



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN**

**“EL DIODO EMISOR DE LUZ, UNA ALTERNATIVA DE  
AHORRO DE ENERGIA EN ILUMINACIÓN”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA**

**PRESENTA:**

**ROBERTO GUEVARA DE LOS SANTOS**

**ASESOR: ING. ABEL VERDE CRUZ**



**MÉXICO**

**2009**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor de esta tesis desea dar las gracias a mis padres: Don Manuel Guevara Torres y Petrita De los Santos Rojas por su amor, apoyo, confianza, esfuerzo, tolerancia, ánimo y sacrificio a lo largo de todo este tiempo en que nuestro sueño se vuelve realidad. A mi familia, Manuelito, Paulina, Ernesto, Fernando, Jacke, Carlos Hdez., Francis, Araceli, Itzel, Perla, Russell, Alejandra, Bryan, Kevin, Armando, Eduardo y Gerardo; especialmente a mis hermanos Gabriel, Guadalupe, José Manuel, Julio Cesar y Raúl, y que debido a su ejemplo, apoyo, amistad y entusiasmo, me alentaron a no declinar y llegar a la meta prometida. Gracias Ivonne por tu amor, consejos, entusiasmo y ayuda en éste momento de mi vida. A mis profesores de la FES, que a lo largo de la carrera contribuyeron al enriquecimiento de mi saber; en especial a Ing. Abel Verde Cruz por todo su apoyo, paciencia y amistad mostrada en ésta etapa. A mis amigos que ya no están y a los que permanecen a mi lado hechandome porras y choteos, Elena, Jenny, LDaniel, Lili, Oscar, Raúl, Santa, Sandra, Sergio, Vero, Yera y demás amigos que me faltaron. A los amigos de la empresa “Consortio Empresarial BACE.” por darme su amistad, por confiar en mí y darme la oportunidad de entrar al campo laboral donde encontré la llave para mi desarrollo profesional; a Enrique, Félix, Jesús y Mauricio; así mismo, a todos aquellos que creyeron en mi dándome su solidaridad con ánimo para concluir ésta etapa.

Así mismo agradezco infinitamente a los miembros del consejo universitario.

# ÍNDICE

Índice	Página
Introducción	I
CAPITULO 1 GENERALIDADES	
1.1	LA LUZ, LUZ MONOCROMÁTICA, LUZ NEGRA.....1
1.2	EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO, ESPECTRO DE LA LUZ BLANCA.....4
1.2.1	Radiación electromagnética, La teoría ondulatoria de la luz y el Efecto Raman.....7
1.3	LUZ POLARIZADA .....12
1.4	COLOR, COLORES PRIMARIOS.....13
1.4.1	Absorción.....16
1.5	TEMPERATURA DEL COLOR Y EL ARCOÍRIS.....17
1.6	EL OJO HUMANO (VISIÓN DE LA LUZ).....20
1.6.1	Visión – Luz.....23
1.6.2	El ojo y sus componentes (La retina, la pupila, la córnea, El iris).....25
1.6.3	Visión nocturna.....27
1.7	CONCEPTOS LUMÍNICOS, INCANDESCENCIA, LUMINISCENCIA, LA FLUORESCENCIA Y LA FOSFORESCENCIA, LA FOTOLUMINISCENCIA, OTRAS LUMINISCENCIAS.....27
1.8	ÓPTICA GEOMÉTRICA, ÓPTICA FÍSICA, LEY DE SNELL, LEYES DE LA REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN, LA FIBRA ÓPTICA Y LA INTERFERENCIA Y DIFRACCIÓN EN LAS BURBUJAS DE JABÓN.....31
1.9	EMISIÓN ESTIMULADA Y EL HOLOGRAMA.....36
1.10	SEMICONDUCTORES DE JUNTURA, CONDUCTORES, DIELECTRICOS, DOPAJE.....38
1.10.1	Estructura de un semiconductor, el Silicio y el Germanio.....41
1.10.2	Los semiconductores tipo P y tipo N.....43
1.10.3	Corriente de arrastre, Corriente de difusión y Semiconductor Unión P-N.....45

## CAPITULO 2 CONCEPTUALIZACIÓN DEL DIODO Y FUENTES DE ILUMINACIÓN

2.1	EL DIODO Y LA RECTIFICACIÓN.....	48
2.1.1	Polarización directa e inversa de un diodo.....	49
2.2	DIFERENTES DIODOS.....	51
2.3	EL DIODO EMISOR DE LUZ - LIGHT-EMITTING DIODE (LED), SU ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO.....	53
2.4	TIPOS DE LÁMPARAS.....	58
2.4.1	Lámparas incandescentes convencionales.....	59
2.4.1.1	Formas y tipos.....	62
2.4.2	Lámparas incandescentes con halógeno.....	64
2.4.3	Lámparas de vapor de sodio (baja presión SBP) y Lámparas de vapor de sodio (Alta presión SAP).....	65
2.4.4	Lámparas de vapor de mercurio alta presión.....	67
2.4.5	Lámparas de Haluros Metálico.....	68
2.4.6	Lámparas Contacto Fluorescentes CFL´s.....	69

## CAPITULO 3 APLICACIÓN DEL DIODO EMISOR DE LUZ COMO ALTERNATIVA DE AHORRO

3.1	OFERTA DE LARGA VIDA Y DURABILIDAD.....	73
3.2	ALTERNATIVAS DE LEDS (DE MONTAJE SUPERFICIAL, .....MULTICOLOR, BICOLOR).....	75
3.2.1	Conexión básica (Serie – Paralelo).....	77
3.2.2	Cálculo de los valores de resistencia.....	78
3.2.3	LEDs del mismo color.....	81
3.2.4	LEDs en serie, diferente color.....	82
3.2.5	LEDs en paralelo, mismo color.....	83
3.2.6	LEDs en paralelo, diferente color.....	84
3.2.7	Tendencia “OLEDs”.....	84
3.3	DIFERENCIAS EFECTIVAS ANTE LAS DEMÁS LUMINARIAS.....	86
3.3.1	Cómo elegir el LED o ensamble apropiado.....	88
3.3.2	Características relevantes, difusor y forma.....	88

3.3.4	Controladores diseñados específicamente para LEDs (DRIVERS).....	89
3.4	CARACTERÍSTICAS DE ENTORNO AL CONSIDERAR UNA.LÁMPARA.....	92
3.4.1	Aplicaciones.....	93
3.4.2	Fuentes de alimentación para LEDs.....	95
3.4.3	Fuentes de alimentación en Modo Pulsado Controlador PWM.....	96
3.4.4	Ventajas y desventajas del Diodo Emisor de Luz.....	98
	CONCLUSIONES.....	99
	BIBLIOGRAFIA.....	101

# INTRODUCCIÓN

El presente trabajo pretende mostrar algunas de las múltiples cualidades del LED, diodo emisor de luz, destacando como principal atributo la iluminación constante anclada en un bajo consumo de energía, subrayando por ello la utilidad de este dispositivo al generar enormes beneficios como son: el bajo consumo de energía, el mantenimiento casi nulo y el contar con una vida aproximada de 60 a 100,000 horas, cualidades por las cuales considero relevante profundizar en dichas cuestiones con intención de matizar sus múltiples aplicaciones, ya que como es sabido el diodo LED, es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones visuales, como indicador de situaciones específicas de funcionamiento.

Por lo tanto, la intención que persigue esta investigación es mostrar los fundamentos que avalan al LED como alternativa de iluminación creciente en nuestro entorno, es decir, si bien el uso del LED es desde hace años una realidad considero necesario retomar las cualidades o características que han colocado en tan poco tiempo a este dispositivo como una alternativa en el ahorro de energía.

Con tal intención el presente trabajo se encuentra integrado por tres capítulos;

En el primer capítulo desarrollo los principales conceptos relacionados con el fenómeno de la luz analizando las distintas formas de percepción, al destacar los diferentes parámetros que engloban las denominaciones técnicas aludiendo a las diversas fuentes de energía, tanto naturales como artificiales. Subrayando el impacto que el estudio del espectro electromagnético ha tenido para la comprensión del fenómeno de la emisión de luz, destacando como eje principal la comprensión del proceso de percepción relacionado tanto con nociones prácticas como lo son las diferentes longitudes de onda a la que pertenecen la radiación electromagnética, como situaciones eminentemente humanas tendientes a la distinción de tonalidades, proceso anclado en el entendimiento del funcionamiento y

características del ojo al enmarcar la relación ligada a la visión de los objetos, siendo necesario entender el porqué de las tonalidades emanadas tanto del fenómeno de difracción como de refracción indagando para ello en el apasionante campo de la óptica con la finalidad de entender el comportamiento del fenómeno de la luz, razón por la cual, el capítulo primero desarrollará los conceptos fundamentales para comprender al LED como alternativa de iluminación.

El segundo capítulo se centra en la descripción física del diodo al destacar los procesos de polarización y funcionamiento tendientes a describir las características de la familia del LED subrayando las principales cualidades que lo colocan como alternativa funcional entre las diversas posibilidades ofrecidas en el mercado, por ello realizamos un balance sobre las ventajas y desventajas que considero ofrece dicho dispositivo en comparación con las bondades ofertadas por lámparas incandescentes y de descarga, razón por la cual, el presente capítulo integra la descripción de distintas formas de iluminación.

El tercer y último capítulo se encuentra referido a las aplicaciones del diodo como emisor de luz resaltando su impacto como alternativa de ahorro, debido a cuestiones prácticas como lo son su larga vida y durabilidad, la variedad de los distintos acoplamientos como los de montaje superficial, bicolor o multicolor, marcando indudablemente las diferencias efectivas ante las demás luminarias, cualidades que considero cada vez son más valoradas y utilizadas por el consumidor de manera implícita o explícita al momento de comparar sobre una u otra iluminación, agregando con ello cuestiones prácticas dirigidas al consumidor, como lo son los criterios propicios que nos permiten diferenciar el ensamble apropiado con LEDs a las distintas necesidades para iluminar.

# Capítulo 1

## GENERALIDADES

### 1.1 LA LUZ, LUZ MONOCROMÁTICA, LUZ NEGRA.

El término “**luz**” proviene del latín **Lux** o *lucís*, con símbolo **lx** y es un agente físico que hace visibles los objetos. La luz se origina con el movimiento acelerado de los *electrones*, — *partícula elemental de carga negativa que forma parte de la familia de los leptones y que, junto con los protones y los neutrones, forma los átomos y las moléculas* — siendo un fenómeno electromagnético, y es sólo una parte diminuta de una amplia gama de ondas electromagnéticas llamado “**espectro electromagnético**”, ver la tabla siguiente. A la luz se le puede considerar también como un flujo de partículas energéticas carentes de masa, a estas partículas se les llamadas **fotones**, que son las partículas que constituyen la luz. La energía de un fotón se expresa mediante la ecuación  $E = h u$ , donde **h** es la constante de *Planck* y **u** es la frecuencia de la luz.

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)
Rayos gamma	< 10 pm >	30,0 EHz
Rayos X	< 10 nm >	30,0 PHz
Ultravioleta extremo	< 200 nm >	1,5 PHz
Ultravioleta cercano	< 380 nm >	789 THz
<b><u>Luz visible</u></b>	< 780 nm >	384 THz
Infrarrojo Cercano	< 2.5 μm >	120 THz
Infrarrojo Medio	< 50 μm >	6,00 THz
Infrarrojo lejano/submilimétrico	< 1 mm >	300 GHz

Microondas	<	30	cm	>	1	GHz
Ultra Alta Frecuencia - Radio	<	1	m	>	300	MHz
Muy Alta Frecuencia - Radio	<	10	m	>	30	MHz
Onda Corta - radio	<	180	m	>	1.7	MHz
Onda Media - Radio	<	650	m	>	650	Khz.
Onda Larga - Radio	<	10	km	>	30	KHz
Muy Baja Frecuencia - Radio	>	10	km	<	30	KHz

### *Bandas del espectro electromagnético*

La **iluminancia** ( $E$ ) es la unidad dentro del *Sistema Internacional* con que se mide un *lux*; es decir, un Lux es la iluminancia recibida, por segundo, y repartida uniformemente en una superficie por un *flujo luminoso* de un *Lumen* por metro cuadrado; donde la intensidad de éste flujo luminoso se mide en candelas. El **Lumen**, de símbolo **lm**, se define como el flujo luminoso producido por el *flujo radiante* emitido por un punto luminoso uniforme, teniendo una intensidad de 1 candela. Por lo que la candela, de símbolo **cd** es la unidad de intensidad luminosa.

Se le llama **luminancia** ( $L$ ) a la relación entre la *intensidad luminosa* de una fuente de luz, emitida en una dirección dada y la superficie iluminada por la fuente proyectada según dicha dirección. Expresa el efecto de luminosidad que una superficie produce en el ojo humano, ya sea dicha fuente primaria (lámpara o luminaria) o secundaria (*plano de una mesa que refleja la luz*). Su unidad de medida es la candela por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2 = \text{lm}/\text{sr m}^2$ ).

Los fotones energéticos de la luz solar estimulan vibraciones de billones de billones de electrones en la estructura molecular de los objetos. Las vibraciones más vigorosas producen calor, mientras que otras más sutiles lanzan nuevos fotones que revelan los colores. Estas vibraciones de energía radiante, tienen frecuencias que revelan los colores. Estas vibraciones de energía radiante, tienen frecuencias que van desde los  $10^3$  a los  $10^{22}$  Hertz. La frecuencia de  $540 \times 10^{12}$  hz corresponde

a una longitud de onda de **555 nm** en el aire, donde ésta radiación, por centímetro cuadrado, equivale a 60 **candelas**.

Por lo tanto, se le considera luz a todo aquello que ilumina los objetos y los hace visibles.

La mayoría de la luz procede de electrones que vibran a diferentes frecuencias, al ser calentados a una temperatura elevada; cuanto mayor es la temperatura, mayor es la frecuencia de vibración y más azul es la luz producida, siendo esto la temperatura del color.

**Luz monocromática.** Una luz monocromática está constituida por ondas electromagnéticas de igual *longitud de onda*, que revela un solo color. Una buena fuente de luz *monocromática* es la lámpara de vapor de sodio y también el láser.

El término “**monocromático**”, proviene de *monocromo*; que significa “de un solo color”.

Aunque la luz es lo único que realmente podemos ver, sabemos que durante el día la principal fuente de luz es el Sol, y después viene la claridad del cielo; la luz artificial son otras fuentes muy frecuentes emisoras de luz, como los filamentos incandescentes de las lámparas ó el gas resplandeciente en los tubos fluorescentes, que en éste caso, la luz se origina con el movimiento acelerado de los electrones; siendo éste un fenómeno del **espectro electromagnético**. Una onda luminosa es la que se origina de un cuerpo luminoso y que transmite su luz.

**Luz negra.** El término de luz negra, es aplicado a la radiación que rodea la región visible del **espectro electromagnético**. La luz negra es la producida por los rayos **ultravioleta** que provoca la “**fluorescencia**” de algunos cuerpos. La luz negra incluye la radiación ultravioleta de mayor longitud de onda y los rayos infrarrojos de menor longitud de onda que limitan con la luz visible.

## 1.2 **EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO, ESPECTRO DE LA LUZ BLANCA**

El espectro electromagnético es un intervalo continuo de ondas de van desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, ver tabla 01. Los nombres descriptivos de sus partes sólo son una clasificación histórica, porque todas las ondas tienen la misma naturaleza, su diferencia está principalmente en la **frecuencia** y en la **longitud de onda**, donde todas las ondas se propagan a la misma rapidez, que es de 300,000 Km/seg. La Luz, por ser energía radiante y debido a que se propaga a través de ondas, cumple con las características físicas de las radiaciones como son la **amplitud, periodo y longitud**.

El término **Frecuencia**, es empleado para indicar el número de veces que se repite, en un segundo, cualquier fenómeno periódico. Cuanto más corto es el objeto, mayor es la frecuencia de vibración.

La velocidad de la onda, su frecuencia y la longitud de onda, están relacionadas entre sí. La longitud de onda, que es la distancia entre dos crestas consecutivas, es inversamente proporcional a la frecuencia y directamente proporcional a la velocidad. En términos matemáticos, esta relación se expresa por la ecuación  $v = \lambda f$ , donde  $v$  es la velocidad,  $f$  es la frecuencia y  $\lambda$  — *letra griega lambda* — es la longitud de onda, ver figura 01. A partir de esta ecuación puede hallarse cualquiera de las tres cantidades si se conocen las otras dos.



Fig. 01. *Forma y descripción de una onda*

La longitud de onda es la distancia a lo largo de la dirección de propagación entre dos puntos con la misma 'fase'. La frecuencia se expresa en hercios (Hz); una frecuencia de 1 Hz significa que existe 1 ciclo u oscilación por segundo. La unidad se llama así en honor del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz.

Las unidades como kilohercios (kHz) — *miles de ciclos por segundo*—, megahercios (MHz) — *millones de ciclos por segundo* — y gigahercios (GHz) — *miles de millones de ciclos por segundo* — se usan para describir fenómenos de alta frecuencia como las ondas de radio.

Las **ondas electromagnéticas** de frecuencias extremadamente elevadas, como la luz o los rayos X, suelen describirse mediante sus longitudes de onda, que frecuentemente se expresan en nanómetros — *un nanómetro, abreviado **nm**, es una milmillonésima de metro* —. Una onda electromagnética con una longitud de onda de 1 nm tiene una frecuencia de aproximadamente 300 millones de GHz.

En el siglo XIX, se descubrió que más allá del extremo **violeta**, del *espectro electromagnético*, podía detectarse una radiación invisible para el ojo humano pero con una marcada acción fotoquímica; llamada radiación ultravioleta. Así mismo, más allá del extremo **rojo** del *espectro electromagnético* se detectó radiación infrarroja que aunque era invisible transmitía energía, como demostraba su capacidad para producir calor.

Como consecuencia, se redefinió el término espectro para que abarcara esas radiaciones invisibles, y desde entonces se ha ampliado para incluir las ondas de radio más allá del infrarrojo y los rayos X y los rayos gamma más allá del ultravioleta.

Los cambios en el movimiento de los electrones exteriores de los átomos dan lugar a espectros en la región visible, infrarroja y ultravioleta. Los cambios en el movimiento de los electrones interiores de los átomos pesados, producen espectros de rayos X.

Los cambios en la configuración del núcleo de un átomo producen espectros de rayos gamma. Los cambios en la configuración de las moléculas producen espectros visibles e infrarrojos.

***Espectro de la luz blanca.*** El sol es una fuente emisora de luz blanca, en espectro continuo, y abarca toda la gama de longitudes de onda visibles. Ya que ésta luz es una mezcla de varios colores, y si se utiliza un prisma de cristal anteponiéndolo en la luz, se observa que la luz se divide formando un espectro que refleja los colores fundamentales que se observan en un arco iris. El prisma desvía, o refracta, más o menos la luz de diferentes colores, la luz **roja** es la menos refractada y la **violeta** la más refractada, (*ver figura 02*).

El eje de propagación de las ondas luminosas es en línea recta, por lo que poseen la característica de que pueden pasar unas a través de otras , sin tener ningún tipo de alteración, por ejemplo, puede pasar un rayo de luz roja por encima de uno de color azul, sin cambiar de dirección ni de color. La luz es invisible al paso por el espacio, a menos de que algún medio la disperse. Así mismo, en el espectro visible las diferencias en longitud de onda se manifiestan como diferencias de color, activando “los sensores” en la **retina** del ojo. Por lo que el color depende tanto de las características de la luz como del funcionamiento de los ojos.

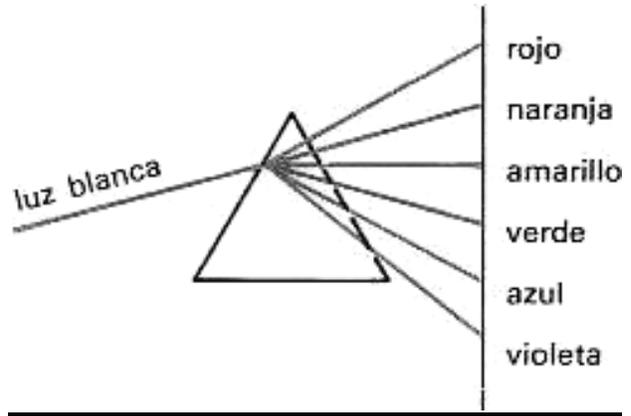


Fig. 02. *Refracción de los colores al pasar por un prisma*

### 1.2.1 *Radiación electromagnética, La teoría ondulatoria de la luz y el Efecto Raman*

**James Clark Maxwell** (*Físico escocés 1831 – 1879*) estableció la teoría de las ondas electromagnéticas en la década de 1860, donde analizó la teoría de los campos electromagnéticos y afirmó que la luz visible era una onda electromagnética y que los cuerpos luminosos emiten luz en forma de energía radiante, y que esta energía radiante se propaga en forma de ondas electromagnéticas.

Por lo tanto, se llama radiación electromagnética a las ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda altas).

La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético, y su clasificación por orden decreciente de frecuencias, o creciente de longitudes de onda, se muestra en la siguiente tabla mencionando los diferentes tipos de radiación:

<i>Tipo de radiación</i>	<i>Longitudes de onda (nm)</i>
Rayos cósmicos	$10^{-5}$ - $10^{-3}$
Rayos gamma	$10^{-3}$ - $10^{-1}$
Rayos X duros y blandos	$10^{-1}$ - 100
Radiación ultravioleta	100 - 380
<b><i>Luz visible</i></b>	<b>380 - 760</b>
Rayos infrarrojos	760 - $10^6$
Radar y microondas	$10^6$ - $10^8$
Televisión y Frecuencia modulada (FM)	$10^8$ - $10^9$
Radio AM (Amplitud Modulada)	$10^9$ - $10^{12}$
Ondas eléctricas	$10^{12}$ - $10^{16}$

Los rayos gamma y los rayos X duros tienen una longitud de onda de entre 0,005 y 0,5 nm. Los rayos X blandos se solapan con la radiación ultravioleta en longitudes de onda próximas a los 50 nm. La región ultravioleta, a su vez, da paso a la luz visible, que va aproximadamente desde 400 hasta 800 nm.

Los rayos infrarrojos o “radiación de calor” se solapan con las frecuencias de radio de microondas, entre los 100.000 y 400.000 nm.

La parte visible del espectro electromagnético ocupa una pequeña franja del mismo espectro; dentro de la cual el ojo humano distingue las diferentes longitudes de onda por las diversas sensaciones de color que originan.

Así el espectro visible está formado por las siguientes radiaciones:

<i>Tipo de radiación</i>	<i>Longitudes de onda (nm)</i>
Violeta	380 – 436
Azul	436 – 495
Verde	495 – 566
Amarillo	566 – 589
Naranja	589 – 627
Rojo	627 – 760

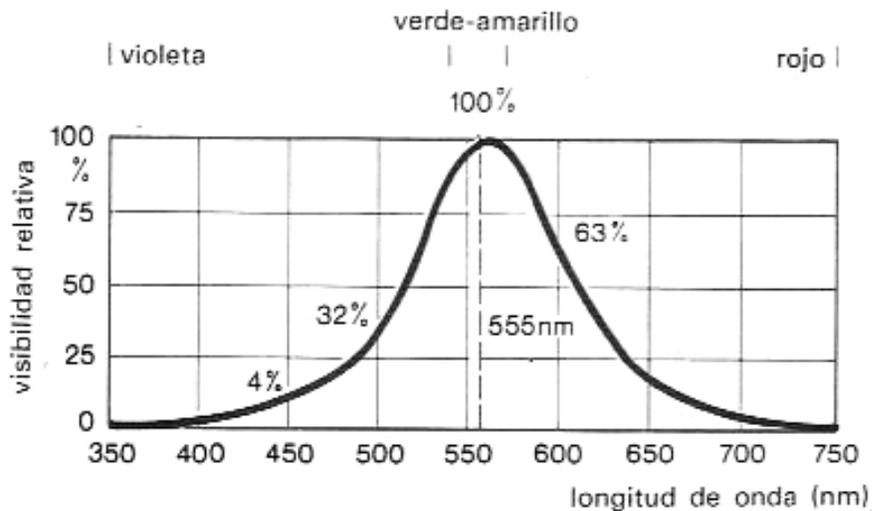
*Longitudes de onda del espectro visible*

Retomando; la luz es la sensación producida en el ojo humano por las ondas electromagnéticas. Se trata de campos electromagnéticos alternativos que transportan energía a través del espacio y se propagan bajo la forma de oscilaciones o vibraciones. Maxwell encontró que, independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad  $c = 299.792 \text{ km/s}$ , (y que actualmente se redondea a  $300,000 \text{ Km/seg}$ ). Todas las radiaciones del espectro electromagnético presentan las propiedades típicas del movimiento ondulatorio, como la difracción (*desvío*) y la interferencia. Dando como resultado la siguiente ecuación: **“La frecuencia es igual a la velocidad de la luz dividida entre la longitud de onda”**.

La radiación electromagnética, queda caracterizada por las siguientes magnitudes:

- Velocidad de propagación (c)
- Frecuencia (f)
- Periodo (T)
- Longitud de onda ( $\lambda$ )

Tanto la frecuencia como el periodo son características invariables de la radiación electromagnética, pero la longitud de onda no lo es, ya que depende de la velocidad de propagación y del medio que se considere.



La grafica muestra un esquema de la longitud de onda aplicada en los colores

**La teoría ondulatoria de la luz.** La velocidad de la luz en las sustancias materiales es menor que en el vacío, y varía para las distintas longitudes de onda; este efecto se denomina *dispersión*. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de una longitud de onda determinada en una sustancia se conoce como *índice de refracción de la sustancia*, para dicha longitud de onda. El índice de refracción del aire es 1,00029 (1) y apenas varía con la longitud de onda.

Las leyes de reflexión y refracción de la luz suelen deducirse empleando *la teoría ondulatoria de la luz* introducida en el siglo XVII por **Christian Huygens** (Físico holandés 1629-1695).

El principio de Huygens afirma que “todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el

frente de onda del que proceden”. Con ello puede definirse un nuevo frente de onda que envuelve las ondas secundarias.

Como la luz avanza en ángulo recto a este frente de onda, el principio de *Huygens* puede emplearse para deducir los cambios de dirección de la luz.

Cuando las ondas secundarias llegan a otro medio u objeto, cada punto del límite entre los medios se convierte en una fuente de dos conjuntos de ondas. El conjunto reflejado vuelve al primer medio, y el conjunto refractado entra en el segundo medio. El comportamiento de los rayos reflejados y refractados se explica por el principio de *Huygens*.

La luz es el resultado de la vibración molecular en el material luminoso; las vibraciones se transmiten a través de un “éter” como movimientos de las ondas (*comparable a las ondas del agua*). Las vibraciones así transmitidas actúan en la retina del ojo estimulando el nervio óptico produciendo la sensación visual.

