



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN PARA
HOMOGENEIZAR LA INTENSIDAD DE LUZ BLANCA A BASE
DE UN ARREGLO DE DIODOS EMISORES DE LUZ (LED'S)**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A

ARMANDO RAMÍREZ ARTEAGA

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS:

M. EN I. EDGAR ALFREDO GONZÁLEZ GALINDO

MÉXICO, 2014





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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN UNAM

JEFATURA DE CARRERA DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OFICIO: FESAR/JAME/054/2014

ASUNTO: Síndico Tesis

LIC. JOSÉ GUADALUPE PIÑA OROZCO
SECRETARIO ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Síndico del Examen Profesional del alumno: **ARMANDO RAMÍREZ ARTEAGA**, con Número de Cuenta: **408098511** y con el tema de tesis: **"DISEÑO DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN PARA HOMEGENIZAR LA INTENSIDAD DE LUZ BLANCA A BASE DE UN ARREGLO DE DIODOS EMISORES DE LUZ (LED'S)."**

PRESIDENTE:	ING. ABEL VERDE CRUZ	ABRIL 95
VOCAL:	ING. JOSÉ LUIS ESTRADA GARCÍA	MARZO 96
SECRETARIO:	M. EN I. EDGAR ALFREDO GONZÁLEZ GALINDO	FEBRERO 05
SUPLENTE:	M. EN I. DAVID FRANCO MARTÍNEZ	JULIO 98
SUPLENTE:	ING. VÍCTOR HERNÁNDEZ VAZQUEZ	AGOSTO 98

Cabe hacer mención que el Director de Tesis es el M. en I. Edgar Alfredo González Galindo, quien está incluido basándose en lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Facultad.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Nezahualcóyotl, Estado de México, 19 de febrero de 2014
EL JEFE DE CARRERA

M. en I. FIDEL GUTIÉRREZ FLORES



C.c.p.- Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez. Jefa del Depto. de Servicios Escolares.
C.c.p.- M. en I. Edgar Alfredo González Galindo. Asesor.
C.c.p.- Alumno

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

Armando Ramírez Arteaga, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, No. de Cuenta 408098511

2. Datos del tutor

M. en I. Edgar Alfredo González Galindo

3. Datos del sinodal 1

M. en I. David Franco Martínez

4. Datos del sinodal 2

Ing. José Luis Estrada García

5. Datos del sinodal 3

Ing. Abel Verde Cruz

6. Datos del sinodal 4

Ing. Víctor Hernández Vazquez

7. Datos del trabajo escrito

Diseño de un sistema de iluminación para homogeneizar la intensidad de luz blanca a base de un arreglo de diodos emisores de luz (LED's)

107 pp. 2014

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar hasta aquí.

Quiero agradecerles a mis padres por apoyarme durante todos estos largos días de estudio.

Gracias a mis hermanos que me han apoyado directamente e indirectamente, durante este trayecto de mi vida.

Gracias a mi asesor de tesis al M. en I. Edgar Alfredo González Galindo, que siempre me brindo su ayuda durante la carrera.

Gracias al Ing. Luna Escorza Prócoro Pablo por confiar en mí durante mi formación universitaria.

Gracias al Ing. Fausto Torres Torres por sus enseñanzas, que no solo me sirvieron para realizar la tesis, sino también para mi formación laboral.

Agradezco a los profesores que hicieron de mí un profesionalista más, ya que sus enseñanzas han hecho posible este logro en mi vida.

RESUMEN

Hoy en día la iluminación está siendo sustituida por focos con LED's ya que hay menor consumo energético que en una lámpara de gas incandescente, además de que la luz de LED aparte de que puede ser blanca no te lastima los ojos y es fácil manipular su intensidad luminosa. Por estas y otras razones, el uso del LED en iluminación a aumentado muy fuerte mente. Nuestro proyecto de investigación se llevo a cabo mediante un análisis sobre el comportamiento de ciertas características del LED, como lo son; el ángulo de iluminación, la refracción y reflexión, su intensidad de iluminación entre otras. Esto se llevó a cabo disipando la luz blanca del LED en una superficie de reflexión la cual fue reflejada en una pantalla donde se pretende que la luz del LED sea homogénea. En este diseño experimental nos apoyamos en una serie de investigaciones, como lo es la óptica geométrica, la cual nos permitió obtener el recorrido óptico de los rayos disipados por el LED y el estudio de la reflexión y refracción para dichos rayo. Los diseños experimentales están diseñados con una pendiente de material refractante especialmente para LED's con ángulo de iluminación de 30 grados, esto es que si se llegara a sustituir los LED's con otro tipo de ángulo de iluminación, los resultados van a ser totalmente diferentes a los obtenidos en este proyecto experimental. Una vez obtenidos los resultados en la pantalla donde se refractaron los rayos del LED se obtuvieron graficas de iluminancia, con el objetivo de observar el comportamiento de los rayos del LED y saber si el arreglo de LED's fue el adecuado para homogenizar la Luz disipada. Después de haber obtenido los resultados de nuestros diseños experimentales, se realiza una fuente de alimentación, esto con el fin de obtener un mejor rendimiento en los LED's, en esté caso se utilizará una alimentación de circuito con pwm.

Índice general

1. Introducción.	1
2. Sistemas de iluminación.	5
2.1. Espectro electromagnético	5
2.1.1. Espectro visible	6
2.1.2. Triángulo Cromático CIE	7
2.2. Magnitudes y unidades.	8
2.2.1. Flujo Luminoso	9
2.2.2. Estereorradián	10
2.2.3. Intensidad luminosa	12
2.2.4. Iluminación	12
2.2.5. Luminancia	13
2.3. Óptica	14
2.3.1. Reflexión y Refracción	14
2.3.2. Camino óptico	16
2.4. Tipos de lámparas en los sistemas de iluminación.	16
2.4.1. Lámparas incandescentes	17
2.4.2. Lámparas Fluorescentes	19
2.4.3. Las lámparas a descarga	21
2.4.4. LED´s	22
3. Sistemas de superficies de reflexión en los sistemas de iluminación	27
3.1. Superficies	27
3.1.1. Superficies radiadas	29
3.1.2. Superficies cuadráticas	30
3.2. Leyes de reflexión	30
3.2.1. Principio de Huygens	30
3.2.2. Principio de Fermat	31
3.3. Técnicas de iluminación.	32
3.3.1. Tipos de iluminación	32
3.3.2. Niveles de iluminación	32
3.4. Cálculos de iluminación para instalaciones de alumbrado	35
3.4.1. Ley de los cuadrados inversos.	35
3.4.2. Método de iluminación media (método de los lúmenes)	35
3.4.3. Método de cavidad zonales.	38
3.4.4. Método del punto por punto.	40
4. Diseño de un sistema de iluminación con LED´s.	41
4.1. Diseño General y selección de led´s	41
4.2. Diseño experimental	44
4.2.1. Dimensiones de los diseños experimentales	45

4.3. Camino Óptico de los diseños experimentales.	59
4.3.1. Camino Óptico del diseño de 40 grados.	64
4.3.2. Camino Óptico del diseño de 45 grados.	66
4.3.3. Camino Óptico del diseño de 50 grados.	67
4.3.4. Camino Óptico del diseño de 60 grados.	68
4.4. Circuito y alimentación de los diseños experimentales	70
4.5. Mediciones de Iluminación.	72
4.5.1. Costos de los diseños experimentales.	86
5. Conclusiones y Trabajo a Futuro.	103
Bibliografía	105

1 Introducción.

Los dispositivos fotoelectrónicos utilizan la luz como medio de transmisión entre un emisor y un receptor, es decir, una fuente luminosa y un elemento fotosensible.

La luz es una radiación electromagnética comprendida en una banda de longitudes de onda de unos 100 a 800 nm. La longitud de onda caracteriza el color de la luz. En la banda de unos 400 nm (violeta) a 700 nm (rojo), la luz es perceptible por el ojo humano (luz visible). Por encima de los 700 nm la luz se considera infrarroja (IR) y por debajo de los 400 nm, ultravioleta (UV).

La radiación utilizada para aparatos fotoelectrónicos proviene de fuentes no influenciadas (luz del día, llama) que proveen además los factores de influencia (interruptores automáticos de crepúsculo, guardallamas) y también de fuentes de luz especiales, que pertenecen al mismo aparato y pueden adaptarse a la finalidad de la aplicación. Esta clase de fuentes de luz para aparatos fotoelectrónicos suele ser, por lo general, lámparas de incandescencia y diodos luminiscentes.

Los diodos luminiscentes (LED), son menor potencia luminosa que las lámparas de incandescencia, aunque de mejor rendimiento luminoso, de una duración 10 veces mayor que éstas, con la particularidad de que no acusan agotamientos repentinos, siendo además muy resistente al choque y a las vibraciones. Un detalle muy importante es que dichos diodos trabajan prácticamente sin inercia, por lo que permiten su modulación en los campos de MHz, lográndose así potencias de impulso considerables. Los diodos luminiscentes son prácticamente fuentes de luz puntiformes, por cuyo motivo resultan potencias luminosas elevadas a potencias reducidas [51].

El diodo emisor de luz o LED toma su nombre del idioma inglés (light Emitting Diode) y, como su nombre lo indica, es un dispositivo que al polarizarse en sentido directo emite radiación electromagnética, que va desde el infrarrojo (por encima de los 700 nm) al visible (400 nm-700nm), dependiendo del ancho de banda prohibida de los semiconductores empleados al hacer la unión P-N.

Estos diodos constituyen la primera lámpara de estado sólido de que se tiene noticia y presentan características muy interesantes, para que en el futuro se pueda ahorrar energía eléctrica en la producción de energía luminosa [2].

El LED transforma corriente eléctrica en luz. Es útil en varios tipos de pantallas indicadoras, y puede usarse algunas veces como una fuente luminosa en aplicaciones de comunicación por fibra óptica [3].

En los últimos años el diodo emisor de luz (LED) ha desempeñado un papel importante en muchas aplicaciones, incluyendo iluminación para teléfonos celulares, faros de un automóvil, semáforos, grandes carteles y displays, señales e iluminación. Los LED pronto serán utilizados en la iluminación, debido a sus ventajas distintivas incluyendo una alta eficiencia, buena fiabilidad, larga vida, colores variables y bajo consumo de energía. Una expectativa acerca de la alta potencia del LED es que va a ser dominante en el año 2025 [4].

Con el progreso de las tecnologías de iluminación LED, su aplicación se está extendiendo en señal y dispositivo de visualización e iluminación de seguridad. En los últimos años, estos dispositivos, han entrado en el campo de la iluminación ofreciendo una alta eficiencia y larga vida, y están ganando aceptación en las personas. En comparación con los actuales dispositivos de iluminación, los LED tienen una serie de ventajas, tales como el ahorro de energía (alta eficiencia), dimensiones pequeñas, peso ligero, tolerancia a las bajas temperaturas, etc.

Los LED'S son componentes electrónicos, como transistores o circuitos integrados, y son usualmente montados sobre las placas de circuito impreso de dispositivos de iluminación. Los LEDs pueden ser clasificados por su forma y el embalaje de la siguiente manera (Figura 1.1) [5].

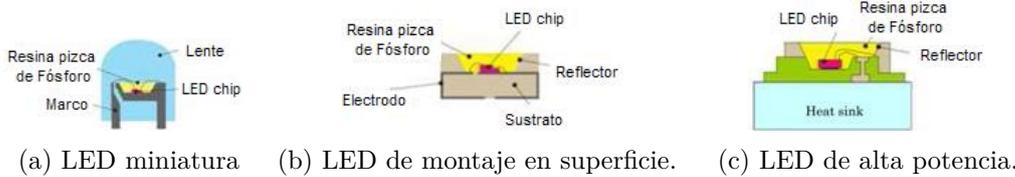


Figura 1.1: Estructura de los típicos módulos LED.

La eficacia luminosa de una fuente de luz o rendimiento luminoso mide la parte de energía eléctrica que se usa para iluminar y se obtiene dividiendo el flujo luminoso emitido por la potencia eléctrica consumida.

$$\eta = \frac{F}{P} \tag{1.1}$$

Durante las dos últimas décadas, los investigadores han estado intentando desarrollar técnicas de posicionamiento preciso para proporcionar información de ubicación mediante GPS, IR, Bluetooth, WLAN, ultrasonido, etc. Recientemente, la comunicación de luz visible (VLC) se está convirtiendo en una tecnología atractiva para sistema de posicionamiento en interiores. Recientemente se ha trabajado con un arreglo matricial de LED'S para iluminación y posicionamiento. Donde tres LED'S no son colineales como se muestra en la Figura 1.2 [6].

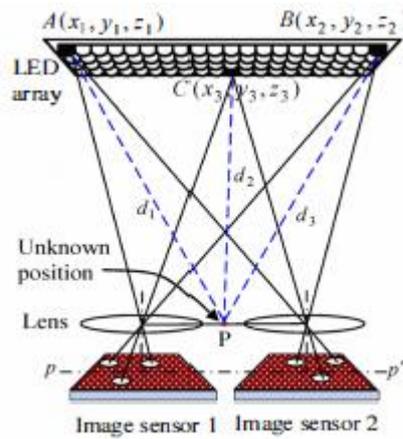


Figura 1.2: Proyecto VLC sistema de posicionamiento

En una investigación, el diseño y la implementación de un sistema autónomo solar de iluminación con LED son los objetivos del estudio. La arquitectura del sistema incluye celdas solares de alta potencia de emisión de luz diodos (HP-LED), módulos bi-direccional buck-boost DC convertidores, baterías de plomo-ácido y un microcontrolador de un solo chip (PIC). El circuito principal del sistema es un bi-direccional convertidor buck-boost DC, combinando un solo chip microcontrolador (PIC18F4431) para gestionar y controlar tanto de carga y descarga de funciones. El sistema tiene funciones de seguimiento de punto de máxima potencia de control, control de pulso de carga y de alta potencia de luz de diodos emisores de las funciones de control de conducción. Finalmente, a través de simulación por ordenador y la medición experimental. Como se muestra en la Figura 1.3[7].

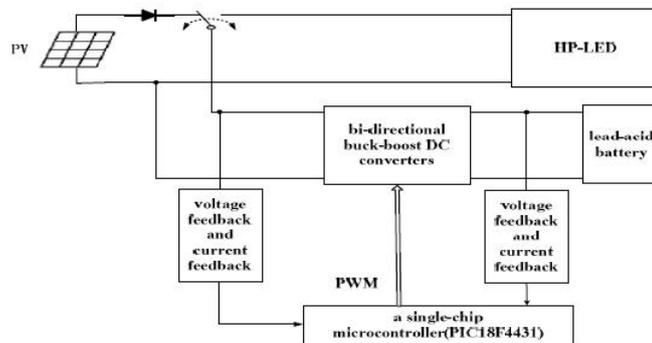


Figura 1.3: Diagrama del autónomo sistema autónomo solar de iluminación con LED.

La red inalámbrica de sensores (WSN) basado en el sistema de iluminación LED se propone en el presente documento consta de 19 nodos distribuidos de sensores inalámbricos: un nodo de la estación base, 17 nodos de dispositivos finales y un nodo extensor de rango, un ordenador personal (PC), una interfaz digital de alumbrado direccionable (DALI) controlador y una gran iluminación LED, como se muestra en la Figura 1.4. A la interfaz entre el sistema de iluminación LED controlable y la WSN distribuidos en el lugar de trabajo, DALI [7], una interfaz de comunicación estándar, ha sido utilizado. Se basa en balastos direccionables individualmente, con funciones de conmutación y regulación [8].

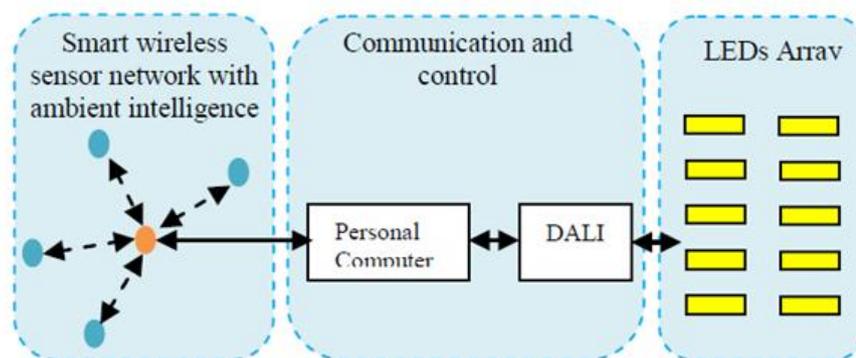


Figura 1.4: El aplicado en el sistema de iluminación inteligente LED.

2 Sistemas de iluminación.

2.1. Espectro electromagnético

El intervalo de frecuencias del espectro electromagnético es muy grande. En la Figura 2.1 se presenta un esquema de este espectro. La longitud de onda λ de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia f por la Ecuación 2.1:

$$c = f\lambda \quad (2.1)$$



Figura 2.1: Espectro electromagnético.

Donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s). El espectro electromagnético que se refiere a la región visible está comprendido entre 400 y 700 nm. La región visible del espectro electromagnético se extiende desde 400 nm para la luz violeta, hasta aproximadamente 700 nm para la luz roja.

Newton fue el primero en realizar estudios detallados de la región visible al dispersar “luz blanca” a través de un prisma. En orden de longitudes de onda ascendente, los colores espectrales

son violeta (450 nm), azul (480nm), verde (520nm), amarillo (580 nm), naranja (600 nm) t rojo (640 nm).

El espectro electromagnético es continuo: no hay separaciones entre una forma de radiación y otra. Los límites establecidos son meramente arbitrarios y dependen de la capacidad para percibir directamente una porción pequeña y para descubrir y medir dichas porciones fuera de la región visible.

Después del descubrimiento de las ondas infrarrojas, se observaron longitudes de onda más cortas que la luz visible: dichas ondas son conocidas actualmente como ondas ultravioleta, y fueron descubiertas en conexión con su efecto sobre ciertas reacciones químicas.

La teoría electromagnética de Maxwell abrió la puerta al descubrimiento de muchas otras clasificaciones de radiación. Ahora el espectro electromagnético se divide convenientemente en ocho regiones principales. Como se muestra en la Figura 2.1: 1) ondas largas de radio. 2) ondas cortas de radio, 3) región infrarroja, 4) la región visible, 5) la región ultravioleta, 6) rayos X, 7) rayos gamma y 8) fotones cósmicos [9].

2.1.1. Espectro visible

El espectro visible para el ojo humano es aquel que va desde los 380nm de longitud de onda para el color violeta hasta los 780 nm para el color rojo. Fuera de estos límites, el ojo no percibe ninguna clase de radiación Figura 2.2.

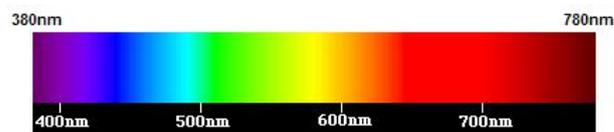


Figura 2.2: Espectro visible

La sensibilidad del ojo a las distintas longitudes de onda de la luz del mediodía soleado, suponiendo a todas las radiaciones luminosas de igual energía, se representa mediante una curva denominada “curva de sensibilidad del ojo” ó “curva V_l” Figura 2.3.

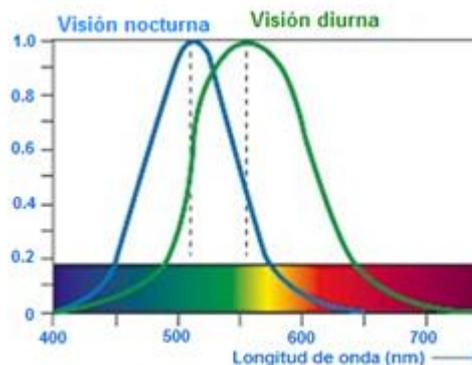


Figura 2.3: curva V_l y Efecto Purkinje.

El ojo tiene su mayor sensibilidad en la longitud de onda de 555 nm que corresponde al color amarillo verdoso y la mínima a los colores rojo y violeta. Esta situación es la que se presenta a la luz del día o con buena iluminación y se denomina “visión fotópica” (Visión diurna).

En el crepúsculo y la noche, (“visión escotópica”) se produce el denominado Efecto Purkinje, que consiste en el desplazamiento de la curva V_l hacia las longitudes de onda más bajas, quedando la sensibilidad máxima en la longitud de onda de 507 nm. Esto significa que, aunque no hay visión de color, el ojo se hace relativamente muy sensible a la energía en el extremo azul del espectro y casi ciego al rojo; es decir que, durante el Efecto Purkinje, de dos haces de luz de igual intensidad, uno azul y otro rojo, el azul se verá mucho más brillante que el rojo [10].

2.1.2. Triángulo Cromático CIE

Los colores del espectro visible y sus infinitas posibilidades de mezcla, pueden ser representados matemáticamente. Existen varios sistemas de representación entre los que se cuentan el “SistemaMunsell”, el “CIE L*b*a”, el “CIE L*c*h”, el “CIE Y, x, z”, etc. De todos ellos, el más popular es el Sistema “x,y, z” o más conocido como “Triángulo Cromático CIE” (Commission Internationale de L’eclairage).

En el Triángulo Cromático CIE (Figura 2.4), todos los colores están ordenados respecto de tres coordenadas cromáticas x , y , z , cumpliéndose la igualdad $x + y + z = 1$. Esto significa que a partir de dos coordenadas cualesquiera puede definirse un color o mezcla de colores.

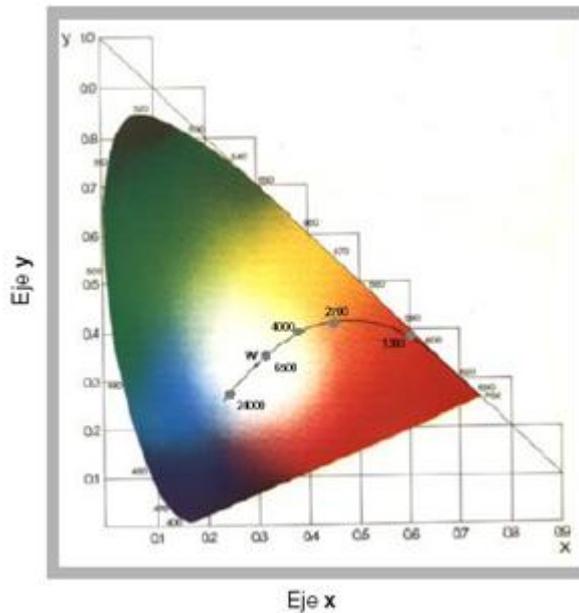


Figura 2.4: Triangulo Cromático CIE

El triángulo presenta una forma curva en su parte superior que es el lugar geométrico de las radiaciones monocromáticas, cerrándose en su parte inferior por una línea recta llamada “línea de los púrpura”. La zona central del triángulo es acromática y sobre ella se pueden localizar los colores de todas las fuentes de luz artificial. El centro de esta zona es un punto blanco donde los valores de las coordenadas x , y , z son iguales entre sí (0.333 cada una). Cuanto más alejado del centro esté el punto buscado, más saturado será el color resultante [11].

2.2. Magnitudes y unidades.

La naturaleza de la luz no es fundamentalmente distinta de las otras radiaciones electromagnéticas, es decir, calor, ondas de radio o radiación ultravioleta; la característica que distingue a la luz de otras radiaciones es su energía. La luz es radiación electromagnética capaz de afectar el sentido de la visión.

A fines del siglo XVII se plantearon dos teorías para explicar la naturaleza de la luz, la teoría de partículas (corpúscular) y la teoría ondulatoria. Quien apoyaba la teoría corpúscular de la luz era Sir Isaac Newton. La teoría ondulatoria fue desarrollada por Christian Huygens (1629-1695), matemático y científico holandés, 13 años mayor que Newton. Cada teoría trataba de explicar las características de la luz observadas entonces. Las tres principales características de la luz son:

1. Propagación rectilínea: La luz viaja en línea recta.
2. Reflexión: Cuando la luz incide sobre una superficie lisa, aquélla retorna al medio original.
3. Refracción: La trayectoria de la luz cambia cuando entra en un medio transparente.

De acuerdo con la teoría corpúscular, se consideraba que partículas muy pequeñas de masa despreciable eran emitidas por fuentes de luz como el Sol o una llama. Dichas partículas viajaban hacia afuera de la fuente en líneas rectas y a gran velocidad. Cuando las partículas entraban al ojo, se estimulaba el sentido de la visión [12].

Una fuente puntual de luz es aquélla cuyas dimensiones son pequeñas en comparación con la las distancias consideradas.

Cualquier objeto de color oscuro absorbe luz, pero uno negro absorberá la mayor parte de la que incide sobre él. Se dice que un objeto es opaco si toda la luz que incide sobre él se refleja o se absorbe. Ya que la luz no puede pasar a través de un cuerpo opaco, se producirá una sombra detrás del objeto, Figura 2.5. Puesto que la luz se propaga en línea recta, los rayos dibujados desde la fuente pasan por los bordes del objeto opaco y forman una sombra nítida que es proporcional a la forma del mismo. A la región en la cual no entra la luz se llama umbra o sombra.

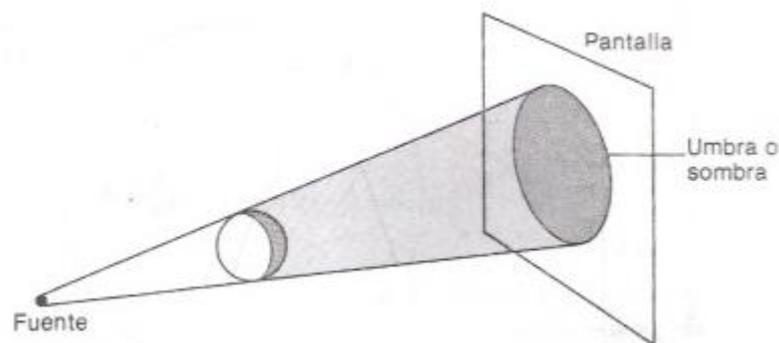


Figura 2.5: Umbra o sombra formada por una fuente puntual de luz.

Si en lugar de una fuente puntual de luz se considera una fuente extendida, la sombra resultante constará de dos porciones Figura 2.6. La porción interna no recibe luz de la fuente y por lo tanto es la umbra o sombra. A la porción externa se le llama penumbra [13].

