 4) Vida útil / garantía. Deben cumplir con requisitos mínimos ENERGY STAR sobre vida útil de la lámpara. Las lámparas deben tener una garantía de sustitución gratuita de como mínimo

cinco para usos domésticos en interior y exterior. ENERGY STAR sólo se requiere una garantía de tres años.

- 5) Distribución de Luz – las lámparas omnidireccionales y los focos deben cumplir con los requisitos de ENERGY STAR. Los ángulos de haz deben tener entre 45° y 110° con el 10% de los lúmenes totales emitidos en la zona comprendida entre 60° y 90°. La especificación de calidad de California no reconoce las clasificaciones "semidireccional" ni "salida de luz no estándar".

⁵⁰ <http://www.electronicweekly.com/news/components/led-lighting/colour-rendering-from-led-lighting-2011-08/>

⁵¹ Kelly, George "Understand color science to maximize success with LEDs – part 4" (LEDS MAGAZINE Febrero 2013)

⁵² <http://www.open-photonics.com/featured-technologies/high-cri-leds>

⁵³ Conner, Margery. "Measuring light quality for Philips and Cree LED bulbs with the MK350 spectrometer". 5 de enero de 2014. <http://www.designingwithleds.com/>