***El Efecto Raman.*** Este fenómeno fue descubierto por el físico indio *Chandrasekhara Venkata Raman* en 1928. El efecto Raman es un cambio de frecuencia, observado, cuando la luz es dispersada por un material transparente.

Cuando una luz monocromática, como la emitida por un láser, se hace pasar por un gas, líquido o sólido transparente y se observa con un instrumento de observación visual, llamado “*espectroscopio*”; éste, permite dispersar la luz emitida, descomponiéndola en las diferentes radiaciones **monocromáticas**, colores que aparecen, además de la línea espectral producida normalmente por dicha luz; Estas líneas son causadas por fotones que pierden o ganan energía en colisiones elásticas con las moléculas de la sustancia transparente. El espectro de Raman correspondiente a una línea espectral determinada, varía según el material que dispersa la luz.

### 1.3 LUZ POLARIZADA

La luz polarizada está formada por fotones individuales cuyos vectores de campo eléctrico están todos alineados en la misma dirección. En el caso de la luz normal, ésta NO es polarizada, debido a que los fotones emitidos viajan de forma aleatoria; mientras que, en el caso de la luz láser SI es polarizada porque los fotones se emiten coherentemente.

Cuando la luz atraviesa un filtro polarizador, el campo eléctrico interactúa más intensamente con las moléculas orientadas en una determinada dirección. Esto hace que el haz incidente se divida en dos haces con vectores eléctricos perpendiculares entre sí, ver figura 03. Un filtro horizontal absorbe los fotones con vector eléctrico vertical. Un segundo filtro girado  $90^\circ$  respecto al primero, absorbe el resto de los fotones; si el ángulo es diferente sólo se absorbe una parte de la luz.

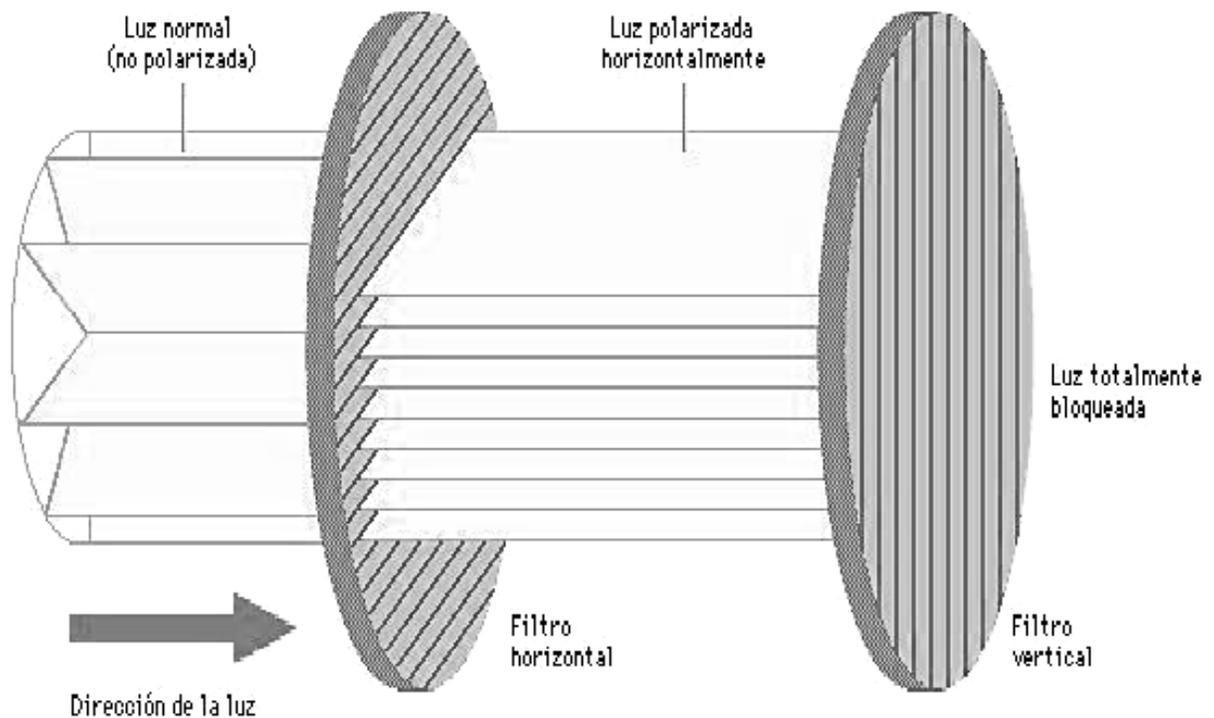


Fig. 03. *Filtro Polarizador*

## 1.4 COLOR, COLORES PRIMARIOS

El color es un fenómeno físico de la **luz**, o de la **visión**, asociado con las diferentes *longitudes de onda*, en la zona visible del *espectro electromagnético*. El color es la impresión que hace en la *retina* del **ojo**, la luz reflejada por los cuerpos.

Los métodos utilizados actualmente para la especificación del color se encuadran en la especialidad llamada **colorimetría**, y éstos métodos consisten en medidas científicas precisas, basadas en las *longitudes de onda* de los tres **colores primarios**, que son: **rojo**, **verde** y **azul**.

En toda radiación luminosa distinguimos dos aspectos, el aspecto cualitativo y el cuantitativo, el primero referido a la intensidad emitida por una fuente luminosa, independientemente de su longitud de onda, a diferencia del segundo, el cual se centra principalmente en la **cromaticidad**; determinada por dos sensaciones que aprecia el ojo: tonalidad y saturación las cuales definen las propiedades de color de una fuente de luz, referidas a:

- La apariencia de color de la fuente, es decir, el color que presenta la propia fuente de luz y:
- La reproducción **cromática** obtenida con una fuente de luz determinada por los colores reproducidos de los objetos iluminados por esa fuente de luz.

Una luz compuesta por vibraciones de una única longitud de onda del espectro visible es cualitativamente distinta de una luz de otra longitud de onda. Esta diferencia cualitativa se percibe subjetivamente como **tonalidad**.

Por ejemplo, la luz con longitud de onda de  $750\text{ nm}$  se percibe como roja, y la luz con longitud de onda de  $350\text{ nm}$  se percibe como violeta. Las luces de longitudes de onda intermedias se perciben como azul, verde, amarilla o anaranjada, ver figura 04.

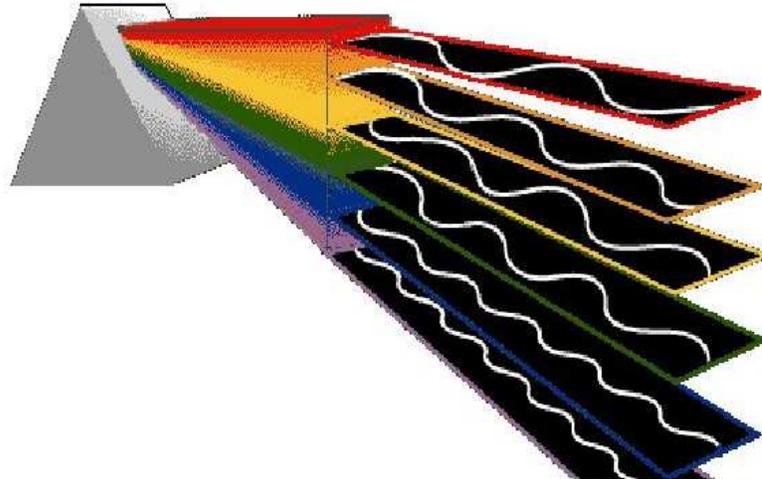


Fig. 04. Cada color del espectro corresponde a una longitud de onda diferente

Dependiendo de dichas características en la composición espectral se determina el color resultante que presenta la propia fuente, al reflejar los colores recibidos, sin embargo ambas dependen de la descomposición espectral, la apariencia de color y la reproducción cromática, de manera independiente.

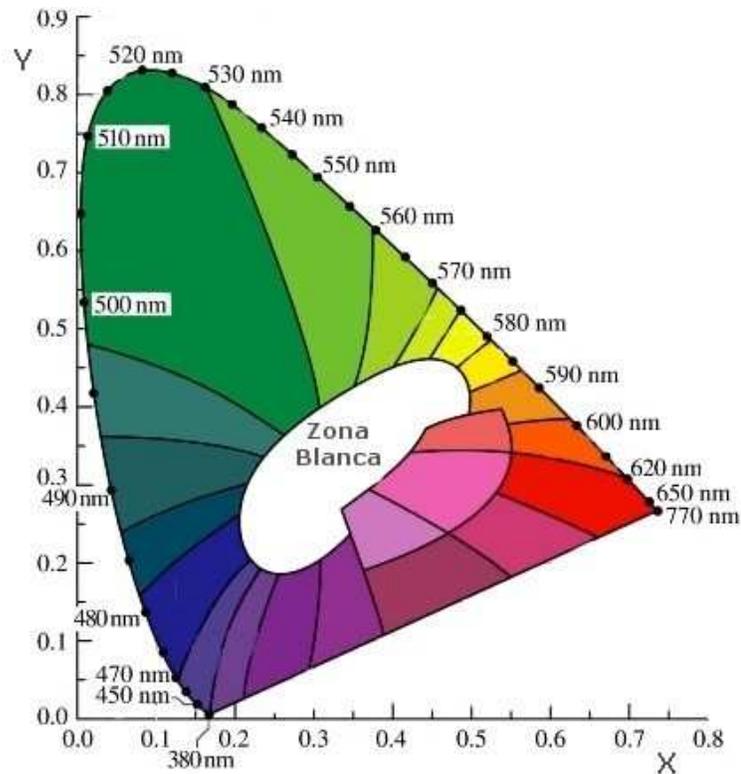


Diagrama de cromaticidad

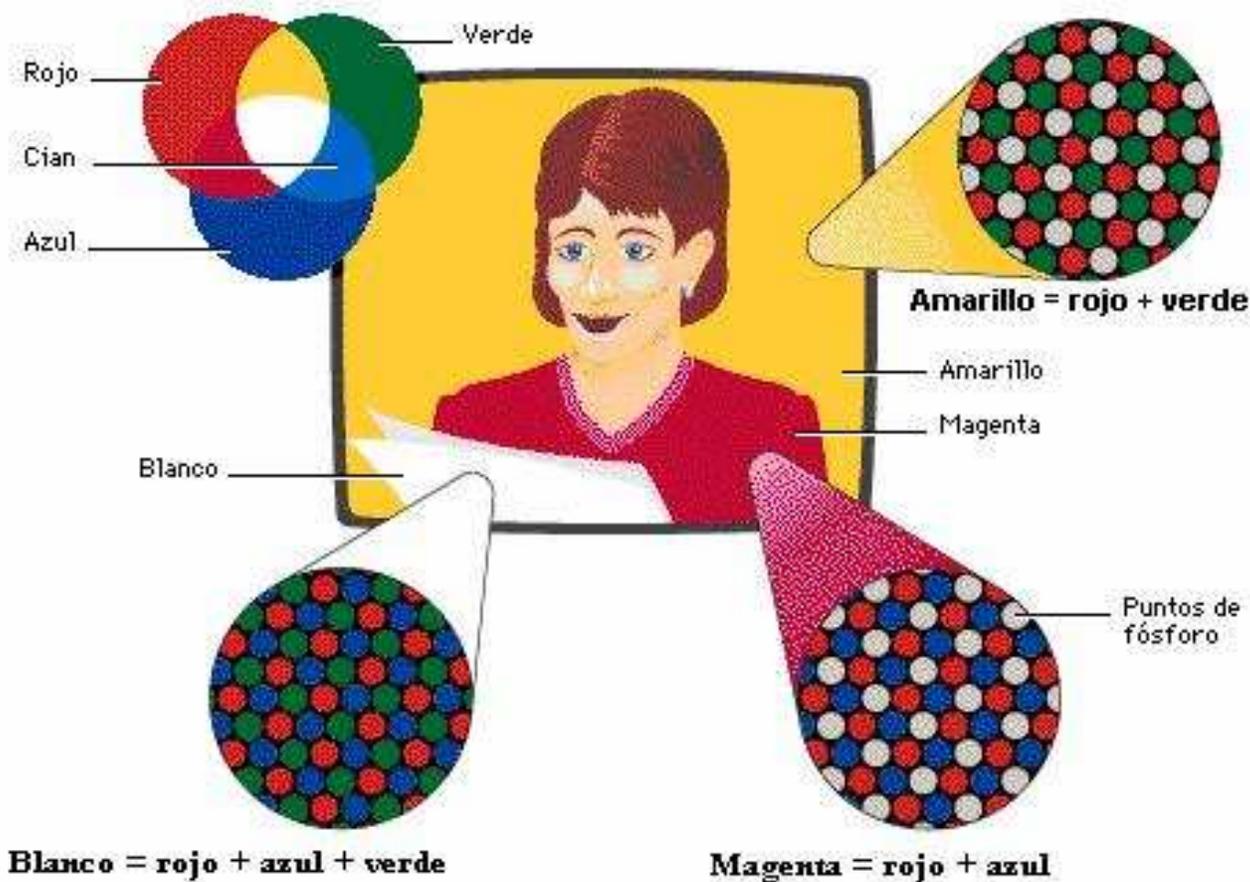
**Colores primarios.** Los colores primarios **rojo, verde y azul**, al mezclarlos entre sí producen otros colores; Así, una mezcla de luces roja y verde de intensidades apropiadas parece exactamente igual a una luz amarilla espectral, aunque no contiene luz de las longitudes de onda asociadas al amarillo.

Puede reproducirse cualquier sensación de color mezclando, aditivamente, diversas cantidades de luces roja, azul y verde. Por eso se conocen estos colores como colores aditivos primarios. Si se mezclan luces de estos colores primarios con intensidades aproximadamente iguales se produce la sensación de **luz blanca**. También existen parejas de colores espectrales puros, que si se mezclan aditivamente, producen la misma sensación que la luz blanca, por lo que se denominan *colores complementarios*.

Todos los objetos tienen la propiedad de *absorber y reflejar* ciertas **radiaciones electromagnéticas**. La mayoría de los colores que experimentamos normalmente son mezclas de longitudes de onda que provienen de la absorción parcial de la luz blanca. Casi todos los objetos deben su color a los filtros, pigmentos o pinturas, que absorben determinadas longitudes de onda de la luz blanca y reflejan o transmiten las demás; estas **longitudes de onda** reflejadas o transmitidas, son las que producen la sensación de color, que se conoce como *color pigmento*.

Los “**colores pigmento**” que absorben la luz de los colores aditivos primarios se llaman **colores sustractivos primarios**; que son: el magenta (*color rojo oscuro*) que absorbe el verde; el amarillo, que absorbe el azul y el cian (*color azul verdoso*) que absorbe el rojo, ver figura 04.

Los colores sustractivos primarios pueden mezclarse en proporciones diferentes para crear casi cualquier tonalidad; los tonos así obtenidos se llaman **sustractivos**. Si se mezclan los tres en cantidades aproximadamente iguales, producen una tonalidad muy oscura, aunque nunca completamente negra.



### 1.4.1 Absorción

En el caso de una sustancia, el proceso de absorción depende de la estructura molecular de la misma. En el caso de los compuestos orgánicos, sólo muestran color los compuestos no saturados y su tonalidad puede cambiarse alterándolos químicamente. Los compuestos inorgánicos suelen ser incoloros en solución o en forma líquida, salvo los compuestos de los llamados *elementos de transición*.

El color también se produce por otras formas que no son la absorción de luz. Algunos cristales presentan diferentes colores según el ángulo que forma la luz que incide sobre ellos. Una serie de sustancias muestran colores diferentes según sean

iluminadas por luz transmitida o reflejada. Algunas sustancias, al ser iluminadas por luz de una determinada tonalidad, la absorben e irradian luz de otra tonalidad, cuya **longitud de onda** es siempre mayor. Este fenómeno se denomina **fluorescencia** o, cuando se produce de forma retardada, se llama **fosforescencia**. Descripción que se detalla en el apartado 1.5 de conceptos lumínicos.

El color azul del cielo se debe a la difusión de los componentes de baja longitud de onda de la luz blanca del Sol por las moléculas de gas de la atmósfera. Una difusión similar puede observarse en una sala de cine a oscuras. Visto desde un lado, el haz de luz del proyector parece azulado debido a las partículas de polvo que hay en el aire.

## **1.5 TEMPERATURA DEL COLOR Y EL ARCOÍRIS**

La temperatura del color es un término que se usa para describir el color de la luz emitida por una fuente luminosa, comparándola con el de un *cuerpo negro*, que es, teóricamente, el “radiante perfecto”.

La mayoría de los cuerpos, al ser calentados, cambian de color al aumentar su temperatura, obteniéndose primeramente un tono rojo oscuro y después rojo claro, pasando por el naranja, amarillo y finalmente blanco, blanco azulado y azul.

Cada incremento de temperatura va emparejado con un aumento de la energía radiante emitida. Por ejemplo, el color de la llama de una vela, es igual al de un cuerpo negro a  $1.800^{\circ}$  K, aproximadamente, por lo que en este caso se dice que la llama tiene una temperatura de color de  $1.800^{\circ}$  K. La luz de una lámpara de filamento de tungsteno de 100 vatios se acerca mucho más al blanco, y el cuerpo negro ha de ser elevado a  $2.875^{\circ}$  K para igualarla. Así, la lámpara tiene una temperatura de color de  $2.875^{\circ}$  K.

La temperatura del color no es una medida de la temperatura real, ya que define solamente el color, y que se puede aplicar únicamente a fuentes que se parezcan mucho al **cuerpo negro**. Los fabricantes son quienes han adoptado éste término ya que existe un nexo entre la temperatura y el color.

Las lámparas de mercurio, lámparas de sodio y las más intensamente coloreadas no se igualan con el cuerpo negro a ninguna temperatura, y por ello no se les puede asignar ninguna temperatura. Los valores de temperatura de color que a veces se dan por conveniencia a varios tipos de lámparas fluorescentes “blancas”, solo pueden considerarse como aproximaciones. Así, el parámetro que caracteriza la tonalidad de la luz emitida recibe el nombre de “**temperatura del color**”.

La temperatura de color se mide en grados kelvin ( $^{\circ}$  k), su relación con los grados centígrados es:

$0^{\circ}$  k =  $-273.00^{\circ}$  C. La siguiente tabla muestra los parámetros aproximados de algunas fuentes de iluminación:

TEMPERATURA DEL COLOR (GRADOS Kelvin) (Valores aproximados)	
Cielo azul	10.000 –
Cielo cubierto	30.000
Luz solar al medio día	7000
Lámparas fluorescentes:	
Luz del día	5250
Blanca fría	6500
Blanca	4500
Blanca caliente	3500
Lámpara	

incandescente	
“luz del día” 500	
váticos	3000
Lámpara fotográfica	4000
Lámparas	
incandescentes	3400
de servicio general	2500 – 3050
Llama de bugía	1800

*Tabla de la temperatura del color*

**El Arcoíris.** Un ejemplo real de lo que hasta el momento se ha descrito, y pretendiendo hacer más comprensible el tema de la luz, describo el fenómeno del “**arcoíris**”. Como si nombre lo indica, el arco iris es un arco luminoso que muestra los colores del *espectro*, dispuestos ordenadamente. El arcoíris se origina por gotas de agua que caen por el aire, descomponiendo la *luz blanca* solar y observándolo en el cielo, en la dirección opuesta al Sol, cerca de lluvia o de agua pulverizada en las cascadas.

Los colores se colocan, desde el primario, con el rojo en el lado externo, siendo ésta luz la que menos se desvía y la violeta la que más. Sobre este arco perfecto hay otro secundario donde los colores están invertidos.

Cuando un rayo de Sol penetra en una gota de lluvia, éste se **refracta** (o *desvía*) en la gota, y se refleja en su interior de tal forma que aparece un espectro de colores, cabe recordar que la **refracción** es distinta para la luz de distintos colores por las *longitudes de ondas*. Sin embargo, sólo pueden verse cuando el ángulo de reflexión entre el Sol, la gota de agua y la línea de visión del observador se sitúa entre 40° y 42°.

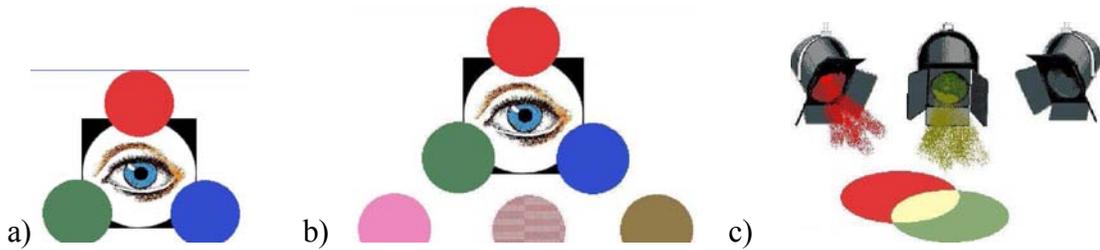
Cuando el Sol está bajo en el cielo, el arco iris aparece alto; al subir el Sol, el arco iris parece descender manteniendo el ángulo crítico entre  $40^\circ$  y  $42^\circ$ . A más de  $42^\circ$  sobre el horizonte, no se puede ver el arco iris porque el ángulo requerido pasa por encima de la cabeza del observador.



Imagen 01. *Arcoíris primario atravesando el cielo después de una tormenta.*

## 1.6 **EL OJO HUMANO (VISIÓN DE LA LUZ)**

Podemos ver los colores porque el ojo humano contiene receptores para los tres “**colores primarios**”: **rojo**, **verde** y **azul**, fig. a). Cuando se estimulan los receptores, los ojos pueden percibir todos los colores, fig. b); y cuando se estimulan los receptores de color, por pares, percibimos el amarillo, el cian (*azul-verdoso*) y el magenta (*rojo azulado*). Otros colores como el anaranjado, el gris o el marrón, se perciben cuando algunos de los receptores solo están estimulados parcialmente, fig. c).



Cuando se producen colores combinando luces de distintas longitudes de onda, el proceso se conoce como mezcla aditiva de colores, fig. d). La mezcla de pigmentos de distintos colores se denomina sustractiva, cuando la luz blanca incide sobre una superficie coloreada, algunas longitudes de onda son absorbidas y otras son reflejadas, fig. e) y e').

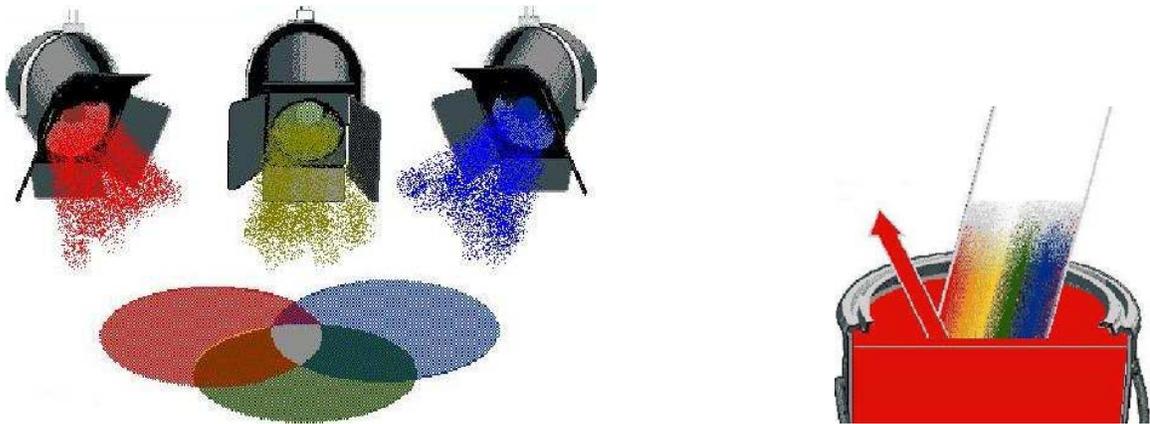


Fig. d) Color aditivo con 75 % rojo + 75 % verde + 23 % = **gris**      Fig. e) Solo se refleja el rojo

Nuestros ojos interpretan el color de la superficie según las longitudes de onda de luz que son reflejadas; en el caso del color blanco se reflejan todos los colores, fig. f) y en el caso del color negro, no se refleja ningún color, todos los colores son absorbidos, fig. g).



Fig. e')



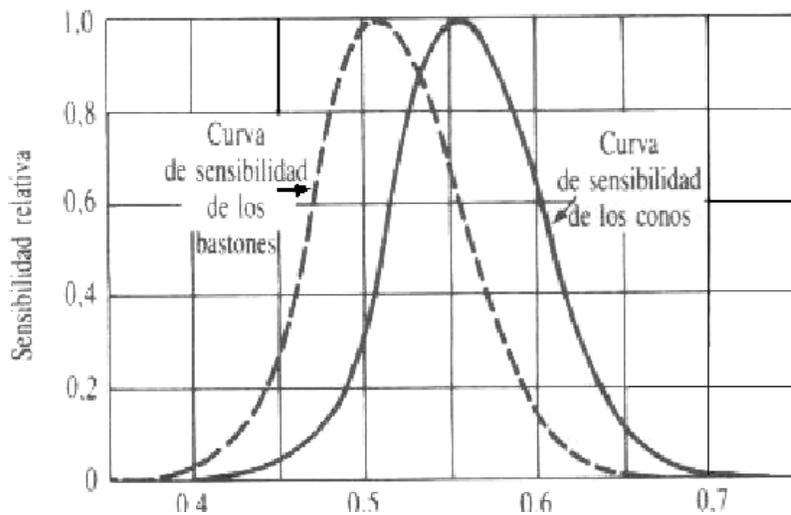
Fig. f)



Fig. g)

La sensibilidad del ojo humano no es constante en todo el *espectro visible*, sino que varía con la **longitud de onda**, además tan bien influye el grado de "**luminosidad**" en el cual se desarrolla la función visual.

En la siguiente grafica, en la curva de la derecha se muestra la sensibilidad espectral que se origina debido a las condiciones de luminosidad habituales en el diseño lumínico; en tanto que en condiciones de oscuridad sería válida la curva de la izquierda, produciéndose el máximo de sensibilidad del ojo a diferentes longitudes de onda en ambas situaciones.



*Sensibilidad espectral del ojo humano* (Longitud de onda en micrones)

Si nos referimos únicamente a la curva de visión diurna, *curva de sensibilidad de los conos*, (derecha), se observa que la respuesta visual es máxima en la zona verde-amarilla del espectro visible, correspondiendo a una longitud de onda de  $555 \text{ nm}$ . Esto condiciona la eficiencia de las fuentes de luz, siendo más eficientes aquellas fuentes de luz que consigan emitir la mayor parte de su radiación luminosa en las proximidades de la longitud de onda que corresponde a la máxima sensibilidad espectral; dicho de otro modo, para conseguir la misma sensación luminosa, se precisará menos energía emitida a  $555 \text{ nm}$ , que en cualquier otra longitud de onda.