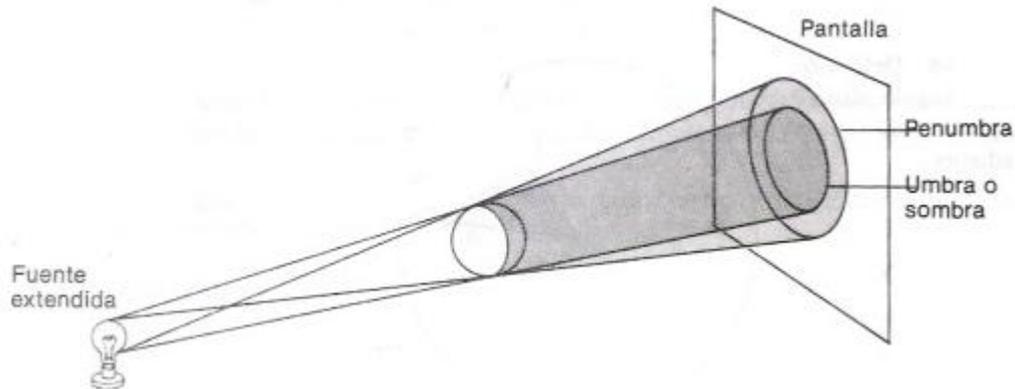


Figura 2.6: Sombra formada por una fuente extendida de luz

2.2.1. Flujo Luminoso

Se llama potencia radiante o flujo radiante a la energía radiante que emite una lámpara por unidad de tiempo. Solamente una pequeña porción de la energía radiante emitida estará en la región visible, es decir, en la región comprendida en su longitud de onda entre 400 y 700 nm. La sensación de la visión sólo depende de la energía radiada visible o luminosa por unidad de tiempo [14].

El flujo luminoso es la luz emitida por unidad de tiempo. La luz es una forma de energía radiante en movimiento. Ordinariamente, sin embargo, el elemento tiempo puede despreciarse, y el flujo luminoso se considera comúnmente como una magnitud definida [15]. Como se muestra en la Ecuación 2.5 del capítulo 2.2.3 (Intensidad luminosa).

En una lámpara común de luz incandescente, sólo alrededor del 10 % de la energía radiante es flujo luminoso. La mayor parte de la potencia radiante no es luminosa.

En la Figura 2.7 se muestra una gráfica de la respuesta del ojo a diferentes longitudes de onda. En condiciones el ojo es más sensible a la luz amarilla-verde de longitud de onda 555 nm. Para longitudes de onda mayores y menores la sensibilidad decae rápidamente.

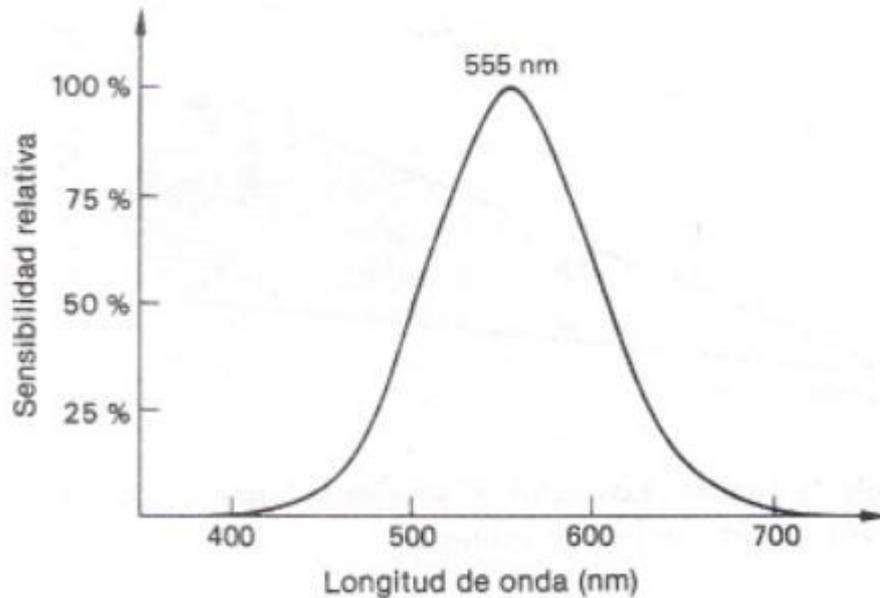


Figura 2.7: Curva de sensibilidad.

Si la unidad escogida para el flujo luminoso es la correspondiente a la respuesta sensitiva del ojo humano, debe definirse una nueva unidad; el watt (W) no es suficiente, ya que para diferentes colores las sensaciones visuales no son las mismas. Lo que realmente se quiere es una unidad que mida el brillo. Tal unidad es el lumen (lm), que se determina por comparación de una fuente estándar.

Un lumen (lm) es el flujo luminoso emitido por una fuente a través de una abertura de $1/60 \text{ cm}^2$ realizada en un ángulo sólido de 1 sr. Podemos decir que un lumen es el equivalente a $1/68 \text{ W}$ de luz verde-amarillo de 555 nm de longitud de onda [16].

También podemos decir que un lumen es el flujo de luz que incide sobre una superficie de 1 metro de una fuente puntual teórico que tenga una intensidad luminosa de 1 candela en todas direcciones. Esta superficie es una sección de 1 metro cuadrado de una esfera de 1 metro de radio, en cuyo centro se encuentra una fuente puntual uniforme de una candela. El mismo concepto puede expresarse diciendo que un lumen es el flujo luminoso emitido en un ángulo sólido unidad por una fuente puntual uniforme de una candela [17].

2.2.2. Estereorradián

Para comprender la definición del lumen, primero debe de desarrollarse el concepto de ángulo sólido Ecuación 2.2. Un ángulo sólido en estereorradianes (sr) se define en la misma forma que un ángulo plano en radianes. En la Figura 2.8 el ángulo ϑ en radianes es:

$$\theta = \frac{S}{R} \text{rad} \quad (2.2)$$

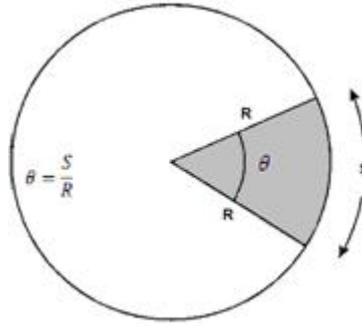


Figura 2.8: Definición de un ángulo plano ϑ expresado en radianes.

Donde S es la longitud del arco y R es el radio. Similarmente se define el ángulo sólido Ω en la Figura 2.9, que no es otra cosa que la abertura del extremo de un cono subtendido por un segmento de área sobre la superficie esférica.

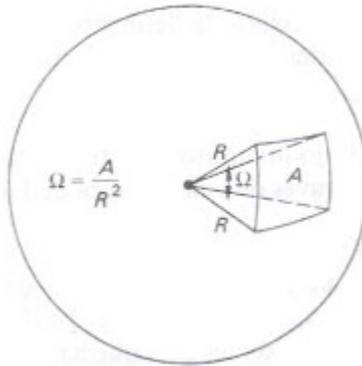


Figura 2.9: Definición de un estereorradián

Un estereorradián (sr) es el ángulo sólido subtendido en el centro de una esfera por un área A sobre su superficie que es igual al cuadrado de su radio R .

En general, el ángulo sólido en estereorradián está dado por:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}sr \tag{2.3}$$

Al igual que el radián, el estereorradián es una cantidad adimensional.

Así como en un círculo completo hay 2π rad, puede demostrarse mediante la Ecuación 2.3 que hay 4π sr en una esfera completa Ecuación 2.4[18].

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{(4\pi R^2)}{R^2} = 4\pi sr \tag{2.4}$$

2.2.3. Intensidad luminosa

La intensidad luminosa I de una fuente de luz es el flujo luminoso F emitido por unidad de ángulo sólido Ω Ecuación 2.5.

$$I = \frac{F}{\Omega} \quad (2.5)$$

La unidad de intensidad luminosa es el lumen por estereorradián (lm/sr), y se denomina candela (cd). La candela o bujía, como se la llamó algunas veces, se originó cuando el estándar internacional se definió en términos de la cantidad de luz emitida por la llama de cierta bujía: Se encontró que este estándar era insatisfactorio, se reemplazó finalmente por el estándar de platino.

La mayor parte de las fuentes de luz tienen distintas intensidades luminosas en direcciones diferentes. Una fuente isotrópica es aquella que emite uniformemente luz en todas direcciones.

El ángulo sólido total Ω de una fuente isotrópica es 4π sr Ecuación 2.6[19].

$$F = 4\pi I \quad (2.6)$$

2.2.4. Iluminación

La iluminación E de una superficie A se define como el flujo luminoso F por unidad de área Ecuación 2.7.

$$E = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

Cuando el flujo F se mide en lúmenes y el área A en metros cuadrados, la iluminación E tiene las unidades de lúmenes por metro cuadrado o lux (lx). La aplicación directa de la ecuación 2.2.5.1 requiere un conocimiento del flujo luminoso que incide sobre cierta superficie dada.

Para ver la relación entre la intensidad y la iluminación, considere una superficie A a una distancia R de una fuente puntual de intensidad I , como se muestra en la Figura 2.10 a). El ángulo sólido Ω subtendido por la superficie en la fuente esta dada por la Ecuación 2.8:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \quad (2.8)$$

Donde el área A es perpendicular a la luz emitida. Si el flujo luminoso forma un ángulo ϑ con la normal a la superficie, como se muestra en la Figura 2.10 b), es necesario considerar la proyección del área $A \cos \vartheta$. Ésta representada el área efectiva normal al flujo. En consecuencia, el ángulo sólido suele obtenerse de la Ecuación 2.9:

$$\Omega = \frac{A \cos \vartheta}{R^2} \quad (2.9)$$

Resolviendo para el flujo luminoso F en la Ecuación 2.5, se obtiene la Ecuación Ecuación 2.10.

$$F = I\Omega = \frac{IA\cos\theta}{R^2} \quad (2.10)$$

Sustituyendo la Ecuación 2.10 que define la iluminación, obtenemos la Ecuación 2.11.

$$E = \frac{F}{A} = \frac{IA\cos\theta}{AR^2}$$

o

$$E = \frac{I\cos\theta}{R^2} \quad (2.11)$$

Para la superficie normal.

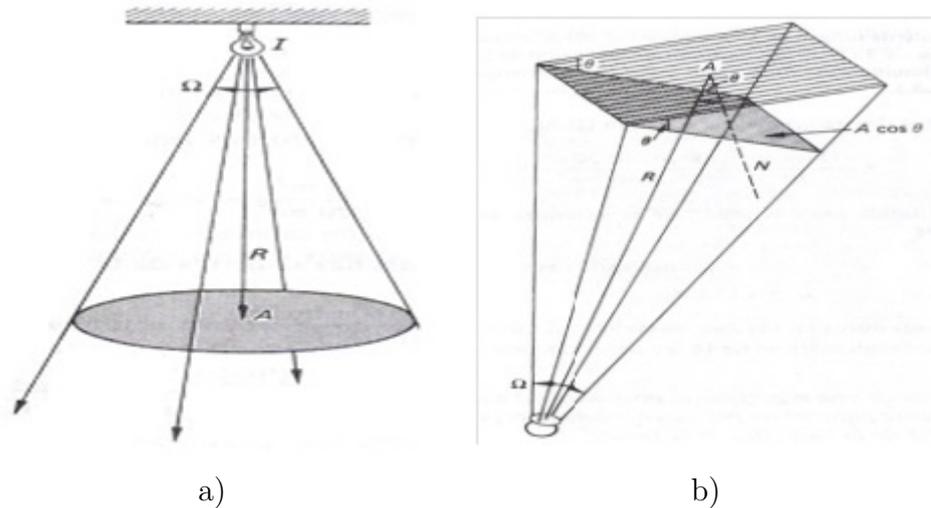


Figura 2.10: a) Cálculo de la iluminación de una superficie perpendicular al flujo luminoso incidente.
 b) Cuando una superficie forma un ángulo con el flujo incidente, la iluminación es proporcional a la componente de la superficie perpendicular al flujo.

2.2.5. Luminancia

El término técnico es brillo fotométrico o luminancia, pero en el lenguaje ordinario se usa frecuentemente la palabra brillo. La luminancia B se expresa de dos formas en candelas por unidad de superficie o en lúmenes por unidad de superficie.

Una superficie que emite o refleja luz en una dirección determinada a razón de una candela por cm^2 de área proyectada tiene un brillo en dicha dirección de stilb (candela por cm^2).

Una superficie que tiene un brillo en una dirección dada igual al brillo uniforme de una superficie perfectamente difusora que emite o refleja un lumen por pie cuadrado, tiene en dicha dirección un brillo de un footlambert (Lambert-pie), (unidad utilizada en los países de habla inglesa).

Un Lambert es la luminancia o brillo de una superficie que emite o refleja un lumen por centímetro cuadrado [20].

2.3. Óptica

La palabra óptica deriva de otra que significa ver. La óptica es la rama de la física que analiza las características y las propiedades de la luz, estudiando cómo se comporta y se manifiesta. La óptica se divide en tres puntos principales:

1. Óptica geométrica
2. Óptica física
3. Óptica cuántica

Podríamos decir que estas tres partes de la Óptica corresponden a un análisis macroscópico, microscópico y atómico respectivamente, limitándonos claramente su campo de aplicación [21]. Para éste proyecto, se enfocará en el punto numero uno, como se verra en el capitulo 4.3 utilizando el camino óptico.

2.3.1. Reflexión y Refracción

La velocidad de la luz en un medio transparente como el aire, el agua o el vidrio es menor que la velocidad $c = 3 \times 10^8 m/s$ en el vacío. Un medio transparente se caracteriza por el índice de refracción, n , que se define por el cociente entre la velocidad en el vacío, c , y la velocidad en el medio, v , Ecuación 2.12:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.12)$$

Cuando un haz de luz incide sobre una superficie límite de separación entre dos medios, como una superficie aire-vidrio, parte de la energía luminosa se refleja y parte entra en el segundo medio. Si la luz incidente no es perpendicular a la superficie, entonces la luz transmitida no es paralela a la incidente. El cambio en dirección del rayo transmitido se denomina refracción. La Figura 2.11 muestra un rayo de luz que incide sobre una superficie lisa aire-vidrio. El ángulo ϑ_1 entre el rayo incidente y la normal (la recta perpendicular a la superficie) se denomina ángulo de incidencia y el plano definido por ambas líneas recibe el nombre de plano de incidencia. El rayo reflejado yace en el plano de incidencia y forma un ángulo ϑ_1 con la normal que es igual al ángulo de incidencia.

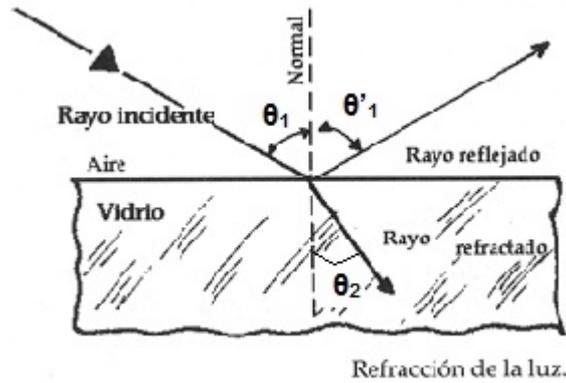


Figura 2.11: El ángulo de reflexión $\vartheta'1$ es igual al ángulo de incidencia $\vartheta1$. El ángulo de refracción $\vartheta2$ es menor que el ángulo de incidencia si la velocidad de la luz en el segundo medio es menor que la que posee en el medio incidente.

El rayo de la Figura 2.11 se denomina rayo refractado y el ángulo $\vartheta2$ es el ángulo de refracción. Cuando una onda cruza un límite en el cual se reduce su velocidad, como en el caso de la luz que penetra en el vidrio desde el aire, el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia $\vartheta1$, es decir, el rayo refractado se aproxima a la normal. En cambio, si el haz luminoso se origina en el vidrio y se refracta en el aire, entonces el rayo refractándose aleja a la normal.

El ángulo de refracción $\vartheta2$ depende del ángulo de incidencia y de la velocidad relativa de las ondas luminosas en los dos medios. Si v_1 es la velocidad de la onda en el medio incidente y v_2 la velocidad de la onda en el medio transmisor, los ángulos de incidencia y refracción vienen relacionados por:

$$\frac{1}{v_1} \sin \vartheta_1 = \frac{1}{v_2} \sin \vartheta_2 \quad (2.13)$$

En la Ecuación 2.13 es válida para la refracción de cualquier tipo de onda incidente en una interface limitante que separe dos medios distintos.

En función de los índices de refracción de los dos medios n_1 y n_2 , la Ecuación 2.13 toma la forma:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.14)$$

El mecanismo físico de la reflexión de la luz puede comprenderse en función de la absorción e irradiación posterior de la luz por los átomos del medio reflectante o refractante. Cuando la luz que se transmite por el aire incide sobre una superficie de vidrio, los átomos de éste absorben la luz y la irradian inmediatamente con la misma frecuencia en todas las direcciones. Las ondas radiadas hacia atrás por los átomos de vidrio interfieren constructivamente en un ángulo igual al de incidencia, produciendo así la onda reflejada Ecuación 2.14.

La onda transmitida es el resultado de la interferencia entre la onda incidente y la onda producida por la absorción e irradiación de la energía de la luz por los átomos del medio. En el caso de que la luz entre en el vidrio procedente del aire, existe un retraso de fase entre la onda

resultante y la onda incidente. Este retraso de fase significa que la posición de una cresta de la onda transmitida está retardada respecto a la posición de las crestas de la onda incidente en el medio. Por consiguiente, en un tiempo determinado, una cresta de la onda transmitida no llega tan lejos dentro del medio como la de la onda incidente original: es decir, la velocidad de la onda transmitida es menor que la de la onda incidente. El índice de la misma que la de la luz incidente, los átomos absorben y vuelven a irradiar la luz con la misma frecuencia, pero la velocidad de la luz es diferente, la longitud de onda de la luz transmitida es distinta de la que posee la luz incidente. Si la longitud de onda en el vacío es λ , entonces $\lambda f = c$, y si λ' es la longitud de onda de un medio en el que la velocidad de la luz es v , $\lambda' f = c$. Combinando estas dos relaciones se obtiene $\lambda/\lambda' = c/v$, o bien la Ecuación 2.15

$$\lambda' = \frac{\lambda}{c/v} = \frac{\lambda}{n} \quad (2.15)$$

Donde $n = c/v$ es el índice de refracción del medio [22].

2.3.2. Camino óptico

Si la luz recorre un trayecto de longitud 's' en un medio homogéneo de índice n, el producto $n \cdot s$ se define como camino óptico 'L'.

Si en su trayecto la luz atraviesa distintos medios de índices n_i , y en cada uno de ellos recorre longitudes s_i , el camino óptico se obtendrá mediante el sumario de la Ecuación 2.16:

$$L = n_1 \cdot s_1 + n_2 \cdot s_2 + \dots = \sum_i (n_i \cdot s_i) = c \cdot t \quad (2.16)$$

Si el medio es heterogéneo con variación continua de índice, la trayectoria de longitud total es 's' puede considerarse descompuesta en elementos infinitesimales ds, en los cuales el índice puede considerarse constante. El camino óptico se obtendrá de la integral Ecuación 2.17:

$$L = \int_S n \cdot ds = c \int_A^B \frac{ds}{v} = \int_A^B dt = c \cdot t \quad (2.17)$$

Siendo A y B los puntos extremos de la trayectoria [23].

2.4. Tipos de lámparas en los sistemas de iluminación.

Las lámparas de alumbrado son receptores que transforman la energía eléctrica en energía luminosa. Las lámparas utilizadas se pueden agrupar en tres grupos, que son:

1. Lámparas de incandescencia.
2. Lámparas fluorescentes.
3. Lámparas de descarga [24].

2.4.1. Lámparas incandescentes

Las primeras lámparas de filamento que se emplearon para iluminar fueron las lámparas de incandescencia que inicialmente se fabricaban con filamento de carbón para después sustituirlo por tungsteno, evolucionando la forma del filamento desde un hilo recto, a espiral y luego a doble espiral, con disposición en festón, recto y en corona [25].

Las lámparas incandescentes generan Luz como consecuencia del paso de corriente a través de un filamento conductor, de modo que su temperatura se eleva, dando origen a la emisión por termo radiación. Una gran parte de la energía eléctrica absorbida por la lámpara se pierde en calor, lo que da lugar a una eficacia luminosa muy reducida (10-20 lm/W).

En el Cuadro 2.1, se muestran las principales características de las componentes de las lámparas incandescentes.

Cuadro 2.1: Características de las componentes de las lámparas incandescentes

COMPONENTE	CARACTERISTICAS
Filamento	<p>Fabricado en tungsteno, tiene un punto de fusión de 3.653 0K; sin embargo, su temperatura de funcionamiento es bastante más reducida para asegurar una duración adecuada. El factor que condiciona la vida del filamento es la evaporación que se produce, degradando sus condiciones iniciales; además, el tungsteno volatilizado se deposita sobre la pared interna de la ampolla ennegreciéndola, lo que reduce el flujo luminoso emitido.</p> <p>Las ejecuciones habituales de filamento son en hilo, en espiral y doble espiral, con objeto de incrementar la superficie de radiación.</p>
Ampolla	<p>En general, de vidrio soplado, aunque existen ejecuciones especiales de vidrio prensado. Su misión es aislar el filamento del medio ambiente y, al mismo tiempo, permitir la evacuación del calor generado por aquél. Dentro de la amplia variedad existente, las formas más comunes son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Estándar (pera). 2) Esférica. 3) Globo. 4) Vela. 5) Tubular. 6) Elíptica (reflectores de vidrio soplado). 7) PAR (Parabolic Aluminized Reflector) constituida por dos piezas de vidrio prensado, una de ella con recubrimiento reflector (aluminio) y, la otra, una lente que permite dirigir el flujo luminoso en un haz ancho (extensiva) o estrecho (intensiva). <p>En cuando transparencia, las ampollas pueden ser:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Lara. 2) Mateada. 3) Opalizada.

Gas de llenado	Las lámparas de potencia inferior a 25 W son de vacío. Para las potencias superiores, con objeto de atenuar la volatilización de tungsteno del filamento, se emplean como gases de llenado: 1) Argón. 2) Kriptón. 3) Xenón. Todos ellos mezclados con nitrógeno.
Casquillo	Entre los diversos tipos existentes, destacan: 1) E, rosca Edison. 2) B, bayoneta o Swan. Ambos tipos se construyen en diversos tamaños normalizados.

En el Cuadro 2.2, se muestran las principales características de funcionamiento de las lámparas incandescentes.

Cuadro 2.2: Principales características de funcionamiento de las lámparas incandescentes.

FUNCIÓN	CARACTERISTICA
Encendido de tensión	Funcionan a cualquier tensión de red, aunque lógicamente sólo ofrecen sus prestaciones nominales cuando se conectan a la tensión nominal. No precisan equipos auxiliares, ni para el encendido ni durante su funcionamiento. Tanto el encendido como el reencendido son instantáneos. Presenta una sobre intensidad de encendido de orden de 10-15 veces la intensidad nominal, en razón de la diferencia de resistividad del tungsteno en frío y en caliente. Sin embargo esta sobre intensidad es prácticamente instantánea y no suele considerarse a efectos de sobredimensionamiento del circuito de alimentación.
Variaciones	Afectan de manera diversa a las distintas características de funcionamiento de las lámparas. Un incremento de la tensión de alimentación ocasiona: 1) Mayor flujo luminoso (lm). 2) Mayor potencia absorbida (W). 3) Mayor eficacia luminosa, puesto que el incremento del flujo es superior al de la potencia (lm/W). 4) Menor duración. Las disminuciones de la tensión por debajo del valor nominal producen el efecto contrario.
Temperatura de calor	Del orden de 2.700 0K (calidad).
Índice de rendimiento de calor	100
Duración	En las lámparas de incandescencia el concepto de duración que se maneja es el de vida media, que corresponde al tiempo esperable de ruptura del filamento. La vida media, según tipos de lámparas, es de: • 1.000 h, estándar y reflectoras de vidrio soplado. • 2.000 h, reflectoras PAR.

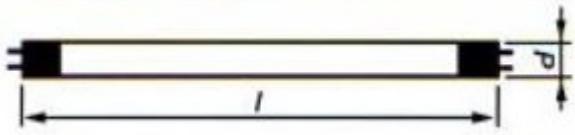
Sus ventajas más importantes son:

1. Bajo precio.
2. Sencillez de funcionamiento e instalación y ausencia de equipos auxiliares.
3. Encendido y reencendido instantáneo.
4. Ausencia de efecto estroboscópico.
5. Excelente rendimiento de color.
6. Gama amplia de potencias y tensiones de alimentación [26].

2.4.2. Lámparas Fluorescentes

Las lámparas fluorescentes se suelen construir en forma de barra. La longitud de la barra depende de la potencia de la lámpara, como se muestra en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3: Longitud de la barra dependiendo la potencia de la lámpara.

Lámparas fluorescentes normalizadas (diámetro de tubo $d=26$ mm)		
		
Potencia en W	Longitud l en mm	Caudal luminoso en lm
18	590	1,000...1,200
36	1,200	2,500...3,100
58	1,500	4,000...5,000

El aparato de conexión necesario puede estar dispuesto en el exterior, es decir separado de la lámpara, o bien incorporado en la misma lámpara. Las lámparas fluorescentes necesitan aparatos de conexión para el cebado y para limitar necesidad de corriente durante el funcionamiento [27].

Las lámparas fluorescentes pueden ser clasificadas en dos grupos:

- Lámparas que utilizan arrancador para su encendido, llamadas también lámparas precalentadas o de encendido con interruptor.
- Lámparas sin dispositivo de encendido. En este tipo de lámparas, la balastro o reactor es el único equipo auxiliar utilizado para proporcionar la tensión y la corriente adecuada para encender la lámpara. Se subdividen a su vez en los siguientes tipos:

1. Lámparas “Slim Line”.
2. Lámparas de encendido instantáneo.
3. Lámparas de encendido rápido.
4. Lámparas de precalentamiento de encendido rápido .
5. Lámparas de alta emisión.
6. Lámparas “Power Groove”.
7. Lámparas “Circ Line” (circulares).

Las lámparas de tipo “Slim Line” se emplean balastras de voltaje, de manera que son encendidas instantáneamente. Los cátodos de estas lámparas están diseñados especialmente para soportar el voltaje de arranque. Se les denomina de “encendido instantáneo”, pero dicho termino se refiere en realidad a las lámparas con casquillo biclavillo que no requieren arrancador, es decir, aquéllas de 40 watts en bulbos T-12 y T-17.

Las de encendido instantáneo requieren de una balastro que les proporcione relativamente el alto voltaje para su encendido.

Las lámparas de encendido rápido tienen sus electrodos (cátodos) conectados al circuito de caldeo de la balastro durante el periodo de encendido y de operación de la lámpara.

Las lámparas de precalentamiento o de encendido rápido pueden usarse con o sin arrancador, es decir, por medio de circuitos de precalentamiento o de arranque rápido. Son una combinación de las lámparas de 40 watts y las de 40 watts de encendido rápido.

Las lámparas de alta emisión operan igual que las anteriores, pero relativamente a altas corrientes.

En cuanto a las lámparas “Power Groove”, son las de mayor potencia fabricados hoy en día; también operan con el principio de las de encendido rápido. Se emplea en lugares donde se requiere de altos niveles de iluminación a bajo costo.

Las lámparas “Circ Line” utilizan bases de cuatro clavillos y trabajan también con el principio de las de arranque rápido.

Existen tres formas de encendido de las lámparas fluorescentes que dependen del tipo de electrodos que se utilizan:

1. Lámparas de catado caliente o de precalentamiento con arrancador de gas neón
2. Lámparas de cátodos de precalentamiento a base de circuito de caldeo dentro del reactor. A este método se le denomina de “encendido rápido”.
3. Lámparas de encendido instantáneo o de “cátodo frío”.

El espectro radiante de las lámparas fluorescentes puede ser modificado al cambiar la mezcla de fósforo usados en la capa interior del tubo. Hay varios tipos de lámparas fluorescentes de color blanco en el mercado:

1. Blanco frío.
2. Blanco cálido.
3. Blanco.
4. Blanco frío de lujo.
5. Blanco cálido de lujo.
6. Luz de día.

Sus desventajas son:

1. Su gran tamaño en relación con su potencia.
2. La necesidad de un reactor o balastros que le proporcione una corriente y voltaje adecuado y una reducción del flujo luminoso a bajas temperaturas ambientales.

Sus ventajas son:

1. Alta eficiencia luminosa.
2. Realce de los colores azules, violeta, verde, y opaca miento del rojo y anaranjado, lo cual puede ser también una desventaja.
3. Gran duración (12000 horas en comparación con las 750-1000 horas de las lámparas incandescentes) [28].

2.4.3. Las lámparas a descarga

El grupo de fuentes luminosas de descarga en gas es muy amplio. Comprende las lámparas fluorescentes tubulares, las lámparas de vapor de mercurio o de sodio, así como los tubos usados para anuncios luminosos. El principio de funcionamiento, el tipo de luz que emiten, así como el campo de aplicación, varía notablemente de tipo a tipo de lámpara. Lo único que tiene en común es el paso de la corriente eléctrica en un gas.

Otros problemas comunes a estos tipos de lámparas, son los dispositivos requeridos para su encendido y estabilización de descarga, el bajo factor de potencia y la necesidad de eliminar el efecto estroboscópico (parpadeo) [29].

2.4.4. LED's

Los diodos luminiscentes, LED (light emitting diodes), son de menor potencia luminosa que las lámparas de incandescencia, aunque de mejor rendimiento luminoso, de una duración 10 veces mayor que éstas, con la particularidad de que no acusan agotamientos repentinos, siendo además muy resistentes al choque y a las vibraciones.

La luz arriada por un diodo luminiscente, es de banda estrecha y tiene prácticamente una sola longitud de onda, que depende del material semiconductor y de su impurificación. Actualmente hay diodos luminiscentes para longitudes de onda comprendidas entre 560 y 950 nm, es decir desde el verde hasta la banda del infrarrojo [30].

El diodo emisor de luz (LED) transforma corriente eléctrica en luz. La cantidad emitida por el LED depende de la corriente que circula por el diodo; cuanto mayor es la corriente, tanto más grande la luz emitida [31].

Un diodo emisor de luz es un diodo de unión p-n, fabricado casi siempre con material semiconductor como el arseniuro de aluminio y galio (AlGaAs) o el arseniuro fosfuro de galio (GaAsP). Los LED emiten luz por emisión espontánea: la luz se emite como resultado de la combinación de electrones con huecos. Cuando tiene una polarización directa, esos portadores minoritarios se inyectan a través de la unión p-n. Una vez atravesada la unión, esos portadores minoritarios se recombinan con portadores mayoritarios y desprenden energía en forma de luz. Este proceso es esencialmente el mismo que en un diodo semiconductor convencional, pero en los LED se eligen ciertos materiales semiconductores y dopantes, tales que el proceso es radiactivo; esto es, que se produce un fotón [32].

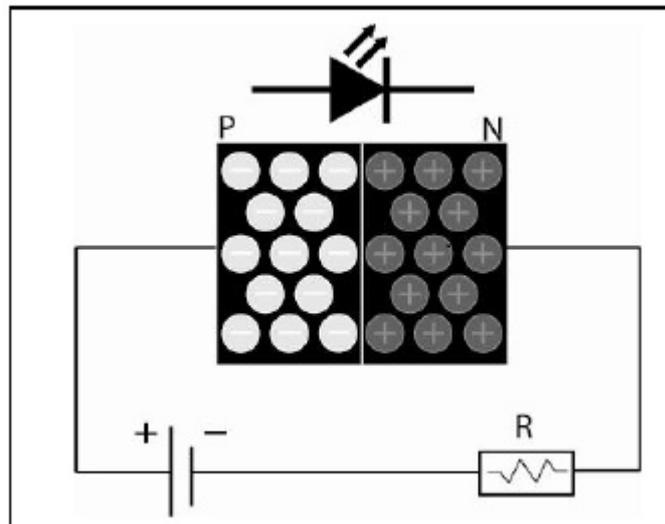


Figura 2.12: Representación de un diodo unión PN

La estructura fundamental de los diodos electrónicos consiste en la unión de dos porciones de cristal, generalmente de silicio (Si), en los que se añadió impurezas de una manera controlada. Estas impurezas son normalmente algún metal u otro compuesto químico de manera que obtenemos semiconductores de tipo N y P.

Un semiconductor P se obtiene añadiendo al silicio una pequeña cantidad de un elemento con tres electrones en su capa de valencia. Con ello se aumenta considerablemente el número de portadores de carga libre positiva (huecos) existentes en el cristal. Cuando se añade el material dopante, el cristal se queda con un número inferior de electrones en la capa externa de los átomos de los que podría almacenar el cristal sin doparse.

Un semiconductor tipo N se obtiene añadiendo un elemento con cinco electrones en su capa de valencia al cristal de silicio. Con ello se aumenta el número de portadores de carga libre negativa (electrones) existentes en el cristal. Cuando se añade el material dopante, el cristal se queda con un número muy superior de electrones en la capa externa de los átomos a los que podría almacenar el cristal sin doparse.

El funcionamiento del semiconductor se basa en que al aportarle energía a través de la conducción de corriente eléctrica esto hace que algunos electrones de la parte N salten a la banda de conducción se combina con un hueco de la parte P libera una energía al volver a la banda de valencia. La cantidad de energía liberada en cada recombinación es un valor constante y es función de los materiales dopantes utilizados en el cristal de silicio

Esta energía se libera en forma de radiación electromagnética que se transmite en forma de “cuantos de energía” (fotones). La cantidad de energía que tiene cada uno de estos fotones es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación que se forma, y por tanto al color emitido, a través de una constante denominada constante de Planck Ecuación 2.18:

$$E = h \cdot \nu \tag{2.18}$$

Donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la radiación producida por el fotón.

Si la energía que se libera al recombinarse los electrones es pequeña, dicha energía se emitirá en forma de ondas infrarrojas relativamente, baja frecuencia. Si el electrón genera más energía de las ondas que emitirá el diodo tendrá frecuencia más alta y se pasaría de emitir luz infrarroja a luz visible: roja, amarilla, verde, azul, violeta y ultravioleta. Estas distintas longitudes de onda se forman combinando distintas proporciones de materiales en el dopaje del silicio. En el Cuadro 2.4 se muestran las tensiones de polarización nominales promedio para distintos colores de LED's.

Cuadro 2.4: Tensiones de polarización nominales promedio para distintos colores de LED's

Color	Diferencia de Potencial (V)
Infrarrojo	$\leq 1.6 \text{ V} - 1.8 \text{ V}$
Rojo	$- 2.2 \text{ V} - 2.2 \text{ V}$
Naranja	$- 2.3 \text{ V} - 2.3 \text{ V}$
Amarillo	$- 2.6 \text{ V} - 2.6 \text{ V}$
Verde	$- 3.2 \text{ V} - 3.0 \text{ V}$
Azul	$- 3.5 \text{ V}$
Blanco	$3.0 \text{ V} - 3.5 \text{ V}$
Ultravioleta	$>= 3.5 \text{ V}$

Las características lumínicas que más rápidamente se asocian a los LED´s son valores altos de eficiencia energética y de vida útil, mientras que desde el punto de vista comercial a la hora de seleccionar un equipo de iluminación los parámetros más analizados son el precio de compra del equipo y los costes de operación, donde podemos incluir gastos de energía y de mantenimiento.

De manera más específica los puntos fuertes diferenciales de la tecnología LED son:

1. Direccionalidad de la emisión de luz. Conducir la luz solo donde se necesita.
2. Tamaño. Se suelen valorar mucho los equipos compactos y de bajo perfil.
3. Resistencia a la rotura. Equipos que no incluyan materiales frágiles.

Los LED´s ofrecen muchas facilidades en términos de control de sus niveles de emisión manteniendo o incluso aumentando sus parámetros de eficiencia. Son sistemas electrónicos, controlables por sistemas digitales de gestión, remotos o autónomos.

Se pueden realizar multitud de clasificaciones de los LED´s en función de diferentes parámetros: especificaciones técnicas, campos de aplicación, potencia luminosa, ángulo de iluminación, tipo de encapsulado, etc.

Todas estas posibles clasificaciones están relacionadas entre ellas dado que cada aplicación se relaciona con un encapsulado, asociado con un ángulo de visión, y de una potencia determinada.

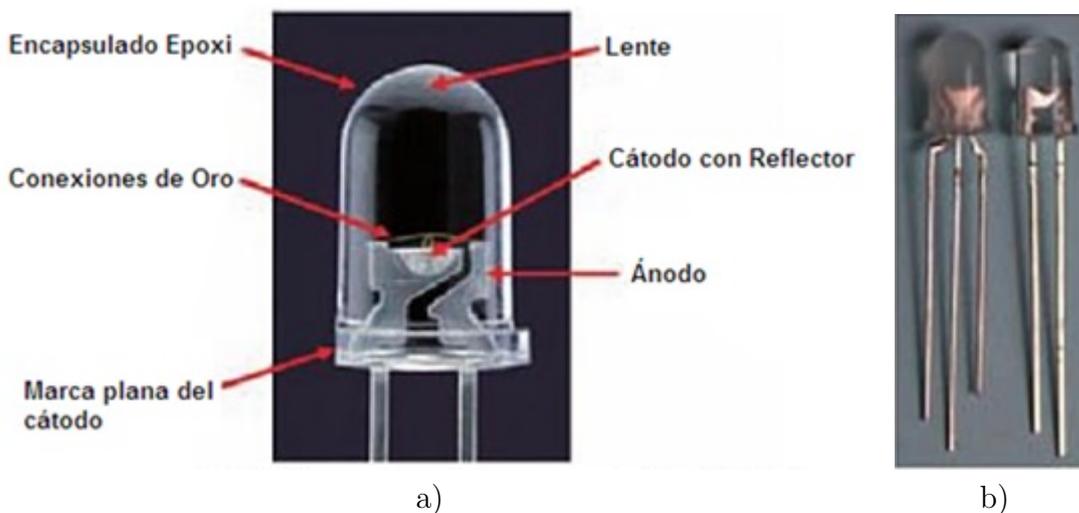


Figura 2.13: a) Diagrama de secciones y b) componentes de un LED (5mm) de inserción.

Un LED bien enfocado debe proyectar un haz luminoso simétrico cuando se proyecta sobre una superficie plana. Un LED con un enfoque defectuoso se identificar porque proyecta sombras con la forma del sustrato y a veces se observa un aro más brillante en el exterior de círculo. Esto es síntoma de que la posición del sustrato se encuentra por detrás del centro focal del espejo.

Dentro de las características ópticas del LED, aparte de su luminosidad, está la del ángulo de visión. Se define generalmente el ángulo de visión como el desplazamiento angular desde la perpendicular del LED donde la potencia de emisión disminuye a la mitad. Según la aplicación que se le dé al LED se necesitará un ángulo de visión. Así son típicos LED´s con 4, 6, 8, 16, 24, 30,

45, 60, y hasta 90 grados de ángulo de visión. Generalmente el ángulo de visión está determinado por el radio de curvatura del reflector del diodo y principalmente por el radio de curvatura del encapsulado. Mientras más pequeño sea el ángulo, y a igual sustrato semiconductor, tendrá una mayor potencia de emisión y viceversa [33].

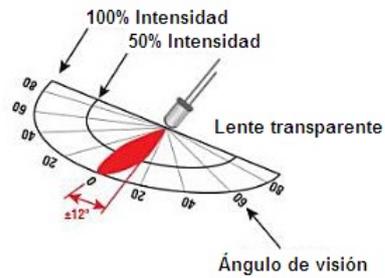


Figura 2.14: Definición del ángulo de emisión de un LED.

3 Sistemas de superficies de reflexión en los sistemas de iluminación

3.1. Superficies

Una superficie puede ser considerada como la película infinitamente delgada que recubre un cuerpo cualquiera o que separa dos regiones del espacio. La superficie puede definirse como.

- El lugar geométrico de las posiciones de una línea cualquiera que se mueva con arreglo a una ley determinada, sin que su forma varíe. En la Figura 3.1 se aprecia la línea L que ocupa varias posiciones L_1, L_2, \dots , las cuales serán generatrices de la superficie, que también podemos llamar g_1, g_2, \dots .

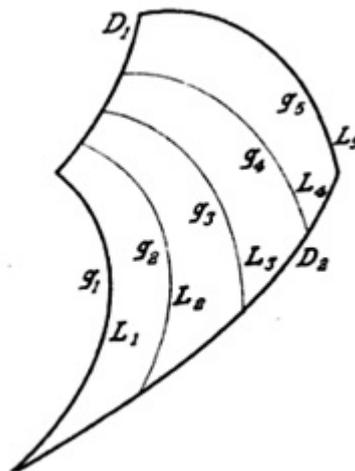


Figura 3.1: Superficie engendrada por una línea móvil indeformable.

- Como lugar geométrico de las posiciones de una línea cualquiera, sujeta a una ley determinada de movimiento, la cual cambia al mismo tiempo de forma, generalmente en función de su posición en el espacio. La Figura 3.2 nos muestra la superficie S engendrada por la línea g , siendo g_1, g_2, \dots , distintas posición de esta línea móvil y variable.

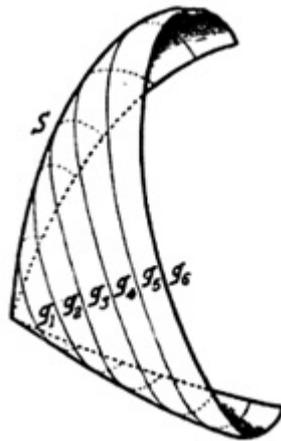


Figura 3.2: Superficie engendrada por una línea móvil variable.

- Como envolvente de las distintas posiciones de otra superficie que se mueve con arreglo a una ley, permaneciendo indeformable, Figura 3.3[34].

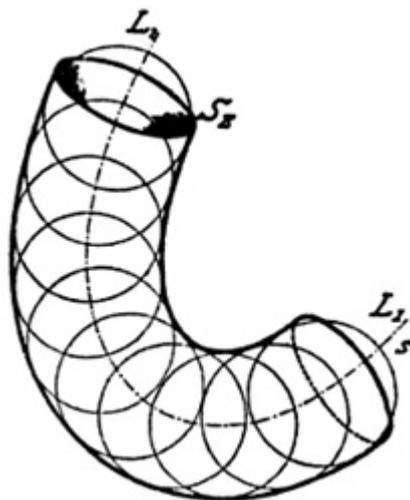


Figura 3.3: Superficie envolvente de otra móvil indeformable

Las superficies podemos clasificarlas de muy diferentes formas, pero atendiendo a la forma de su generatriz y a su generación podemos clasificarlas según el Cuadro 3.1 [35]:

Cuadro 3.1: Tipo de superficies.

Superficies				
Regladas	Desarrollables	plano		
		radiadas	Vértice propio cónicas	Pirámide cono
			Vértice impropio cilíndricas	Prisma cilindro
		poliédricas	regulares	
	irregulares			
	Alabeadas (no Desarrollables)	Revolución	Hiperboloide de revolución,...	
Otras		Conoide Paraboloide hiperbólico		
curvas	No desarrollables	Revolución	Esfera Toro Escocia,...	
		Otras	elipsoide	
Otras		Topográficas		

3.1.1. Superficies radiadas

Son las obtenidas como lugar geométrico de las distintas rectas (generatrices) que se apoyan en una directriz cualquiera y son concurrentes en un punto que se denomina vértice.

Si el vértice es un punto propio se llaman:

- Pirámides, si la directriz es una línea poligonal Figura 3.4 a); V: vértice, directriz: ABCDE.
- Cónicas, si la directriz es una línea curva, Figura 3.4 b): V: vértice.

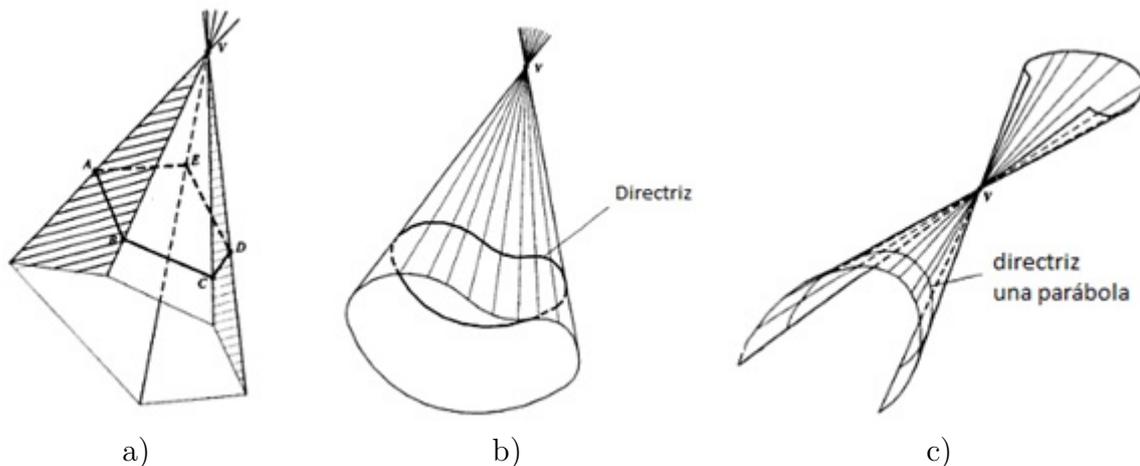


Figura 3.4: a) Superficie piramidal; b) Superficie cónica; c) Superficie abierta

Estas superficies son ilimitadas y se componen de dos hojas o partes que reciben el nombre de completa o simple según se consideren las dos hojas o una sola.

También pueden ser cerradas, Figura 3.4; a) y Figura 3.4 b) o abiertas Figura 3.4 c), según lo sea la directriz [36].

3.1.2. Superficies cuadráticas

Una superficie cuadrática es la gráfica de una ecuación de segundo grado en tres variables x , y y z . La ecuación más general es la Ecuación 3.1.

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fxz + Gx + Hy + Iz + J = 0 \quad (3.1)$$

Donde A, B, C, \dots, J son constantes, pero por traslación se puede llevar a una de las dos formas estándar Ecuación 3.2

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + J = 0 \quad (3.2)$$

ó bien la Ecuación 3.3

$$Ax^2 + By^2 + Iz = 0 \quad (3.3)$$

Las superficies cuadráticas son las contrapartes en tres dimensiones de las secciones cónicas en el plano [37].

3.2. Leyes de reflexión

Describimos la dirección de los rayos incidentes, reflejados y refractados, en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos en términos de los ángulos que forman con la normal (perpendicular) a la superficie en el punto de incidencia. Si la interfaz es áspera, tanto la luz transmitida como la luz reflejada se dispersan en múltiples direcciones, y no existe un único ángulo de transmisión o de reflexión. La reflexión en un ángulo de transmisión o de reflexión. La reflexión en un ángulo definido desde una superficie muy lisa se denomina reflexión especular (de la palabra latina que significa “espejo”); la reflexión dispersa desde una superficie áspera se llama reflexión difusa [38].

3.2.1. Principio de Huygens

El principio de Huygens nos permite hallar la forma y posición futura de un frente de onda a partir de su forma y posición futura de un frente de onda a partir de su forma y posición presentes. Dicho principio establece que todo punto de un frente de onda se puede considerar como una fuente de pequeñas ondas esféricas secundarias. El frente de una onda en un instante posterior es la superficie tangente a estas ondas secundarias, es decir, su envolvente.

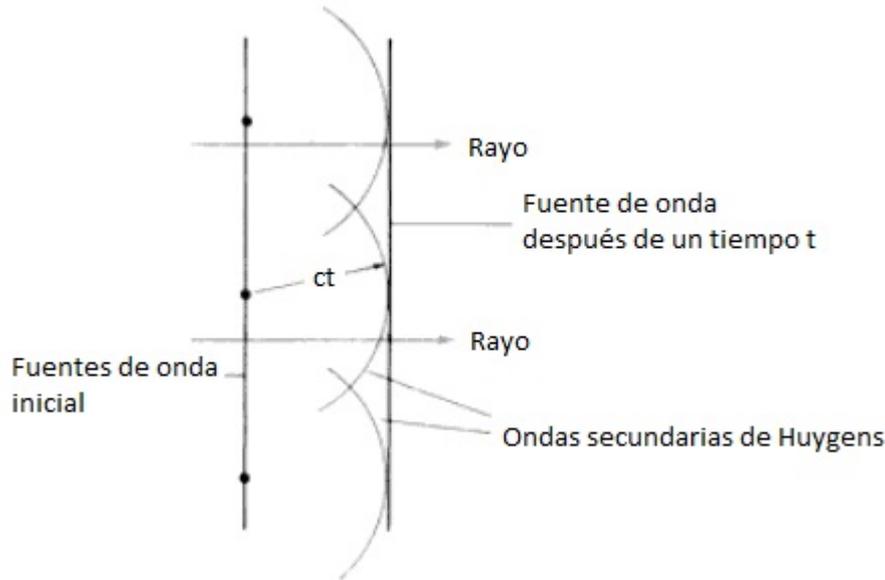


Figura 3.5: En un tiempo t , el frente de onda se desplaza una distancia ct .

Para mostrar cómo se usa el principio de Huygens, consideremos una onda plana Figura. En diversos puntos de un frente de onda, dibujamos esferas de radio $r=ct$, que representan la distancia recorrida por las ondas secundarias en el intervalo t . La tangente a estas esferas es un plano paralelo al interior y desplazado una distancia ct a partir de éste. Así pues, el frente de onda se ha desplazado la distancia esperada en este intervalo de tiempo.

La formulación original del principio de Huygens establecía que las ondas irradiaban con la misma intensidad en todas direcciones. Ello supondría que las ondas viajan tanto hacia adelante como hacia atrás, al contrario de lo que en realidad observamos [39].

3.2.2. Principio de Fermat

El camino óptico a lo largo de la trayectoria de longitud s que sigue la luz para ir de un punto A a otro B es mínimo comparado con otras trayectorias reales de luz.

Esta definición equivale a afirmar que el camino óptico a lo largo de una trayectoria de luz se mantiene estacionario cuando introducimos una variación infinitesimal en la trayectoria s pasando a ser $s+ds$. Es decir: la variación del camino óptico será nula si despreciamos infinitésimos de orden superior al primero. Por tanto, la expresión matemática del Principio de Fermat es representada por la Ecuación 3.4:

$$\delta L = \delta \int_A^B n \cdot ds = 0 \quad (3.4)$$

Dado que existe algún caso (como el del espejo esférico) en que el camino que sigue la luz es máximo, el principio de Fermat puede enunciarse de modo más general diciendo que: el camino óptico a lo largo de una trayectoria de luz es estacionario, es decir un extremal [40].

3.3. Técnicas de iluminación.

3.3.1. Tipos de iluminación

Los tipos de iluminación, se pueden clasificar de acuerdo a la distribución del flujo luminoso como:

1. Iluminación directa. El flujo luminoso es directo hacia abajo, las luminancias de este tipo tienen por lo general un rendimiento elevado (90-100 %).
2. Semidirecta. El flujo luminoso es directo en gran parte, hacia abajo (40-50 %) y hacia arriba (50-60 %).
3. Mixta. El flujo luminoso está distribuido uniformemente hacia abajo (60-90 %).
4. Indirecta. El rendimiento es bajo y la visión poco nítida por la falta del efecto de sombra, la iluminación hacia arriba es del 90 al 100 % [41].

Para nuestro diseño experimental se utilizara la iluminación semidirecta.