Nuestra percepción del color, no sólo depende de la cantidad de luz de las diferentes *longitudes de onda* que nos llega; por ejemplo, cuando sacamos un objeto iluminado con luz artificial, que contiene mucha luz rojiza, de altas longitudes de onda, a la luz del día, que contiene más luz azulada de longitudes de onda cortas, la composición de la luz reflejada por el objeto cambia mucho; sin embargo, no solemos percibir ningún cambio en el color del objeto.

Esta constancia del color se debe a la capacidad del sistema formado por **el ojo y el cerebro** para comparar la información sobre longitudes de onda procedente de todas las partes de una escena.

### 1.6.1 *Visión - Luz*

El ojo humano responde solamente a la energía que está dentro del espectro visible, el cual comprende una estrecha banda de longitudes de onda entre los  $3800$  y  $7600\text{\AA}$  (*Angstrom*) — *unidad de medida de las longitudes de onda y equivalente a la diezmillonésima parte de un milímetro o a la diezmillonésima ( $10^{-10}$ ) parte del metro*— Por lo tanto, es la luz la energía correspondiente a esta región, evaluada de acuerdo con la curva espectral de eficiencia luminosa o “**curva de sensibilidad del ojo**”.

La función del ojo es traducir las vibraciones electromagnéticas de la luz en un determinado tipo de impulsos nerviosos que se transmiten al cerebro, ya que el órgano que efectúa el proceso de la visión es el cerebro; que permite distinguir variaciones muy pequeñas de forma, color, luminosidad y distancia en la visión humana y otros organismos complejos.

La luz entra al **ojo** por la cubierta transparente llamada **córnea**, que produce 70% de la desviación de la luz antes de que pase por la **pupila** (*que es una abertura en el iris*). A continuación la luz pasa por una lente, que sólo proporciona la desviación adicional para que las imágenes, de los objetos cercanos, queden enfocadas en la capa que está en el fondo del ojo. Esta capa es la **retina**, y es en extremo sensible.

La **retina** no es uniforme. Hay una mancha en nuestro campo de visión, llamada **fóvea** o mancha amarilla (*que está en el centro de la mácula lútea*). En la fóvea se puede captar todo con mayor detalle, que en las partes laterales del ojo. También hay un lugar en la retina donde salen los nervios, se concentran con el nervio óptico y llevan toda la información al exterior, siendo éste el llamado "**punto ciego**".

La retina está formada por diminutas antenas que resuenan con la luz que les llega. Hay dos clases de antenas: los **bastones** y los **conos**. Hay tres clases de cono: los que se estimulan con la luz de baja frecuencia, los que se estimulan con la luz de frecuencia intermedia y los que se estimulan con la luz de mayor frecuencia. Los bastones predominan en la periferia de la **retina**, mientras que las tres clases de conos son más densos hacia la **mácula lútea** (*que se encuentra detrás de la pupila*).

La visión de los colores se debe a los conos; en consecuencia, percibimos el color con más agudeza enfocando una imagen en la fóvea, donde no hay bastones.

Los primates y cierta especie de ardilla terrestres son los únicos mamíferos que tienen tres clases de conos, y tienen una visión total de los colores. Las **retinas** de

los demás mamíferos están formadas principalmente por *bastones*, que sólo son sensibles a la luz o a la oscuridad, como una fotografía o película de blanco y negro.

Otra cosa que distingue a los bastones y a los conos es la intensidad de la luz a la que responden. Los conos requieren más energía que los bastones para poder “disparar” un impulso por el sistema nervioso. Si la intensidad luminosa es muy baja, lo que veamos no tiene color. Vemos bajas intensidades con los bastones. La visión adaptada a la oscuridad se debe casi totalmente a los bastones, mientras que la visión con mucha iluminación se debe a los conos.

La luz más brillante que puede percibir el ojo humano, sin dañarse, tiene un brillo 500 veces mayor que el brillo mínimo perceptible. Debido a un efecto llamado *inhibición lateral* no percibimos las diferencias reales de brillo; los lugares más brillantes en nuestro campo visual no pueden opacar al resto, porque siempre que una célula receptora en nuestra retina manda una fuerte señal de brillantez a nuestro cerebro, también indica a las células vecinas que aminoren sus respuestas. De este modo emparejamos nuestro campo visual, lo cual nos permite percibir detalles en zonas muy brillantes y también en zonas muy oscuras.

### **1.6.2 El ojo y sus componentes (La retina, la pupila, la córnea, El iris)**

**La retina** es sensible a la luz y es la capa más interna en el ojo compuesta por células nerviosas. Las células receptoras sensibles a la luz se encuentran en su superficie exterior detrás de una capa de tejido pigmentado.

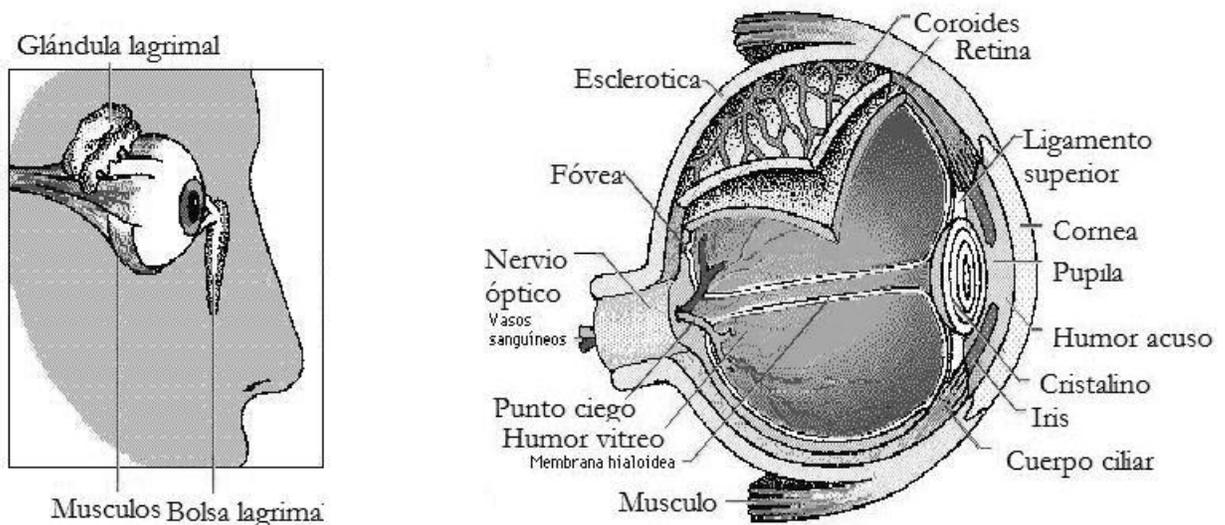
**La pupila** tiene por detrás una pequeña mancha de color amarillo llamada *mácula lútea*; en su centro se encuentra la *fóvea central*, que es la zona del ojo con mayor agudeza visual.

**La córnea** es una membrana resistente, compuesta por cinco capas, a través de la cual la luz penetra en el interior del ojo.

**El iris** es una estructura pigmentada suspendida entre la córnea y el cristalino y tiene una abertura circular en el centro, la pupila. El tamaño de la pupila depende de un músculo que rodea sus bordes, aumentando o disminuyendo cuando se contrae o se relaja, controlando la cantidad de luz que entra en el ojo.

En la imagen derecha: La cantidad de luz que entra en el ojo se controla por la pupila, que se dilata y se contrae con este fin. La córnea y el cristalino, cuya configuración está ajustada por el cuerpo ciliar, enfocan la luz sobre la retina, donde unos receptores la convierten en señales nerviosas que pasan al cerebro.

En la imagen izquierda: Las glándulas lagrimales secretan lágrimas que limpian la parte externa del ojo de partículas y que evitan que la córnea se seque. El parpadeo comprime y libera el saco lagrimal; con ello crea una succión que arrastra el exceso de humedad de la superficie ocular.



*Esquema del ojo*

### 1.6.3 *Visión nocturna*

El mecanismo de la visión nocturna implica la sensibilización de los bastones gracias a un pigmento, llamado “púrpura visual” o *rodopsina*, que es sintetizado dentro de los bastones. La rodopsina se blanquea por la acción de la luz y los bastones deben reconstituirla en la oscuridad; es por esto que una persona que entra en una habitación oscura procedente del exterior con luz del sol, no puede ver hasta que el pigmento no empieza a formarse. Cuando los ojos son sensibles a unos niveles bajos de iluminación, quiere decir que se han adaptado a la oscuridad.

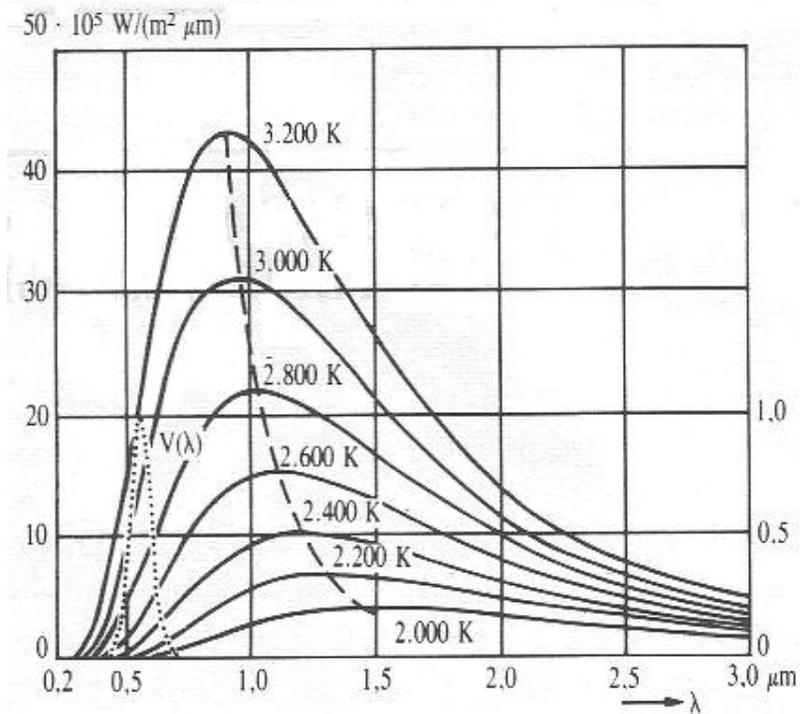
Para proteger los conos, de la sobre exposición a la luz, existe un pigmento marrón o parduzco, producido en la capa externa de la retina. Cuando la luz intensa alcanza la retina, los gránulos de este pigmento emigran a los espacios que circundan a los conos, revistiéndolos y ocultándolos. De este modo, los ojos se adaptan a la luz.

La visión está relacionada en especial con la percepción del **color**, la forma, la distancia y las imágenes en tres dimensiones.

## 1.7 **CONCEPTOS LUMÍNICOS, INCANDESCENCIA, LUMINISCENCIA, LA FLUORESCENCIA, LA FOSFORESCENCIA, LA FOTOLUMINISCENCIA, OTRAS LUMINISCENCIAS.**

La incandescencia, también llamada **termorradiación**, se define, como la emisión de **energía radiante** que depende exclusivamente de la **temperatura** del un material. A la parte de esta radiación emitida, dentro del **espectro visible**, se le denomina incandescencia, y se define como: “la producción de luz, que surge por la elevación de temperatura de un cuerpo”.

Las interacciones de un cuerpo se intensifican a medida que aumenta su temperatura, a tal extremo que su nivel de energía llega a ser prácticamente infinito, por lo cual el espectro de la luz emitida, es un espectro continuo de todas las longitudes de onda visibles. A medida que aumenta la temperatura del cuerpo emisor, la cantidad de energía radiada es mayor y la longitud de onda a la que se emite por lo que la máxima energía se hace más corta, es decir, se hace más próxima al espectro visible, tal como se aprecia en la siguiente gráfica:



*Curvas de Planck*

El rendimiento visual, para una curva de emisión determinada, vendrá dado por la relación entre la energía radiada, en el espectro visible, y la energía radiada total, teniendo en cuenta la sensibilidad espectral del **ojo humano**. El valor máximo de este rendimiento visual se establece alrededor de los 4,300 °K, cifra notablemente superior al punto de fusión de los materiales utilizados en la producción de luz por incandescencia que es de 3.410 °C.

La **Luminiscencia** es la propiedad de arrojar luz sin elevar la temperatura y visible casi solo en la oscuridad, como lo que observamos en las luciérnagas, algunas maderas, minerales de uranio, etc. Las radiaciones luminiscentes dependen de la estructura atómica de los materiales. Otros ejemplos de luminiscencia es la luz que emiten algunas pegatinas o adhesivos que brillan en la oscuridad después de haber sido expuestas a la luz natural o artificial. La luminiscencia es diferente de la **incandescencia** — *que es la producción de luz por materiales calentados; generalmente en los metales que se enrojecen o blanquean por la acción del calor.* La luminiscencia se puede clasificar dependiendo del agente excitador y teniendo en cuenta sus aplicaciones prácticas.

La **Electroluminiscencia** es la producida por la acción de un campo eléctrico en el seno de un gas o un metal sólido, como ocurre, por ejemplo, en los relámpagos o en una lámpara **fluorescente**; así mismo, la electroluminiscencia la podemos encontrar en:

- Descarga a través de un gas (lámparas de descarga)
- Cátodo-luminiscencia (tubos catódicos de televisión)
- **Diodos emisores de luz LED**

Cuando determinados materiales absorben energía de distintas clases, parte de esta energía puede ser emitida en forma de luz; este proceso implica dos pasos:

- La energía inicial hace que los electrones de los átomos del material luminiscente se exciten y salten de las órbitas internas de los átomos a las externas; el segundo paso es:
- Cuando los electrones vuelven a su estado original, se emite un **fotón** de luz. El intervalo entre ambos pasos puede ser imperceptible (*menos de una cienmilésima de segundo*) o largo (*varias horas*). Cuando el intervalo es corto, el proceso se denomina **fluorescencia**, pero cuando el intervalo es largo, se le

llama **fosforescencia**. En ambos casos, la luz producida es casi siempre de menor magnitud energética, es decir, de mayor longitud de onda, que la luz que produce la excitación.

**La fluorescencia y la fosforescencia** tienen numerosas aplicaciones prácticas. Una de las aplicaciones de la fluorescencia se encuentra en los tubos de imagen, de los televisores; ya que están recubiertos de materiales fluorescentes que brillan al ser excitados por un rayo catódico. El interior de un tubo fluorescente también está recubierto por un material similar, que absorbe la radiación ultravioleta de la fuente primaria de luz, emitiendo luz visible.

Otro caso, se encuentra en un láser, donde se produce un tipo especial de fluorescencia denominado "**emisión estimulada**".

**La fotoluminiscencia** es la luminiscencia que se produce cuando determinados materiales son irradiados con luz visible o ultravioleta; por ejemplo, ocurre en pinturas **fosforescentes**. A su vez, puede ser:

- Fluorescencia: conversión de radiación ultravioleta en radiación visible (*lámparas fluorescentes*); siendo una fotoluminiscencia simultánea, puesto que el tiempo transcurrido entre la excitación y la emisión es inferior a 10 ns.
- Fosforescencia: es fotoluminiscencia retardada, es en la que existe emisión de luz durante cierto tiempo después que ha cesado la excitación.
- Láseres (gases y sólidos).

**Otras luminiscencias.** Para enriquecer el tema de la luminiscencia, a continuación citaremos otras **luminiscencias** producidas por causas diversas y normalmente sin aplicabilidad práctica como fuentes de producción de luz.

- La **quimioluminiscencia** es provocada por una reacción química; ocurre, por ejemplo, cuando el fósforo amarillo se oxida en el aire produciendo una luminiscencia verde.
- La **bioluminiscencia** es cuando la reacción química se produce en un ser vivo, como la luciérnaga.
- La **triboluminiscencia** es provocada por la rotura, frotamiento o separación de determinados materiales.
- **Radioluminiscencia** es la emisión de luz causada por una radiación (materiales radioactivos).
- La **sonoluminiscencia**, observable en algunos líquidos orgánicos, es producida por ondas ultracortas de sonido, o ultrasonidos.

## 1.8 **ÓPTICA GEOMÉTRICA, ÓPTICA FÍSICA, LEY DE SNELL, LEYES DE LA REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN, LA FIBRA ÓPTICA Y LA INTERFERENCIA Y DIFRACCIÓN EN LAS BURBUJAS DE JABÓN.**

El término *Óptica* proviene del griego *optikos*, y de *optomai*, y significa “veo”; por lo tanto es relativo o perteneciente a la visión y parte de la física que estudia las leyes y los fenómenos de la luz, así como su propagación y comportamiento.

El estudio de la óptica se divide en dos ramas, la óptica geométrica y la óptica física.

En la **Óptica Geométrica** se prescinde de la teoría ondulatoria de la luz y supone que la luz no se difracta. Este campo de la óptica se ocupa de la trayectoria de los rayos a través de un sistema óptico aplicando las leyes de reflexión y refracción de la luz; y como al diseño de lentes y otros componentes de instrumentos ópticos.

**Óptica Física.** Esta rama de la óptica se ocupa de aspectos del comportamiento de la luz tales como su emisión, composición o absorción, así como de la polarización, la interferencia y la difracción, tema que será parte de éste estudio, empezando por la *Ley de Snell* y la **refracción**.

La **Ley de Snell** (Willebrord Van Roijen Snell, *matemático holandés*), afirma que el producto del índice de **refracción** del primer medio y el seno del *ángulo de incidencia* de un rayo, es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del *ángulo de refracción*.

Esto es, que el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia están en un mismo plano. En general, el índice de refracción de una sustancia transparente más densa es mayor que el de un material menos denso, es decir, la velocidad de la luz es menor en la sustancia de mayor densidad. Por tanto, si un rayo incide de forma *oblicua* sobre un medio con un índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal; mientras que si incide sobre un medio con un índice de refracción menor, se desviará alejándose de ella.

Los rayos que inciden en la dirección de la normal son reflejados y refractados en esa misma dirección.

Las **leyes de la reflexión y refracción** de la luz suelen deducirse empleando la "**teoría ondulatoria de la luz**"; ésta afirma que todo punto de un frente de onda inicial, puede considerarse como una fuente de ondas esféricas **secundarias**, que se extienden en todas las direcciones con la misma **velocidad, frecuencia** y **longitud de onda** que el frente de onda del que proceden. Con ello puede definirse un nuevo frente de onda que envuelve las ondas secundarias. Como la luz avanza

en ángulo recto a este frente de onda, el principio de Huygens puede emplearse para deducir los cambios de dirección de la luz.

Cuando las ondas secundarias llegan a otro medio u objeto, cada punto del límite entre los medios se convierte en una fuente de dos conjuntos de ondas. El conjunto reflejado vuelve al primer medio, y el conjunto refractado entra en el segundo medio. El comportamiento de los rayos **reflejados** y **refractados** puede explicarse por el principio de Huygens. Es recomendable representar la propagación de la luz mediante rayos en vez de ondas. El rayo es la línea de avance, o dirección de propagación, de la energía radiante y, por tanto, perpendicular al frente de onda.

Si la superficie del segundo medio es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie se encuentran en direcciones aleatorias. En ese caso, los rayos que se encuentren en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz tendrán un plano de incidencia, y por tanto de reflexión, aleatorio. Esto hace que se dispersen y no pueda formar una imagen, ver figura 3 y 4.

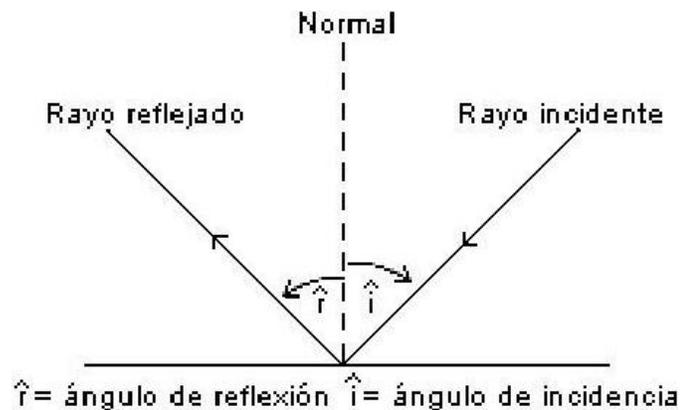


Fig. 3) *Leyes fundamentales de la reflexión*

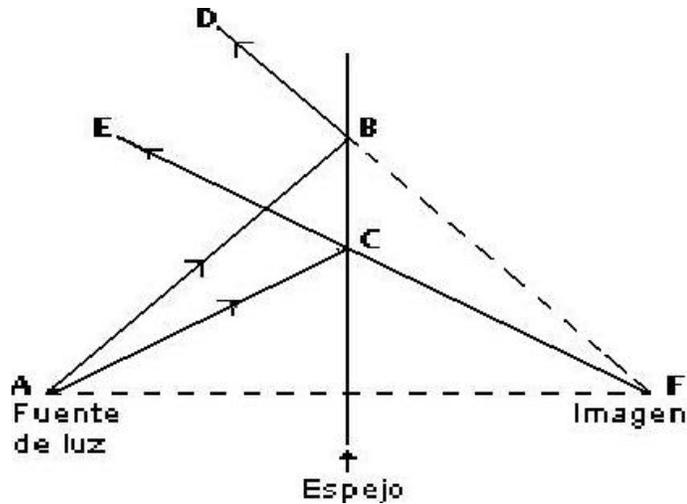


Fig. 4) *Reflexión en un espejo plano*

**La fibra óptica** es una aplicación práctica de la **reflexión** total.

Cuando la luz entra por un extremo de un tubo macizo de vidrio o plástico, puede verse reflejada totalmente en la superficie exterior del tubo y, después de una serie de reflexiones totales sucesivas, salir por el otro extremo.

Es posible fabricar fibras de vidrio de diámetro muy pequeño, recubrirlas con un material de índice de refracción menor y juntarlas en haces flexibles o placas rígidas que se utilizan para transmitir imágenes. Los haces flexibles, que pueden emplearse para iluminar además de para transmitir imágenes, son muy útiles para la exploración médica.

**Interferencia y difracción en las burbujas de jabón.** Cuando dos haces de luz se cruzan pueden interferir u obstruirse, lo que afecta a la distribución de intensidades resultantes. La coherencia (*unión entre moléculas*) de dos haces de luz, expresa hasta qué punto están en fase sus ondas. Si la relación de fase cambia de forma rápida y aleatoria, los haces son incoherentes.

Los átomos de una fuente de luz ordinaria irradian luz de forma independiente, por lo que una fuente extensa de luz suele emitir radiación incoherente. Para obtener luz coherente de una fuente así, se selecciona una parte reducida de la luz mediante un pequeño orificio o rendija. Si esta parte vuelve a separarse mediante una doble rendija, un doble espejo o un doble prisma y se hace que ambas partes recorran trayectorias de longitud ligeramente diferente antes de combinarlas de nuevo, se produce un **diagrama de interferencias**. Las distancias se miden en relación a la longitud de onda de la luz empleada, ver figura 5.

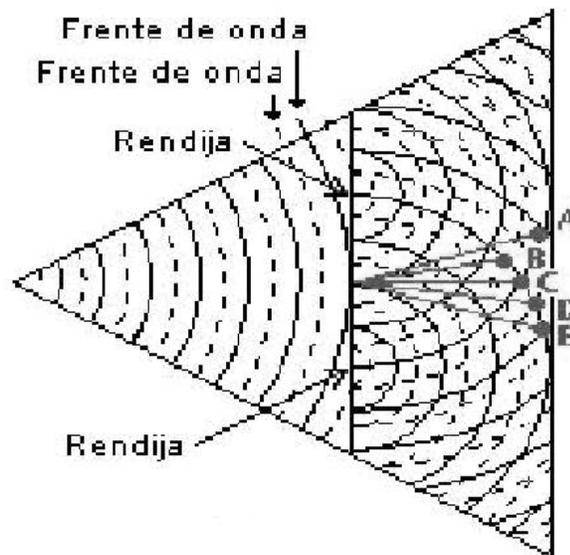


Fig.5. Interferencia de la luz al pasar por dos rendijas

La luz que incide sobre el borde de un obstáculo es desviada (o *difractada*), y el obstáculo no genera una sombra geométrica nítida. Los puntos situados en el borde del obstáculo actúan como fuente de ondas coherentes, y se forma un diagrama de interferencias denominado **diagrama de difracción**. La forma del borde del obstáculo no se reproduce con exactitud, porque parte del frente de onda queda cortado.

**Interferencia de la luz en las burbujas de jabón.** Los colores o franjas coloreadas en la superficie de las burbujas de jabón se deben a la **interferencia** entre los rayos de luz reflejados en las dos caras de la delgada película de líquido que forma la burbuja.

En una parte de la burbuja, vista desde un cierto ángulo, la interferencia puede intensificar ciertas **longitudes de onda**, o **colores**, de la luz reflejada, mientras que suprime otras longitudes de onda.

El color que se ve depende de las intensidades relativas de las distintas longitudes de onda en la luz reflejada. En otras zonas, vistas desde otros ángulos, las longitudes de onda que se refuerzan o se cancelan son otras. Sin embargo, la estructura de las franjas de colores depende del espesor de la película de líquido en los distintos puntos.

## 1.9 EMISIÓN ESTIMULADA Y EL HOLOGRAMA

Los átomos de una fuente de luz como la de una bombilla incandescente (foco), una lámpara fluorescente o una lámpara de neón producen luz por emisión espontánea y la radiación que emiten es **incoherente**, es decir, si un número suficiente de átomos absorben energía de manera que resultan excitados y acceden a estados de mayor energía en la forma adecuada puede producirse la **emisión estimulada**.

La luz de una determinada longitud de onda puede provocar la producción de más luz con la misma fase y dirección que la onda original, por lo que la radiación será coherente. La emisión estimulada amplifica la radiación con una longitud de onda determinada y la luz generada presenta una desviación del haz muy baja.

El material excitado puede ser un gas, un sólido o un líquido, pero su forma o la forma de su recipiente debe ser tal que forme un interferómetro en el que la longitud

de onda que se amplifica se refleje numerosas veces en un sentido y otro. Una pequeña parte de la radiación excitada se transmite a través de uno de los espejos del interferómetro. Este dispositivo se denomina láser, que en inglés corresponde al acrónimo de “amplificación de luz por emisión estimulada de radiación”.

El proceso de suministrar energía a un número elevado de átomos para llevarlos a un estado adecuado de energía superior se denomina **bombeo**. El bombeo puede ser óptico o eléctrico. Como un láser puede emitir pulsos de energía extremadamente alta con una desviación de haz muy pequeña, es posible detectar, por ejemplo luz láser enviada a la Luna y reflejada de vuelta a la Tierra, lo que permite medir con precisión la distancia Tierra-Luna.