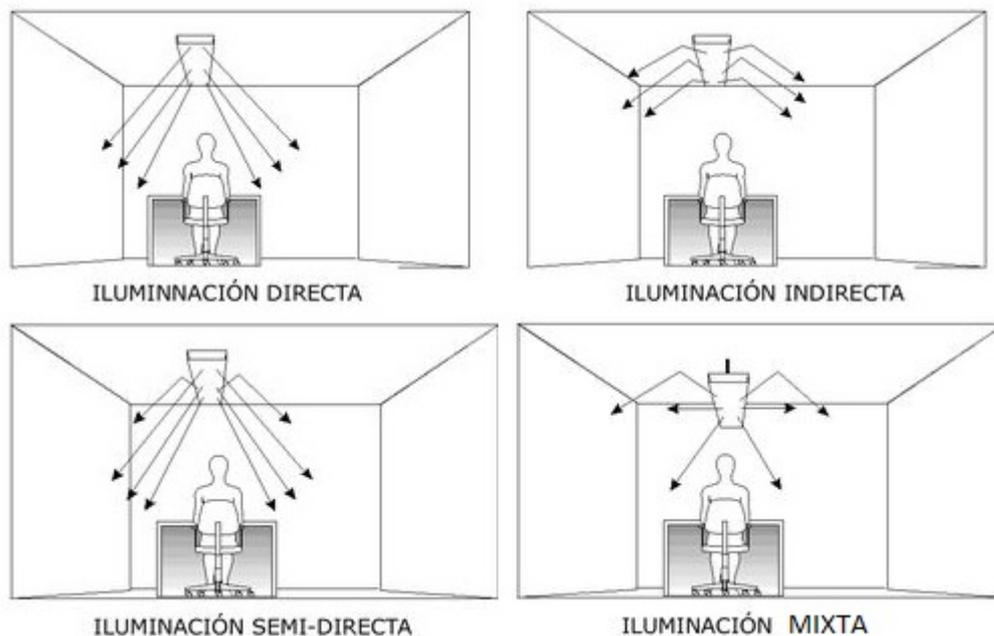


Figura 3.6: Tipos de iluminación.

3.3.2. Niveles de iluminación

Los niveles mínimos de iluminación en el plano de trabajo, para cada tipo de tarea visual o área de trabajo, son los establecidos en el Cuadro3.2 [42].

Cuadro 3.2: Niveles de iluminación

Tarea Visual del Puesto de Trabajo	Área de Trabajo	Niveles Mínimos de iluminación (luxes)
En exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento vehículos.	Exteriores generales: patios y estacionamientos.	20
En interiores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículo.	Interiores generales: almacenes de poco movimiento, pasillos, escaleras, estacionamientos cubiertos, laborales en minas subterráneas, iluminación de emergencia.	50
En interiores	Áreas de circulación y pasillos; salas de espera; salas de descansó; cuartos de almacén; plataformas; cuartos de caldera.	100
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Servicio al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia, cuartos de compresores y pailera.	200
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y maquina, inspección simple, empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	300
Distinción fina de detalles: maquinado y acabados delicados, ensamble de inspección moderadamente fácil, captura y procesamiento de información, manejo de instrumentos y equipos de laboratorio.	Talleres de precisión: de pintura y acabado de superficies y laboratorios de control de calidad.	500
Distinción fina de detalles: maquinado de precisión, ensamble e inspección de trabajos delicados, manejo de instrumentos y equipo de precisión, manejo de piezas pequeñas.	Talleres de alta precisión: de pintura y acabado de superficies y laboratorios de control de calidad.	750
Alta exactitud en la distinción de detalles: ensamble, proceso e inspección de piezas pequeñas y complejas, acabado con pulidos finos.	Proceso: ensamble e inspección de piezas complejas y acabados con pulidos finos.	1000
Alto grado de especialización en la distinción de detalles.	Proceso de gran exactitud. Ejecución de tareas visuales: <ul style="list-style-type: none"> • De bajo contraste y tamaño muy pequeño por periodos prolongados; • Exactas y muy prolongadas, y • Muy especiales de extremadamente bajo contraste y pequeño tamaño. 	2000

Otros niveles de iluminación son los siguientes [43]:

Exteriores

Calle en zona residencial	4 a 7 Lux
Avenida comercial importante	15 a 20 Lux
Plazas	10 a 20 Lux
Playas de estacionamiento	50 Lux

Interiores: Residencial

Estar:	Iluminación general	100 Lux
	Iluminación localizada	200 Lux
	Lectura, escritura, etc.	400 Lux
Dormitorio:	Iluminación general	200 Lux
Cocina:	Iluminación general	200 Lux
	Iluminación de la mesada	500 a 800 Lux
Baño:	Iluminación general	100 Lux
	Iluminación sobre el espejo (nivel vertical)	200 Lux

Interiores: Oficinas

Halls y lobbys	200 Lux
Circulaciones	200 Lux
Salas de reuniones	300 Lux
Trabajo normal de oficina	500 Lux

Interiores: Varios

Restaurantes:	Íntimo	80 a 100 Lux
	Tipo gril	300 Lux

3.4. Cálculos de iluminación para instalaciones de alumbrado

3.4.1. Ley de los cuadrados inversos.

“La iluminación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre la fuente de luz y la superficie iluminada”, Ecuación 3.5.

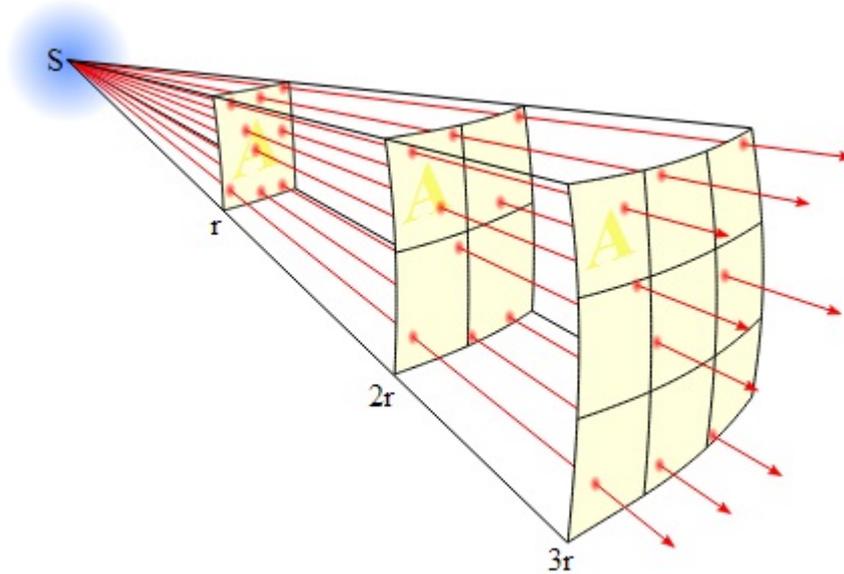


Figura 3.7: Ley de los cuadrados inversos.

$$E = \frac{I}{D^2} \quad (3.5)$$

Donde:

I = Intensidad luminosa.

D = Distancia existente entre la fuente de luz y la superficie.

E = Iluminación.

Nota: Esta ley es válida únicamente tratándose de fuentes puntuales, superficies perpendiculares a la dirección del flujo y cuando la distancia es grande en relación al tamaño de la fuente. La distancia debe ser al menos cinco veces la dimensión máxima de la luminaria. No es aplicable a fuentes de iluminación extensas [44].

3.4.2. Método de iluminación media (método de los lúmenes)

Una vez determinado el nivel de iluminación en lux, adecuado para la tarea visual específica que se va a realizar en el local, el tipo de alumbrado (fluorescente, incandescente, mercurial, etc.) y consecuentemente el flujo luminoso en lúmenes emitido por cada lámpara (dato que proporciona el fabricante) y con base en la fórmula de la iluminación que dice: la iluminación es el flujo incidente por unidad de área Ecuación 3.6:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{\text{lúmenes}}{m^2} = lux \quad (3.6)$$

Se puede determinar el flujo luminoso total incidente sobre una superficie para producir un nivel luminoso prefijado, despejando el flujo luminoso Ecuación 3.7:

$$\Phi_T = AE \tag{3.7}$$

El número de lámparas será igual a Ecuación 3.8:

$$\text{Número de lámparas} = \frac{\Phi_T}{\Phi/\text{lámparas}} = \frac{AE}{\Phi/\text{lámparas}} \tag{3.8}$$

La fórmula anterior es afectada por diversos coeficientes, ya que no todo el flujo luminoso producido por las luminarias llega al área de trabajo, dado que parte de los lúmenes son absorbidos por el techo, las paredes y la suciedad de las luminarias, debido a que la luz tiene que atravesar los polvos que se depositan en ellas e incluso hay pérdidas de flujo luminoso por envejecimiento de las lámparas y por la impedancia de la balastro. Finalmente la fórmula queda de la siguiente manera Ecuación 3.9 [45]:

$$\text{Número de lámparas} = \frac{A \times E}{\Phi/\text{lámparas} \times C.U. \times C.M. \times C.D. \times E.B.} \tag{3.9}$$

Donde:

A = Área de la superficie m^2

E = la intensidad de la iluminación en lux

$\Phi/\text{lámparas}$ = flujo luminoso en lúmenes por lámpara

$C.U.$ = coeficiente de utilización de la luminaria en particular

$C.M.$ = coeficiente de mantenimiento

$C.D.$ = coeficiente de depreciación luminosa

$E.B.$ = eficiencia de la balastro

Coficiente de utilización

Es una relación entre el flujo luminoso Φ , que alcanza el plano de trabajo, y el flujo luminoso total emitido por la lámpara. Este coeficiente depende de las dimensiones del local que se va a iluminar, ya que la luz emitida llega al plano de trabajo.

El índice de cuarto clasifica a los locales en 10 grados, representados por un número o una letra, de la A a la J, de acuerdo a sus dimensiones.

Índice de cuarto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Letra código	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J

Y se puede calcular según la Ecuación 3.10:

$$I.C. = \frac{5H(\text{largo} + \text{ancho})}{\text{largo} \times \text{ancho}} \tag{3.10}$$

Siendo H la altura de la luminaria al plano de trabajo.

Existe otra fórmula para calcular el índice de cuarto que utilizan los fabricantes de lámparas europeas y que emplean en sus tablas de coeficientes de utilización. En dicha fórmula también relacionan las dimensiones del local de la siguiente manera Ecuación 3.11:

$$K = \frac{LA}{Hm(LTA)} \quad (3.11)$$

Donde:

L = largo de la sala

A = ancho de la sala

Hm = altura de montaje

K = índice del local

El índice del local K puede tener los siguientes valores [46]:
0.6, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0.

Factor de mantenimiento

El factor de mantenimiento toma en consideración la reducción en la luz emitida por las lámparas o luminarias, debido al envejecimiento y acumulación de suciedad. El factor de mantenimiento apropiado para cualquier condición dada y tipo de luminaria, se puede determinar como sigue:

Las luminarias se pueden clasificar o dividir en categorías, para cada categoría existe una curva en donde se encuentra en uno de los ejes el número de meses entre limpieza y limpieza de las luminarias. Cada curva corresponde a la condición de suciedad en la atmósfera [47].

Coefficientes de depreciación luminosa

- Lámparas de sodio de baja presión. Si la temperatura de operación de las lámparas de sodio de baja presión se mantiene dentro de los límites de -100°C a $+400^{\circ}\text{C}$, el flujo luminoso de las lámparas permanece constante, es decir, prácticamente no existe depreciación luminosa para estas lámparas.
- Lámparas de sodio de alta presión. Para lámparas de 250 watts, a las 10,000 h. de vida funcional la depreciación luminosa es del 83%. Para lámparas de 400 watts y al mismo tiempo transcurrido la depreciación luminosa de 85%. A las 18,000 h. de vida las lámparas de 400 watts tienen una depreciación luminosa del 70% y las de 250 watts del 65% respectivamente [48].

Eficiencia de la balastra.

Este coeficiente se debe a que la balastra o reactor consume cierta potencia, que afecta a las lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio en un 5%, por lo que hay que aplicar un coeficiente de 0.95 cuando se trate de este tipo de lámparas. Según norma técnica de la SECOFI este factor debe ser de 0.80.

Las lámparas incandescentes no deberán ser afectadas por este coeficiente, sin embargo, una variación de 1 % en el voltaje puede hacer variar su flujo en un 3 %, al igual que las de vapor de mercurio.

Las lámparas fluorescentes varían su flujo en 1 % por cada 2.5 % de variación de voltaje.

Por tanto, la fórmula para el cálculo del número de luminarias con el método del lumen queda de la siguiente manera Ecuación 3.12:

$$\text{Número de lámparas} = \frac{A \times E}{\Phi / \text{lámp} \times C.U. \times C.M. \times C.D. \times E.B.} \quad (3.12)$$

Y escrita en términos de unidades para mayor facilidad quedaría Ecuación 3.13:

$$\text{Número de lámparas} = \frac{\text{lux} \times \text{metros}^2}{\text{lúmenes/lámp} \times C.U. \times C.M. \times C.D. \times E.B.} \quad (3.13)$$

El número de luminarias es igual a Ecuación 3.14[49]:

$$\text{Número de unidades de alumbrado} = \frac{\text{No. de Lámparas}}{\text{lámparas/unidad}} \quad (3.14)$$

3.4.3. Método de cavidad zonales.

Este método es el normalmente reconocido para la determinación de la iluminación promedio producida por un sistema de alumbrado interior. Como su nombre lo indica, está basada en el hecho de que un sistema se puede dividir en varios sub-espacios o cavidades. Este método de cavidad zonal reemplaza a los primeros métodos de cálculos de iluminación que fueron basados en las técnicas de punto por punto que usan la ley de los cuadrados inversos. Los cálculos por el método de cavidad zonal se usan para determinar el coeficiente de utilización de luminaria en la configuración específica del local, este coeficiente representa por sí mismo la fracción de los lúmenes totales de la lámpara en el plano de trabajo.

El local se divide en tres cavidades separadas, que son:

1. Cavidad del techo.
2. Cavidad del local.
3. Cavidad de piso.

Cavidad de techo. Es el área medida desde el plano de la luminaria al techo. Para luminarias colgantes existirá una cavidad de techo: para luminarias colocadas directamente en el techo o empotradas en el mismo no existirá cavidad de techo.

Cavidad de local. Es el espacio entre el plano de trabajo de donde se desarrolla la tarea y la parte inferior de la luminaria: el plano de trabajo se encuentra localizado normalmente arriba del nivel del piso. En algunos casos, donde el plano de trabajo es considerado a nivel de piso. En algunos casos, donde el plano de trabajo es considerado a nivel del piso, el espacio desde

la luminaria al piso se considera como cavidad local. En el lenguaje de iluminación la distancia desde el plano de trabajo a la parte inferior de la luminaria es llamada “altura de montaje de la luminaria”.

Cavidad de piso. Se considera desde el piso a la parte superior del plano de trabajo, o bien, el nivel donde se realiza la tarea específica. Para áreas de oficina esta distancia es aproximadamente de 76 cm. (2.5 pies). Para bancos de trabajo en industrias deberán considerarse 92 cm. (3 pies) aproximadamente. Si el trabajo o tarea se desarrolla en el piso, no existe cavidad de piso.

Para los cálculos se refiere a las tres cavidades por los símbolos normalmente usados para describirlos:

hcc = Altura de la cavidad del techo.

hrc = Altura de cavidad del local.

hfc = Altura de cavidad de piso.

La cavidad de piso. Consiste del espacio entre el piso y el plano de trabajo. La altura del plano de trabajo. La altura del plano de trabajo (hfc) la cavidad del local es el espacio entre el plano de trabajo y la altura de montaje de las luminarias (hrc). La cavidad del techo es el espacio entre el fondo o parte de la luminaria y el techo mismo (hcc).

La teoría básica considerada en este método de cálculo de iluminación es que la luz producida por una lámpara o luminaria es reflejada por las superficies del área. Las reflexiones múltiples de la luz desde la luminaria y desde las superficies del local actúan para producir la luz en el plano de trabajo. Debido a este hecho es muy importante determinar:

- Las dimensiones del local.
- Las reflectancias del local referente a: techo, paredes y piso.
- Características de la lámpara.
- Características de la luminaria.
- Efectos ambientales: polvo, suciedad y temperatura.
- Mantenimiento planeado del sistema de iluminación.

Con el objeto de producir un lux en el plano de trabajo, el sistema de iluminación debe producir un lumen sobre cada metro cuadrado. De hecho, la definición de lux es:

Un lumen por metro cuadrado, o bien, establecido en forma matemática Ecuación 3.15:

$$\text{Número de lúmenes} = \frac{\text{Lumen incidente sobre una superficie}}{\text{Área en metros cuadrados}} \quad (3.15)$$

La fórmula básica para determinar los lúmenes necesarios para producir un nivel de iluminación deseado para un espacio conocido es como sigue Ecuación 3.16[50]:

$$Luxes = \frac{No.deluminarias \times lámparasporluminarias \times lumenesporlámparas \times C.U. \times f.m}{Áreaportaluminaria} \tag{3.16}$$

Donde:

C.U. = Coeficiente de Utilización.

f.m. = Factor de conservación L.L.D. × L.D.D.

L.L.D. = Depreciación de lúmenes de la lámpara.

L.D.D. = Depreciación de luminaria.

3.4.4. Método del punto por punto.

A diferencia del “Método de las cavidades Zonales”. Donde se calcula el “Nivel medio” de iluminación sobre un plano de trabajo considerado el aporte de las reflexiones de paredes, techo y piso además la incidencia de un factor de mantenimiento o conservación de la instalación, el “Método punto por punto” se basa en la cantidad real de luz que se produce en un “punto” del área iluminada.

Para aplicar este método, se deberá conocer la forma en que la luminaria distribuya el flujo luminoso que emite la fuente de luz (“Curva de distribución luminosa”) y verificar que se cumpla la “Ley de la inversa de los cuadrados” [?].

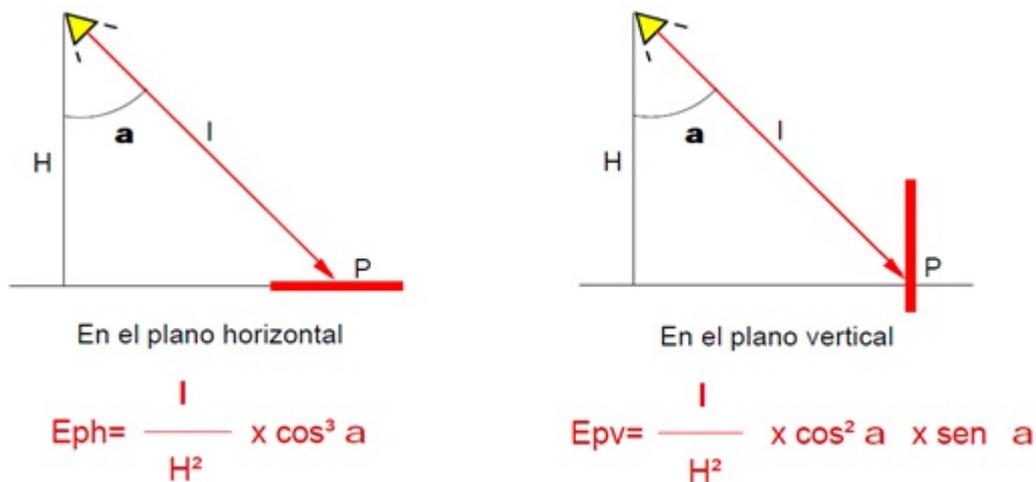


Figura 3.8: Método punto por punto.

Donde:

E_{ph} = Nivel de iluminación en un punto de la superficie horizontal (lux)

E_{pv} = Nivel de iluminación en un punto de la superficie vertical (lux)

I = Intensidad luminosa en una dirección dada (candelas)

H = Altura de montaje de la luminaria normal al plano horizontal que contiene al punto

a = Angulo formado por el rayo de luz y la vertical que pasa por la luminaria.

4 Diseño de un sistema de iluminación con LED´s.

4.1. Diseño General y selección de led´s

Se disipa una luz de un LED ultrabrillante en una superficie de reflexión la cual será reflejada en una pantalla, desplazando horizontalmente el LED como se muestra en la Figura 4.1.

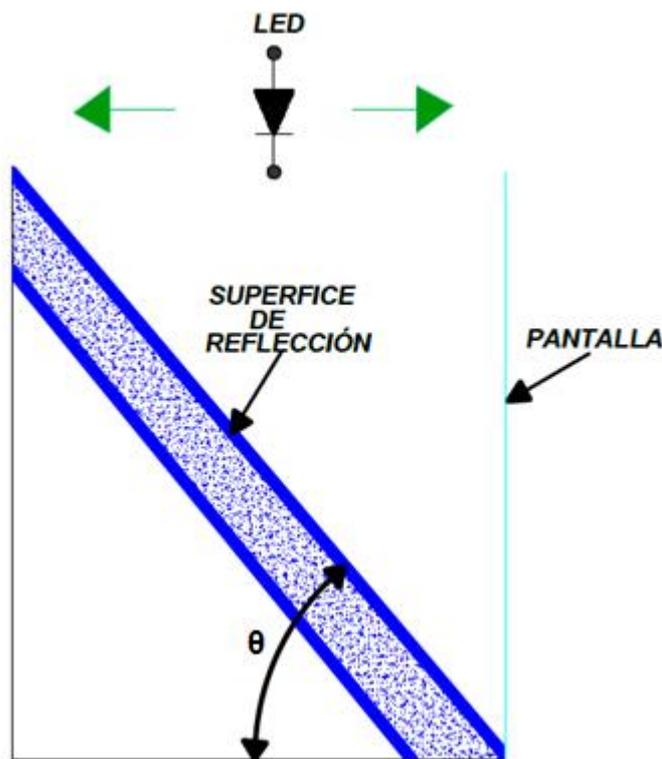


Figura 4.1: Diseño general.

En la Figura 4.1 se observa como un LED se desplaza en la parte superior de manera horizontal. La luz que disipa el led será reflejada en una superficie de reflexión la cual refractara los rayos del led en una pantalla blanca. La superficie de reflexión estará inclinada a un ángulo θ .

Según datos de steren tenemos las siguientes características de LED´s ultrabrillantes:

LED ultrabrillante de 3 mm, color blanco Precio \$9

- Voltaje: 2.4 Vcc
- Intensidad luminosa: 1300 a 1600 mcd

- Corriente: 10 mA
- Angulo de iluminación: 30° respecto a la horizontal
- Diámetro: 3 mm
- Largo: 5,25 mm

LED ultrabrillante de 5 mm, color blanco Precio \$12

- Voltaje: 3,5 a 4 Vcc - Intensidad luminosa: 600 a 800 mcd
- Corriente: 20 mA
- Angulo de iluminación: 30° respecto a la horizontal
- Diámetro: 5 mm
- Largo: 8,6 mm

LED ultrabrillante de 10 mm luz blanca Precio \$9

- Voltaje: 3.3 Vcc
- 10 mm de diámetro
- 13,5 mm de largo
- Intensidad luminosa de 3300 a 3700 mcd
- Angulo de iluminación de 40 grados

Según las características técnicas que nos proporciona steren el ángulo de iluminación del LED que nos vende es de 30 y 40 grados. En este caso se ocupara un LED con ángulo de iluminación de 30grados con respecto a la horizontal ya que sus dimensiones no son tan grandes como el LED de 40 grados. Vease anexo 1. En la Figura 4.2 se muestra el ángulo de algunos LED's comerciables.

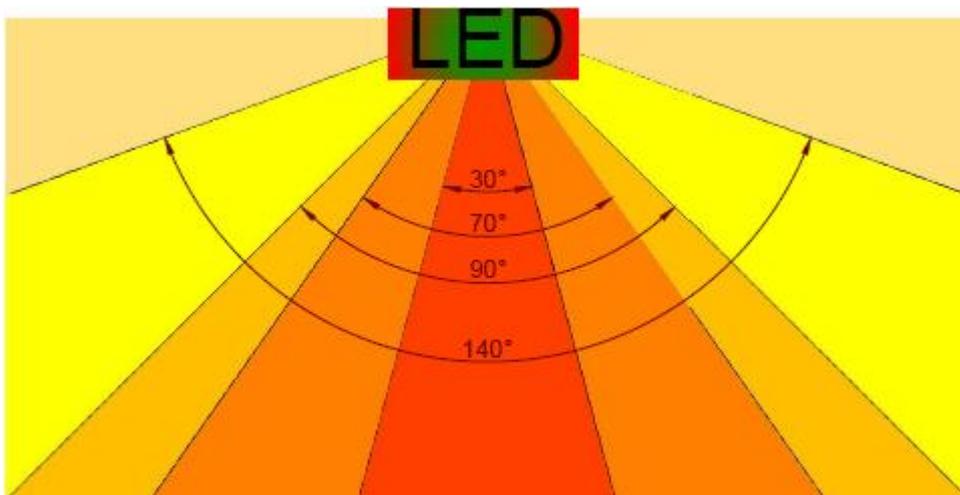


Figura 4.2: Ángulo de iluminación del LED.

Uno de los puntos más importantes del arreglo del sistema de iluminación es colimar los raios del LED para obtener el mismo flujo luminoso (lumen) en la pantalla (d) y se obtendrá midiendo la intensidad luminosa (candelas) en la pantalla como se muestra en la Figura 4.3.

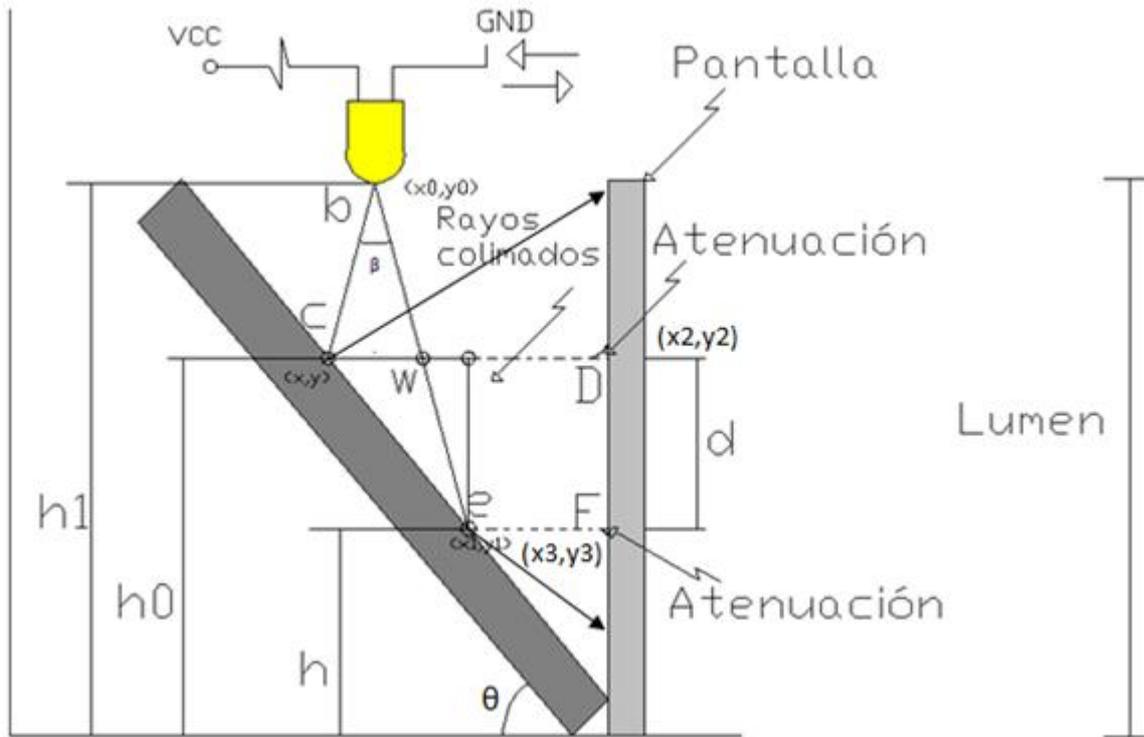


Figura 4.3: Características del diseño experimental.

En la Figura 4.3 se observa el ángulo de iluminación del LED proyectado en la superficie de refacción (θ) el cual va a ser refractado en una pantalla. Los rayos refractados van a tener dos caminos ópticos (CO) los cual serán calculados mas adelante.

4.2. Diseño experimental

El diseño experimental consistirá en colimar los rayos de 4 LED's en la superficie refractora como se muestra en la Figura 4.4. Los LED's tendrán un ángulo de iluminación de 30 grados. La distancia que hay de LED a LED dependerá de la posición del primer LED y de la intersección de la superficie refractora con la refracción de los rayos de luz del LED.

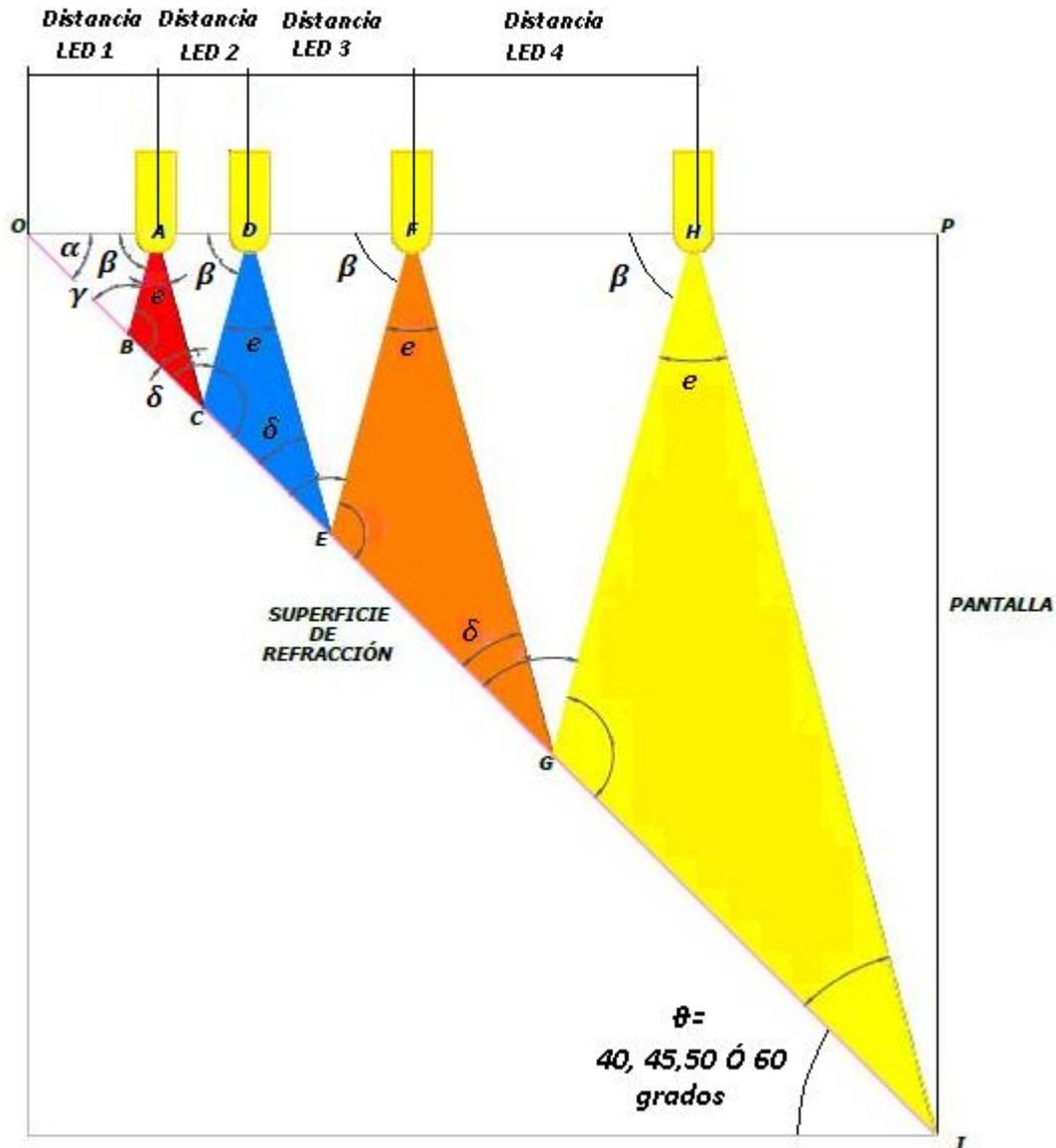


Figura 4.4: Diseño experimental

Matemáticamente el ángulo ϑ puede tomar valores de 0 a 90 grados, pero en el arreglo experimental ϑ tendrá 4 valores; 40, 45, 50 y 60 grados. Esto se debe a que si el ángulo fuera menor de 40 grados la refracción de la luz se refractaría en donde está colocado los LED's y no en la pantalla, ahora si β fuera mayor de 60 grados, la luz refractada se concentraría en la parte inferior de la pantalla y no en toda la región que nos interesa.

Las dimensiones del diseño experimental dependerán del ángulo de inclinación de la su-

perficie refractora, es decir de ϑ . Pero también dependerá de la posición del primer LED, esto es que entre más cerca se encuentre el primer LED de la superficie refractora las dimensiones de prototipo serán más pequeñas y entre más pequeño sea el ángulo de inclinación las dimensiones serán aun más pequeñas. En este proyecto se colocó el primer LED en dos posiciones, una a 0.5 cm de la superficie refractora y la otra posición a 1 cm de la superficie refractora.

4.2.1. Dimensiones de los diseños experimentales

4.2.1.1. Ángulos de iluminación de la refracción del LED.

El ángulo de iluminación del LED, según steren es de 300, se tomo como referencia diez rayos de refracción de dicho ángulo del LED hacia la superficie de refracción. Esto se realiza para observar el comportamiento de refracción del LED.

Como la posición del LED es la parte superior y el ángulo de iluminación del LED (e) según steren es de 300, entonces $\beta=750$, que es el ángulo que se forma de la superficie superior con la abertura del ángulo de iluminación.

Por lo que la ecuación del ángulo de los rayos refractados estará dada por la siguiente expresión matemática:

$$\beta = \beta' + \frac{eL}{s} \tag{4.1}$$

Donde:

β' = *Angulo de iluminación de la refracción del LED.*

β = *Angulo existente entre la superficie y el ángulo exterior de iluminación del LED.*

e = *Angulo de iluminación del LED (en este caso, el dato de fabricante del ángulo de iluminación es de 30 grados).*

L = *Posición de la línea de refracción LED.*

s = *Número de líneas requeridas.*

El número de líneas requeridas no es otra cosa más que las muestras que uno desee obtener, en este caso se obtendrán 10 muestras o diez líneas y s se obtendrán mediante la siguiente fórmula:

$$s = m - 1 \tag{4.2}$$

Donde:

m = *número de líneas o muestras.*

Los valores de L serán de 0 a 9, esto dependerá de la posición de la línea del Led. En el Cuadro 4.1 se muestran los valores de L con respecto a la posición.

Cuadro 4.1: Valores de la posición de la línea de refracción.

Valores de L									
L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Sustituyendo los valores de de 'L' y 'e' en la Ecuación Ecuación 4.1 podemos observar en la Figura 4.5 el comportamiento del ángulo de iluminación del LED.

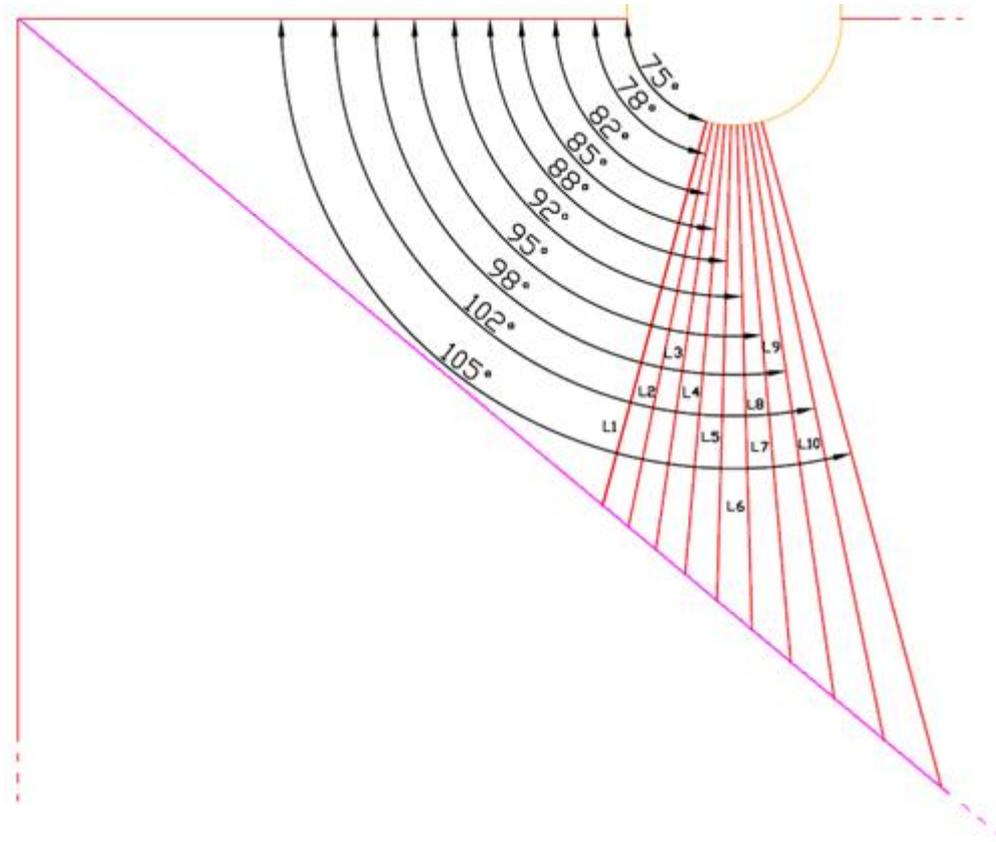


Figura 4.5: Ángulo de iluminación de las Líneas del LED.

4.2.1.2. Calculo de los diseños experimentales

De la Figura 4.4, se obtendrán las dimensiones de diseños experimentales, sabiendo que ϑ puede obtener los valores de 40, 45, 50 y 60 grados y la distancia OA (Posición del LED 1) retoma los valores de 5 y 10 milímetros.

Del triangulo O, D y C y por ley de senos tenemos

$$OD = \frac{OC \sin \gamma}{\sin \beta} \tag{4.3}$$

Observando el triangulo O, A y C

$$OC = \frac{OA \sin(\beta + e)}{\sin \delta} \tag{4.4}$$

Sustituyendo Ecuación 4.4 en la Ecuación 4.3

$$OD = \frac{OA \sin(\beta + e) \sin \gamma}{\sin \beta \sin \delta} \quad (4.5)$$

$$OF = \frac{OE \sin \gamma}{\sin \beta} \quad (4.6)$$

Podemos deducir la siguiente ecuación de los puntos O, D y E

$$OE = \frac{OD \sin(\beta + e)}{\sin \delta} \quad (4.7)$$

Sustituyendo Ecuación 4.5 en la Ecuación 4.7

$$OE = \frac{OA (\sin(\beta + e))^2 \sin \gamma}{\sin \beta (\sin \delta)^2} \quad (4.8)$$

Sustituyendo Ecuación 4.7 en la Ecuación 4.6

$$OF = \frac{OA (\sin(\beta + e))^2 (\sin \gamma)^2}{(\sin \beta)^2 (\sin \delta)^2} \quad (4.9)$$

Del triangulo comprendido por los puntos O, H y G

$$OH = \frac{OG \sin \gamma}{\sin \beta} \quad (4.10)$$

Y del triangulo formado por los puntos O, F y G

$$OG = \frac{OF \sin(\beta + e)}{\sin \delta} \quad (4.11)$$

$$OH = \frac{OF \sin(\beta + e) \sin \gamma}{\sin \delta \sin \beta} \quad (4.12)$$

Sustituyendo Ecuación 4.9 en la Ecuación 4.12

$$OH = \frac{OA (\sin(\beta + e))^3 (\sin \gamma)^3}{(\sin \beta)^3 (\sin \delta)^3} \quad (4.13)$$

Por ley de senos y por el triangulo formado por los puntos O, H e I

$$OI = \frac{OH \sin(\beta + e)}{\sin \delta} \quad (4.14)$$

Sustituyendo Ecuación 4.13 en la Ecuación 4.14

$$OI = \frac{OA(\sin(\beta + e))^4(\sin\gamma)^3}{(\sin\beta)^3(\sin\delta)} \quad (4.15)$$

Por funciones trigonométricas y del triangulo comprendido por los puntos O, P e I

$$PI = OI\sin\alpha \quad (4.16)$$

Sustituyendo Ecuación 4.15 en la Ecuación 4.16

$$PI = \frac{OA(\sin(\beta + e))^4(\sin\gamma)^3\sin\alpha}{(\sin\beta)^3(\sin\delta)^4} \quad (4.17)$$

$$OP = OI\cos\alpha \quad (4.18)$$

Sustituyendo Ecuación 4.15 en la Ecuación 4.18

$$OP = \frac{OA(\sin(\beta + e))^4(\sin\gamma)^3\cos\alpha}{(\sin\beta)^3(\sin\delta)^4} \quad (4.19)$$

En el Cuadro 4.2 se obtendrán los ángulos de los diseños experimentales, para facilitar los cálculos.

Cuadro 4.2: Datos de los diseños experimentales

	Distancia OA	Angulo β	Angulo e	Angulo α	Angulo δ	Angulo γ
Diseño 40 grados a 10mm	10mm	75	30	40		
Diseño 45 grados a 5mm	5mm	75	30	45		
Diseño 45 grados a 10mm	10mm	75	30	45		
Diseño 50 grados a 5mm	5mm	75	30	50		
Diseño 50 grados a 10mm	10mm	75	30	50		
Diseño 60 grados a 5mm	5mm	75	30	60		
Diseño 60 grados a 10mm	10mm	75	30	60		

Sabiendo

$$\gamma = 180 - (\beta + \alpha) \quad (4.20)$$

y

$$\delta = 180 - (\beta + e + \alpha) \quad (4.21)$$

Por lo tanto se obtiene.

Cuadro 4.3: Datos de los diseños experimentales

	Distancia OA	Angulo β	Angulo e	Angulo α	Angulo δ	Angulo γ
Diseño 40 grados a 10mm	10mm	75	30	40	35	65
Diseño 45 grados a 5mm	5mm	75	30	45	30	60
Diseño 45 grados a 10mm	10mm	75	30	45	30	60
Diseño 50 grados a 5mm	5mm	75	30	50	25	55
Diseño 50 grados a 10mm	10mm	75	30	50	25	55
Diseño 60 grados a 5mm	5mm	75	30	60	15	45
Diseño 60 grados a 10mm	10mm	75	30	60	15	45

De las Ecuación 4.5, Ecuación 4.9, Ecuación 4 y del Cuadro 4.3, obtendremos la posición de cada LED de los diseños experimentales, además se adquirirá las dimensiones de dichos diseños experimentales en el Cuadro 4.4.

Cuadro 4.4: Posición de los LED en los diseños experimentales.

	$\beta+e$	LED 1	LED 2 (Ecuación 4.5)	LED 3 (Ecuación 4.9)	LED 4 (Ecuación 4.19)	OP (Ecuación 4.17)	PI (Ecuación 4.17)
Diseño 40 grados a 10mm	105	10mm	15.18 mm	25 mm	39.5 mm	50.9 mm	42.7 mm
Diseño 45 grados a 5mm	105	5mm	8.7 mm	15 mm	26 mm	35.5 mm	35.5 mm
Diseño 45 grados a 10mm	105	10mm	17.3 mm	30 mm	52 mm	71 mm	71 mm
Diseño 50 grados a 5mm	105	5mm	9.7 mm	18.8 mm	36.4 mm	53.5 mm	63.7 mm
Diseño 50 grados a 10mm	105	10mm	19.3 mm	37.6 mm	72.8 mm	107 mm	127.5 mm
Diseño 60 grados a 5mm	105	5mm	13.7 mm	37.3 mm	102 mm	190.3 mm	329.5 mm
Diseño 60 grados a 10mm	105	10mm	27.3 mm	74.6 mm	204 mm	380.5 mm	659.1 mm

Para obtener el espesor de los diseños experimentales se tomo como referencia la posición del cuarto LED y la altura h formada por la intersección de la superficie refractora y el ángulo de apertura del LED como se muestra en la Figura 4.6.

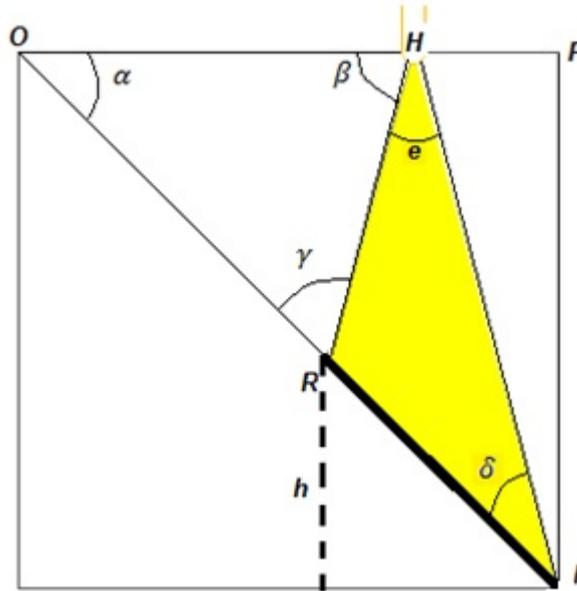


Figura 4.6: Distancia formada por la intersección de la superficie refractora y el ángulo de apertura del cuarto LED.

De la Figura 4.6 podemos deducir las siguientes Ecuaciones:

$$RI = OI - OR \tag{4.22}$$

$$OR = \frac{OH \sin \beta}{\sin \gamma} \tag{4.23}$$

$$OI = \frac{OH \sin(\beta + e)}{\sin \delta} \tag{4.24}$$

Sustituyendo la 4.24 y 4.23 en la Ecuación 4.22

$$RI = \frac{OH \sin(\beta + e)}{\sin \delta} - \frac{OH \sin \beta}{\sin \gamma} \tag{4.25}$$

Y por funciones trigonométricas obtenemos h .

$$h = OH \sin(\alpha) \left(\frac{\sin(\beta + e)}{\sin \beta} - \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \right) \tag{4.26}$$

En el Cuadro 4.5 se calcula el espesor de los diseños experimentales utilizando la formula de la Ecuación 4.23 y tomando los datos correspondientes del LED 4.

Cuadro 4.5: Espesor de los diseños experimentales.

	Angulo β	Angulo e	Angulo δ	Angulo γ	OH (mm)	Espesor de los diseños experimentales (mm)
Diseño 40 grados a 10mm	75	30	35	65	39.5	15.7
Diseño 45 grados a 5mm	75	30	30	60	26	15.01
Diseño 45 grados a 10mm	75	30	30	60	52	30.02
Diseño 50 grados a 5mm	75	30	25	55	36.4	30.85
Diseño 50 grados a 10mm	75	30	25	55	72.8	61.7
Diseño 60 grados a 5mm	75	30	15	45	102	209
Diseño 60 grados a 10mm	75	30	15	45	204	418

Nota: Para los diseños de 60 grados el espesor es muy grande así que se decidió que el espesor fuera el mismo del diseño experimental de 50 grados a un centímetro.

4.2.1.3. Dimensiones de iluminación de los diseños experimentales.

A continuación se muestran los arreglos experimentales con un ángulo de inclinación de superficie de: 400, 450, 500 y 600; y con el LED inicial a una distancia de la superficie refractora de medio centímetro y un centímetro.

- Diseño experimental con $\theta=60$ y $OA=5$ mm.

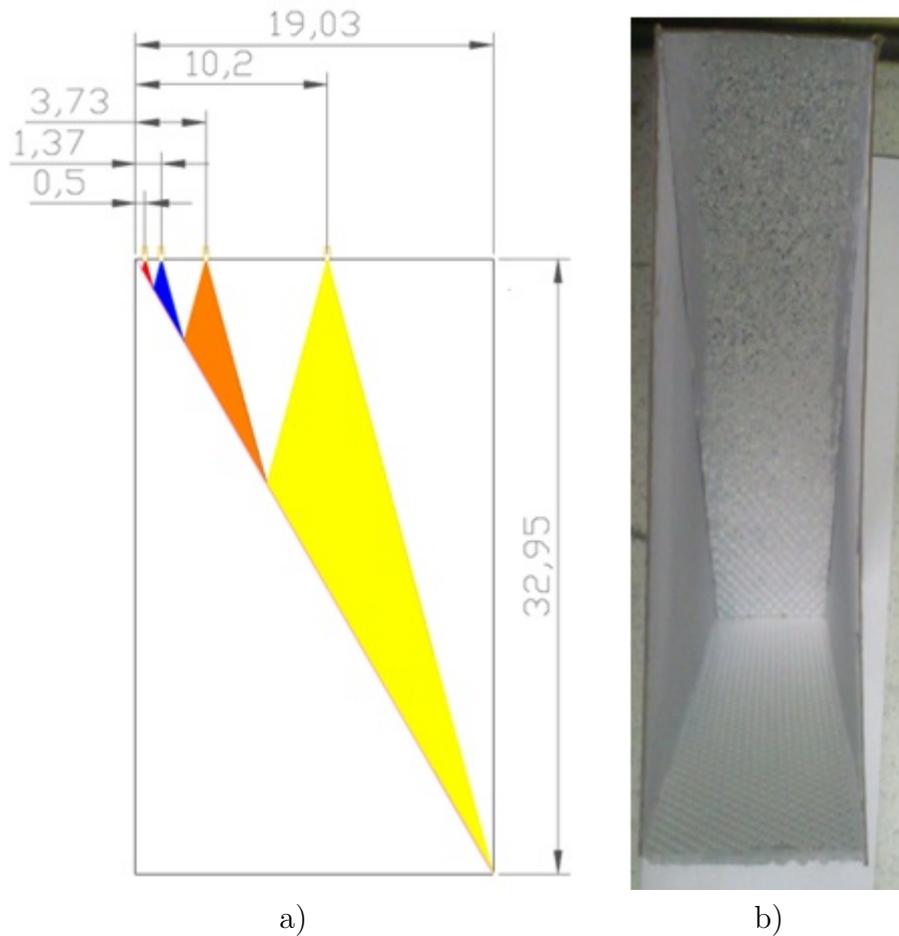


Figura 4.7: a) Dimensiones del arreglo experimental de 60 grados a medio centímetro, b) Vista superior del arreglo de 60 grados.

La Figura 4.7 se muestran las dimensiones del diseño experimental con una inclinación de la superficie de refracción de $\vartheta = 60$ grados y posicionando el primer LED a medio centímetro de la superficie de refracción. Las dimensiones físicas obtenidas por el ángulo de iluminación de los LED a base de las especificaciones dadas anteriormente fueron:

$$Largo = 19.03cm$$

$$Ancho = 6.37cm$$

$$Altura = 32.95cm$$

$$Área = 209.89cm^2$$

- Diseño experimental con $\theta=60$ y $OA=10$ mm.

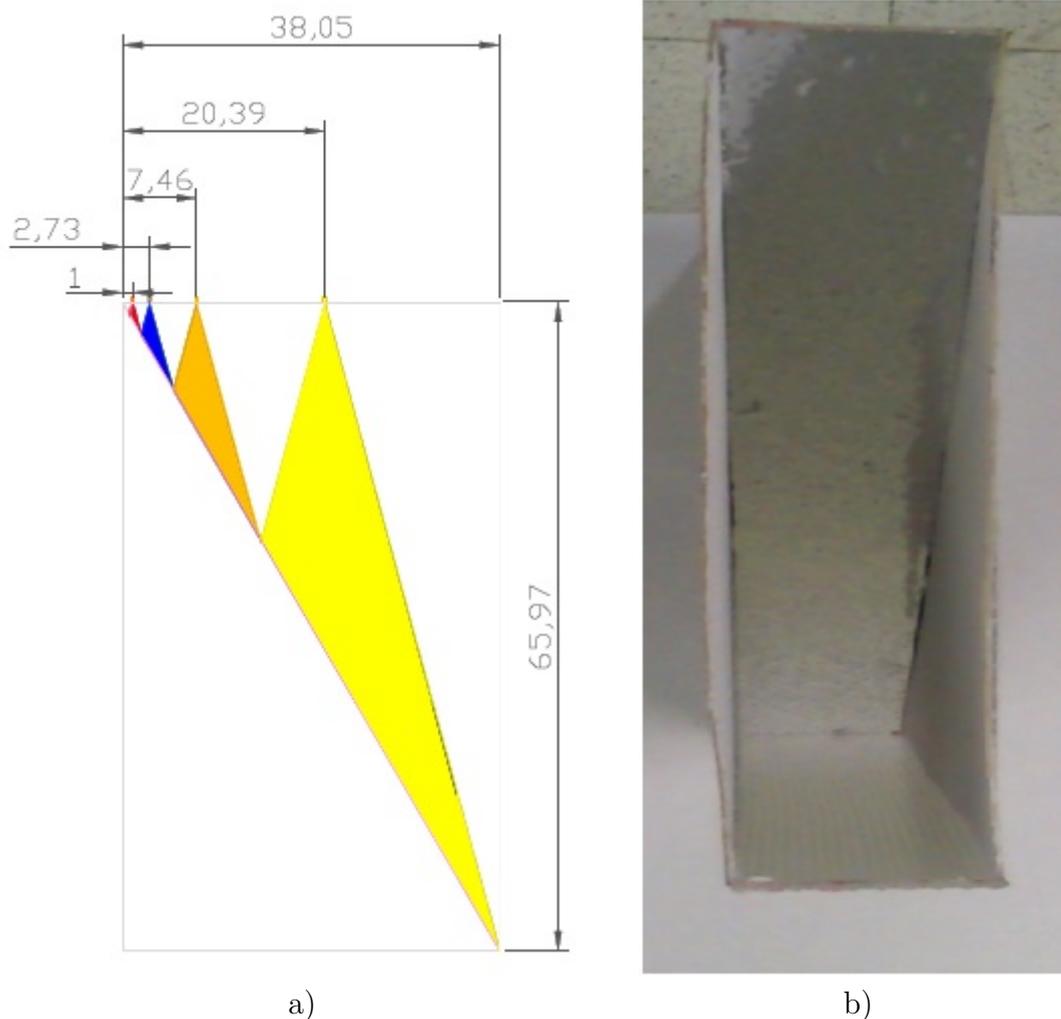


Figura 4.8: a) Dimensiones del arreglo experimental a 60 grados a un centímetro, b) Vista superior del arreglo de 600.