Un **holograma** es un registro fotográfico de la interferencia entre un haz de referencia y el diagrama de difracción del objeto. Para generar un holograma, la luz procedente de un único láser se divide en dos haces. El haz de referencia ilumina la placa fotográfica — *por ejemplo, a través de una lente y un espejo* — y el segundo haz ilumina el objeto. El haz de referencia y la luz reflejada por el objeto forman un diagrama de difracción sobre la placa fotográfica. Si una vez revelado el holograma se ilumina con luz coherente, no necesariamente de la misma longitud de onda que la empleada para crearlo, puede obtenerse una imagen tridimensional del objeto.

Un ejemplo de la generación armónica de luz, puede ser la luz láser infrarroja, con longitud de onda de 1,06 micrómetros, puede convertirse en luz verde con longitud de onda de 0,53 micrómetros, es decir, justo la mitad, mediante un cristal de *niobato de sodio y bario*.

Es posible producir fuentes de luz coherente ampliamente sintonizables en la zona de la luz visible y el infrarrojo cercano bombeando medios adecuados con luz o con radiación de menor longitud de onda.

Se puede lograr que un cristal de niobato de litio presente fluorescencia roja, amarilla y verde bombeándolo con luz láser azul verdosa con una longitud de onda

de 488 *nm*. Algunos fenómenos de difusión pueden ser estimulados con un único láser para producir pulsos de luz intensos en una amplia gama de longitudes de onda monocromáticas.

## 1.10 SEMICONDUCTORES DE JUNTURA, CONDUCTORES, DIELECTRICOS, DOPAJE

**El conductor.** Primeramente, entendamos que los *materiales* que permiten el movimiento libre de los **electrones** se les llama **conductor**; así mismo, el término conductor se aplica a cualquier material que permite un flujo generoso de carga cuando se aplica una **diferencia de potencial** de una fuente de voltaje de magnitud limitada, que pase a través de sus terminales y que ofrezca poca resistencia al flujo de electricidad.

Uno de los mejores conductores es la **plata**, pero es el **cobre** el elemento que comúnmente usamos como conductor, ya que es más barato en cuestión de conducción; otro material es el **aluminio**, ya que cuando se usa correctamente es casi tan buen conductor como el cobre, pero aún su costo es mayor que el cobre.

Otros buenos conductores que siguen, después de los mencionados, son: el **zinc**, el **latón** y el **hierro**. Las sustancias y los gases, también conducen electricidad en mayor o en menor medida por medio de **iones**.

Debido a una temperatura específica, algunos materiales tienen la propiedad de perder bruscamente su resistencia eléctrica; este fenómeno es conocido como **superconductividad**, y se produce cuando algunos materiales son enfriados a unos 270° C; y a temperaturas cercanas al cero absoluto su conductividad se vuelve prácticamente infinita.

**Un dieléctrico**, llamado también aislante o aislador, es un material que presenta un nivel muy bajo de conductividad cuando se encuentra bajo la “presión” de una fuente de voltaje aplicada, ya que estos materiales presentan una resistencia al paso de corriente eléctrica, y por lo tanto, es un material que conduce limitadamente el paso de la electricidad o el calor; por lo que se consideran “malos” conductores, debido a que actualmente no existe ningún material que se considere aislador perfecto.

Los materiales considerados como buenos aislantes son: vidrio, mica, hule, plásticos, cerámica, seda, entre otros; el aire seco es también un buen aislador.

**Semiconductor.** El prefijo *semi* se aplica normalmente a un rango de nivel entre dos límites; por lo que un semiconductor es aquel elemento o material, que en su estado puro y a temperatura ambiente normal, no es ni buen conductor ni buen aislante.

Entre los *semiconductores* comunes se encuentran elementos químicos y compuestos como el *selenio*, el *arseniuro de galio*, *seleniuro de zinc*, *telururo de plomo*, *óxido de cobre*, el **Silicio** y el **Germanio**, estos dos últimos son la base de los transistores, **diodos** y otros dispositivos de estado sólido; además de que sus características pueden ser alteradas de forma importante mediante la aplicación de **luz**, **calor** o la aplicación de **impurezas**, llamada también “**dopaje**”, para que su conductividad aumente, ya que a mayor nivel de conductividad menor será el nivel de resistencia, o sea que la temperatura está ligada íntimamente con la resistividad ya que para temperaturas muy bajas, los semiconductores se comportan como aislantes y su resistividad aumenta con la disminución de la temperatura, y para temperaturas altas, la resistividad de los semiconductores disminuye.

**Dopaje.** El dopaje sirve para mejorar los materiales semiconductores, y esto sucede al añadir **impurezas** cuidadosamente controladas durante su fabricación, con el fin de modificar su comportamiento de conducción de electricidad en un sentido mejor

que en el otro, ya que funcionan como un conductor o un aislador, dependiendo de la dirección del flujo de la corriente.

En el caso del silicio, la diferencia del número de electrones de valencia entre el **material dopante**, tanto si acepta como si concede electrones y el **material receptor** hace que crezca el número de electrones de conducción negativos (*llamado tipo n*) o positivos (*llamado tipo p*). Cada átomo de silicio tiene cuatro electrones de valencia (*representados mediante puntos*); se requieren 2 para formar el **enlace covalente**.

En el silicio tipo n, un átomo como el del fósforo (P), con cinco electrones de valencia, reemplaza al silicio y proporciona electrones adicionales. En el silicio tipo p, los átomos de tres electrones de valencia como el aluminio (Al) provocan una deficiencia de electrones o huecos que se comportan como electrones positivos, ver figura 6. Los electrones o los huecos pueden conducir la electricidad.

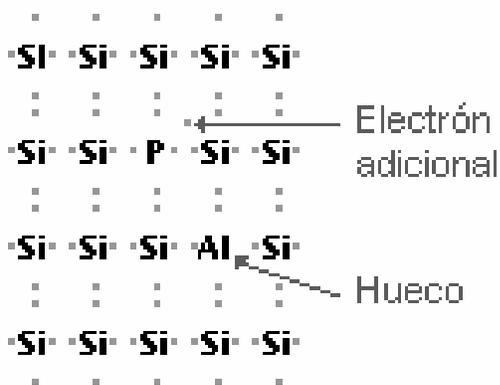


Fig. 6. Representación de un cristal de silicio dopado

### 1.10.1 Estructura de un semiconductor, el Silicio y el Germanio

En los casos de los elementos semiconductores más usuales en el campo de la electrónica, los átomos de Germanio y Silicio tienen cuatro electrones de valencia, en su nivel superior. En dichos materiales los átomos están ordenados en los que se denomina *estructura de red cristalina*. Cada átomo comparte cada uno de sus electrones de valencia con los átomos vecinos. De esta manera se forman los llamados **enlaces** de par electrónico o **enlaces covalentes** entre los átomos, ver figura 7.

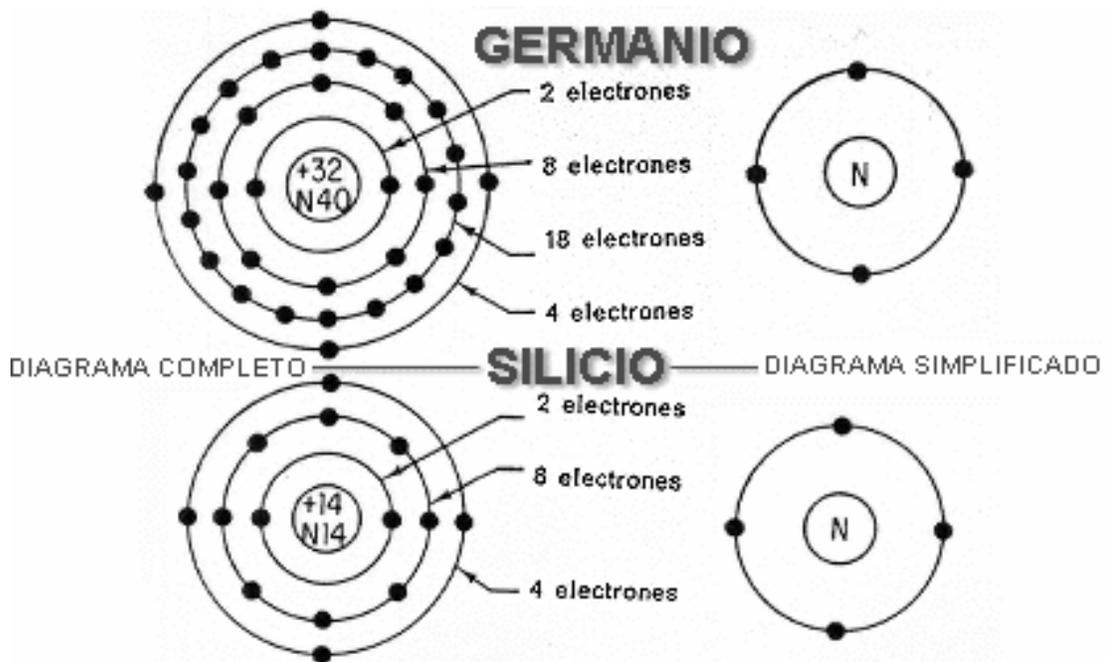


Fig. 7. Estructura de las moléculas del germanio y el silicio

El **silicio** (de símbolo **Si**) es un elemento semiconductor (llamado también **semimetálico**), tiene un elevado punto de fusión y es el segundo elemento más común en la Tierra después del oxígeno, extraordinariamente abundante. Su estado no es libre, sino que se encuentra principalmente en forma de **sílice** (mineral formado por silicio y oxígeno).

El silicio se obtiene calentando sílice con un agente reductor, como **carbono** o **magnesio**, en un horno eléctrico. El silicio cristalino tiene una dureza de grado 7, suficiente para rayar el vidrio; su punto de fusión es de 1.410°C, y tiene un punto de ebullición de 2.355 °C; y tiene una densidad relativa de 2,33.

**El Germanio** de símbolo **Ge** (*procedente de Germania, Alemania*), es, al igual que el **silicio**, un elemento **semimetálico** cristalino, duro, brillante, de color blanco grisáceo.

Es escaso en la corteza terrestre, se encuentra en los residuos de la metalurgia del **zinc** y en las cenizas de algunos carbones. También se usa en la fabricación de transistores, diodos y detectores de radiación. Pertenece a la misma familia química que el carbono, el silicio y el plomo. Se separa de otros metales por destilación de su tetracloruro.

Su punto de fusión es de 937 °C, tiene un punto de ebullición de 2.830 °C y una densidad relativa de 5,3.

Los cristales de germanio convenientemente tratados tienen la propiedad de rectificar o permitir el paso de la corriente eléctrica en un solo sentido. En la siguiente grafica se muestra la ubicación del silicio y el germanio en la tabla periódica de los elementos.

The image shows a periodic table of elements with color-coded groups. The groups are labeled as follows: IA, IIA, IIIA, IVA, VA, VIA, VIIA, VIIIA, IIIB, IVB, VB, VIB, VIIB, VIIIB, VIII, IIB, and VIII. The elements are color-coded according to the legend below:

- No metales (Yellow)
- Metales alcalinotérreos (Green)
- Otros metales (Teal)
- Actínidos (Grey)
- Gases nobles (Purple)
- Metales alcalinos (Orange)
- Metales de transición (Blue)
- Halógenos (Red)
- Lantánidos (Light Green)

The element Silicon (Si) is circled in red. The legend also includes Lantánidos (Light Green) and Actínidos (Grey).

*Tabla periódica de los elementos*

### 1.10.2 Los semiconductores tipo P y tipo N

Ya se ha indicado que los materiales semiconductores se alteran mediante la adición de ciertos átomos de **impureza**, llamado también material semiconductor **extrínseco**; A pesar de que estas impurezas se añaden en proporción de una parte por cada 10 millones, éstas pueden alterar la estructura de las bandas de los átomos, lo suficiente como para modificar las propiedades eléctricas del material por completo.

En un material, los electrones libres generados exclusivamente por causas naturales se denominan portadores **intrínsecos**; existen dos tipos de materiales

*intrínsecos*; el tipo P y el tipo N. Los materiales intrínsecos, son aquellos semiconductores que se han refinado cuidadosamente con el objetivo de reducir las impurezas hasta un nivel muy bajo, tan puros como sea posible. Si el semiconductor es perfectamente puro, por cada electrón libre aparecerá un hueco, ya que ambos se producen a partir de la ruptura de un **enlace covalente**, por lo que, en un cristal puro existe el mismo número de huecos como de electrones libres.

**El material tipo "P"** se forma mediante el dopado de un cristal puro, en este caso ya sea de *germanio* o de *silicio*, con átomos de impureza que cuenten con tres electrones de valencia. Los elementos que se utilizan de forma más frecuente para este propósito son: el **boro**, el **galio** y el **indio**.

Un cristal semiconductor tipo P es el que presenta un **mayor número de cargas positivas** (*huecos*) que de cargas negativas (*electrones libres*). Al aplicarle un campo eléctrico externo estas cargas positivas serán atraídas por el terminal negativo, estableciéndose una circulación de corriente. (*Siendo este el sentido convencional de la corriente eléctrica*) Como se muestra en la figura 8:

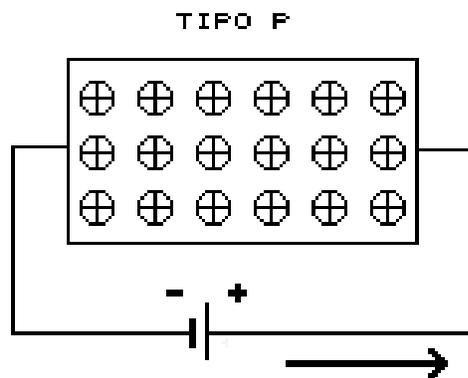


Fig. 8. *Flujo convencional de corriente en un semiconductor tipo P*

**El material tipo N** se crea al introducir elementos que cuentan con “**cinco electrones de valencia**” como el **antimonio**, el **arsénico** o el **fósforo**. Además

presenta un **mayor número de cargas negativas** (*electrones libres*) que de positivas (*huecos*). Es importante distinguir que aunque se ha establecido un gran número de portadores libres, este permanece con carga eléctrica neutral. Por lo que los electrones serán atraídos por el terminal positivo de la fuente. Como se muestra en la figura 9:

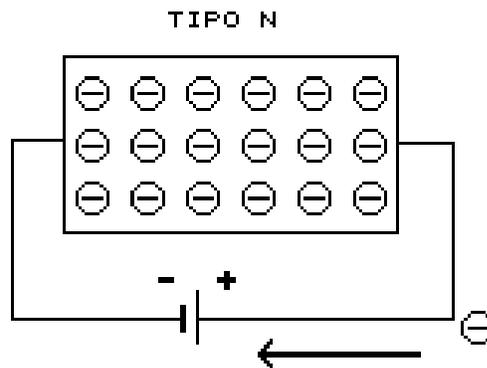


Fig. 9. Material semiconductor tipo N con mayor número de cargas negativa

El origen de las propiedades electrónicas de los *semiconductores* se encuentra en la forma en la que se mueven los portadores de carga en el material, dando lugar a dos tipos fundamentales de corrientes eléctricas: **corriente de arrastre** y **corriente de difusión**.

### 1.10.3 Corriente de arrastre, Corriente de difusión y Semiconductor – Unión P-N

La corriente de arrastre es la que normalmente se aplica en los conductores; y se debe al desplazamiento de los portadores de carga al aplicar una diferencia de potencial (*voltaje*) al semiconductor, ver figura 10.

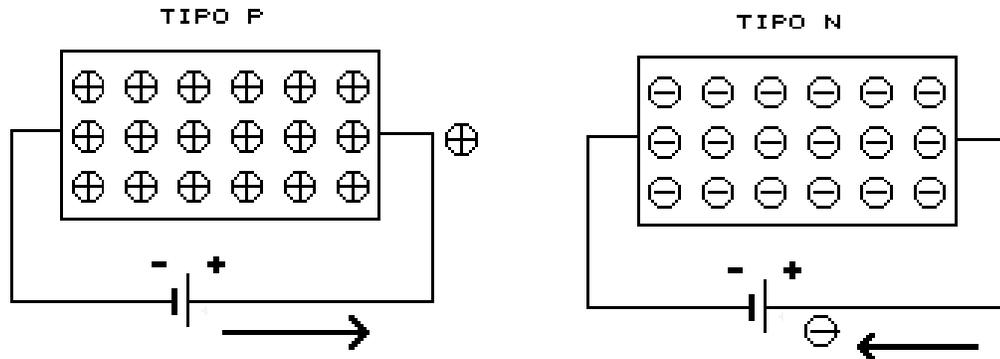


Fig. 10 *Corriente de arrastre en los materiales tipo P y N*

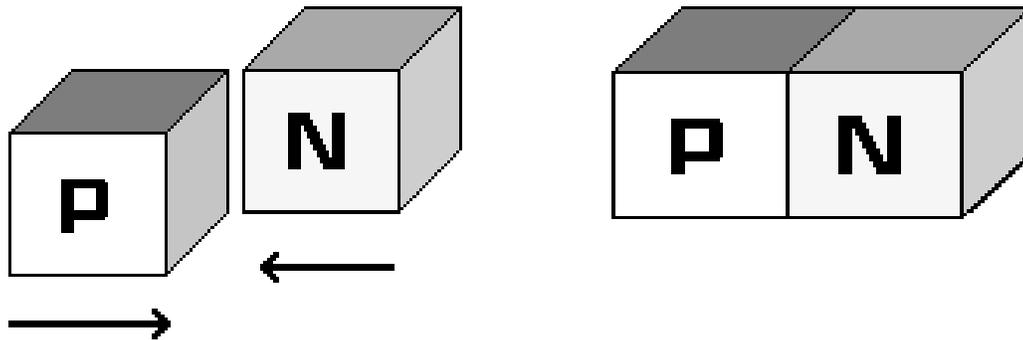
**Corriente de difusión.** La corriente de difusión es una corriente característica de los semiconductores y es la responsable directa de muchas de las aplicaciones de los semiconductores en la materia de electrónica.

Su origen se encuentra en una desigual distribución de portadores a lo largo del cristal. Si en una zona del cristal hay una concentración de portadores mucho mayor que en otra, estos portadores tenderán a desplazarse hacia las **zonas de baja concentración**, de forma que haya una distribución uniforme a lo largo de todo el cristal. Este movimiento de portadores da lugar a la llamada **corriente de difusión**.

**Semiconductor - Unión P-N.** Los semiconductores son la base sobre la que actualmente se constituyen la mayoría de los componentes electrónicos, desde los más simples (**diodos**), hasta los más complejos (**microprocesadores**). Todo se fundamenta en cristales semiconductores **unidos** de forma adecuada.

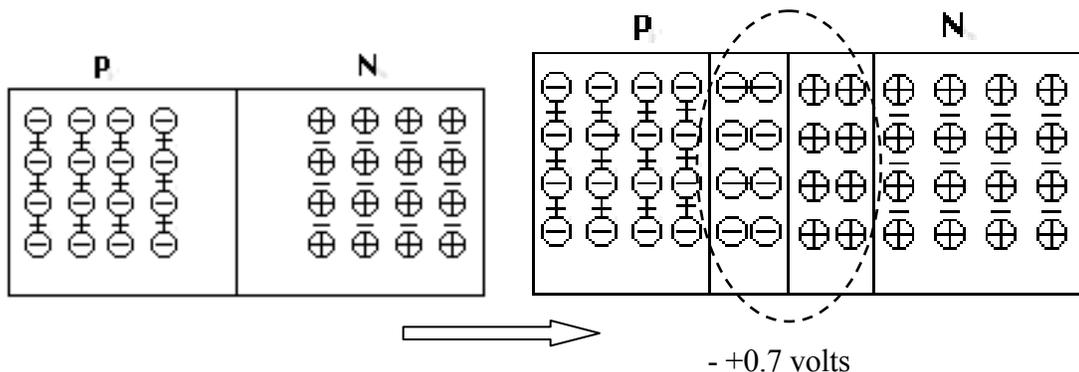
Al unir un semiconductor tipo P con otro tipo N se forma una unión **P-N**. En un material, cuando ciertas capas de semiconductores tipo P y tipo N son adyacentes (**vecinos**), forman un **diodo** de semiconductor y la región de contacto se llama **unión PN**. Las propiedades de conductividad de la unión P-N dependen de la dirección del voltaje; voltaje mismo que puede a su vez utilizarse para controlar la

naturaleza eléctrica del dispositivo. Algunas series de estas uniones se usan para hacer transistores y otros dispositivos semiconductores como células solares, láseres de unión PN, rectificadores y **diodos emisores de luz**, ver la siguiente figura:



*Unión de dos materiales semiconductores tipo N y tipo P*

Algunos *electrones* próximos a la unión la **atravesarán** y se re combinarán con los *huecos* de la zona P. Por lo tanto aparecerá una zona de carga positiva y negativa en ambos lados de la unión. A esta zona de carga especial se le llama **zona de transición** (o *zona de deflexión*), como se muestra en la siguiente figura:



*Recombinación de cargas positivas y negativas entre 2 semiconductores*

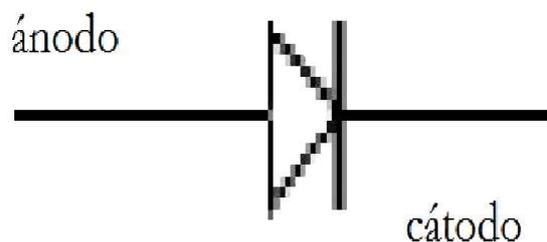
La acumulación de cargas eléctricas de signos contrarios origina un campo eléctrico a través de la *zona de transición*. En el caso del **SILICIO**, la caída de tensión en la unión PN es de **0.7 Volts**.

## Capítulo 2

### CONCEPTUALIZACIÓN DEL DIODO Y FUENTES DE ILUMINACIÓN

#### 2.1 EL DIODO Y LA RECTIFICACIÓN

La palabra **Diodo** significa *camino*; El diodo es un dispositivo electrónico, una válvula electrónica de dos **electrodos**, por la cual la corriente pasa en un solo sentido, ya que tiene una gran resistencia al paso de la corriente eléctrica en una dirección y una baja resistencia en la otra. Consta de un ánodo frío y de un cátodo caldeado. Como se muestra en la siguiente figura:



*Símbolo del diodo*

Los primeros dispositivos de este tipo fueron los diodos de tubo de vacío, que consistían en un receptáculo de vidrio o de acero al vacío que contenía dos electrodos (*cátodo* y *ánodo*). Ya que los electrones pueden fluir en un solo sentido, desde el cátodo hacia el ánodo, el diodo de tubo de vacío se podía utilizar en la rectificación; y por lo tanto se conoce como **diodo rectificador común**.

**Rectificación.** Se le llama rectificación al proceso que convierte una corriente eléctrica alterna, que circula en un sentido u otro de un circuito, en una corriente continua, que sólo fluye en un sentido. Para ello se inserta en el circuito un dispositivo conocido como rectificador, que sólo permite que pase corriente en un sentido, bloqueando la corriente en el otro, y éste dispositivo es el **diodo rectificador**.

La polarización del voltaje aplicado a un diodo, determina, en todo caso, si a través del diodo fluirá corriente o no. Las dos polaridades de un voltaje aplicado se conocen como **polarización directa** o de *avance* y **polarización inversa**.

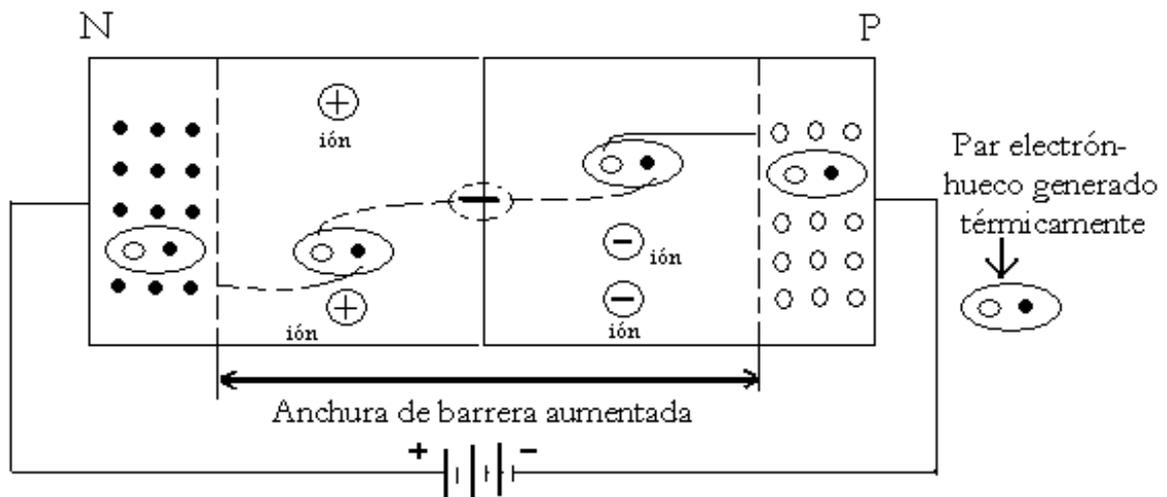
### 2.1.1 **Polarización directa e inversa de un diodo**

**Polarización directa.** Un diodo está en polarización directa (o de *avance*) cuando la terminal positiva de una fuente de voltaje, se conecta a su ánodo (zona P) y la terminal negativa a su cátodo (zona N), y hay potencial suficiente para que los portadores atraviesen la **zona de transición**.

La terminal positiva de una fuente, repele a los huecos dentro del material tipo P hacia la zona de transición. Al mismo tiempo, la terminal negativa, de la fuente, repele a los electrones dentro del material tipo N hacia la juntura (**zona de transición**); cuando los huecos y electrones llegan a la juntura, algunos la atraviesan, después los huecos se re combinan con los electrones dentro del material tipo N y los electrones se re combinan con los huecos dentro del material tipo P.

Cada vez que un hueco se re combina con un electrón o un electrón con un hueco, próximo a la **zona de transición**, un electrón de un enlace doble dentro del material tipo P (**ánodo**) rompe su enlace; después este electrón llega a la terminal positiva de la fuente. Al mismo tiempo, un electrón de la terminal negativa de la batería se mueve hacia el material tipo N (**cátodo**) del diodo.

De esta manera se produce un flujo de electrones del **negativo** al **positivo** en el circuito externo al cual está conectado el **diodo**; y por lo tanto se puede considerar que la unión P-N, **directamente polarizada**, se comporta como un circuito cerrado, permitiendo el paso de la corriente llamada, "corriente directa", ver siguiente figura:



*Recombinación de cargas en una polarización directa*

**La polarización inversa** es más difícil la conducción, porque el electrón libre tiene que subir una barrera de potencial muy grande de la zona N a la zona P, debido al ensanchamiento de la zona de transición; por lo que no hay conducción de electrones libres o huecos, y por lo tanto no hay corriente.