La Figura 4.8 muestra las dimensiones del diseño experimental a un centímetro con respecto a la superficie refractora que esta a una inclinación $\vartheta = 60$ grados. Las dimensiones físicas obtenidas fueron:

$$\begin{aligned} \text{Largo} &= 38.05\text{cm} \\ \text{Ancho} &= 6.37\text{cm} \\ \text{Altura} &= 65.91\text{cm} \\ \text{Área} &= 415.01\text{cm}^2 \end{aligned}$$

- Diseño experimental con $\theta=50$ y $OA=5$ mm.

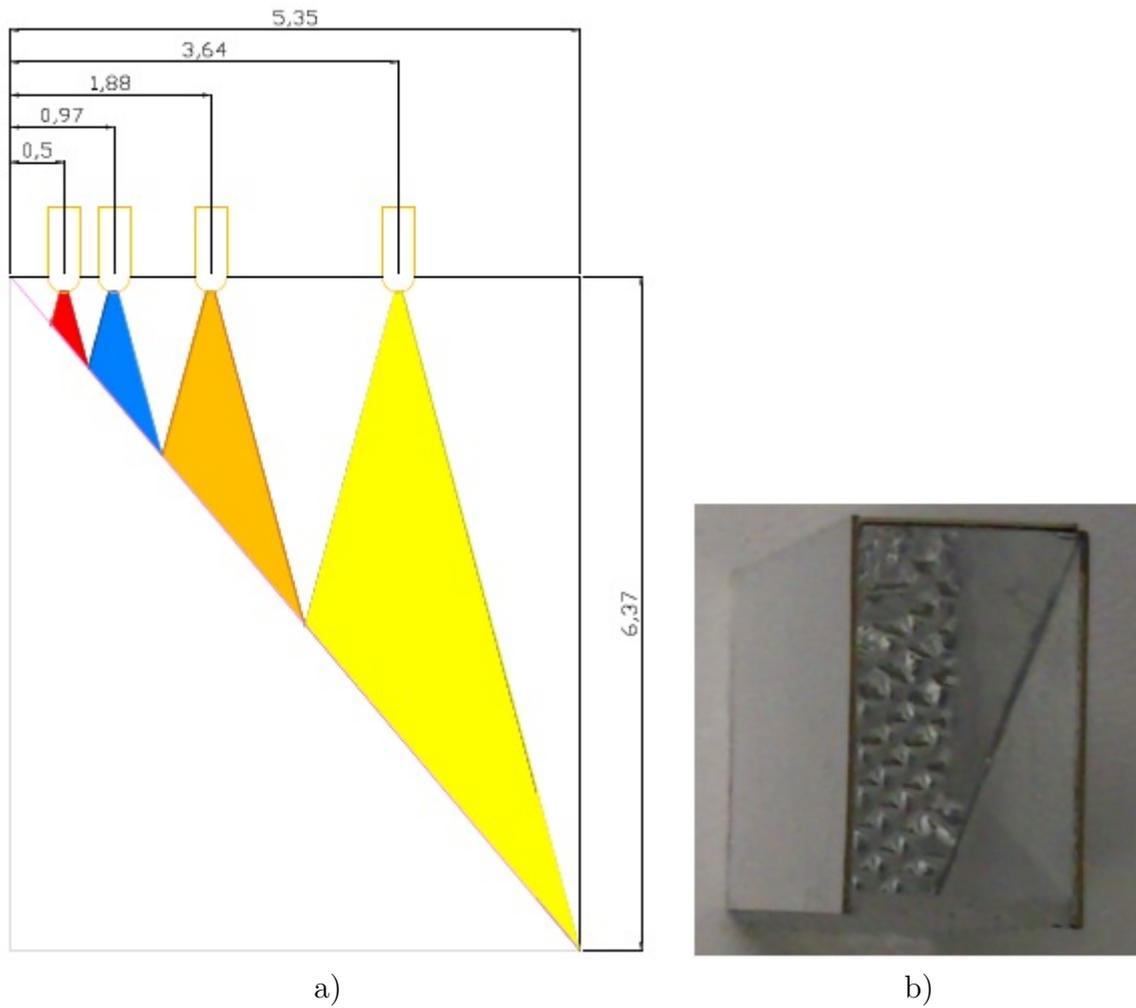


Figura 4.9: a) Dimensiones del arreglo experimental a 50 grados a 0.5 centímetros, b) Vista superior del arreglo de 50 grados.

La Figura 4.9 muestra las dimensiones del diseño experimental a medio centímetro con respecto a la superficie refractora que esta a una inclinación $\vartheta = 50$ grados. Las dimensiones físicas obtenidas fueron:

$$\begin{aligned}
 \text{Largo} &= 5.34\text{cm} \\
 \text{Ancho} &= 3.09\text{cm} \\
 \text{Altura} &= 6.37\text{cm} \\
 \text{Área} &= 19.72\text{cm}^2
 \end{aligned}$$

- Diseño experimental con $\theta=50$ y $OA=10$ mm.

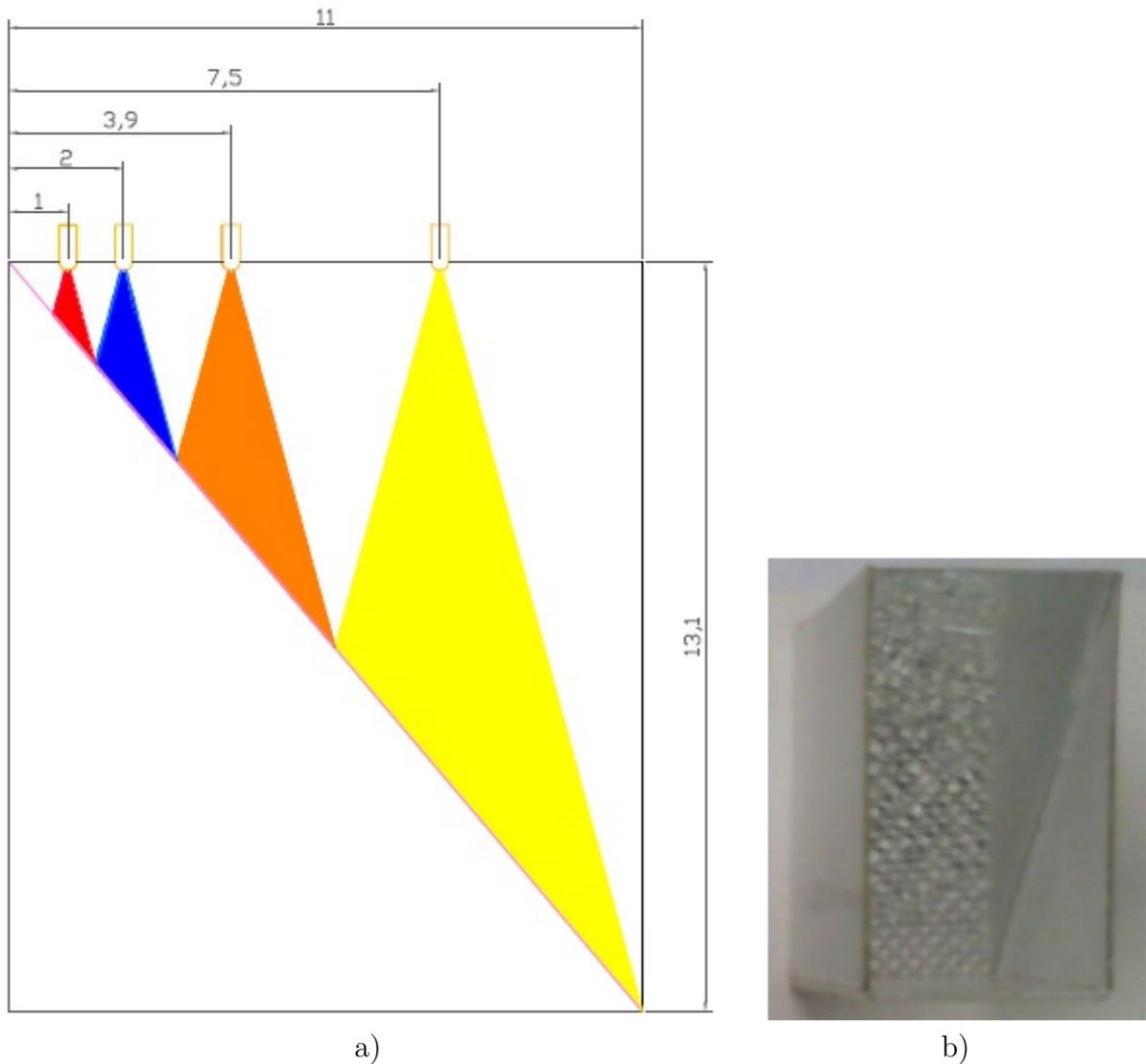


Figura 4.10: a) Dimensiones del arreglo experimental de 50 grados a unos centímetros, b) Vista superior del arreglo de 50 grados.

La Figura 4.10 muestra las dimensiones del diseño experimental a un centímetro con respecto a la superficie refractora que esta a una inclinación $\theta = 50$ grados. Las dimensiones físicas obtenidas fueron:

$$\begin{aligned} \text{Largo} &= 11\text{cm} \\ \text{Ancho} &= 6.37\text{cm} \\ \text{Altura} &= 13.11\text{cm} \\ \text{Área} &= 83.51\text{cm}^2 \end{aligned}$$

- Diseño experimental con $\theta=45$ y $OA=5$ mm.

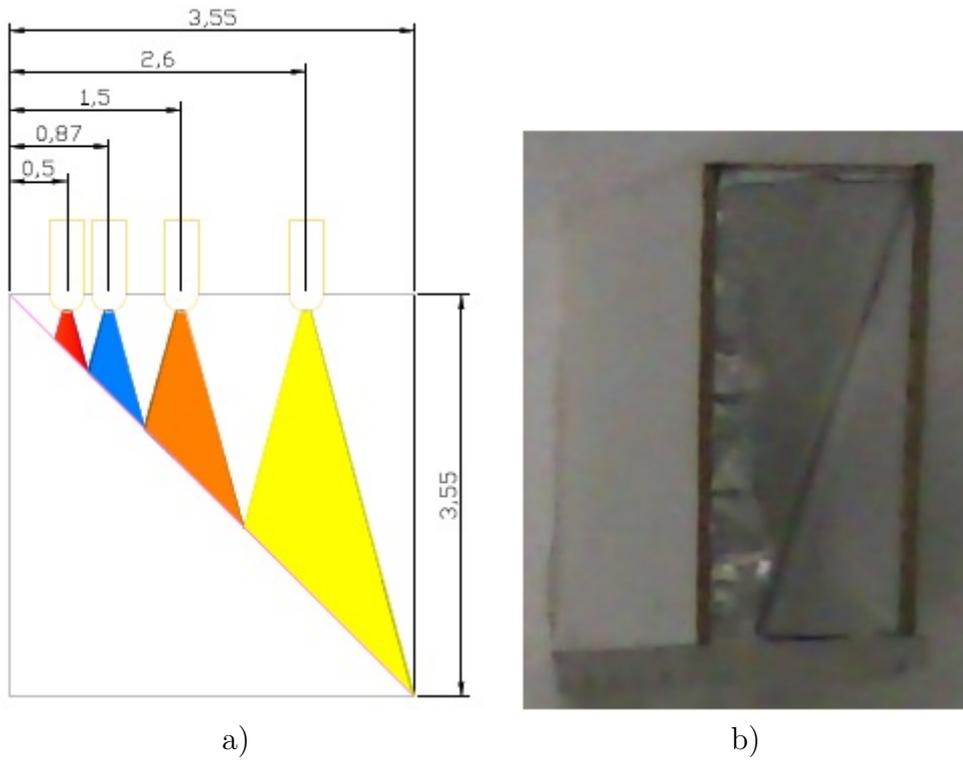


Figura 4.11: a) Dimensiones del arreglo experimental de 45 grados a 0.5 centímetros, b) Vista superior del arreglo de 45 grados.

La Figura 4.11 muestra las dimensiones del diseño experimental a un centímetro con respecto a la superficie refractora que esta a una inclinación $\vartheta = 45$ grados. Las dimensiones físicas obtenidas fueron:

$$\begin{aligned} \text{Largo} &= 3.55\text{cm} \\ \text{Ancho} &= 1.5\text{cm} \\ \text{Altura} &= 3.55\text{cm} \\ \text{Área} &= 5.5\text{cm}^2 \end{aligned}$$

- Diseño experimental con $\theta=45$ y $OA=10$ mm.

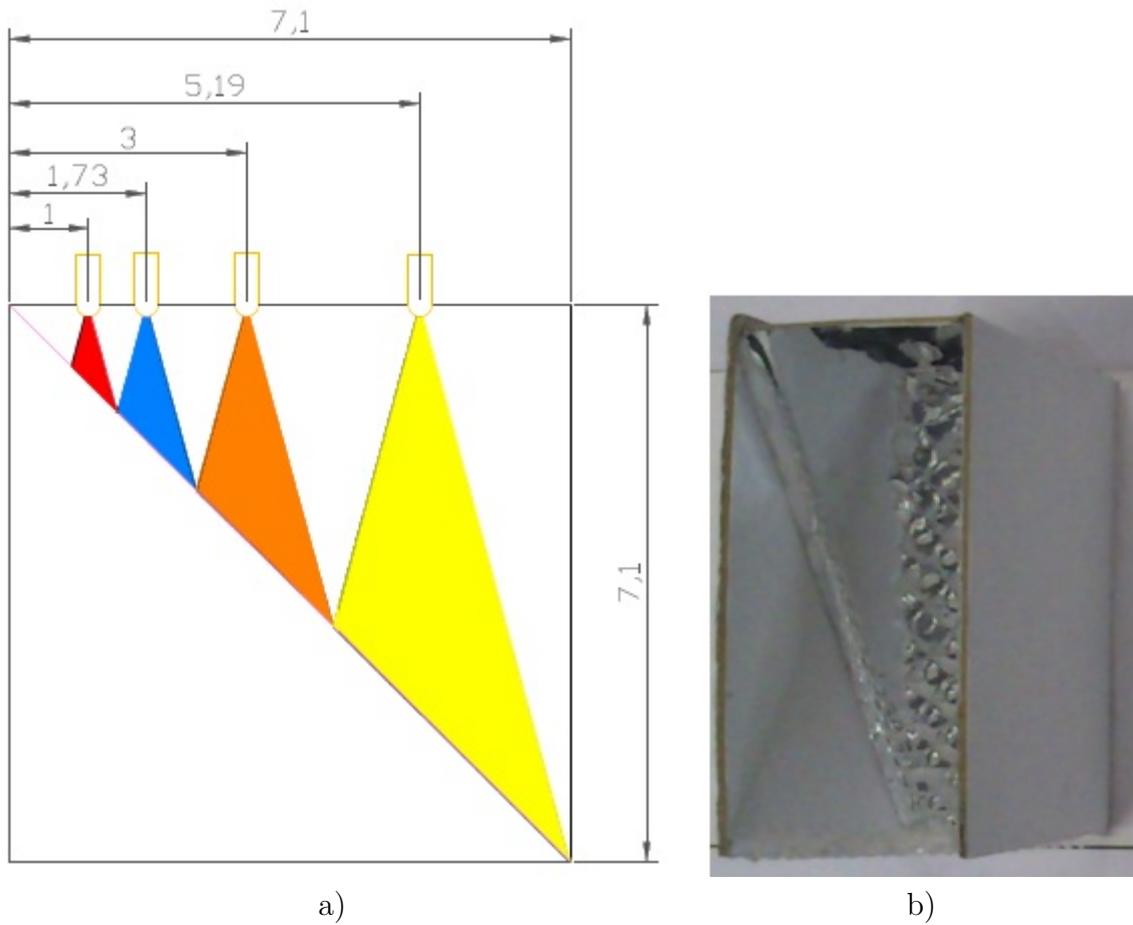


Figura 4.12: a) Dimensiones del arreglo experimental de 45 grados a 1 centímetro, b) Vista superior del arreglo de 45 grados.

La Figura 4.12 muestra las dimensiones del diseño experimental a un centímetro con respecto a la superficie refractora que esta a una inclinación $\vartheta = 45$ grados. Las dimensiones físicas obtenidas fueron:

$$\begin{aligned} \text{Largo} &= 7.1\text{cm} \\ \text{Ancho} &= 3\text{cm} \\ \text{Altura} &= 7.1\text{cm} \\ \text{Área} &= 21.3\text{cm}^2 \end{aligned}$$

- Diseño experimental con $\theta=40$ y $OA=10$ mm.

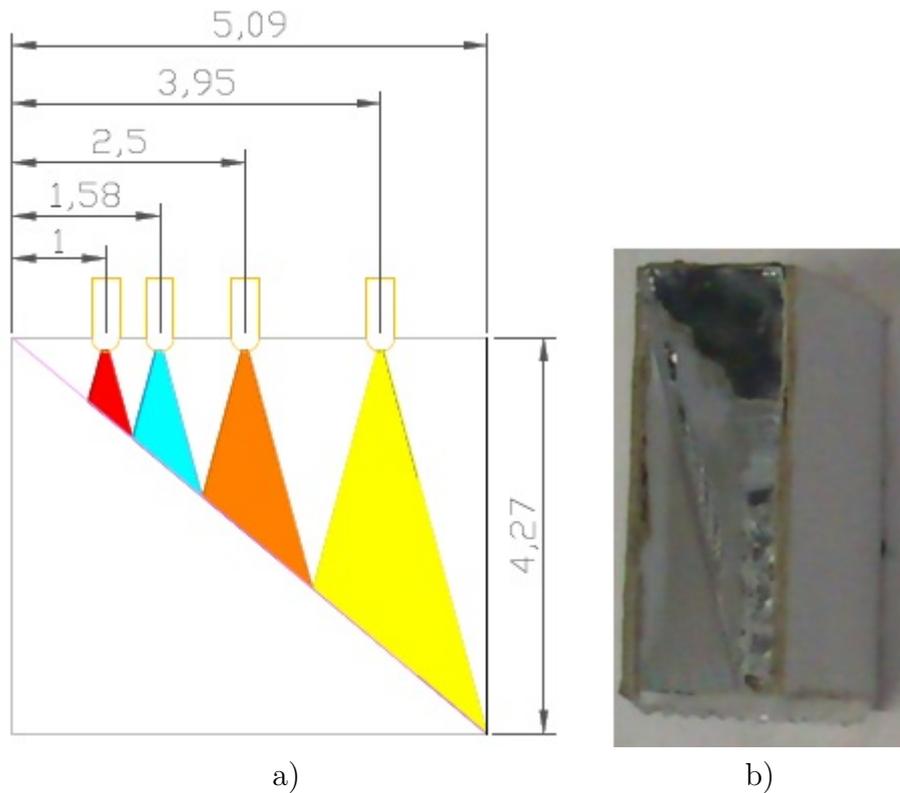


Figura 4.13: a) Dimensiones del arreglo experimental de 40 grados a 1 centímetro, b) Vista superior del arreglo de 40 grados.

La Figura 4.13 muestra las dimensiones del diseño experimental a un centímetro con respecto a la superficie refractora que esta a una inclinación $\vartheta = 40$ grados. Las dimensiones físicas obtenidas fueron:

$$\begin{aligned} \text{Largo} &= 5.09\text{cm} \\ \text{Ancho} &= 1.57\text{cm} \\ \text{Altura} &= 4.27\text{cm} \\ \text{Área} &= 6.7\text{cm}^2 \end{aligned}$$

4.3. Camino Óptico de los diseños experimentales.

Si el camino Óptico máximo se comporta de manera en el cual el rayo se refracta en la pantalla, como se muestra en la Figura 4.14 donde se ve claramente la refracción del LED 1. Entonces se deducen las siguientes formulas:

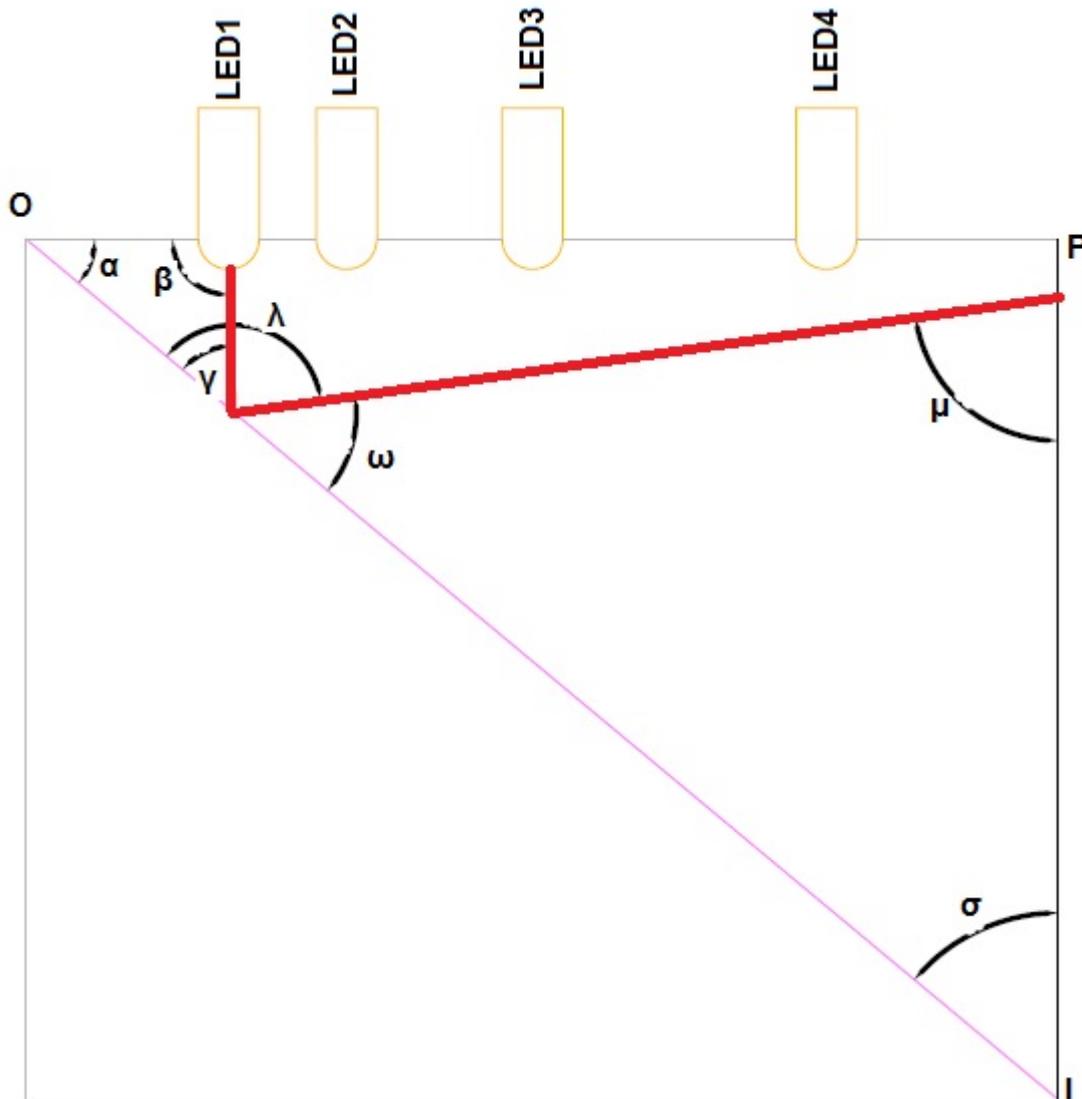


Figura 4.14: Comportamiento del camino óptico máximo.

$$C.O.LED1_{max} = AB + BJ \quad (4.27)$$

Del triangulo comprendido por los puntos O, A y B

$$AB = \frac{OAsin\alpha}{sin\gamma} \quad (4.28)$$

$$BJ = \frac{BI \sin \sigma}{\sin \mu} \quad (4.29)$$

$$BI = OI - OB \quad (4.30)$$

$$OB = \frac{OA \sin \beta'}{\sin \gamma} \quad (4.31)$$

Sustituyendo Ecuación 4.30 en la Ecuación 4.31

$$BI = OI - \frac{OA \sin \beta'}{\sin \gamma} \quad (4.32)$$

Sustituyendo Ecuación 4.32 en la Ecuación 4.29

$$BJ = \frac{\left(OI - \frac{OA \sin \beta'}{\sin \gamma}\right) \sin \sigma}{\sin \mu} \quad (4.33)$$

$$OI = \sqrt{(OP)^2 + (PI)^2} \quad (4.34)$$

Sustituyendo Ecuación 4.34 en la Ecuación 4.33

$$BJ = \frac{\left(\sqrt{(OP)^2 + (PI)^2} - \frac{OA \sin \beta'}{\sin \gamma}\right) \sin \sigma}{\sin \mu} \quad (4.35)$$

Sustituyendo las Ecuación 4.35 y Ecuación 4.28 en la Ecuación 4.27

$$C.O.LED1_{max} = \frac{OA \sin \alpha}{\sin \gamma} + \frac{\left(\sqrt{(OP)^2 + (PI)^2} - \frac{OA \sin \beta'}{\sin \gamma}\right) \sin \sigma}{\sin \mu} \quad (4.36)$$

Si:

$$\gamma = 180 - (\alpha + \beta) \quad (4.37)$$

$$\omega = \gamma$$

$$\sigma = 90 - \alpha \quad (4.38)$$

$$\mu = 180 - (\sigma + \omega) \quad (4.39)$$

Sustituyendo Ecuación 4.38 en Ecuación 4.39

$$\mu = 2\alpha + \beta' - 90 \quad (4.40)$$

Y sustituyendo la Ecuación 4.37, la Ecuación 4.39 y la Ecuación 4.40 en la Ecuación 4.36 tenemos:

$$C.O.LED1_{max} = \frac{OAsin\alpha}{sin(180 - (\alpha + \beta'))} + \frac{sin(90 - \alpha)}{sin(2\alpha + \beta' - 90)} \left(\sqrt{(OP)^2 + (PI)^2} - \frac{OAsin\beta'}{sin(180 - \alpha + \beta')} \right) \quad (4.41)$$

Si el camino Óptico mínimo se comporta de manera en el cual el rayo se refracta en la pantalla, como se muestra en la Figura 4.15 donde se ve claramente la refracción del LED 1. Entonces se deducen las siguientes formulas:

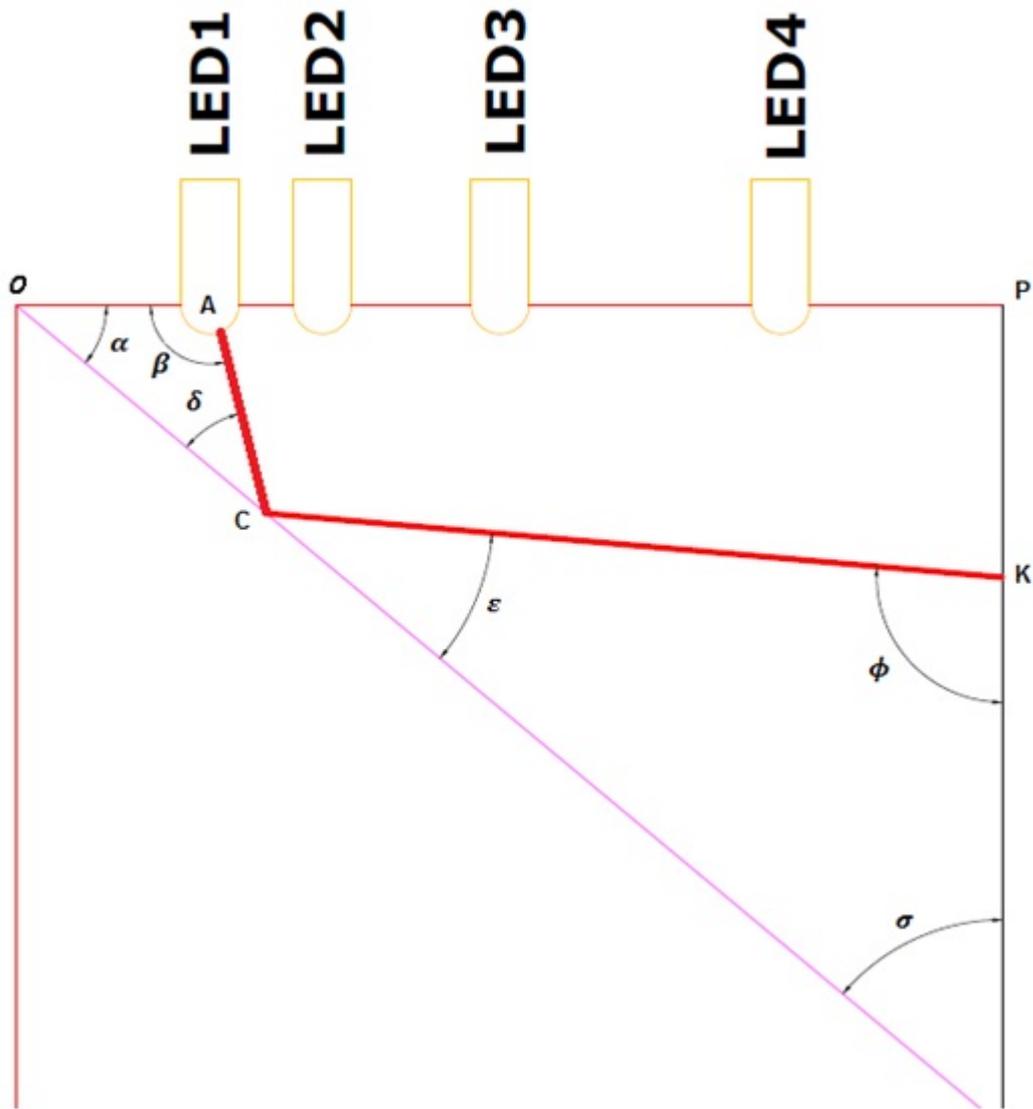


Figura 4.15: Comportamiento del camino óptico máximo.

$$C.O.LED1_{max} = AC + CK \tag{4.42}$$

AB se obtuvo en la Ecuación 4.28 por lo que se obtendrá BQ, del triángulo B, Q e I.

$$AC = \frac{OA \sin \alpha}{\sin \delta} \tag{4.43}$$

$$CK = \frac{CI \sin \sigma}{\sin \phi} \tag{4.44}$$

$$CI = OI - OC \tag{4.45}$$

$$OC = \frac{OAsin\beta'}{sin\delta} \quad (4.46)$$

Sustituyendo la Ecuación 4.34 y la Ecuación 4.46 en la Ecuación 4.45

$$CI = \sqrt{(OP)^2 + (PI)^2} - \frac{OAsin\beta'}{sin\delta} \quad (4.47)$$

Sustituyendo Ecuación 4.47 en la Ecuación 4.44

$$CK = \frac{\left(\sqrt{(OP)^2 + (PI)^2} - \frac{OAsin\beta'}{sin\delta}\right) sin\sigma}{sin\phi} \quad (4.48)$$

Sustituyendo la Ecuación 4.43 y la Ecuación 4.48 en la Ecuación 4.42

$$C.O.LED1_{max} = \frac{OAsin\alpha}{sin\delta} + \frac{\left(\sqrt{(OP)^2 + (PI)^2} - \frac{OAsin\beta'}{sin\delta}\right) sin\sigma}{sin\phi} \quad (4.49)$$

Si

$$\delta = 180 - (\alpha + \beta') \quad (4.50)$$

$$\phi = 180 - (\varepsilon + \sigma) \quad (4.51)$$

$$\varepsilon = \delta \quad (4.52)$$

sustituyendo la Ecuación 4.50 y la Ecuación 4.38 en la Ecuación 4.51

$$\phi = 2\alpha + \beta - 90 \quad (4.53)$$

Sustituyendo Ecuación 4.38, Ecuación 4.50 y Ecuación 4.53 en Ecuación 4.49

$$C.O.LED1_{max} = \frac{OAsin\alpha}{sin(180 - (\alpha + \beta'))} + \frac{sin(90 - \alpha)}{sin(2\alpha + \beta - 90)} \left(\sqrt{(OP)^2 + (PI)^2} - \frac{OAsin\beta'}{sin(180 - (\alpha + \beta'))} \right) \quad (4.54)$$

Lo que se deduce que la fórmula para calcular el camino óptico mínimo es la misma para calcular el camino óptico máximo y la formula dependerá de β' y α .

Para el LED 2 y el LED 3 el comportamiento de refracción es el mismo que la del LED 1,

por lo tanto las ecuaciones van a ser las mismas. A diferencia del LED 4 que su comportamiento de refracción máxima y mínima son diferentes a las ya analizadas. En la Figura 4.16 se muestra el comportamiento del LED 4 cuando su refracción es la máxima.

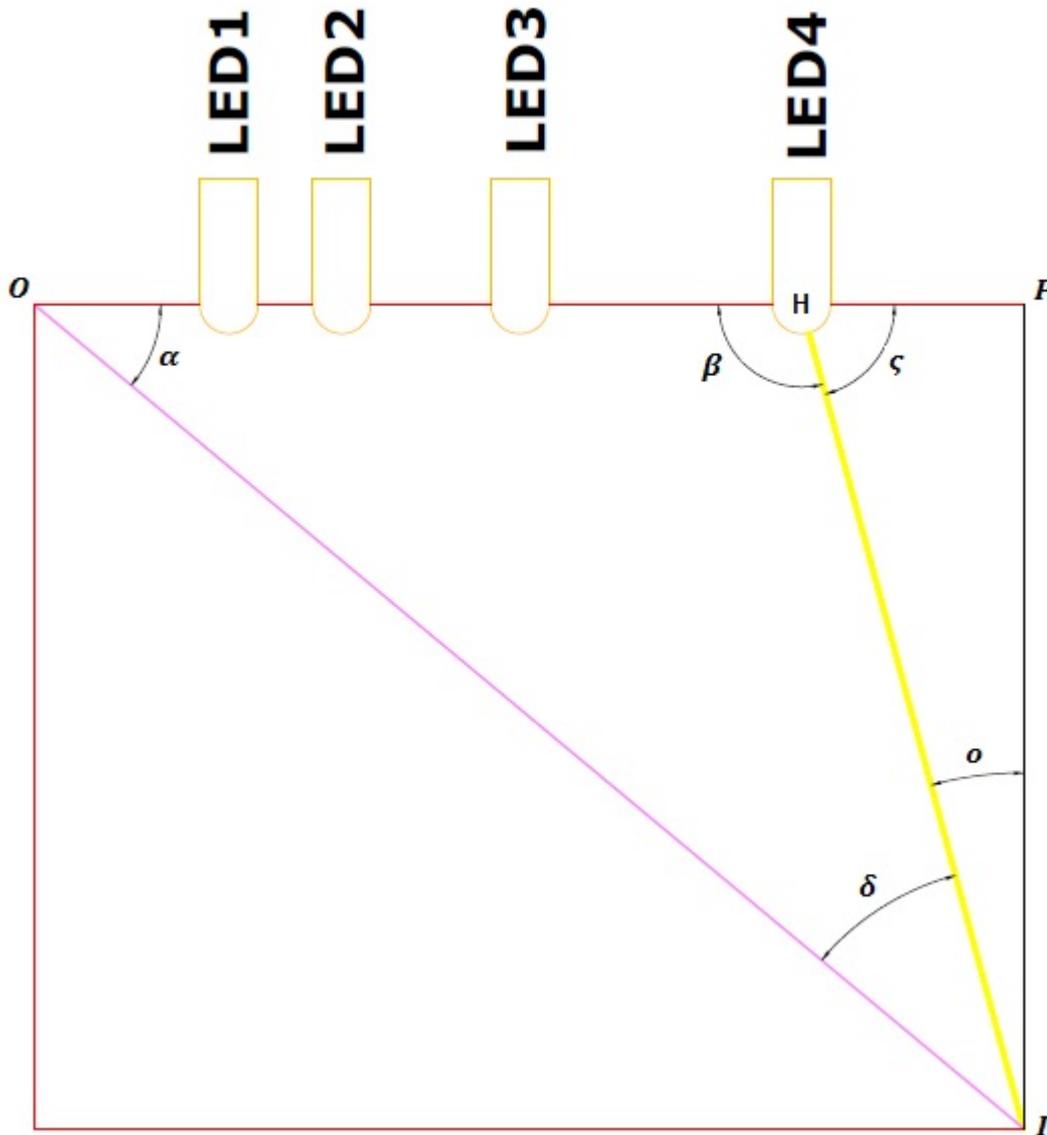


Figura 4.16: Comportamiento del camino óptico mínimo.

A continuación se deducirán las ecuaciones para el cálculo del camino óptico del LED 4.

La expresión matemática del camino óptico máximo del LED 4 es la que se dedujo para el LED 1. Por otro lado el camino óptico mínimo estará dado por la siguiente ecuación:

$$C.O.LED4_{min} = \frac{OH \sin \alpha}{\sin \delta} \tag{4.55}$$

4.3.1. Camino Óptico del diseño de 40 grados.

En la Figura 4.17 se muestran los máximos y mínimos recorridos ópticos de cada LED, y el número de rayo en el cual se presenta la máxima y mínima refracción en la pantalla, a

continuación se obtendrá el camino óptico para cada LED.

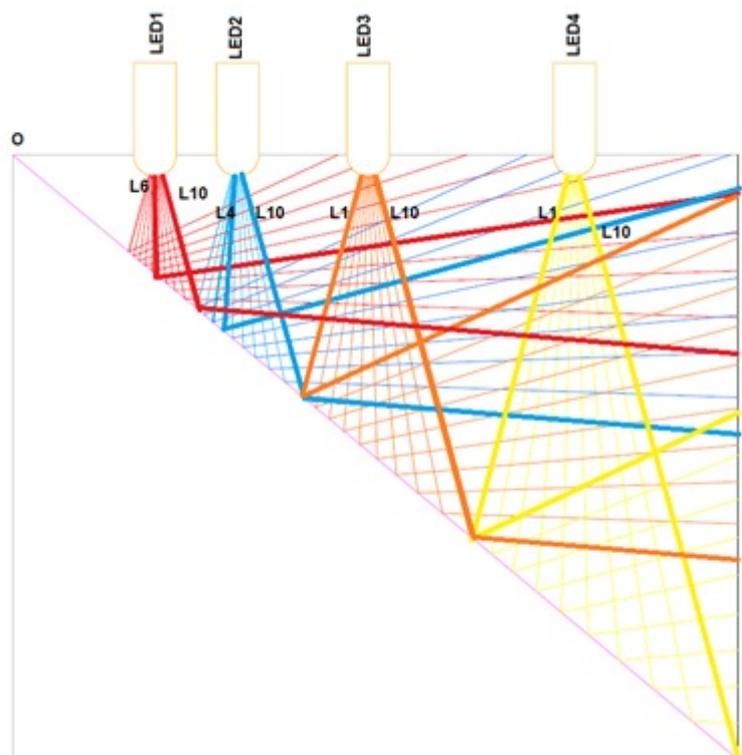


Figura 4.17: Camino óptico del diseño experimental con pendiente de iluminación de 40 grados.

Para facilitar los cálculos del camino óptico se programo la formula de la Ecuación 4.3.14 y la Ecuación 4.3.29 en matlab. En el Cuadro 4.6 se muestran los datos necesarios para obtener el camino óptico del diseño experimental de 40 grados.

Cuadro 4.6: Datos generales del diseño de 40 grados.

Datos Generales				Distancia del vértice al LED inicial= 10 mm	
Posición del LED	α	OP	PI	Numero de los rayos (mm)	Distancia del vértice al LED (mm)
LED1	40	50.9 mm	42.7 mm	6, 10	10 mm
LED2				4,10	15.8 mm
LED3				1,10	25 mm
LED4				1,10	39.5 mm

En el Cuadro 4.7 muestra el camino óptico para cada uno de los LED's del diseño experimental cuando la inclinación de la pendiente refractora esta a 40 grados de inclinación y la distancia del vértice al primer LED es de un centímetro.

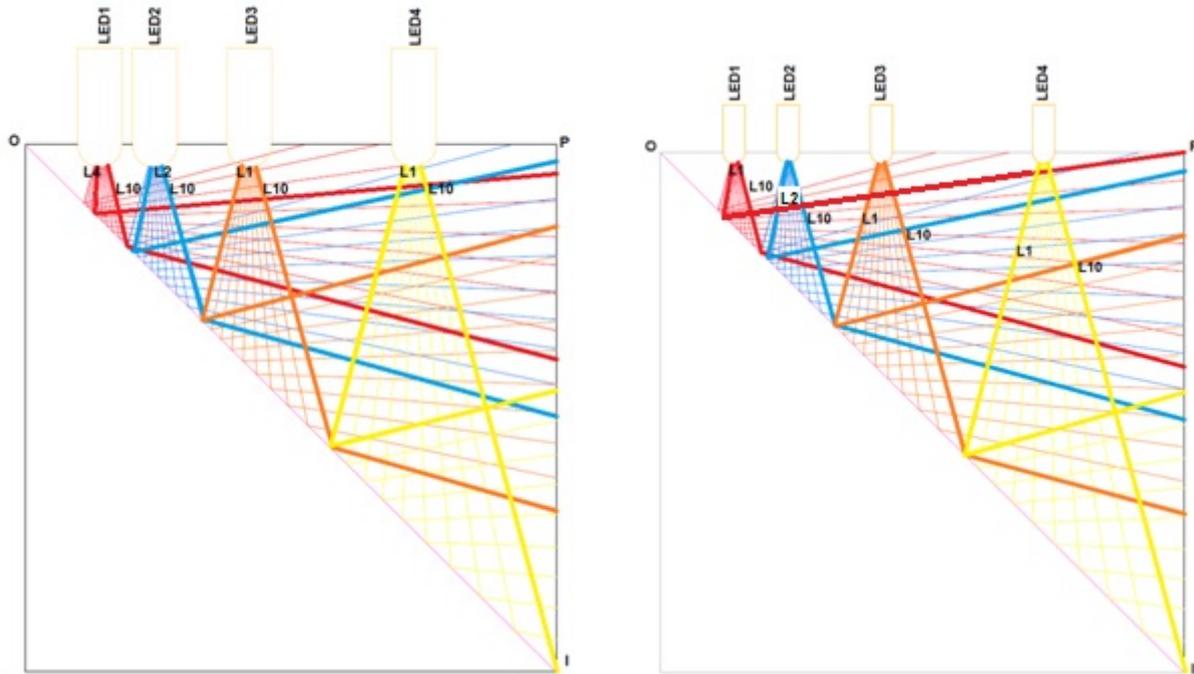
Cuadro 4.7: Camino Óptico del diseño experimental

Posición del LED	Camino óptico Máx.	Camino óptico Min.
LED1	48.68 mm	49.35 mm
LED2	49.85 mm	48.33 mm
LED3	51.37 mm	46.73 mm
LED4	48.59 mm	44.27 mm

4.3.2. Camino Óptico del diseño de 45 grados.

Para el diseño experimental que se realizo con un ángulo de inclinación de la pendiente refractora de 45 grados se tomo como referencia el primer LED con una posición de 5 a 10 milímetros de distancia con respecto al vértice.

En la Figura 4.18 se muestran los máximos y mínimos recorridos ópticos de cada LED de los diseños experimentales de 45 grados, y el número de rayo en el cual se presenta la máxima y mínima refracción en la pantalla, a continuación se obtendrá el camino óptico para cada LED.



a) LED inicial a medio centímetro del vértice. b) LED inicial a un centímetro del vértice.

Figura 4.18: Camino óptico del diseño experimental con pendiente de iluminación de 45 grados.

En el Cuadro 4.8 se muestran los datos ya obtenidos en temas anteriores, esta tabla nos facilita los cálculos del camino óptico para el diseño experimental que se realizó.

Cuadro 4.8: Camino Óptico del diseño de 45 grados

Datos Generales		Distancia del vértice al LED inicial = 5 mm				Distancia del vértice al LED inicial= 10 mm			
Posición del LED	α	OP (mm)	PI(mm)	Numero de los rayos	Distancia del vértice al LED (mm)	OP (mm)	PI(mm)	Numero de los rayos	Distancia del vértice al LED (mm)
1	45	35.5	35.5	4, 10	5	71	71	3, 10	10
2				2, 10	8.7			2, 10	17.3
3				1, 10	15			1, 10	30
4				1, 10	26			1, 10	52

En el Cuadro 4.9 muestra el camino óptico para cada uno de los LED's del diseño experimental cuando la inclinación de la pendiente refractora esta a 45 grados de inclinación y la distancia del vértice al primer LED es de un centímetro y de medio centímetro.

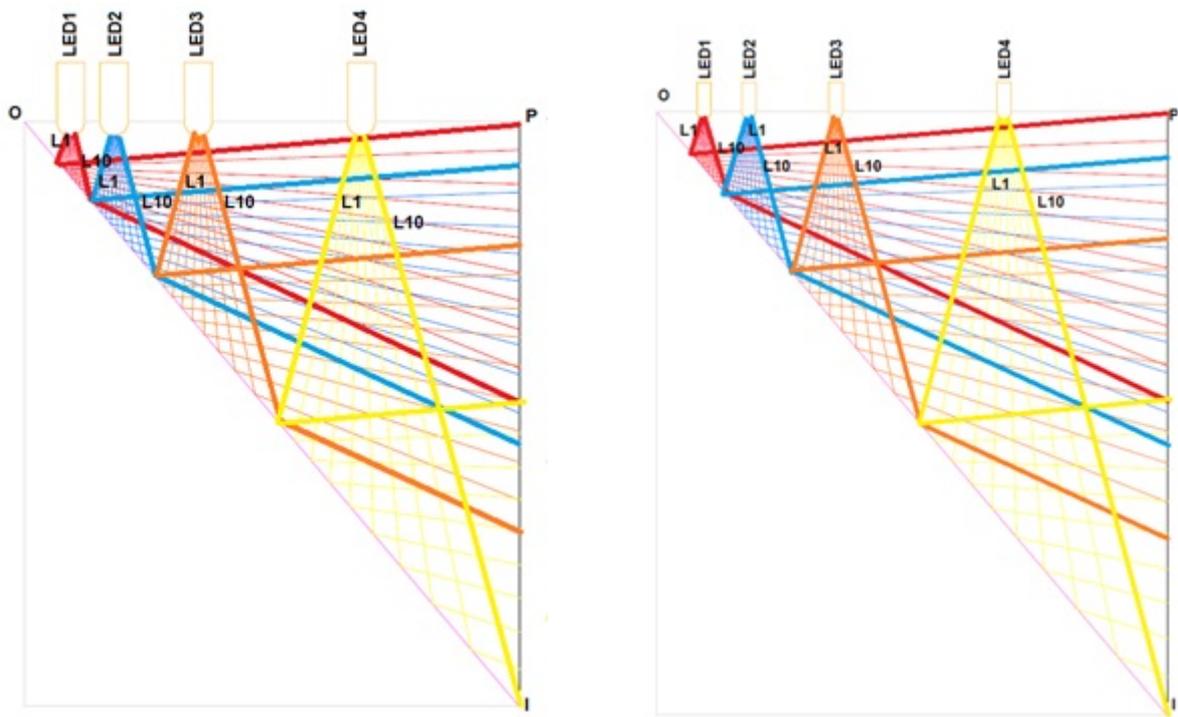
Cuadro 4.9: Camino Óptico del diseño experimental

Posición del LED	Distancia del vértice al LED inicial = 5 mm		Distancia del vértice al LED inicial= 10 mm	
	Camino óptico	Camino óptico	Camino óptico	Camino óptico
	Min. (mm)	Min. (mm)	Min. (mm)	Min. (mm)
LED1	35.64	36.75	71.75	73.5
LED2	36.25	36.75	72.5	73.5
LED3	36.75	36.75	73.5	73.5
LED4	36.75	36.77	73.5	73.54

4.3.3. Camino Óptico del diseño de 50 grados.

Para el diseño experimental que se realizó con un ángulo de inclinación de la pendiente refractora de 50 grados se tomo como referencia el primer LED con una posición de 5 a 10 milímetros de distancia con respecto al vértice.

En la Figura 4.19 se muestran los máximos y mínimos recorridos ópticos de cada LED de los diseños experimentales de 45 grados, y el número de rayo en el cual se presenta la máxima y mínima refracción en la pantalla, a continuación se obtendrá el camino óptico para cada LED.



a) LED inicial a medio centímetro del vértice. b) LED inicial a un centímetro del vértice.

Figura 4.19: Camino óptico del diseño experimental con pendiente de iluminación de 50 grados

En el Cuadro 4.10 se muestran los datos ya obtenidos en temas anteriores, esta tabla nos facilita los cálculos del camino óptico para el diseño experimental que se realizó.

Cuadro 4.10: Camino Óptico del diseño de 50 grados

Datos Generales		Distancia del vértice al LED inicial = 5 mm				Distancia del vértice al LED inicial= 10 mm			
Posición del LED	α	OP (mm)	PI(mm)	Numero de los rayos	Distancia del vértice al LED (mm)	OP (mm)	PI(mm)	Numero de los rayos	Distancia del vértice al LED (mm)
1	50	53.5	63.7	1, 10	5	107	127.5	1, 10	10
2				1, 10	9.7			1, 10	19.3
3				1, 10	18.8			1, 10	37.6
4				1, 10	36.4			1, 10	72.8

En el Cuadro 4.11 muestra el camino óptico para cada uno de los LED's del diseño experimental cuando la inclinación de la pendiente refractora está a 50 grados de inclinación y la distancia del vértice al primer LED es de un centímetro y de medio centímetro.