En esta situación tenemos que tener en cuenta la generación térmica de pares electrón-hueco. Los pocos electrones generados térmicamente pierden energía y bajan de P a N y a esta se le llama "**Corriente Inversa de Saturación**" ( $I_s$ ) que es muy pequeña.

Además de esta corriente, existe otra corriente debida a las fugas, que se denomina "Corriente de Fugas".

## 2.2 DIFERENTES DIODOS

En este subcapítulo se hará una breve descripción de los diferentes tipos de diodos más representativos que se conocen, así como únicamente la mención de algunos de ellos; por ejemplo: Diodos de Barrera **Schottky**, llamados también “portadores calientes” o de **barrera de superficie**.

Diodo **Varicap** o **diodo de capacidad variable** (o *Varactor*), es un tipo de diodo que basa su funcionamiento en el fenómeno que hace que, la anchura de la **zona de transición** (o *barrera de potencial*) en una unión P-N, **varíe** en función de la tensión inversa aplicada entre sus extremos. Al aumentar dicha tensión, aumenta la anchura de esa barrera, disminuyendo así la capacidad del diodo. De este modo se obtiene un **capacitor** (o *condensador*) variable, controlado por tensión.

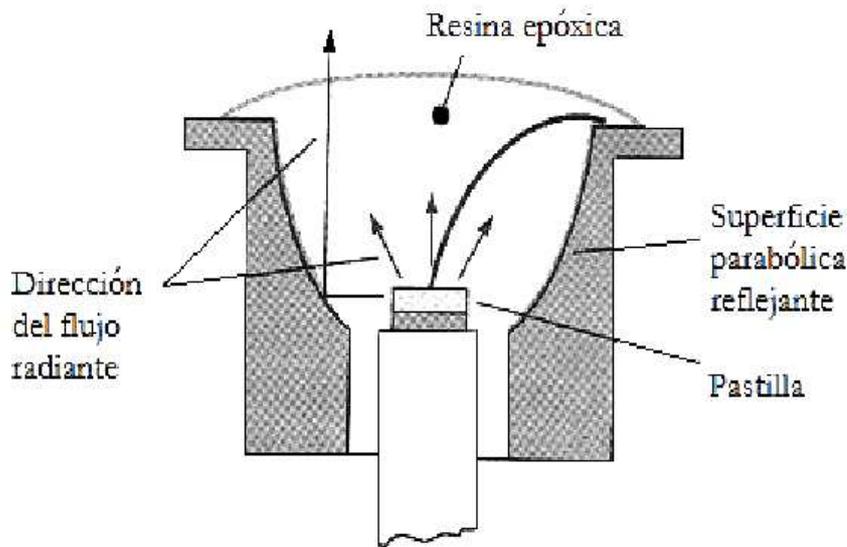
**Diodo de potencia.** Los diodos de potencia se caracterizan porque en estado de conducción, deben ser capaces de soportar una alta intensidad con una pequeña caída de tensión (o *voltaje*). En sentido inverso, deben ser capaces de soportar una fuerte tensión negativa de **ánodo** con una pequeña intensidad de fugas.

**Diodo Zener** es un modelo especial de diodo de unión, que utiliza **silicio**, en el que la tensión en paralelo a la unión es independiente de la corriente que la atraviesa. Debido a esta característica, los diodos Zener se utilizan como reguladores de tensión.

Diodo **Rectificador**. Este elemento solo permite el paso de la corriente en un sentido. La intensidad eléctrica circulará siempre desde el ánodo hasta el cátodo. El diodo rectificador sólo conduce si la tensión en el **cátodo** es menor que en el

**ánodo**, por lo que se tiene que cumplir que  $V_K < V_A$  (donde  $V$  = voltaje o tensión).  
**Diodo Emisor IR – infrarrojo.** Los diodos emisores de luz infrarroja, son dispositivos de **arseniuro de galio**, de estado sólido, que emiten un rayo de flujo radiante cuando se polarizan directamente.

Cuando la unión se encuentra en *polarización directa*, los electrones de la región N se re combinan con el exceso de huecos del material P en una región de recombinación especialmente diseñada, intercalada entre los materiales tipo P y N. Durante este proceso de recombinación, se irradia energía del dispositivo en forma de **fotones**. Los fotones generados se reabsorberán en la estructura o abandonarán la superficie del dispositivo en forma de **energía radiante**, ver la siguiente figura del diagrama de un diodo emisor de luz infrarroja:



*Diagrama de un diodo emisor de luz infrarroja*

**El Fotodiodo** es un diodo *semiconductor* de unión **p-n** cuya región de operación se limita a la región de **polarización inversa**. Está diseñado de manera que la luz que incide sobre él, genera una corriente eléctrica en el circuito externo. Funciona como un detector *optoelectrónico*, o *foto detector*, que permite conmutar y regular la corriente eléctrica en un circuito externo en respuesta a una intensidad luminosa variable.

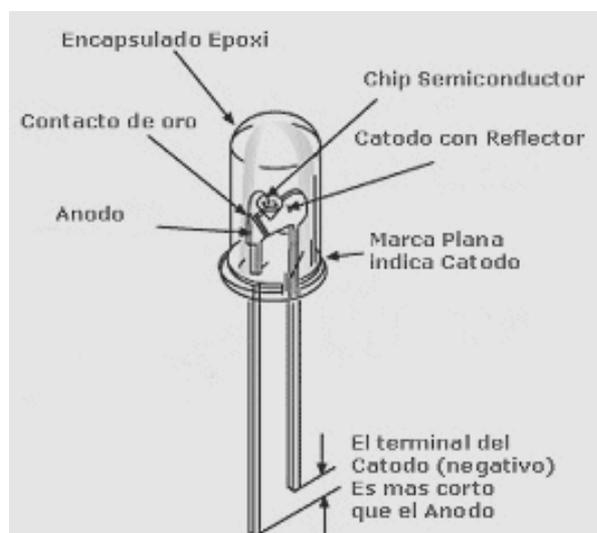
Los fotodiodos se utilizan para leer la información de los discos compactos con la ayuda de un rayo láser, en la utilización de sistemas de alarma, en operaciones de conteo, etc.

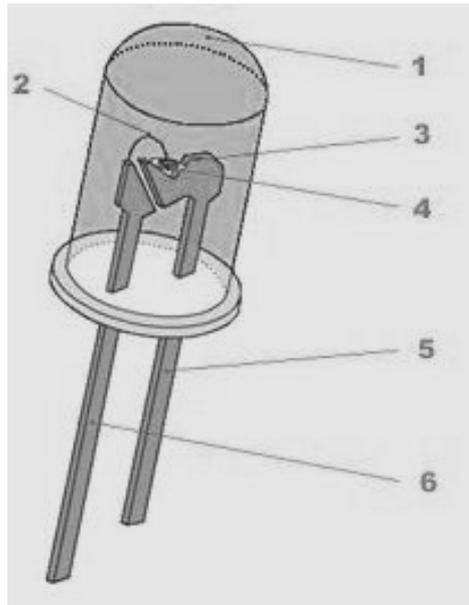
### 2.3 **EL DIODO EMISOR DE LUZ** **LIGHT-EMITTING DIODE (LED),** **SU ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO**

Los diodos emisores de luz funcionan por un proceso físico, dentro del dispositivo, en el que se desprenden **fotones** al volver a su órbita de valencia, de los elementos químicos manejados. La energía luminosa **radiada**, puede ser de color verde, si el elemento ha sido tratado con **galio-fósforo**, o roja si lo sido con **galio-arsenio**.

El diodo emisor de luz, **LED**, derivado de sus siglas en inglés “Light-Emitting Diode es un componente electrónico que a través del cual la corriente pasa en un solo sentido. El LED es un semiconductor y básicamente se utilizaba para la indicación de “*encendido*” de variados aparatos tecnológicos, debido a su tamaño y bajo consumo de corriente.

#### **Estructura básica de un LED y sus componentes**





*El diodo emisor de luz*

**Componentes:**

1. Lente encapsulado epóxico.- Este lente es el recubrimiento de todo el componente estructurado; determina el haz de luz, protege al chip reflector y extrae el flujo luminoso.
2. Cable conductor.- Es un cable muy delgado de oro, el cual conecta cada terminal a cada uno de los postes conductores.
3. Chip semiconductor.- Consiste en dos capas de material emisor semiconductor, cuando los átomos son excitados por un flujo de corriente intercambiando electrones, creando la luz, desprendiendo **fotones**.
4. Reflector.- Está por debajo del Chip reflejando y proyectando luz hacia fuera, sólo un 3% se queda atrapada.
5. Cátodo.- Poste hecho de aleación de cobre y conduce carga negativa, el cátodo es más corto que el ánodo para facilitar un ensamble más rápido y preciso en el circuito.
6. Ánodo.- Poste hecho en aleación de cobre y conduce carga positiva.

En todas las uniones de semiconductores p-n cierta cantidad de esta energía se desprenderá en forma de calor y otra en forma de fotones (**luz**). En el caso del **silicio** y el **germanio**, el porcentaje mayor de energía que se desprende es en forma de **calor** y en una medida insignificante, se desprende luz emitida.

En otros materiales, como el *fosfuro de arseniuro de galio* (**GaAsP**) o el *fosfuro de galio* (**GaP**), el número de **fotones** de energía luminosa emitida es suficiente como para crear una fuente de luz altamente visible.

### **Funcionamiento del LED**

En figura 15, se muestra que la superficie conductora que se encuentra conectada al material P es mucho más pequeña, con el objeto de permitir la emisión del máximo de fotones de energía luminosa. La recombinación de portadores inyectados, debido a la unión con **polarización directa**, provoca una emisión de luz en lugar de la recombinación, ver figura 11.

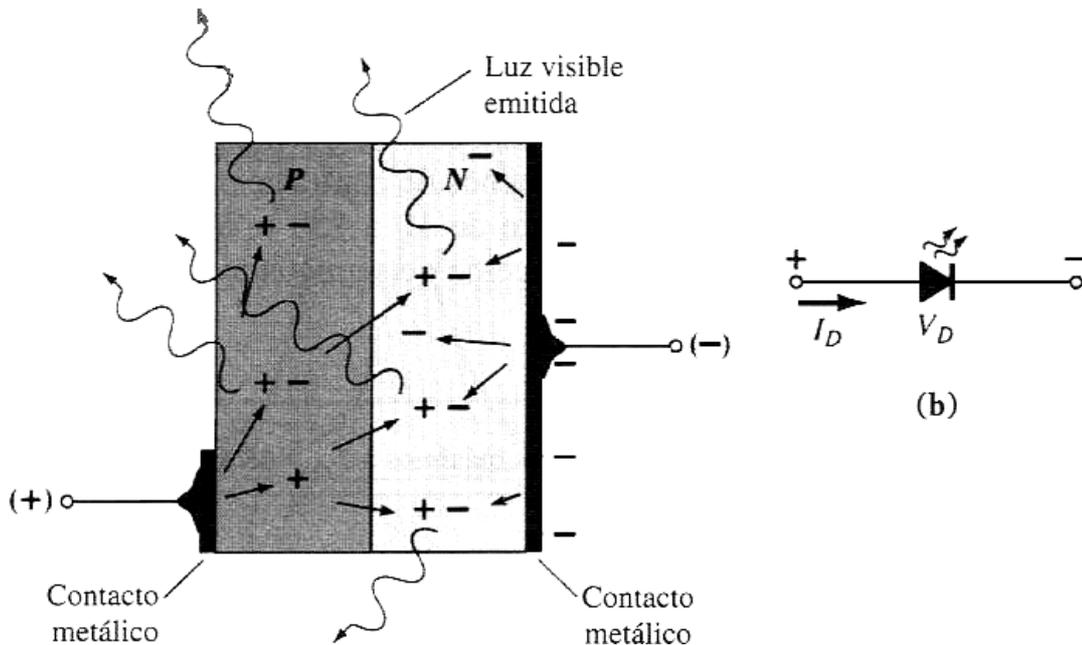


Fig. 11. Desprendimiento de fotones al re combinarse huecos con electrones

Se necesita una corriente de operación cercana a los **10 mA** con una caída de potencial de **2.5 V** para una buena emisión de luz.

Éstas son la  $\eta_v$  y la eficiencia luminosa ( $\eta_v$ ). La intensidad de la luz (*intensidad luminosa axial* ( $I_v$ )) se mide en **candelas**. Una candela emite un flujo de luz de 4 **lúmenes** y crea una **iluminación** de 1 candela/pie, sobre un área de 1 pie cuadrado a una distancia de un pie de la fuente de luz. Para el caso del **LED**, la **eficiencia** es la razón entre el número de lúmenes generados por watt o energía eléctrica aplicada. La **eficiencia relativa** (*eficiencia luminosa*) se define como la **intensidad luminosa** por unidad de corriente.

Debido a que el **LED** es un dispositivo de unión **p-n**, asume la característica de **polarización directa**, similar a la curva de respuesta del diodo convencional.

En general los **LEDs** operan en rangos de voltaje de 1.7 a 3.3 V, lo cual los hace completamente compatibles con los circuitos de estado sólido. Cuentan con tiempos de respuesta rápidos (*nano-segundos*) y ofrecen índices buenos de contraste para **mejor visibilidad**. Sus requerimientos de potencia son típicamente de **10 a 150 mW** con tiempos de vida de más de **100,000** horas y además su constitución de **semiconductor** les añade un factor de significativa durabilidad.

Derivado de las diferentes combinaciones de elementos, al momento del dopaje en los semiconductores, se ha obtenido la siguiente tabla en donde se observa el resultado de dichas combinaciones y la obtención de los colores, así como su respectiva frecuencia dentro del rango visible en el espectro electromagnético, ver la siguiente tabla:

<i>Frecuencia</i>	<i>Color</i>	<i>Material</i>
940	Infrarrojo	GaAs
890	Infrarrojo	GaAlAs
700	Rojo profundo	GaP
660	Rojo profundo	GaAlAs
640	Rojo	AlInGaP
630	Rojo	GaAsP/GaP
626	Rojo	AlInGaP
615	Rojo – Naranja	AlInGaP
610	Naranja	GaAsP/GaP
590	Amarillo	GaAsP/GaP
590	Amarillo	AlInGaP
565	Verde	GaP
555	Verde	GaP
525	Verde	InGaN
525	Verde	GaN
505	Verde turquesa	InGaN/Zafiro
498	Verde turquesa	InGaN/Zafiro
480	Azul	SiC
450	Azul	InGaN/Zafiro
430	Azul	GaN
425	Azul	InGaN/Zafiro
370	Ultravioleta	GaN

*Materiales y frecuencias de emisión típicas de un LED*

## 2.4 TIPOS DE LÁMPARAS

Las fuentes luminosas eléctricas se pueden clasificar en dos grandes categorías:

- 1) De irradiación por efecto térmico (*lámparas de incandescencia*), ver figura 11.
- 2) De descarga en gas o vapores (*lámparas fluorescentes, de vapor de mercurio, vapor de sodio, etc.*), ver figura 12.

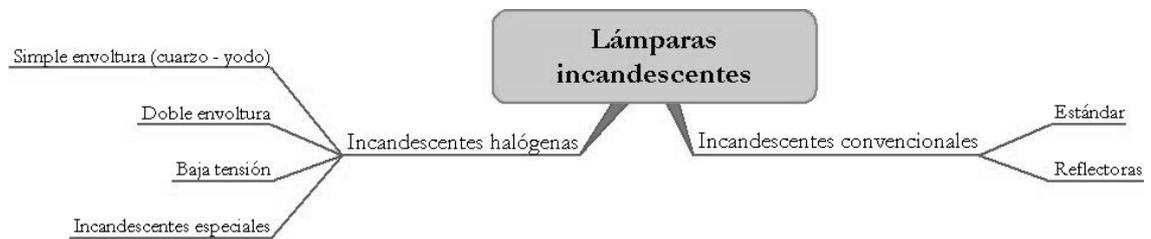


Fig. 11. Diferentes tipos de lámparas incandescentes

Las dos grandes ramas de fuentes de luz existentes son las incandescentes — luz producida por **termorradiación** ó calor — y las de descarga — luz producida por **luminiscencia**.

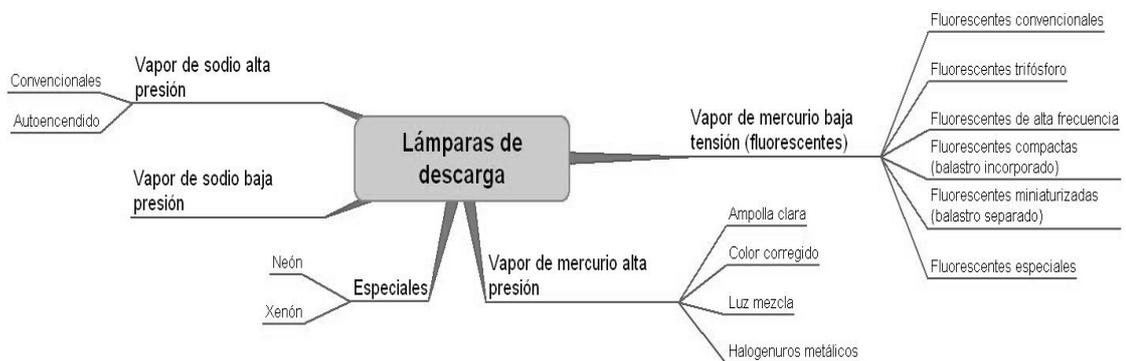


Fig. 12. Diferentes tipos de lámparas de descarga

Las lámparas que funcionan por **incandescencia**, se conectan directamente a la red eléctrica, sin necesidad de equipos auxiliares de conexión o encendido. Las lámparas de descarga tienen una característica de **resistencia negativa**, es decir, que disminuye su resistencia a medida que aumenta la corriente, que por ellas circula; debido a esto, es necesario utilizar un elemento limitador de dicha corriente, llamada corriente de arco, para su conexión a la red. Asimismo, algunas lámparas de descarga necesitan para su encendido tensiones superiores a la de red, por lo que necesitan equipos arrancadores que suministran picos de tensión para el encendido.

#### **2.4.1 Lámparas incandescentes convencionales**

Una lámpara incandescente, también llamada bombilla (ó *foco o lámpara de filamento*), está formada por una **ampolla de vidrio**, en la que se ha hecho el vacío y que lleva en su interior un **filamento enrollado** en forma espiral, que puede ser sencilla o doble; su calibre es dos veces más fino que el cabello humano y es necesario un metro de material para formar tres centímetros de filamento. Éste material tiene un punto de fusión muy elevado, el cual se pone **incandescente** al paso de la corriente eléctrica que fluye a través del delgado filamento, hilo que, normalmente es de **volframio** o **tungsteno** — *Se le llama incandescente, a aquello que se pone enrojecido o blanqueado por la acción del calor; dicho generalmente a los metales.*

Durante muchos años, las lámparas incandescentes se rellenaban con una mezcla de nitrógeno y argón. Actualmente, algunos fabricantes utilizan un gas poco común, el **criptón**, gas que permite que el **filamento** funcione a una temperatura mayor, lo que da como resultado una luz más brillante.

El hilo de **tungsteno**, tiene una temperatura de fusión de alrededor de los **3,410 °C**; este hilo es tan fino que el desplazamiento de las cargas eléctricas por él lo hace alcanzar temperaturas por encima de los 2.500°C. En comparación con el **volframio**, a estas temperaturas, éste se oxida y se evapora en el aire. Es por

esto, y para aminorar este problema, que el filamento está dentro de la ampolla de vidrio en una atmósfera al vacío, al igual que para las lámparas de pequeña potencia, y para las lámparas de media y gran potencia, en gas inerte (**ázo**e, **argón**, **criptón**, etc.).

El uso de un gas inerte en lugar del vacío tiene como ventaja una evaporación más lenta del filamento. Actualmente, la mayoría de las bombillas se rellenan con una mezcla de **argón** y **gases halógenos**, o bien con una pequeña cantidad de **nitrógeno** o de **criptón**. Aún así, se produce la evaporación lentamente y el filamento se hace cada vez más fino y se rompe, lo que hace inservible a la bombilla.

Las bombillas que tienen el filamento de *volframio*, consumen mucha energía; y sólo el 10% de la energía eléctrica suministrada se transforma en energía luminosa. La siguiente imagen muestra un diagrama clásico de una bombilla, universalmente conocida, ver figura 13.

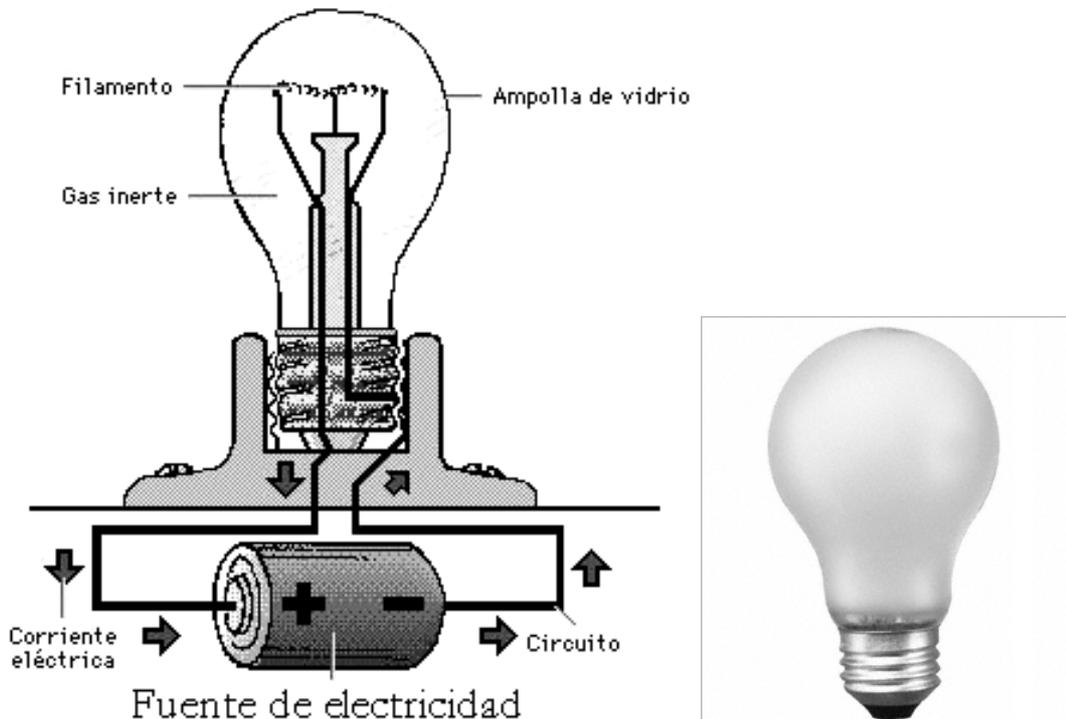


Fig. 13. Diagrama de funcionamiento de una lámpara incandescente

La vida media de las lámparas de incandescencia es de, aproximadamente, **1000 horas**, a la tensión nominal; Aumentando la potencia de una lámpara de incandescente, se aumenta también la eficiencia luminosa, por lo tanto, con el empleo de fuentes luminosas de elevada potencia se tiene un mayor rendimiento que con las de potencia pequeña.

Alimentando las lámparas con una tensión superior a la nominal, se reduce sensiblemente su duración; cada hora de funcionamiento a una tensión 10% mayor que la nominal, acorta en dos horas la vida de la lámpara. Alimentando la lámpara *con una tensión inferior* a la nominal, **disminuye** sensiblemente **el flujo luminoso**. Las lámparas de incandescencia emiten mucho calor; las luminarias que no permiten la disipación del calor reducen su duración. La siguiente tabla muestra los valores de eficiencia y flujo luminosos de las diferentes presentaciones de las luminarias incandescentes.

Potencia nominal (W)	Flujo luminoso <sup>(*)</sup> (lm)		Eficiencia luminosa (lm/W)	
	127 V	220 V	127 V	220 V
<b>25</b>	220	220	8.8	8.8
<b>40</b>	430	350	10.8	8.8
<b>60</b>	750	630	12.5	10.5
<b>100</b>	1380	1250	13.8	12.5
<b>150</b>	2300	2090	15.4	14.0
<b>200</b>	3200	2920	16.0	14.6
<b>300</b>	4950	4610	16.5	15.3
<b>500</b>	8800	8300	17.6	16.6
<b>1000</b>	19100	18600	19.1	18.6
<b>1500</b>	29600	29000	19.8	19.5

*Características de las lámparas de incandescencia normales*

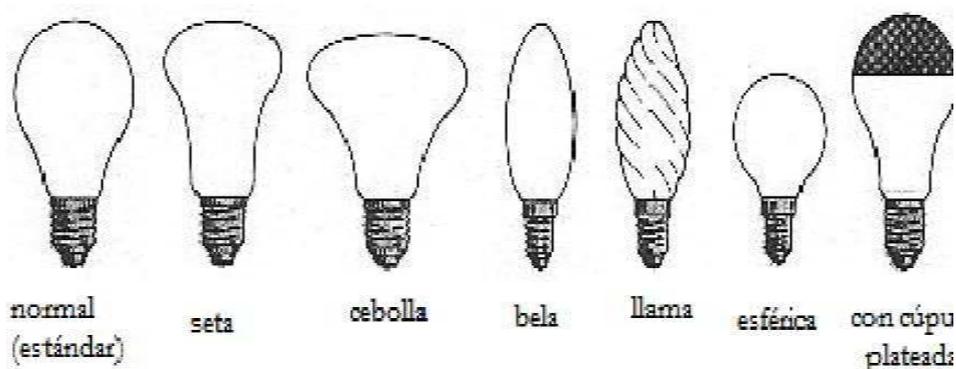
La conservación del flujo luminoso, está estrechamente ligado al periodo de tiempo de encendido de las lámparas, en éste caso y para fines de ejemplo, se muestra en la tabla siguiente, el rendimiento de las luminarias al cabo de 750 horas de trabajo.

<i>Tiempo de encendido</i>		<i>Flujo luminoso resultante</i>		<i>Potencia de la luminaria</i>		<i>Flujo luminoso resultante</i>	
750	Hrs	72-74	%	25	W	28-26	%
750	Hrs	85	%	40 a 200	W	15	%
750	Hrs	80-85	%	300-500	W	20-15	%
750	Hrs	70-80	%	1000	W	30-20	%
750	Hrs	65-80	%	1500	W	35-20	%

*Pérdida del flujo luminoso al cabo de 750 horas de servicio*

#### 2.4.1.1 *Formas y tipos*

La ampolla, de las luminarias **incandescentes**, puede ser de tipo clara, esmerilada u opalizada (*opaca*), para reducir la **luminancia** y por lo tanto, el deslumbramiento, ver figuras 14 y 15.



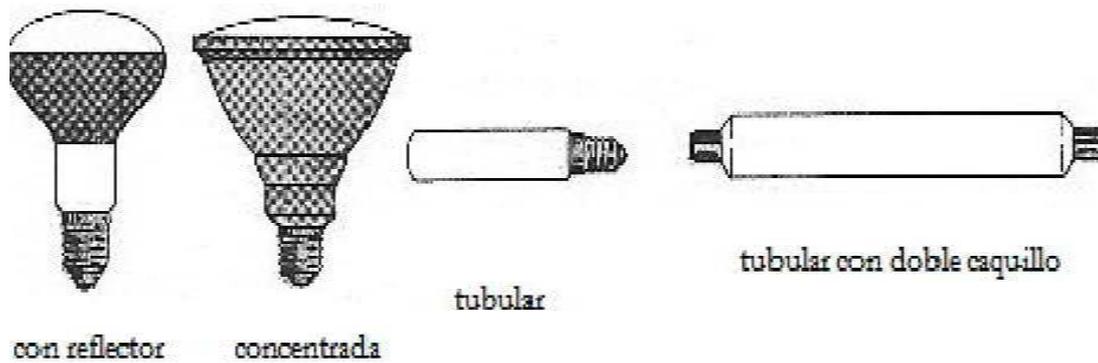


Fig. 14. *Tipos de ampollas*

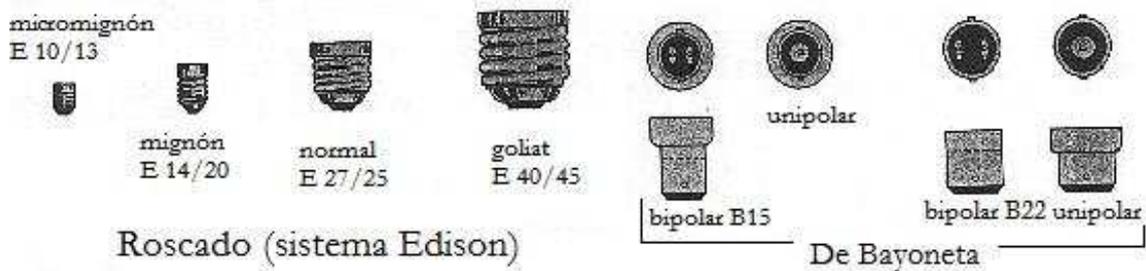


Fig. 15. *Principales tipos de casquillos*

Las siglas designan la designación normalizada; la letra E significa **sistema Edison**; el primer número, el diámetro exterior de la rosca; el segundo, la longitud total del casquillo. La letra B significa **Bayoneta**; y el número indica el diámetro del casquillo. Cabe mencionar que algunas lámparas se elaboran con vidrios de cuarzo debido a su elevada temperatura de operación. El casquillo, generalmente roscado, es de latón o aluminio; en él se conectan los electrodos principales, uno va soldado al contacto central y el otro se une al borde superior de la base.

La siguiente figura muestra la forma de las lámparas especiales utilizadas para reflectores de potencia y de uso particular, ver figura 16.

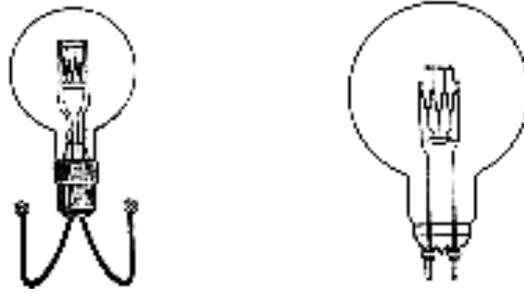


Fig.16. Lámparas de potencia especiales para fotografía y cinematografía

Las principales desventajas de estas lámparas son:

- Disminución sensible del flujo luminoso emitido causado por la ampolla ennegrecida, debido a que el filamento de **tungsteno** se evapora parcialmente, depositándose en el interior del bulbo.
- Corta duración, ya que se rompe el filamento y se ennegrece la ampolla.
- Luz demasiado intensa causada por la tensión de alimentación superior a la nominal
- Emisión de luz rojiza causada por la tensión de alimentación inferior a la nominal.

#### 2.4.2 Lámparas incandescentes con halógeno

Este tipo de lámparas, perteneciente a la familia de las lámparas incandescentes, suelen ser mejores. La luz halógena es más blanca; tiene una temperatura de color de 3000 °K, tiene mayor vida de utilidad, también es bajo mantenimiento, proporciona un mayor flujo luminoso y además, trabajan con un menor consumo de energía.

Aparte del gas de relleno, se introducen pequeñas cantidades de **Bromo halógeno** (generalmente **yodo**). Esto da lugar a un proceso que devuelve al filamento, el **tungsteno** volatizado, impidiendo el ennegrecimiento del globo; éste proceso se conoce como el ciclo del halógeno. Este tipo de lámparas se

caracteriza por una menor decadencia luminosa, mayor eficiencia y menores dimensiones de la ampolla, que generalmente están echas de cuarzo. Para conservar las propiedades luminosas de la lámpara, no deben de tocar las bombillas con materiales que puedan desprender grasa.

Estas lámparas se utilizan para la iluminación de monumentos y campos deportivos, y para aplicaciones con tiempos reducidos de funcionamiento continuo, ver la siguiente imagen:



*Lámpara incandescente con halógeno*

Una de las principales desventajas de éste tipo de lámparas es su elevado precio y elevada luminancia.

### **2.4.3 Lámparas de vapor de sodio (baja presión SBP) y Lámparas de vapor de sodio (alta presión SAP)**

El funcionamiento de éste tipo de lámparas es similar a las lámparas de vapor de mercurio; la diferencia es la que la temperatura de operación, ya que para asegurar la vaporización del **sodio**, se requiere de una temperatura mucho mayor.

La estructura del *bulbo*, está fabricada con un vidrio duro, químicamente tratado para resistir los efectos corrosivos del **sodio**, y mantener estable la temperatura del tubo de descarga, que es de 260 °C. Su arquitectura se basa en un tubo de descarga interna donde se encuentran dos electrodos de **tungsteno** recubiertos con material emisor, que operan bajo el principio de cátodo frío, a una tensión elevada entre 400 y 600 Volts. Esta tensión es suministrada por un arrancador eléctrico, el cuál proporciona un impulso de tensión para realizar la descarga. Así mismo, el tubo de descarga, contiene **neón**; al cuál se le anexa una mínima cantidad de **argón**, que es quien logra reducir la tensión del encendido.

Las lámparas de vapor de sodio, proporcionan el color de la luz con una única **longitud de onda**, que se conoce como color puro. De estos colores puros, se dice que están saturados, y no suelen existir fuera del laboratorio, además es la que genera más lúmenes por vatio del mercado. Estas lámparas se utilizan en iluminación de calles, carreteras y espacios abiertos de gran tamaño, donde la distinción de colores no es fundamental; ya que la tonalidad de luz que desprenden es de un **amarillo-naranja espectral**, casi completamente **saturado** por lo que la reproducción de colores es muy pobre.

**Lámparas de vapor de sodio (alta presión SAP).** Las lámparas de **vapor de sodio** cuya **presión** parcial durante su operatividad, es de aproximadamente **0,1 atmósferas**, generando una luz amarilla, pero de espectro amplio, en contraste con la producida a baja presión. Así mismo, es una de las más utilizadas en el alumbrado público ya que tienen un alto rendimiento y la reproducción de los colores que emite, se mejora considerablemente, aunque no al nivel que pueda iluminar anuncios espectaculares o algo que requiera excelente reproducción cromática.

El foco de vapor de sodio está compuesto de un tubo de descarga de cerámica translúcida, esto con el fin de soportar la alta corrosión del sodio y las altas temperaturas que se generan; a los extremos tiene dos electrodos que suministran la tensión eléctrica necesaria para que el **vapor de sodio** encienda.

Para operar estas lámparas se requiere de un balastro y uno o dos condensadores para el arranque. Para su encendido requieren de, por lo menos, **9-10 minutos**, y para el reencendido de **4-5 minutos**.

El tiempo de vida de estas lámparas, es alrededor de las **24,000 horas**.

Su uso, principalmente está destinado para el alumbrado de grandes avenidas, autopistas, calles, parques y donde la reproducción de los colores no sea un factor importante, al igual que las lámparas de vapor de sodio de baja presión.

#### **2.4.4 Lámparas de vapor de mercurio alta presión**

La estructura de estas lámparas consiste en un tubo de descarga de **cuarzo** relleno de **vapor de mercurio**, el cual tiene dos electrodos principales y uno auxiliar, para facilitar el arranque. Para su operación, requieren de un balastro.

El tipo de luz emitido, por las lámparas de mercurio, es de color **azul verdoso**; y para evitar las radiaciones rojas, se añaden sustancias fluorescentes que emitan luz en esta zona del espectro electromagnético. De ésta manera se mejoran las características cromáticas de la lámpara.

La vida útil, de estas lámparas, es de aproximadamente, **25,000 horas**, aunque la depreciación lumínica es considerable; y son usadas, principalmente, para iluminar avenidas, carreteras, autopistas, parques, naves industriales y lugares poco accesibles ya que el periodo de mantenimiento es muy largo.

Actualmente, las lámparas de **aditivos metálicos** (o lámpara de **haluros metálico**), particularmente, las que encienden por pulso (*pulse start*), proveen mejores características a lo largo de su vida útil.

#### 2.4.5 Lámparas de Haluros Metálico

Estas lámparas también se conocen como **lámparas de aditivos metálicos**, **lámparas de halogenuros metálicos**, ó **lámparas de mercurio halogenado o METALARC**.

Son lámparas de **descarga de alta presión**, pertenecientes al grupo de las lámparas llamadas **HID** (*Hight Intensity Discharge*). Son de alta potencia y con amplia gama de colores, incluyendo la luz ultravioleta.

Las lámparas de *haluros metálicos*, requieren un equipo auxiliar para proporcionar el voltaje apropiado para comenzar el encendido y regular el flujo de electricidad para mantener la lámpara encendida.

En una lámpara de *haluros metálico*, el tubo compacto, donde se forma el **arco**, contiene una mezcla de **argón**, **mercurio** y una variedad de **haluros metálicos**, que son los que afectan la naturaleza de la luz producida, variando la intensidad y la temperatura del color. Cuando se aplica voltaje, el gas *argón* se **ioniza** y permite el paso del **arco volcánico** pulsante, a través de dos electrodos; el calor generado por el arco eléctrico vaporiza el *mercurio* y los *haluros metálicos*, produciendo **luz** a medida que la temperatura y la presión aumentan.

Éste tipo de lámparas consta de una base metálica que permite la conexión eléctrica; así mismo, la lámpara está recubierta con un cristal protector externo (*llamado bulbo*) que protege los componentes internos de la lámpara y que a la vez contiene un filtro que detiene las **radiación ultravioleta**, provocadas por el vapor de mercurio. Dentro de la cubierta de cristal, se encuentran una serie de soportes y alambres de plomo que sostienen el tubo de cuarzo fundido (*donde se forma el arco voltaico y la luz*), y a su vez este se encaja en los electrodos de **tungsteno**. Dentro del tubo de cuarzo fundido, además del mercurio, contiene yoduros, bromuros (*de diferentes metales*) y un gas noble. La composición de los metales usados define el color y la temperatura de la luz producida por la lámpara. Algunas lámparas son recubiertas internamente con **fosforo** para propagar la luz.

Las **lámparas de haluro** metálico requieren balastos para regular el flujo continuo del arco y proporcionar el voltaje apropiado a la lámpara, dando un control más preciso y exacto de la potencia, con éste hecho se obtiene un color más consistente y una vida más larga de la lámpara. Algunas lámparas grandes contienen un electrodo especial de encendido para generar el arco cuando la lámpara es encendida, generando un parpadeo leve al momento del encendido. Las lámparas más pequeñas no requieren un electrodo de encendido, y en lugar de este utilizan un circuito especial de encendido, que se encuentra dentro del balasto, generando un pulso de alto voltaje entre los electrodos de funcionamiento.

En algunos casos se dice que los balastos electrónicos incrementan la eficiencia de la lámpara, reduciendo el consumo eléctrico, pero hay excepciones, por ejemplo las lámparas de alta frecuencia (High Output) o muy alta frecuencia (**Very High Output**) donde el rendimiento no aumenta con el uso de balastos electrónicos. El tiempo de vida de estas lámparas va desde las 20.000 a 22.000 hrs.

Las lámparas de aditivos metálicos son utilizadas, tanto para uso industrial como para uso doméstico; son colocadas en estaciones de combustible, plazas y alumbrado público. Por su amplio espectro de colores, se le suele usar en lugares donde se requiere una buena reproducción de colores, como estaciones de televisión y campos deportivos.

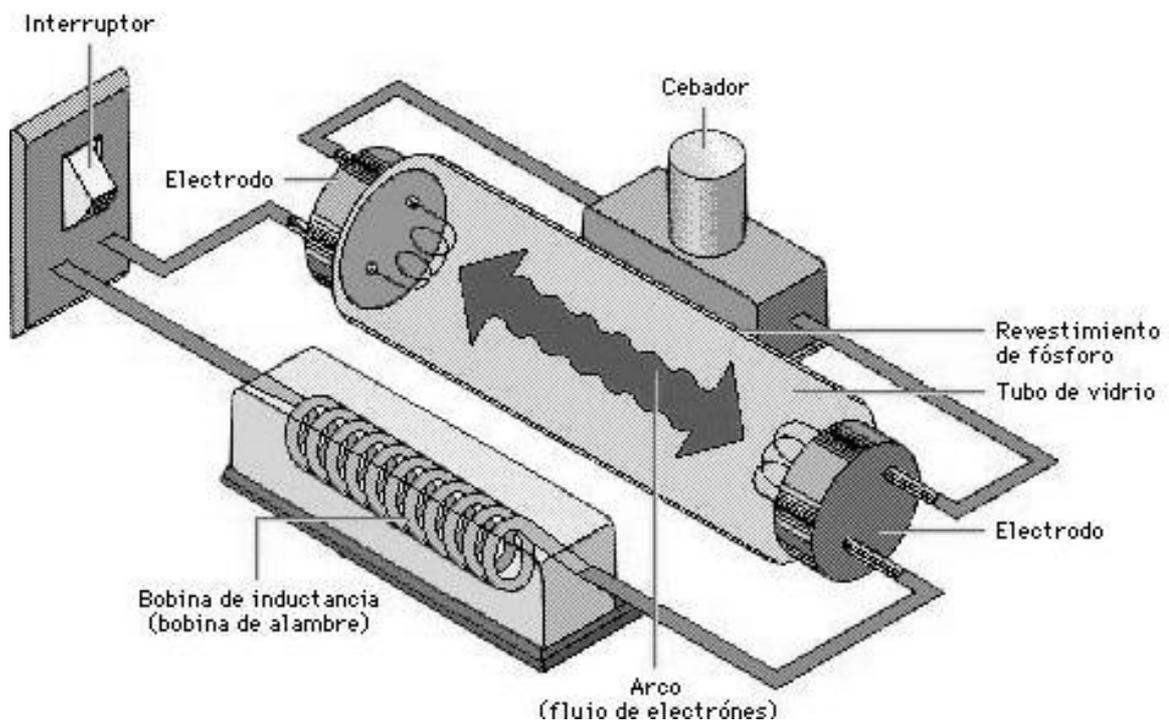
#### **2.4.6 Lámparas Contacto Fluorescentes CFL's**

Ésta lámpara, está formada por un **bulbo** fino de vidrio, revestido con una sustancia que contiene **fósforo**, polvo fluorescente. Consta de un **cebador** — *dispositivo que sirve para iniciar el proceso físico o químico* — y una **bobina de inductancia**. El tubo está relleno con **Argón** y una **pequeña** cantidad de **vapor de mercurio**. El cebador aplica corriente a dos filamentos, hechos de **tungsteno**, para encender la lámpara. Los filamentos generan electrones para

**ionizar** el argón, formando un *plasma* que conduce la electricidad. La bobina de inductancia, limita la cantidad de corriente que puede fluir a través del tubo. El **plasma** excita los átomos de *mercurio* que, como consecuencia, emiten luz visible y luz ultravioleta; donde la luz golpea contra el revestimiento de **fósforo**, (del interior de la lámpara), convirtiendo la luz ultravioleta en luz **más** visible.

En una lámpara fluorescente, más del 90% de la luz se produce por fluorescencia y el porcentaje restante, es producido por las bandas visibles del arco de mercurio. El hilo en espiral de tungsteno se recubre con un material emisor, ya sea bario, estroncio y óxido de calcio, que cuando se calientan, desprenden electrones, proceso llamado emisión termiónica.

Los diferentes fósforos generan colores más cálidos o más fríos. En la siguiente imagen se muestra un diagrama de un tubo fluorescente.



*Lámpara fluorescente*

Las lámparas fluorescentes que operan con precalentamiento y arranque rápido, exigen cuatro puntos de conexión eléctrica que se agrupan en dos bases de doble contacto. Dentro de las bases de doble contacto existen tres tipos comunes que son: el casquillo *doble patilla miniatura*, el **medio** y el **Mogul**. En las lámparas **circline**, los contactos están reunidos en un casquillo con cuatro patillas, situadas entre los dos cátodos en los que se unen los extremos de la lámpara. Las lámparas de encendido de tipo instantáneo requieren de sólo dos contactos, mientras que el tipo **slimline**, tiene casquillos de una sola patilla.

Existen muchos modelos y tipos de lámparas fluorescentes como por ejemplo las convencionales, de trifósforo, modulares, de alta frecuencia, compactas (de balastro incorporado), miniaturizadas (de balastro separado) y especiales.

En la siguiente tabla se muestra reflejados los diferentes tipos de lámparas fluorescentes, de acuerdo con las tonalidades de luz blanca que emiten y su correspondiente temperatura de color en grados Kelvin (°K).

<b>Tonalidades de color</b>	<b>Temperatura de color (°K)</b>
Blanco cálido (WW) ( <i>Warm White</i> )	3,000
Blanco (W) ( <i>White</i> )	3,500
Natural (N) ( <i>Natural</i> )	3,400
Blanco Frío (CW) ( <i>Cool White</i> )	4,100
Blanco Frío Deluxe (CWX) ( <i>Cool White Deluxe</i> )	4,200
Luz del Día (D) ( <i>Daylight</i> )	6,500

#### *Tonalidades y temperatura del color*

Entre las ventajas de las lámparas fluorescentes se encuentran las siguientes:

- Aportan más luminosidad con menos watt de consumo.
- Tienen bajo consumo de corriente eléctrica.

- El tiempo de operación de una lámpara fluorescente es de alrededor de 7,500 a 15,000 horas.
- Tienen poca pérdida de energía en forma de calor.
- La vida útil de una lámpara fluorescente se reduce o termina por los siguientes motivos:
  - Desgaste de la sustancia emisora que recubre el filamento de tungsteno compuesta de calcio (Ca) y magnesio (Mg).
  - Pérdida de la eficacia de los polvos fluorescentes que recubren el interior del tubo.
  - Ennegrecimiento del tubo en sus extremos.
  - Excesivo número de veces que se enciende y apaga de forma habitual la lámpara en períodos cortos de tiempo.

Así mismo, una de las principales desventajas que tienen éstas lámparas es el mercurio contenido en ellas, principalmente al momento en que las lámparas se rompen por cualquier circunstancia. Es aconsejable tener mucho cuidado al momento de la limpieza tanto con los vidrios y el polvo fluorescente. El mercurio causa complicaciones en los seres vivos; los síntomas pueden incluir temblores; cambios emocionales (irritabilidad, nerviosismo, excesiva timidez); insomnio; cambios neuromusculares (atrofia muscular o espasmos); dolores de cabeza; alteraciones en sensaciones; déficit en funciones cognitivas. En exposiciones más altas puede haber efectos sobre los riñones, fallas respiratorias e inclusive la muerte.

## Capítulo 3

### APLICACIÓN DEL DIODO EMISOR DE LUZ COMO ALTERNATIVA DE AHORRO

#### 3.1 OFERTA DE LARGA VIDA Y DURABILIDAD

La primera finalidad de una fuente de luz consiste en producirla y la eficacia con que una lámpara realiza este cometido se expresa en **lúmenes** emitidos por **vatios** consumidos, relación llamada **eficacia luminosa**.

Un consumidor, al requerir de alguna luminaria para determinada necesidad, primero necesita que ésta luminaria satisfaga las necesidades de uso, otra es que el tiempo de vida de la luminaria sea lo suficientemente largo para evitar el cambio de la misma en periodos cortos, y también que el costo de la luminaria sea accesible y proporcional al uso que se le va a dar.

Con relación al uso de bombillas de luz eléctricas en las señales de salida son su vida limitada, requiriendo reemplazo frecuente; su sensibilidad al calor, al fuego, a la vibración, al factor de durabilidad, como por ejemplo cuando ocurren accidentes y su alta demanda de voltaje y potencia. Por este motivo, ahora los **LEDs** son utilizados para proporcionar un periodo de vida más largo, niveles de durabilidad más altos y una demanda de niveles de voltaje y de potencia más baja, especialmente cuando se utiliza el sistema de respaldo de corriente directa **dc** de baterías.

Para decidir qué tipo de lámpara se va a utilizar es necesario tener en cuenta las siguientes características:

- **Potencia nominal:** que es quien condiciona el **flujo luminoso** y las proporciones de la instalación bajo el punto de vista eléctrico, ya sea, sección de los conductores, tipos de protección, etc.
- **Eficiencia luminosa** y degeneración del flujo luminoso durante el funcionamiento, promedio de vida y costo de la lámpara; estos factores condicionan la **economía** de la instalación.
- **Rendimiento cromático:** que es quien condiciona la mayor o menor apreciación de los colores respecto a la observación con luz natural.
- **Temperatura de color:** condiciona la tonalidad de luz. Se dice que una lámpara proporciona luz “cálida” o “fría” si prevalecen las radiaciones luminosas de color rojizo o azulado.
- **Tamaño:** condiciona la construcción de los aparatos de iluminación (direccionalidad del haz luminoso, coste, etc.)

Las diferentes formas en que se colocan los **diodos emisores de luz** dependen de las necesidades de donde se pretenda mejorar las condiciones de iluminación. Se utilizan en amplias aplicaciones como señales de video de **LED** al aire libre e interior, señales de **transporte** e iluminación automotora y también ya se usan en aplicaciones de alto volumen como la contraluz de LCD y tableros de anuncios para la iluminación directa e indirecta.

Las ventajas de los **LEDs**, en comparación con las lámparas incandescentes, son la diferencia en su vida útil y mayor eficacia de energía. Ya es posible conseguir **LEDs** en una amplia gama de colores dentro de todo el espectro visible, con una elevada vida útil, elevado brillo, alta eficiencia lumínica y estándares de calidad de acuerdo a exigentes normas de nivel mundial. Su bajo consumo comparado con otras fuentes de luz, incluso inferior a las lámparas de bajo consumo y **tubos fluorescentes**, posicionan al LED dentro del grupo de los productos ambientalmente amigables y ecológicos. Sumado a todo esto nos encontramos con que su precio y disponibilidad en el mercado lo hacen cada vez más

accesible al público en general e indicado para cada vez más aplicaciones de uso cotidiano.

### **3.2 Alternativas de LEDs (de montaje superficial, Multicolor, Bicolor)**

**LEDs de montaje superficial (SMD).** Éste tipo de diodos **LED-SMD** (Light Emitting Diode Surface Mount Device), funcionan igual que un **LED** convencional; está encapsulado en resina semirrígida con la superficie del semiconductor mayor, por lo tanto el fosforo luminiscente da mayor cantidad y calidad de luz. El material semiconductor que lo forma es el *nitruro de galio e indio (InGaN)* que emite luz azul y verde; o *fosforo de galio (GaP)* que emite luz en la zona roja del espectro. Este tipo de **LEDs** forma parte de la tecnología que intenta ser una alternativa para sustituir a la lámpara incandescente y fluorescente, ya que por su escasa liberación de calor y por su bajo consumo de energía son la alternativa para el ahorro económico.

A estos **LEDs** se les ha adaptado, individualmente, un dispositivo interconstruido que permite omitir los **LEDs** en mal estado, esto es que si un **LED** llegara a fallar, automáticamente el dispositivo suple su función en la serie evitando que se apague la serie completa de **LEDs**.

Otra ventaja del **LED SMD** es que en su fabricación el ensamble automatizado aumenta la calidad de la manufactura, el tiempo de producción y provee un bajo perfil de apenas entre 2 y 4 milímetros ya ensamblado.

**LEDs de montaje superficial RGB (multicolor).** Este tipo de montaje el que utiliza el estándar de obtención de colores **aditivo**. Por el momento, su principal utilización es en pantallas gigantes e iluminación arquitectónica. Se dice que es **aditivo** por que el color deseado se obtiene mediante la suma de los **colores**

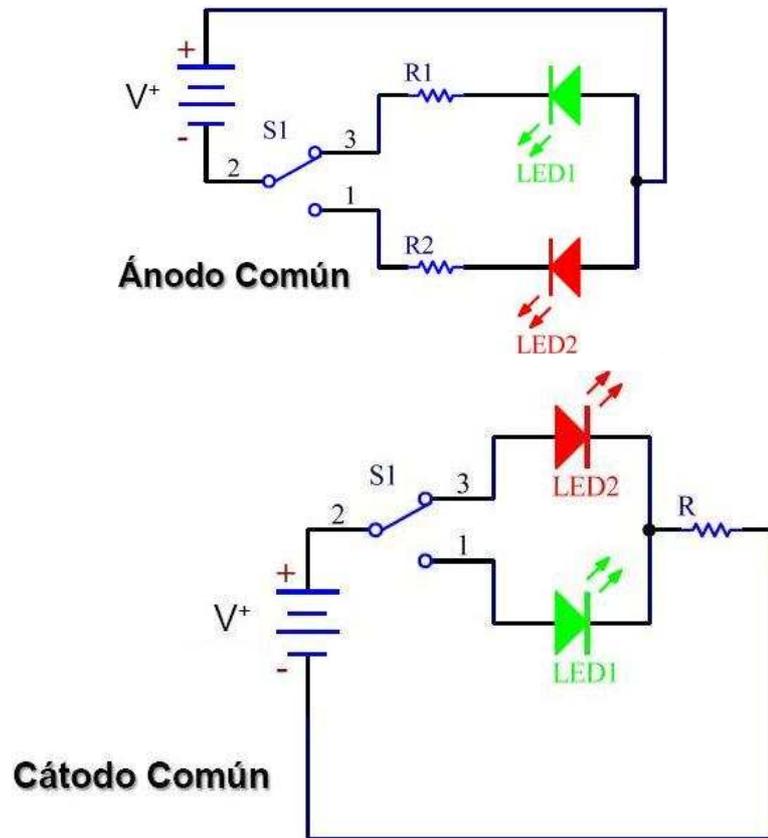
**primarios** que son el **Rojo, Verde y Azul**, de las siglas en ingles **RGB** (*R* = Red, *G* = Green y *B* = Blue).

El **LED RGB** estándar, es capaz de emitir más de 16 millones de colores aunque sólo 6 millones de colores son los que alcanza a distinguir **el ojo** humano. Esta tecnología permite construir luminarias de LEDs SMD que pueden remplazan la tecnología existente para iluminación en general, inclusive con otra ventaja adicional, la conexión directa a sistemas Solares Fotovoltaicos de 12 Volts.

Una de las muchas ventajas de los diodos es su duración, ya que su tiempo de vida es muy larga, pueden estar prendidos emitiendo luz durante **100,000** horas, eso es igual a seis años de funcionamiento continuo. Tal durabilidad es 50 veces mayor que la de una bombilla incandescente y 15 veces mayor que la iluminación fluorescente.

**Los LEDs Bicolor** están formados, como su nombre lo indica, con dos colores en un mismo LED; esto es debido a la composición química que el fabricante haya manejado. Éste LED tiene dos maneras de conectarse: la primera siendo por “ánodo común” y la segunda, por “cátodo común”. Para reconocer el tipo de LED Bicolor, se aplican estas dos formas: utilizando el multímetro, en la sección del diodo, se conecta el cable negro a la “patilla” central y con el cable rojo se tocan las otras patillas por separado. Si enciende algún color, tenemos un LED Bicolor con “cátodo común”. La observación en estos dispositivos es suficiente para distinguir el tipo de LED Bicolor: si la patilla central es más ancha que las otras, igual, se trata de un LED con “cátodo común”; y si la patilla central es pequeña, se tiene un LED Bicolor “ánodo común”.

La siguiente imagen muestra las conexiones de LEDs bipolares en conexión con ánodo común o cátodo común:



Existen lámparas de LEDs de dos terminales, las cuales contienen dos LEDs, de manera que una inversión en la polarización cambia el color de verde a rojo o viceversa.

### 3.2.1 Conexión básica (Serie – Paralelo)

En un circuito básico con LEDs, es necesaria la utilización de una **resistencia** para la corrección de la corriente que circule por el circuito. Para poder saber el valor de dicha resistencia, primero debemos saber a qué voltaje trabaja nuestro LED y ese valor nos lo proporciona el fabricante. En la tabla a) se muestra que el voltaje de operación de los LEDs depende del color; la corriente típica de operación de un **LED** estándar oscila entre los **10 – 40 mAmp**. Así mismo en la tabla, se aprecian los valores estándar de voltaje, con los que se energizan los LEDs de diferentes colores.

COLOR	LED Estándar		
	VF (V)		
Tamaño	3mm	5mm	10 mm
Rojo	2.4	2.0	1.9
Naranja		1.9	
Amarillo	2.0	1.9	1.9
Verde	2.2	3.4	3.3
Azul	3.0	3.0	3.2
Blanco	3.1	3.1	3.0

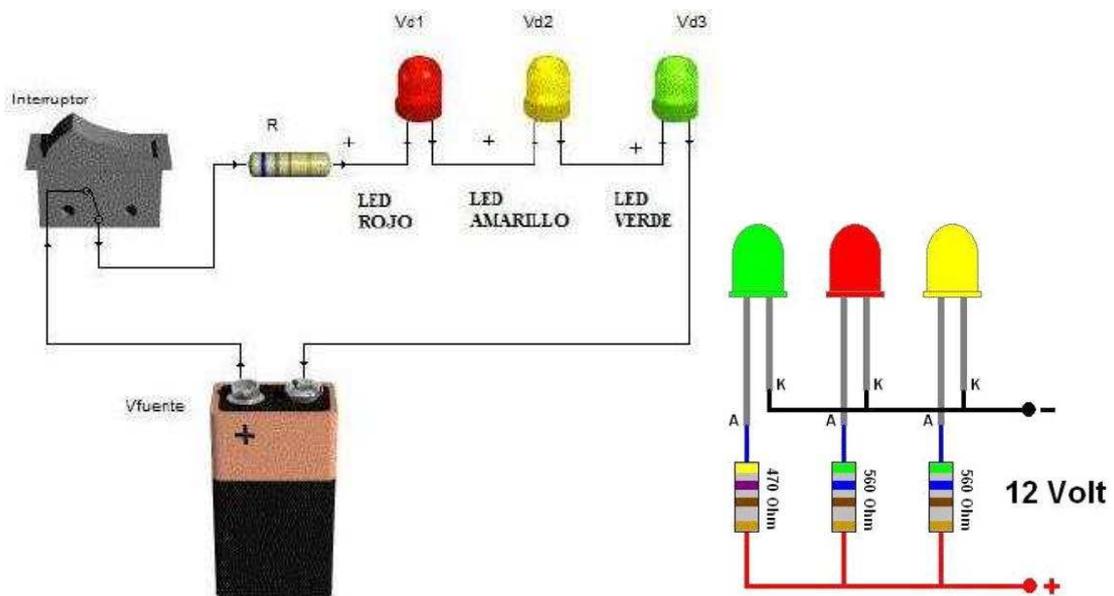
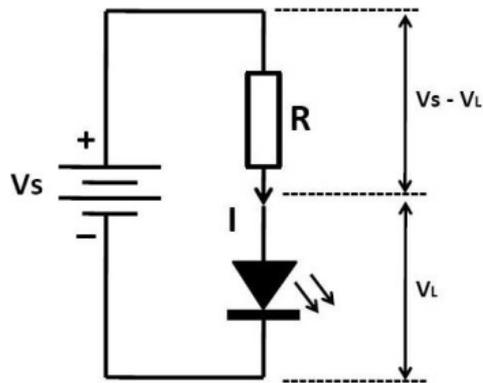
Tabla a) Voltajes de funcionamiento

### 3.2.2 Cálculo de los valores de resistencia

Una vez teniendo el valor del voltaje con el que trabaja el LED, se puede calcular el valor deseado por medio de la Ley de Ohm:  $I = \frac{V}{R}$  por lo tanto, la siguiente formula es para el **cálculo de resistencia** que se debe conectarse al **LED**:

$$R = \frac{V_{fuente} - (V_{d1} + V_{d2} + \dots)}{I}$$

En la figura a), se muestra un esquema de la **conexión básica**, en serie, de un circuito que está representado por una fuente de CD (*pila de 9 Volts*), una resistencia y un LED, así mismo se muestra los voltajes de carga de cada en cada elemento. Así mismo, en la fig. b) se muestra el arreglo de las conexiones serie y paralelo en circuitos con LEDs.



Conexión con resistencias para un circuito con LEDs de diferente color

**Ejemplo:** Para obtener el valor de la resistencia que debe llevar un circuito con un LED de color **rojo**:

Con relación a la fig. A), se tiene un **LED** rojo estándar, que se energiza con 2.0 volts (ver tabla A.); y si usamos una fuente de alimentación de DC Regulada a  $V^+ = 5\text{volts}$  ; considerando una corriente de  $I = 20\text{mAmp}$  .

LED Rojo = 2.0 volt

Calculo del valor de la **resistencia (R)**

aplicando la Ley de Ohm  $I = \frac{V}{R}$  para la resistencia  $R = \frac{V}{I}$

$$V^+ = 5\text{volts} \quad R = \frac{(5-2)V}{0.02\text{Amp}} = \frac{3V}{0.02\text{Amp}} = 150\text{ohms}$$

$I = 20\text{mAmp}$  Por lo que el valor de la resistencia = **150 Ohm**

Ahora, para calcular la **Potencia** de **R** se utiliza la siguiente formula y se realiza el procedimiento como sigue:

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P = (0.02)^2 (150)$$

$$P = 0.06\text{Watts} < 0.125\text{Watts}$$

$$P = 1/4\text{Watt}$$

Por lo que la potencia de esta resistencia debe ser de

**$\frac{1}{4}$  de Watt**

**Ejemplo.** Para obtener el valor de la resistencia que debe llevar un circuito con un LED de **azul**:

Seguimos el mismo procedimiento que con el ejemplo anterior, utilizando la tabla. A) para los valores correspondientes a un LED azul y utilizamos la Ley de Ohm.

LED Azul = 3.0 volts

Para calcular el valor de la **resistencia (R)**

se aplica la Ley de Ohm:  $I = \frac{V}{R}$  para la resistencia  $R = \frac{V}{I}$

$$V^+ = 5\text{volts}$$

$$R = \frac{(5-3)V}{0.02\text{Amp}} = \frac{2V}{0.02\text{Amp}} = 100\text{Ohms}$$

$$I = 20\text{mAmp}$$

Por lo que el valor de la resistencia = **100 Ohm**

Ahora, para calcular la **Potencia** de R:

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P = (0.02)^2 (100)$$

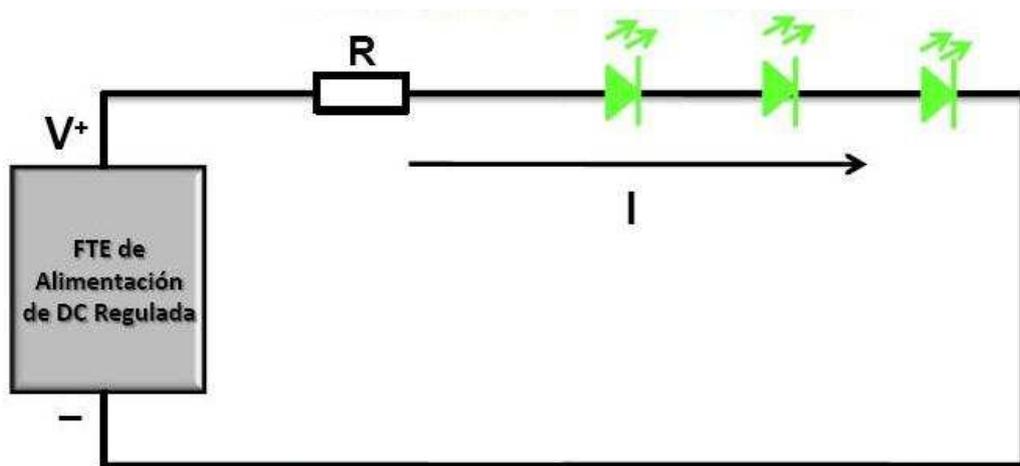
$$P = 0.04 \text{Watts} < 0.125 \text{Watts}$$

Por lo que la Potencia para la resistencia de 100 Ohm

debe ser:  $P = \frac{1}{4} \text{ Watt}$

### 3.2.3 LEDs en serie, mismo color

Para un circuito, con un arreglo en serie y LEDs del mismo color, ver figura b), se suman los voltajes de operación de cada LED y se realiza el cálculo como sigue:



b) Colocación de LEDs en serie

**LED verde** = 3.4 Volts

Cálculo del valor de R

Cálculo de la Potencia de R

$$V^+ = 12 \text{Volts}$$

$$R = \frac{(12) - (3.4 + 3.4 + 3.4)V}{0.02 \text{Amp}}$$

$$P = (0.02)^2 \cdot (90)$$

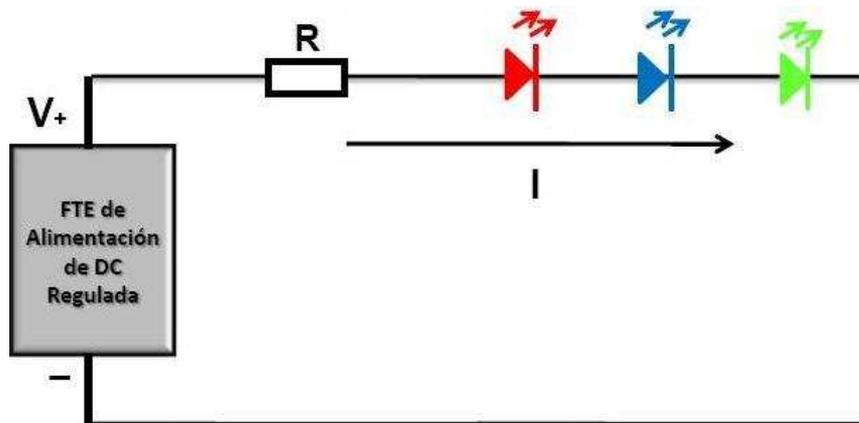
$$I = 20 \text{ mAmp } R = \frac{(12) - (10.2)V}{0.02 \text{Amp}} = \frac{1.8V}{0.02 \text{Amp}} = \underline{\underline{90 \text{ Ohm}}}$$

$$P = 0.0364 \text{ Watts}; P < 0.125 \text{ Watts}$$

$$P = 1/4 \text{ Watt}$$

### 3.2.4 LEDs en serie, diferente color

Para un circuito, con un arreglo en serie y LEDs de diferente color fig. c), se suman los voltajes de operación de cada LED, considerando el valor particular, de voltaje, para cada LED y se realiza el cálculo como sigue:



LED rojo = 2.0 Volts

Cálculo del valor de R

Cálculo de la Potencia de R

LED azul = 3.0 Volts

$$R = \frac{(12) - (2.0 + 3.0 + 3.4)V}{0.02 \text{ Amp}}$$

$$P = (0.02)^2 \cdot (180)$$

LED verde = 3.4 Volts

$$R = \frac{(12) - (8.4)V}{0.02 \text{ Amp}} = \frac{3.6V}{0.02 \text{ Amp}} = 180 \text{ Ohm}$$

$$P = 0.072 \text{ Watts}; P < 0.125 \text{ Watts}$$

Por lo que el valor de la **resistencia** para éste circuito es de **180 Ohms** y con una potencia: **P = 1/4 Watt**

### 3.2.5 LEDs en paralelo, mismo color

Para un circuito, con un arreglo en paralelo y LEDs del mismo color, fig. d), se suman las corrientes de operación de cada LED y se realiza el cálculo como sigue:

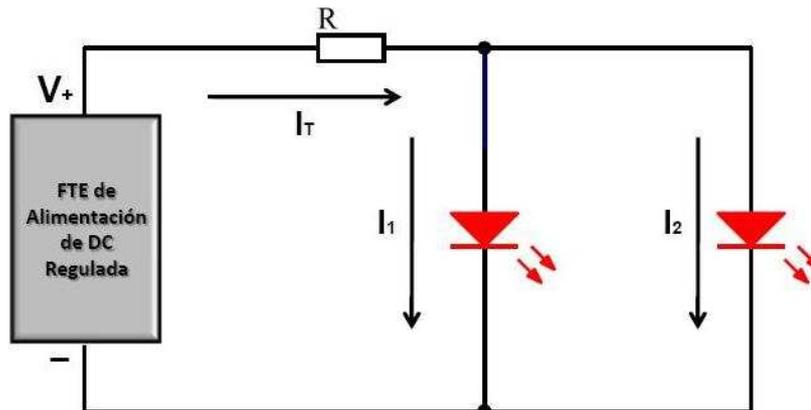


Fig. d) LEDs en paralelo, mismo color

LED rojo = 2 Volts Cálculo del valor de R

Cálculo de la Potencia de R

$$V^+ = 12\text{Volts} \quad R \frac{(12 - 2.0)V}{(0.02 + 0.02)\text{Amp}} = \frac{10V}{0.04\text{Amp}} = 250 \text{ Ohm}$$

$$P = (0.04)^2 \cdot (270)$$

$I_1 = 20\text{mAmp}$  Por lo que la resistencia estándar = **270 Ohm**

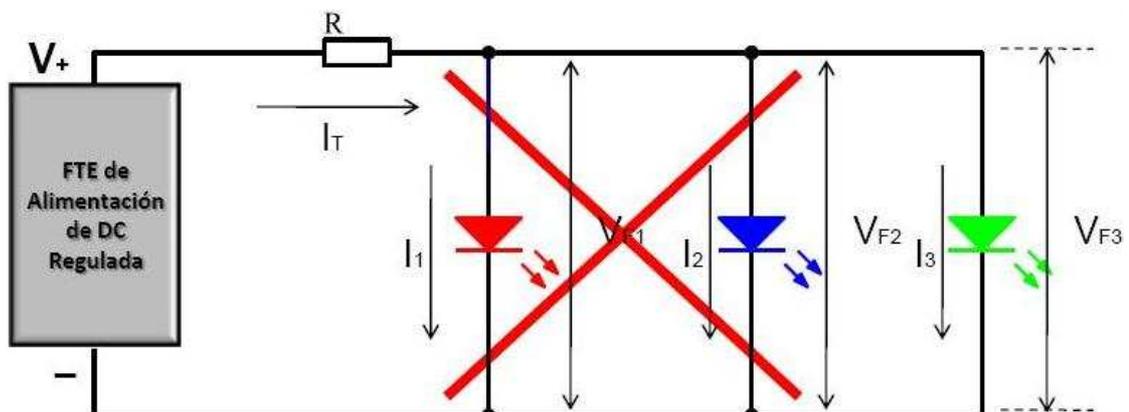
$P = 0.432 \text{ Watts}; < 0.500 \text{ Watts}$

$I_2 = 20\text{mAmp}$  **P = 1/2 Watt**

$I_T = 40\text{mAmp}$

### 3.2.6 LEDs en paralelo, diferente color

No es recomendable conectar LEDs de diferente color en paralelo, ya que manejan diferentes voltajes y la corriente no se distribuye de manera uniforme, dando como resultado un desbalance en el circuito. Para circuitos que involucren varios LEDs, es recomendable hacer el diseño de un circuito en Serie, ya que generalmente al colocarlos en Paralelo requieren de resistencias de mayor potencia, lo que generaría más calor y el circuito es menos estable, ver figura e):

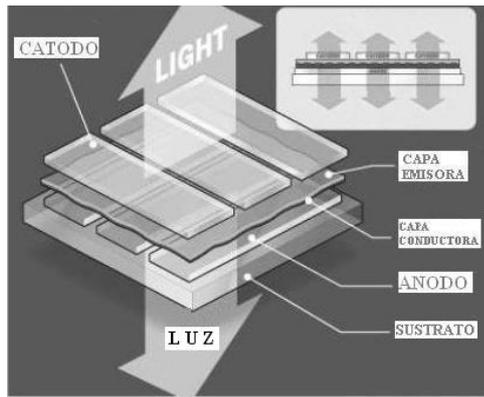


*Circuito inestable con LEDs de diferente color conectados en paralelo*

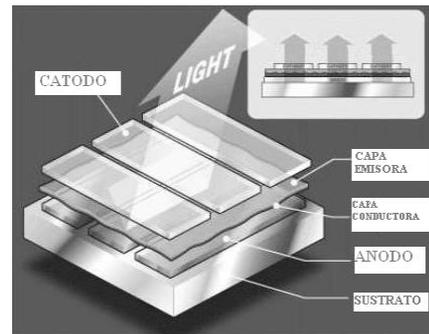
### 3.2.7 Tendencia "OLEDs"

De sus siglas en ingles *Organic Light-Emitting Diode* = **Diodo Orgánico de Emisión de Luz.**

El *OLED* es un diodo que tiene una capa electroluminiscente formada por una película de componentes orgánicos que reaccionan a una determinada estimulación eléctrica, generando y emitiendo luz. En la siguiente figura se muestra una imagen donde se observa la estructura de un *OLED* así como la descripción de sus componentes:



*Principio de emisión de la estructura*



*Estructura transparente*

La aplicación de los OLEDs va enfocada a una gran diversidad de artículos relacionados con la iluminación de definición, como por ejemplo: televisores, relojes, telefonía móvil y local, publicidad, teclados de PC, etc. Todo enfocado a la calidad, imaginación y ahorro de energía, como se muestra en la siguiente imagen:



*Aplicaciones con OLEDs*

La llamada tecnología de *CHIP LED RGB* de **punto Real**, es un sólo punto Luminoso que reproduce Millones de Colores y provee 3 veces más calidad en las imágenes comparado a las pantallas con LEDs convencionales de punto virtual que forman los colores de cada punto con 3 LEDs comunes amontonados, llamado **punto virtual**.

El consumo de voltaje es de 3 Volts en toda la pantalla, lo que disminuye el consumo eléctrico a la mitad, comparado con las otras pantallas de LED de 5.0 Volts, además alarga la vida de los componentes CHIP LED RGB a más de 100,000 horas dando un promedio de vida del televisor de 30 años, en donde se obtuvo calidad y ahorro de energía.

### **3.3 DIFERENCIAS EFECTIVAS ANTE LAS DEMÁS LUMINARIAS**

Con relación a la **fragilidad** que casi todas las luminarias presentan por ser materiales principalmente de vidrio en sus diferentes presentaciones, como en el caso de las bombillas incandescentes o en los tubos fluorescentes y así como a los eventos a los que son sometidas, como las vibraciones o los golpes, que suelen romper el filamento, el vidrio o dejan escapar gases y posiblemente mercurio; una de las ventajas que ofrecen los *LEDs* es que son dispositivos de estado sólido que no se funden, son ligeros, pequeños, amigables con el medio ambiente y resultan casi indestructibles, en comparación con las luminarias tradicionales.

Otro punto de comparación del LED con las luminarias tradicionales (descritas en el capítulo dos), es la reacción de encendido casi instantáneo en comparación, por ejemplo, con las lámparas fluorescentes que necesitan de un balastro o transformador para activar los gases.

Una cualidad de los *LEDs* es que sus características internas permiten graduar su intensidad de luminosidad variando el voltaje que reciben, esto se logra al

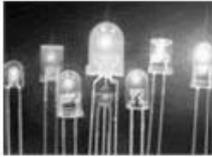
conectar el arreglo de LEDs a un dimmer o atenuador de fase para graduar la intensidad de la Luz; solo hay que tener en consideración el rango máximo permitido y delimitado por el fabricante.

Con relación a la **temperatura**, existe una diferencia notablemente grande en comparación con las luminarias convencionales; la alta eficiencia de Luz en los **LEDs** evita la producción de calor, y el riesgo de incendios por ruptura o explosión de partículas, como en el caso de las bombillas incandescentes, riesgo común de la iluminación de HID y las lámparas fluorescentes.

Una de las características primordiales que el **LED** en comparación con cualquier fuente de iluminación artificial, es el **ahorro de energía**; por ejemplo, en el caso de las lámparas incandescentes, los **LEDs** tienen una eficiencia de 10 a 17 veces mayor, y en el caso de las lámparas fluorescentes es en muchos casos duplica su eficiencia en comparación con la misma.

Como se mencionó en el segundo capítulo, el **LED** se encuentra en un momento en que su costo es superior al de las luminarias tradicionales, sin embargo la tendencia es que éste dispositivo se adapte a las necesidades actuales y sea una opción cotidiana en el uso de la iluminación artificial.

La siguiente tabla muestra algunas diferencias representativas de los tres sistemas de iluminación más comunes en el mercado:

Características	LUMINARIA							
	INCANDESCENTES		HALÓGENAS		FLUORESCENTES		LED	
Tiempo e vida útil	1000	Hrs	2000	Hrs	6000 - 9000	Hrs	50000 - 100000	Hrs
Flujo emitido	720	lm	1650	lm	2850	lm	80 - 500	lm
Eficiencia	12 - 18	lm/w	18 - 22	lm/w	50 - 90	lm/w	150	lm/w
								

*Características en luminarias*

### 3.3.1 **Cómo elegir el LED o ensamble apropiado**

Para elegir el LED apropiado deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- El ángulo de visión.
- Las horas necesarias de funcionamiento, ya que la vida útil del LED depende de su correcta alimentación y de la temperatura de su unión.
- Los requisitos de alimentación, incluyendo el consumo de energía y el método de control, es decir, control de la corriente o voltaje.
- El efecto de la temperatura y el voltaje de la intensidad máxima.
- Considerar las características del espacio o área que se desea iluminar.
- El efecto de la pérdida de uno o varios LED, de acuerdo a la aplicación.
- Revisar normas sobre la interferencia/inmunidad y la compatibilidad electromagnética y otras normas nacionales o internacionales, dependiendo el caso.
- Puede resultar necesario una protección con pararrayos complementario si no está incluida; así como la respectiva conexión a tierra por medio de un sistema.
- Los requisitos sobre la vibración mecánica y los golpes; por ejemplo el caso de los vehículos.

### 3.3.2 **Características relevantes, difusor y forma**

Difusor. Al igual que en los “reflectores” que se utilizan para dirigir, distribuir o filtrar el flujo luminoso de las diferentes lámparas, en el caso de un arreglo de diodos emisores de luz es conveniente reflejar el flujo luminoso en virtud de poder hacer una mejor distribución del flujo luminoso. En el caso de los reflectores, por ejemplo, estos dispositivos utilizan el fenómeno de la **reflexión especular, difusa o total**; donde generalmente, éste fenómeno se logra con materiales como el vidrio, llamado reflectante (*ya sea por platinización, por metalización al vacío o utilizándolo en forma de prismas de reflexión total*), Aluminio, donde sus tratamiento y protección contra la corrosión deben ser de

gran calidad para asegurar su poder reflectante; principio que es tomado para la fabricación de lámparas de *LEDs*.

**Forma.** No hay una forma definida para los LEDs, el fabricante es quien le da la diferencia o la funcionalidad que desea para las diferentes aplicaciones existentes o innovadas. Una característica primordial de un LED, es su **encapsulado** y tipo de lente que conlleva. La función del lente es de **modificar el patrón de radiación** por la característica en particular para lo que el diodo fue diseñado. Los lentes de los primeros LEDs sólo permitían el paso de la máxima cantidad de luz en la dirección perpendicular a la superficie de montaje; más tarde, la luz producida fue mayor y sus lentes se diseñaron para difundir la luz emitida, sobre una amplia área, permitiendo **mayores ángulos de visibilidad**.

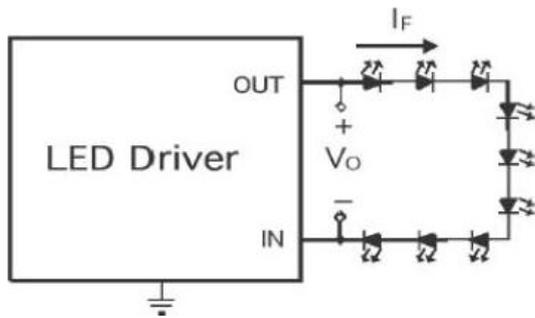
Los LEDs de alta luminosidad, junto con una gran variedad de lentes **epoxi** color rojo, fueron incorporados al mercado, para difundir la luz en una mayor área, produciendo la diferencia que caracteriza a los LEDs de alta luminosidad.

Los lentes son la mejor solución para el ahorro del consumo de energía, ya que dependiendo del diseño y de los **refractores** que se utilicen mayor será la luminosidad requerida en las diferentes áreas en que se quiera utilizar ésta alternativa de ahorro. Así mismo, la potencia y cantidad de LEDs, va conjuntamente con el área a iluminar.

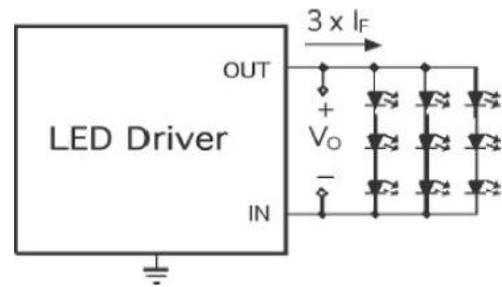
### **3.3.4 Controladores diseñados específicamente para LEDs (DRIVERS)**

Un Driver es un circuito integrado, diseñado específicamente para abastecer de corriente a un determinado número de LEDs. Los LEDs pueden formar arreglos series o paralelos dependiendo de la aplicación y al fabricante, así mismo, los driver manejan un control de intensidad aplicando un PWM o “modulación por ancho de pulso (MAP)”.

La siguiente imagen muestra cómo sería el arreglo de conexión de los LEDs con un “controlador”, en los dos diferentes tipos de conexión, serie y paralelo:



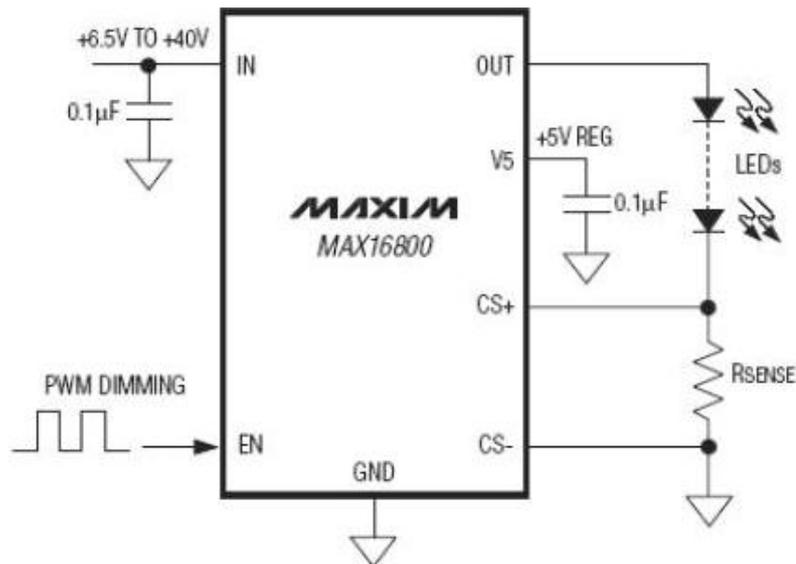
LEDs en Serie



LEDs en Paralelo

Actualmente y debido al gran crecimiento y visión que se le ha dado a los dispositivos LEDs, las empresas dedicadas al ramo de la electrónica y de la iluminación, han desarrollado controladores cada vez más avanzados para los diferentes productos que compiten en el mercado, por lo que a continuación se describen las características de un C. I., controlador de LEDs, de la marca MAXIM modelo MAX16800:

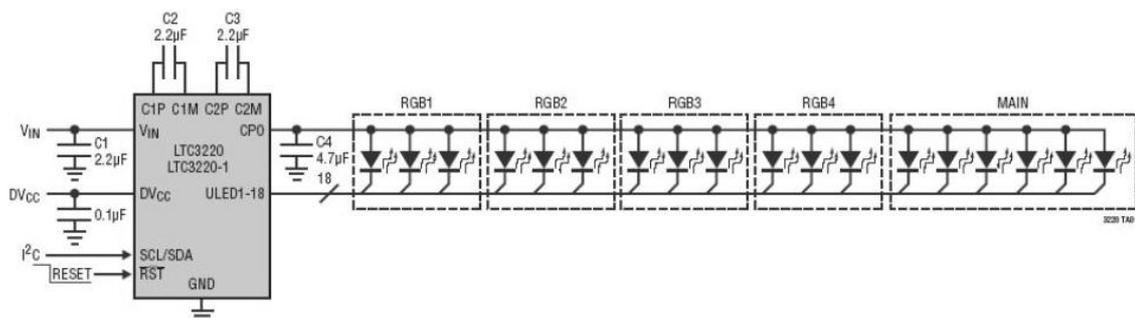
- Voltaje de entrada ( $V_{IN}$ ): 6.5 a 40 VDC
- Voltaje de Salida ( $V_{OUT}$ ): 40 VDC Máx.
- Corriente de Salida: 35 – 350 mAmp.
- Soporta la Topología LDO (Low-Drop-Out)
- Controla la variación de intensidad del brillo por PWM (Pulse-Width Modulation)
- Se pueden conectar hasta 100 LEDs de luz blanca en configuración Serie – Paralelo.



*Driver MAXIM Mod. MAX16800*

Para el arreglo en paralelo, tomaremos como muestra el C.I. LTC3220 de la marca Linear Technology; que es un convertidor de DC a DC multiplicador de voltaje. Características:

- Soporta las topologías Charge Pump.
- Estos tipos de convertidores generan una alimentación reforzada para alimentar múltiples LEDs conectados en paralelo.
- Voltaje de entrada de 3 a 5.5 Volts.
- Proporciona una corriente total de 360 mAmp. suficientes para alimentar 18 LEDs de 20 mAmp cada uno.



*Conexión de varios elementos a un controlador*

### **3.3 CARACTERÍSTICAS DE ENTORNO AL CONSIDERAR UNA LÁMPARA**

Son distintas las circunstancias que debemos pensar al considerar a los *LEDs* como alternativa de iluminación, sin embargo, son las mismas razones que hacemos cuando elegimos algún tipo de luminaria. Inicialmente consideremos las “**características ópticas**”; es conveniente considerar la distribución del flujo luminoso emitido por la lámpara, de acuerdo con la iluminación deseada y si es necesario, controlar el flujo luminoso para evitar cualquier molestia visual, así mismo, adaptar la distribución luminosa a la superficie a iluminar.

Las “**características mecánicas**” a considerar son la solidez de la base del equipo a instalar, puesto que el material debe ser adaptado a las condiciones de trabajo previstas; así mismo, el área a instalar el equipo debe permitir funcionar a la lámpara en condiciones apropiadas y así tener la facilidad de montar, desmontar y limpiar los dispositivos. El diseño mecánico de las luminarias debe tener en cuenta su protección contra la introducción de cuerpos extraños y humedades.

Con relación a las “**características eléctricas**” básicamente se debe considerar que al pretender colocar un dispositivo de *LEDs* es imprescindible tener un cómodo acceso a la lámpara y equipo eléctrico. Las lámparas y el equipo eléctrico relacionado, deben de estar protegidos contra la humedad y demás agentes atmosféricos.

Dentro de las “**características estéticas**” debemos considerar que tanto como apagadas durante el día o encendidas durante la noche, la luminaria no debe desentonar con el medio ambiente, dando mayor interés al aspecto diurno de la instalación. Algunos casos particulares, como sitios de interés históricos, pueden requerir soluciones especiales.

Existe una creciente preocupación que los *LEDs* azules y blancos hoy en día son capaces de superar los límites de seguridad de los llamados “peligros de la luz azul” según los estándares **ANSI/IESNA RP-27.1-05** para lámparas.

### 3.4.1 Aplicaciones

Debido a las características que ofrecen los **LEDs** y reflejadas en los aspectos ópticos, eléctricos, económicos y estéticos, las empresas productoras de dispositivos electrónicos, innovan constantemente los equipos de iluminación actuales, rediseñando y cambiando las luminarias convencionales, por **diodos emisores de luz**. Estos cambios se ven reflejados constantemente en todo nuestro entorno. Podemos apreciar la gran diversidad de tonalidades de los LEDs en equipos de iluminación en centros de entretenimiento, Fig. A, en letreros y medios promocionales, fig. B, así mismo en pasillos, escaleras, fig. C, refrigeradores, autobuses, semáforos, fig. E, automóviles, fig. F, e incluso indicadores de temperatura del agua, fig. D. Así mismo, un solo LED es utilizado en la fabricación de una lámpara de mano, así como la conexión de varios LEDs adaptados a una batería recargable dan funcionamiento a una lámpara de emergencia.



Fig. A.



Fig. B.



Fig. C.



Fig. D.



Fig. E.

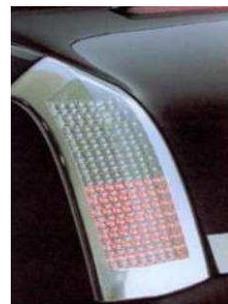


Fig. F.

En el caso de los semáforos, el gobierno de la Ciudad de México coincide con las características primordiales que tienen los diodos emisores de luz, dónde se ha observado que una lámpara LED puede lograr ahorros de hasta el 90% en consumo de energía al reemplazar un foco incandescente;

También:

- Cuidan la ecología, ya que la energía ahorrada se traduce en menos generadores eléctricos trabajando mejorando el medio ambiente.
- Menor costo de mantenimiento debido a que la vida efectiva de las lámparas LED es mayor, el cambio de unidades es menos frecuente.
- Mayor seguridad operativa por la durabilidad de los LED's, es recomendable emplear sólo una unidad roja para el "ALTO" en los semáforos y no dos, como se hace en los semáforos de luz incandescente y de halógeno.
- Se elimina el efecto fantasma, ya que el diseño de las lámparas de LED's impide la creación de este efecto, por no necesitar reflector.
- Mejor visibilidad. La distribución de los LED cubre uniformemente el orificio del lente, mejorando la visibilidad del semáforo al mismo tiempo que dan imagen de modernidad.
- Mayor seguridad vial debido a que los semáforos de LED's ofrecen mayor brillantez y luminosidad.
- Lámparas de LED's a prueba de luz solar. Los rayos ultravioleta no afectan la coloración de los focos.
- Recuperación rápida de su inversión. Por los ahorros de energía, su bajo mantenimiento y durabilidad, la recuperación de su inversión en semáforos de LED's se dará en menos de la mitad de su vida útil.

Además:

- Están diseñados para reemplazo directo en secciones actuales.
- Cumplen con estándares mundiales.
- Son resistentes al polvo y humedad.
- Son de montaje a prueba de agua.
- Tienen una esperanza de vida entre 15 y 25 años.

- El estimado de fallas es menor al 3% después de 200,000 horas de funcionamiento.
- Su temperatura de operación: -40° C a + 74° C.
- Tienen gran resistencia al impacto, evitando el vandalismo.
- Y las pérdidas menores son al 1% de luz con la falla de 1 LED.

Así mismo se muestra en la siguiente tabla los watts consumidos por una lámpara de LEDs y su intensidad de iluminación dependiendo de la luz emitida.

COLOR	VOLTAJE (AC)	POTENCIA (W)	INTENSIDAD (Cd)
Rojo	120 V – 60 Hz	10	339
Ámbar	120 V – 60 Hz	19	339
Verde	120 V – 60 Hz	11	339

*Características de potencia en LEDs de diferente color*

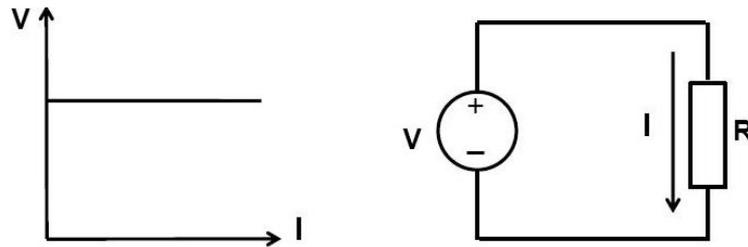
### **3.4.2 Fuentes de alimentación para LEDs**

Para poder alimentar éstos diseños de luminarias con LEDs, es imprescindible la regulación del voltaje para mantener óptima la calidad y vida de las lámparas, es por esto que existen hasta el momento, tres modos diferentes para alimentar un diodo emisor de luz “LED”:

1. Modo D.C.: Estas fuentes se utilizan para alimentar cualquier tipo de “LEDs”.
2. Modo A.C.: Este modo es utilizado sólo en aplicaciones especiales.

3. Modo Pulsado: Se utiliza para disminuir el consumo de Potencia y controlar el brillo de los “LEDs”.

1) Para el Modo D.C. se utiliza una fuente de **voltaje constante**, que es aquella que mantiene un *Voltaje* en la carga, independientemente de las variaciones de corriente que presente, como se aprecia en la siguiente figura:



1) Para el Modo D.C.

### 3.4.3 Fuentes de alimentación en Modo Pulsado Controlador PWM

Este modo de operación, tiene el objetivo de permitir el control de la brillantez del *LED*, lo que a su vez permite disminuir el consumo de potencia, lo cual provoca que el tiempo de vida del **diodo emisor de luz** se incremente.

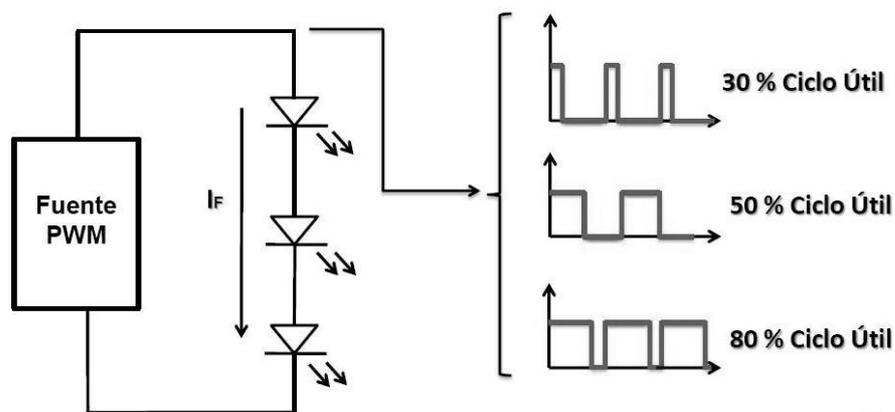
Pulse-Width Modulation (PWM), que en español significa “modulación por ancho de pulso (MAP)”; se refiere, como su nombre lo indica, a la modulación por ancho de pulso de una señal o fuente de energía en donde se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, por ejemplo una sinusoidal o una cuadrada, ya sea para transmitir información a través de un canal o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga, que es la técnica que se emplea para modificar, aún mas, el ahorro de energía producido por un LED.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente:  $D = \frac{\tau}{T}$ , donde:

$D$  es el ciclo de trabajo,

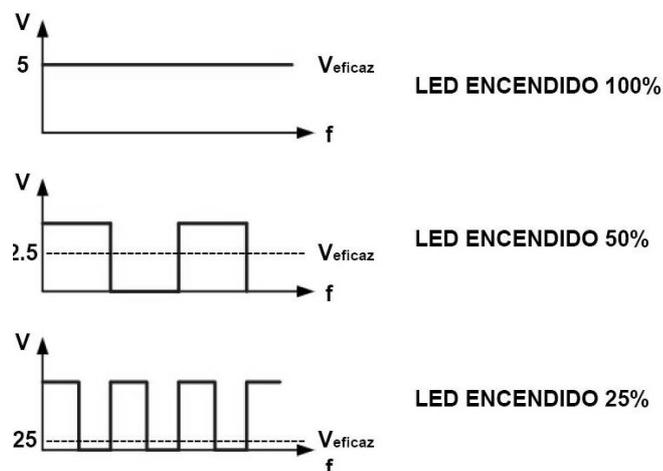
$\tau$  es el tiempo en que la función es positiva y  $T$  es el periodo de la función.

La siguiente imagen muestra el cambio efectuado por la fuente moduladora, dando por resultado una pérdida en la señal de salida pero un ahorro en la vida útil del LED.



*Modificación de la señal de salida aplicando una fuente PWM*

El ciclo útil de una señal, describe la fracción o porcentaje de tiempo en que la señal se encuentra en estado alto. Con relación a la señal que modifica el voltaje en los LEDs, es la siguiente gráfica:



La construcción típica de un circuito PWM se lleva a cabo mediante un comparador con dos entradas y una salida. Una de las entradas se conecta a un oscilador de onda triangular, mientras que la otra queda disponible para la señal moduladora. En la salida la frecuencia es generalmente igual a la de la señal triangular, y el ciclo de trabajo está en función de la portadora. La principal desventaja que presentan los circuitos PWM es la posibilidad de que haya interferencias generadas por radiofrecuencia. Éstas pueden minimizarse ubicando el controlador cerca de la carga y realizando un filtrado de la fuente de alimentación.

Un modulador PWM es básicamente una fuente de alimentación conmutada, en la que el voltaje de salida puede controlarse mediante una señal externa de entrada.

#### **3.4.4 Ventajas y desventajas del Diodo Emisor de Luz**

En forma de lista y basándonos en el trabajo de investigación realizado en ésta tesis, podemos mencionar las características que diferencian al **diodo emisor de luz** ofreciendo las ventajas y mejoras ante las fuentes de iluminación tradicionales:

- En comparación con el consumo energético, entre las lámparas incandescentes y los LEDs, tenemos que hay una diferencia de 1/10 veces o más, aproximadamente de consumo, por ejemplo, si tenemos una lámpara incandescente de 25 w, puedes ser reemplazada por otra lámpara con 12 LEDs y ésta consume 1.2 w.
- Tienen una larga vida útil, algunos fabricantes estiman su duración entre 100,000 y 1, 000,000 de horas, en comparación con los focos incandescentes. éstos tienen un periodo de funcionamiento de alrededor de 1000 o 2000 horas.

- Derivado del tiempo estimado de vida de los “LEDs”, se reducen costos de mantenimiento de las luminarias y equipos que contienen diodos emisores de luz.
- Su funcionamiento requiere de muy baja corriente y baja tensión, lo que los hace más seguros y confiables, reduciendo al mínimo los posibles riesgos de electrocución.
- Por ser de estado sólido, pueden ser adaptados a aplicaciones con ciertos grados de vibración siendo muy resistentes a impactos.
- El tiempo de respuesta de “encendido – apagado” *ON/OFF – OFF/ON* es casi instantáneo (0.1  $\mu$ seg).
- Se puede ajustar la intensidad de su brillo por medio de la **modulación por ancho de pulso** “PWM”
- Son excelentes para el diseño de dispositivos de iluminación multicolor o “RGB”.
- Permiten la elaboración de dispositivos de iluminación mucho más prácticos y de fácil instalación, inclusive se pueden amoldar a prototipos ya existentes.
- Producen más lúmenes por Watt que los focos incandescentes, por ahora esto es especialmente útil en dispositivos operados con baterías.
- Los “LEDs” pueden producir luz de un color específico, sin la necesidad de utilizar filtros adicionales, lo que ahorra peso y los hace más eficientes.
- Cuando se utilizan en aplicaciones donde se requiere disminuir su potencia, los LEDs no cambian el tono de su color, a diferencia de las luces incandescentes que se tornan amarillas.
- Los LEDs no se ven afectados por ciclos rápidos de encendido y apagado, a diferencia de las luces fluorescentes o de HID (High Intensity Discharge) que requieren un largo tiempo, relativamente, para volver a encenderse.
- Mayor separación entre puntos de luz con la consiguiente reducción de número de unidades luminosas y de precio total de la instalación.
- Los LEDs no contienen mercurio, a diferencia de las lámparas fluorescentes.
- El tamaño con que son fabricados, facilita su adaptación en cualquier medio.
- Baja temperatura. Debido a que el LED se alimenta a baja tensión, consumiendo así poca energía, por lo tanto emite poco calor, debido a que el

LED es un dispositivo que opera a baja temperatura en relación con la luminosidad que proporciona.

- Pequeña anchura espectral.
- 

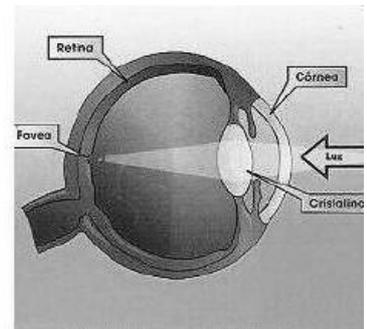
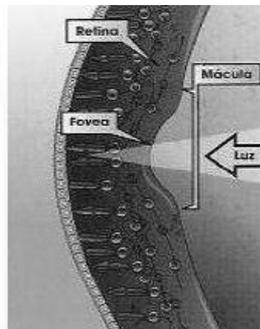
### ***Desventajas del diodo emisor de luz – “LED”***

- El deslumbramiento de los LEDs puede requerir de filtros o difusores, lo que causaría un mayor incremento en su precio.
- Debido a que es una luz de tipo directa, se requiere de muchos dispositivos para cubrir las demandas del área a iluminar, siempre y cuando éstas sean extensas.
- Su costo inicial es mayor que el de otros medios de iluminación como pueden ser la luz incandescente o fluorescente.
- Necesitan ser operados con el voltaje y corriente correctos, lo cual implica el uso de resistencias y fuentes de alimentación reguladas.
- Existe una creciente preocupación de que los LEDs azules y blancos hoy en día son capaces de superar los límites de seguridad de los llamados “peligros de la luz azul”, según los estándares ANSI/IESNA RP-27.1-05 (*American National Standards Institute y Asociación Internacional de Diseñadores de Iluminación*) para lámparas, ver figura 22; por lo que al mirarlos directamente por tiempo prolongado “Daña la visión”, aunque esto sucede con las demás tipos de iluminación.
- 



*Frecuencias de luz visible*

- La luz azul tiene una longitud de onda entre 400 a 500 nm en el rango de la luz visible “muy cercano al ultravioleta” y muy fácilmente puede pasar a través de la cornea y el cristalino, pudiendo llegar de manera eficiente a la retina y **dañarla**.
- La luz azul es la longitud de onda visible más dañina que llega a la retina, ver figura 23.



## CONCLUSIONES

Para entender las ventajas que el Diodo Emisor de Luz - *LED*, ha sido conveniente entender la importancia que tiene el fenómeno de la luz con relación a la percepción de todo lo que nos rodea. Se describió que la luz es una pequeña parte del espectro electromagnético y que su radiación en forma de ondas luminosas es lo que vemos, sin olvidar que derivado de los diferentes intervalos de longitudes de onda es como percibimos los diferentes colores a nuestro alrededor. Ha sido conveniente desarrollar y entender el cómo funciona el ojo humano para diferenciar todos los conceptos que la Óptica involucra con relación a la iluminación.

El funcionamiento del diodo emisor de luz ha sido descrito a detalle para enfatizar las ventajas y desventajas que existen en este dispositivo semiconductor, al compararlo con las luminarias convencionales del mercado como son las incandescentes y las lámparas de descarga. El comparar las variantes que tiene el diodo en sus diferentes aplicaciones determina el beneficio y diferencia de estos dispositivos, hasta llegar al diodo emisor de luz, que teniendo la finalidad de apreciar las diferencias entre uno y otro; así mismo se han presentado las características principales de las fuentes de iluminación artificial que son las que en la actualidad nos permiten el desarrollo de las actividades cotidianas.

La idea es invertir en un dispositivo que consuma menos energía, que proporcione niveles de luminosidad suficientes para desarrollar nuestras actividades diarias y que su tiempo de utilidad sea más largo para lograr que su mantenimiento pase de ser correctivo a solamente preventivo, ahorrándonos más dinero y que sea tan pequeño como ligero y resistente ha sido el principal motivo de esta investigación. Primeramente se debe hacer un análisis detallado de la problemática que conlleva manejar un estudio de ahorro de energía ya que se involucra distintas ramas de la ingeniería en donde la aplicación del método apropiado nos brindará una alternativa para escoger un modelo que nos

proporcione formas de uso en los cuales se verá un ahorro sustancial en el consumo de energía.

La ingeniería electrónica es la encargada de realizar proyectos en los que se requieren los conocimientos adecuados para fortalecer la idea de crear un dispositivo ahorrador de energía.

El diodo emisor de luz ha sido un elemento de gran importancia en la historia de la electrónica ya que su uso primordial fue para la señalización en los equipos electrónicos, pero el LED nos brinda ahora una inmensa variedad de posibilidades en el campo de la iluminación.

El conocimiento teórico práctico que se emplea siempre va presidido por la idea de mejorar el desempeño en la problemática que se tenga que enfrentar. El manejo de diferentes ramas de la ingeniería es esencial para que el cometido sea satisfactorio y elocuente con la panorámica actual de nuestro tiempo ya que esta avanza a pasos agigantados y es evidente estructurar todo tipo de sistemas para adaptarlos a los cambios de la actualidad.

El manejo de la electrónica ha hecho más fácil la vida de todo mundo y debido a que las empresas están apoyando su manejo al invertir en este campo facilita que la oferta y la demanda sean de fácil adquisición. Probablemente es pretensioso decir que esta investigación viene a llenar un hueco dentro de la literatura científica dedicada a la teoría electromagnética, que es muy amplia.

El interés en dispositivos sensibles a la luz se ha incrementado de manera casi exponencial en años recientes. El campo resultante de la optoelectrónica está recibiendo un gran interés por parte de investigadores a medida que se realicen esfuerzos para mejorar los niveles de eficiencia. A través de los medios publicitarios, las personas se han vuelto conscientes de que las fuentes luminosas ofrecen una fuente de energía única, la cual, transmitida como paquetes discretos llamados fotones, posee un nivel directamente relacionado a la frecuencia de la onda de luz.

## BIBLIOGRAFÍA

Boylestad, Nashelsky. **Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos**. México, Pearson / Prentice Hall, 8ª. Ed., 2004.

Fernández, Luis. **Electrotecnologías 2, Técnicas y aplicaciones de la iluminación**. España, Mc Graw Hill, 2003.

García, Ramón. **Pequeño Larousse ilustrado**. México, Ediciones Larousse, 14ª. Ed., 1990.

Hewitt, Paul G. **Física conceptual**. México, Pearson educación, 9ª Ed., 1998.

Hewitt, Paul G. **La enciclopedia del estudiante**. México. Santillana, vol. 04. 2006.

Malvino, Paul. **Electricidad y electrónica (Aplicaciones prácticas)**. México, Mc Graw Hill, Tomo 1, 1989.

Microsoft. **Biblioteca de consulta Encarta**. Ed., 2005.

Ankrum, Paul D. **Electrónica de semiconductores**. Prentice /Hall Internacional, 1974.

Jukarainen, Saku. **Diccionario de la lengua española, Real academia española**. España, 22ª Ed., en CD-Rom, Versión 1.0, 1996.

Vittorio Re. **Iluminación interna, el instalador cualificado**. Barcelona, España, Marcombo, Boixareu Editores, 2003.

Westinghouse. **Manual de Alumbrado**. U.S.A, Westinghouse Electric Corporation, 1988.