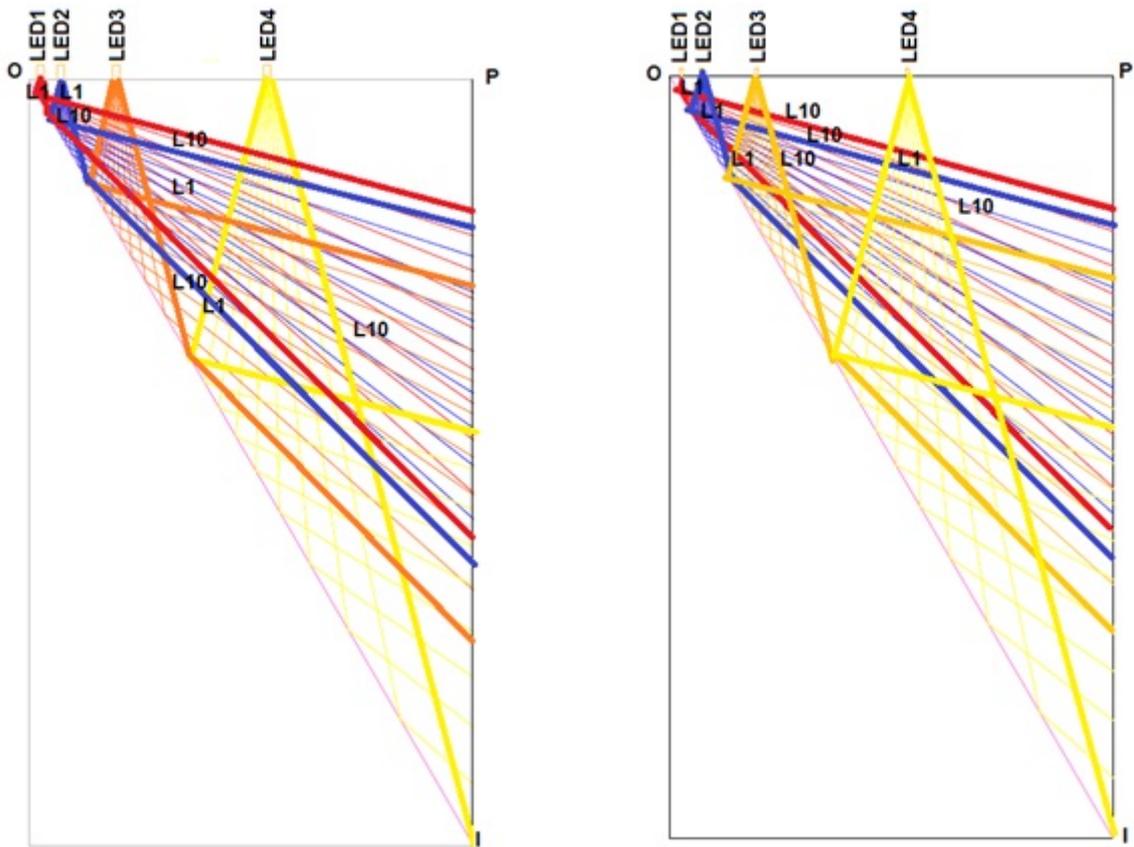
Cuadro 4.11: Camino Óptico del diseño experimental

Posición del LED	Distancia del vértice al LED inicial = 5 mm		Distancia del vértice al LED inicial= 10 mm	
	Camino óptico	Camino óptico	Camino óptico	Camino óptico
	Min. (mm)	Min. (mm)	Min. (mm)	Min. (mm)
LED1	54.55	59.96	109.14	119.97
LED2	55.77	60.86	110.76	121.75
LED3	56.95	62.6	113.95	125.26
LED4	60.02	65.98	120.09	131.96

4.3.4. Camino Óptico del diseño de 60 grados.

Para el diseño experimental que se realizo con un ángulo de inclinación de la pendiente refractora de 60 grados se tomo como referencia el primer LED con una posición de 5 a 10 milímetros de distancia con respecto al vértice.

En la Figura 4.20 se muestran los máximos y mínimos recorridos ópticos de cada LED de los diseños experimentales de 45 grados, y el número de rayo en el cual se presenta la máxima y mínima refracción en la pantalla, a continuación se obtendrá el camino óptico para cada LED.



a) LED inicial a medio centímetro del vértice. b) LED inicial a un centímetro del vértice.

Figura 4.20: Camino óptico del diseño experimental con pendiente de iluminación de 60 grados

En el Cuadro 4.12 se muestran los datos ya obtenidos en temas anteriores, esta tabla nos facilita los cálculos del camino óptico para el diseño experimental que se realizó.

Cuadro 4.12: Camino Óptico del diseño de 60 grados

Datos Generales		Distancia del vértice al LED inicial = 5 mm				Distancia del vértice al LED inicial= 10 mm			
Posición del LED	α	OP (mm)	PI(mm)	Numero de los rayos	Distancia del vértice al LED (mm)	OP (mm)	PI(mm)	Numero de los rayos	Distancia del vértice al LED (mm)
1	60	190.3	329.5	1, 10	5	380.5	659.1	1, 10	10
2				1, 10	13.7			1, 10	27.3
3				1, 10	37.3			1, 10	74.6
4				1, 10	102			1, 10	204

En el Cuadro 4.13 muestra el camino óptico para cada uno de los LED's del diseño experimental cuando la inclinación de la pendiente refractora está a 60 grados de inclinación y la distancia del vértice al primer LED es de un centímetro y de medio centímetro.

Cuadro 4.13: Camino Óptico del diseño experimental

Posición del LED	Distancia del vértice al LED inicial = 5 mm		Distancia del vértice al LED inicial= 10 mm	
	Camino óptico	Camino óptico	Camino óptico	Camino óptico
	Min. (mm)	Min. (mm)	Min. (mm)	Min. (mm)
LED1	199.55	272.6	399.12	545.21
LED2	204.06	278.75	408.08	557.45
LED3	216.27	295.43	432.56	590.89
LED4	249.76	341.3	499.55	682.6

4.4. Circuito y alimentación de los diseños experimentales

Según los datos de fabricante del LED ultrabrillante que se utilizara en los diseños experimentales, son los siguientes:

$$V_{max} = 10V \tag{4.56}$$

$$V_{min} = 5V \tag{4.57}$$

$$i = 20mA \tag{4.58}$$

De la ley de ohm que nos dice, “la intensidad de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo” tenemos la siguiente expresión matemática:

$$R = \frac{v}{i} \tag{4.59}$$

Sustituyendo los valores de fabricante, la resistencia de protección del circuito eléctrico debe ser entre 250Ω y 500Ω y según steren las resistencias comerciales a medio watts son de 270Ω y 330Ω, en este caso utilizaremos una resistencia de 330Ω por ser un valor medio a los cálculos ya obtenidos.

El diseño experimental constara en la parte eléctrica de 4 LED's ultrabrillantes que se colocaran en serie con una resistencia de 330Ω a ½ watts. La conexión eléctrica de los diseños experimentales es la misma. Los LED's ultrabrillantes se conectaron a una fuente variable y se alimento con un voltaje de 20 Vcc, con una corriente total de 20mA y consumiendo 400 mwatts en el circuito eléctrico.

En la Figura 4.21 se muestra la red eléctrica con la cual se instalo los LED's ultrabrillantes en los diseños experimentales.

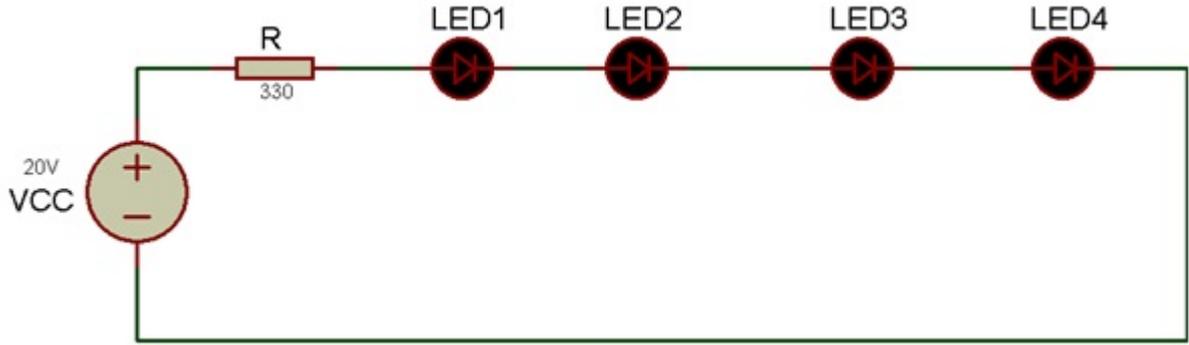


Figura 4.21: Sistema eléctrico del proyecto experimental

A continuación se analizará el circuito para obtener el voltaje en cada componente electrónica. Viendo la conexión que es una malla o trayectoria cerrada se puede utilizar la Ley de Kirchhoff para voltajes (LKV), la cual establece que la suma de todas las tensiones alrededor de una malla es cero y haciendo la suma tenemos la siguiente expresión matemática:

$$-V_{cc} + R_{330\Omega}I_T + R_{LED1}I_T + R_{LED2}I_T + R_{LED3}I_T + R_{LEDD4}I_T = 0 \quad (4.60)$$

Si

$$R_{LED1} = R_{LED2} = R_{LED3} = R_{LEDD4} \quad (4.61)$$

Podemos deducir lo siguiente:

$$-20V + R_{330\Omega}I_T + 4R_{LED'S}I_T = 0 \quad (4.62)$$

Por lo tanto

$$-20V + (330\Omega)(20mA) + 4R_{LED'S}(20mA) = 0 \quad (4.63)$$

Y sustituyendo Ecuación 4.63 en la Ecuación 4.62

$$-20V + (330\Omega)(20mA) + V_{LED'S} = 0 \quad (4.64)$$

$$V_{LED'S} = 13.4V$$

Por lo tanto

$$V_{LED1} = V_{LED2} = V_{LED3} = V_{LED4} = 3.35V$$

Y si la potencia está dada por la siguiente expresión matemática:

$$P = VI \quad (4.65)$$

Entonces:

$$V_{LED1} = V_{LED2} = V_{LED3} = V_{LED4} = 67mwatts$$

$$P_{Resistencia} = 132mwatts$$

4.5. Mediciones de Iluminación.

Se realizaron mediciones en los diseños experimentales, esto se hizo en un cuarto oscuro y en cada diseño experimental se diseñaron tapas, las cuales cubren la pantalla reflejante de los diseños experimentales. Estas tapas tienen una abertura por la cual se obtuvieron las mediciones con el luxómetro. Las tapas fueron deslizadas sobre la pantalla del diseño experimental en 20 puntos.

Las dimensiones de las tapas están dadas mediante las siguientes expresiones matemáticas:

$$Espesor \ de \ latapa = espesor \ del \ diseño \ experimental + 10(mm)$$

$$Altura \ de \ latapa = 2(alturadel \ diseño \ experimental) + 10(mm)$$

En el Cuadro 4.14 se muestran las dimensiones de las tapas de los diseños experimentales.

Cuadro 4.14: Dimensiones de las tapas.

Diseño experimental	Espesor (mm)	Altura (mm)
40 grados a 10 mm	16.7	95.4
45 grados a 10 mm	31.02	137.4
50 grados a 05 mm	31.85	128.4
50 grados a 10 mm	61.7	256
60 grados a 05 mm	61.7	660
60 grados a 10 mm	61.7	1328.2

La abertura de la tapa tiene como dimensiones un rectángulo con las medidas del espesor del diseño experimental y dos milímetros, en la Figura 4.22 se muestran los diseños de las tapas con las cuales se realizaron las mediciones en la habitación oscura.

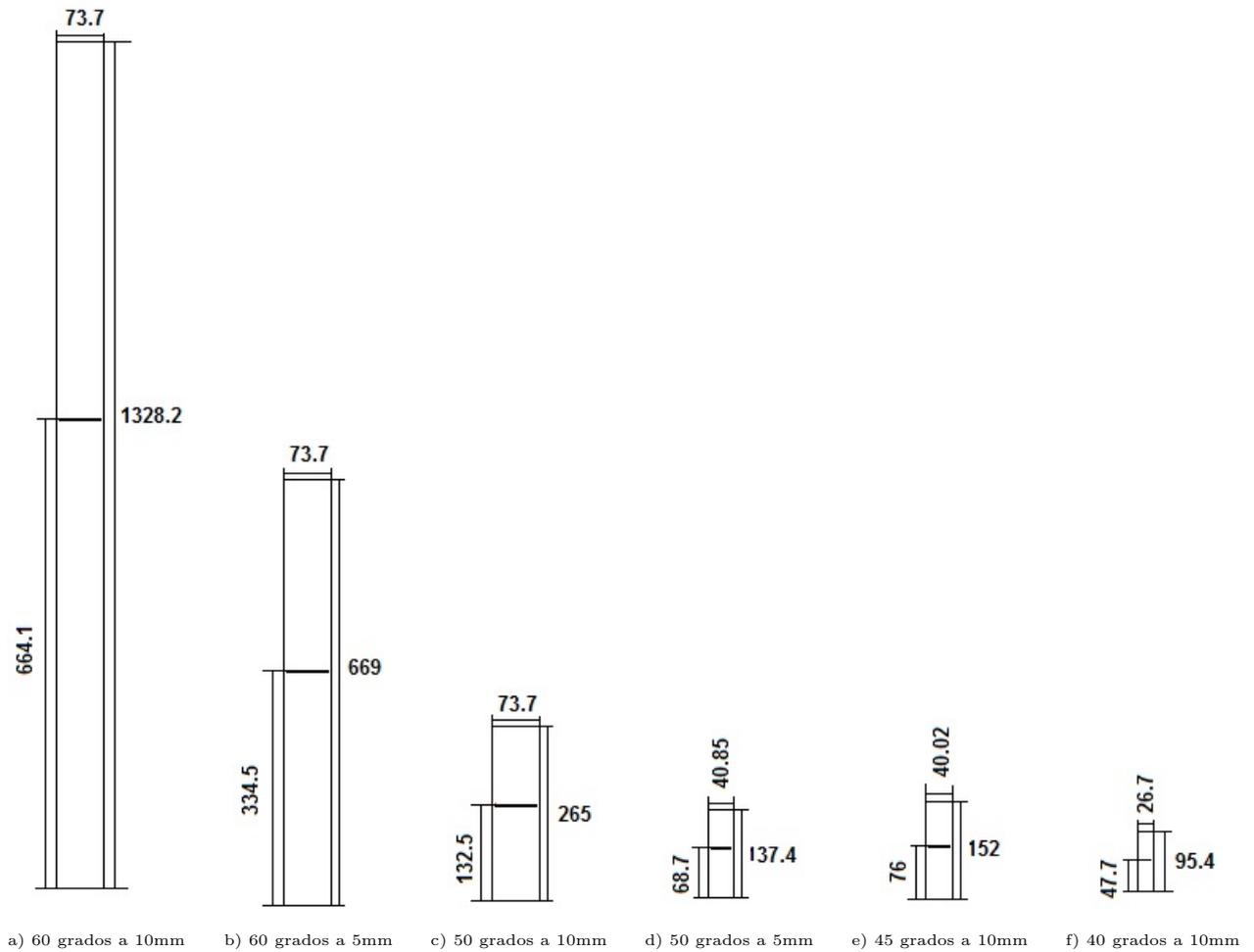


Figura 4.22: Diseño de las tapas para los arreglos experimentales.

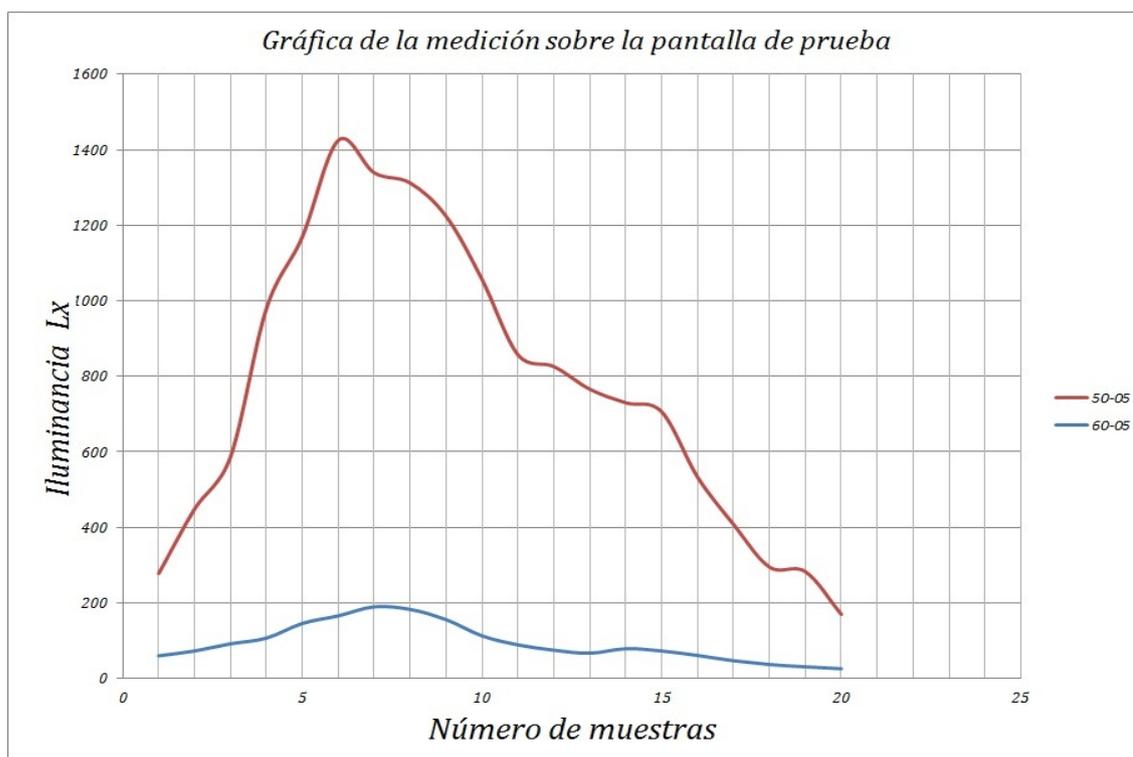
Las tapas fueron deslizadas en la pantalla de cada diseño experimental colocando la primera muestra en la parte superior de la pantalla hasta llegar a la parte inferior de la pantalla, los diseños experimentales fueron divididos en veinte partes cada uno, en los cuales se midió la iluminancia con un luxómetro modelo HER-410. A continuación en el Cuadro 4.15 se muestran las mediciones obtenidas de los diseños experimentales:

Cuadro 4.15: Muestras de iluminancia en los diseños experimentales cuando el primer LED se encuentra a 5 mm de la superficie refractora en lx.

Medidas	Diseño de 50 grados a 5 mm	Diseño de 60 grados a 5 mm
1	278	60
2	449	73
3	587	92
4	980	107
5	1170	146
6	1425	166
7	1339	190
8	1312	183
9	1224	156
10	1057	113
11	857	89
12	826	75
13	766	67
14	730	79
15	706	73
16	533	61
17	408	47
18	295	37
19	283	31
20	170	26

En el Cuadro 4.15 se puede ver que la iluminancia es muchísimo mayor en el diseño de 50 grados que en el diseño de 60 grados y que la concentración de luz blanca se encuentra en el intervalo de la muestra 5 a la 10. Se puede deducir que en el diseño de 50 grados se puede alcanzar una mayor distancia de luz que en el diseño de 60 grados aunque las dimensiones son más robustas en este último diseño.

A continuación se muestra la comparación y el comportamiento grafico de la iluminancia contra el número de muestras de los diseños experimentales de 50 y 60 grados.



Muestra contra flujo luminoso de los diseños experimentales cuando el primer LED se encuentra a 5 mm de la superficie refractora en lumen.

En la grafica podemos observar claramente que el diseño experimental la cual tiene una inclinación de 50 grados en la pendiente refractante hay mayor iluminancia y en la muestra 6 podemos observar que alcanza una iluminancia máxima de 1425 lx. Para estas dos graficas hay mayor iluminancia en el diseño de 50 grados si solo tomamos en cuenta la inclinación de la pendiente refractora.

En el Cuadro 4.16 se muestran las mediciones para los diseños experimentales cuando el primer LED se coloca a un centímetro de la superficie refractora, donde podemos observar que la máximo iluminancia se encuentra en el diseño experimental de 40 grados, alcanzando medidas por arriba de 700 lx por otra parte el diseño experimental de 60 grados alcanza medidas por debajo de los 30 lx. Con base a las tablas ya obtenidas, podemos decir que la pantalla de nuestros diseños experimentales no son homogéneos, ya que las medidas son crecientes y decrecientes en varios intervalos de esta.

Cuadro 4.16: Muestras de la iluminancia de los diseños experimentales cuando el primer LED se encuentra a 10 mm de la superficie refractora en lumen.

Medida	Diseño 40-10	Diseño 45-10	Diseño 50-10	Diseño 50-10
1	1305	249	148	14
2	1338	368	228	16
3	1295	709	270	18
4	1473	860	316	22
5	1215	794	334	27
6	1073	800	371	32
7	1033	815	387	31
8	918	890	391	25
9	895	849	380	22
10	810	880	330	20
11	761	740	283	21
12	787	506	220	15
13	840	452	189	13
14	902	374	173	9
15	1031	459	171	6
16	1132	400	183	5
17	1043	544	178	4
18	1168	501	218	5
19	895	429	189	4
20	826	383	139	2

En la grafica 4.5.2 podemos observar el máximo valor de iluminancia que se encuentra en la muestra 4 del diseño experimental de 40 grados con un valor de 1473 lx. Se puede ver en las graficas que la pantalla donde se refractan los rallos del LED son crecientes y decrecientes en diferentes aéreas de la pantalla. El diseño de 45 grados es el diseño que presenta en términos medio la iluminancia de nuestros diseños experimentales con un flujo luminoso máximo de 880 lx.

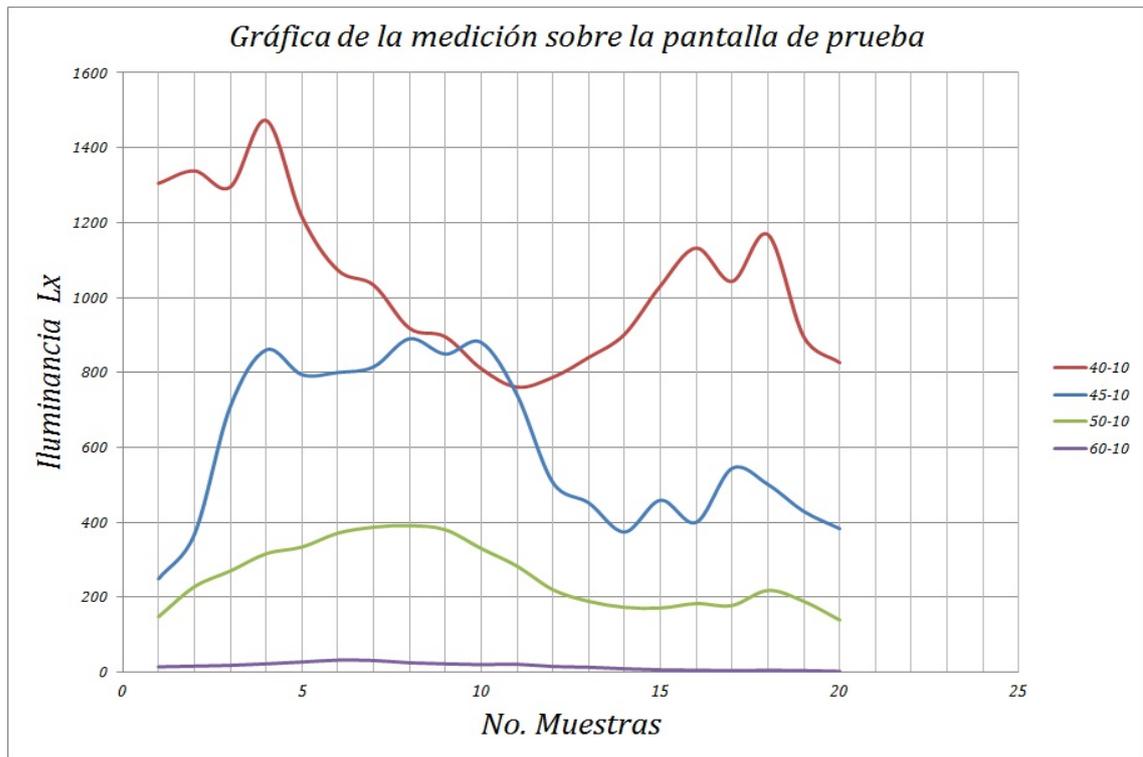


Figura 4.23: Muestra contra iluminancia de los diseños experimentales cuando el primer LED se encuentra a 10 mm de la superficie refractora en lx.

Podemos decir que la iluminancia será mayor en los diseños experimentales que presenten dimensiones pequeñas, como es el caso de los diseños de 40 y 45 grados y en cierta parte el de 50 grados, pero solo si en este último el primer LED está colocado a medio centímetro de la superficie refractora.

Después de haber obtenido la iluminancia sobre la pantalla de los diseños experimentales, se obtuvieron más mediciones, pero ahora fue sin la tapa, colocando el luxómetro a la mitad de cada diseño experimental y a cada 5 cm de distancia del diseño experimental, hasta llegar a 2 metros. Los datos obtenidos de la iluminancia de los diseños experimentales se muestran en el Cuadro 4.17.

Cuadro 4.17: Iluminancia de los diseños experimentales a 2 metros

Distancia (cm)	60 grados a 5mm (lx)	60 grados a 10 mm (lx)	50grados a 5mm (lx)	50 grados a 10 mm (lx)	45 grados a 10mm (lx)	40 grados a 10 mm (lx)
5	270	92	1431	576	1341	1320
10	164	54	538	287	589	440
15	106	44	265	208	288	186
20	68	33	162	151	162	110
25	53	24	110	111	120	70
30	42	17	78	84	85	48
35	33	12	59	63	65	37
40	25	10	46	50	51	28
45	22	9	37	41	40	22
50	20	8	31	33	33	18
55	19	6	26	27	27	15
60	17	5	22	23	22	12
65	15	4	19	20	17	10
70	12	3	16	17	15	9
75	10	3	14	15	13	8
80	9	3	12	13	12	7
85	8	2	11	12	10	6
90	7	2	10	11	9	6
95	6	2	9	10	9	5
100	6	2	8	9	8	5
105	6	2	7	8	7	4
110	5	2	7	7	6	4
115	5	1	6	7	6	4
120	5	1	6	6	5	3
125	4	1	5	6	5	3
130	3	1	5	5	5	3
135	3	1	4	5	5	3
140	3	1	4	5	4	2
145	3	1	4	4	4	2
150	3	1	4	4	4	2
155	3	1	3	4	4	2
160	3	1	3	4	3	2
165	2	1	3	3	3	2
170	2	1	3	3	3	2
175	2	1	3	3	3	2
180	2	1	3	3	3	2
185	2	1	2	3	2	2
190	2	1	2	3	2	1
195	2	1	2	3	2	1
200	1	1	2	2	2	1

En el Cuadro 4.17 podemos observar que el diseño experimental con la superficie refractora a 50 grados de inclinación y con la posición del primer LED a 5 mm de dicha superficie es el diseño que presenta mayor iluminación, alcanzando un máximo de 1431 lx. Los datos adquiridos muestran que la iluminación es decreciente cada vez que nos vamos alejando de la fuente de

iluminación.

A continuación se presentan los datos obtenidos del Cuadro 4.5.3 en la gráfica 4.5.3

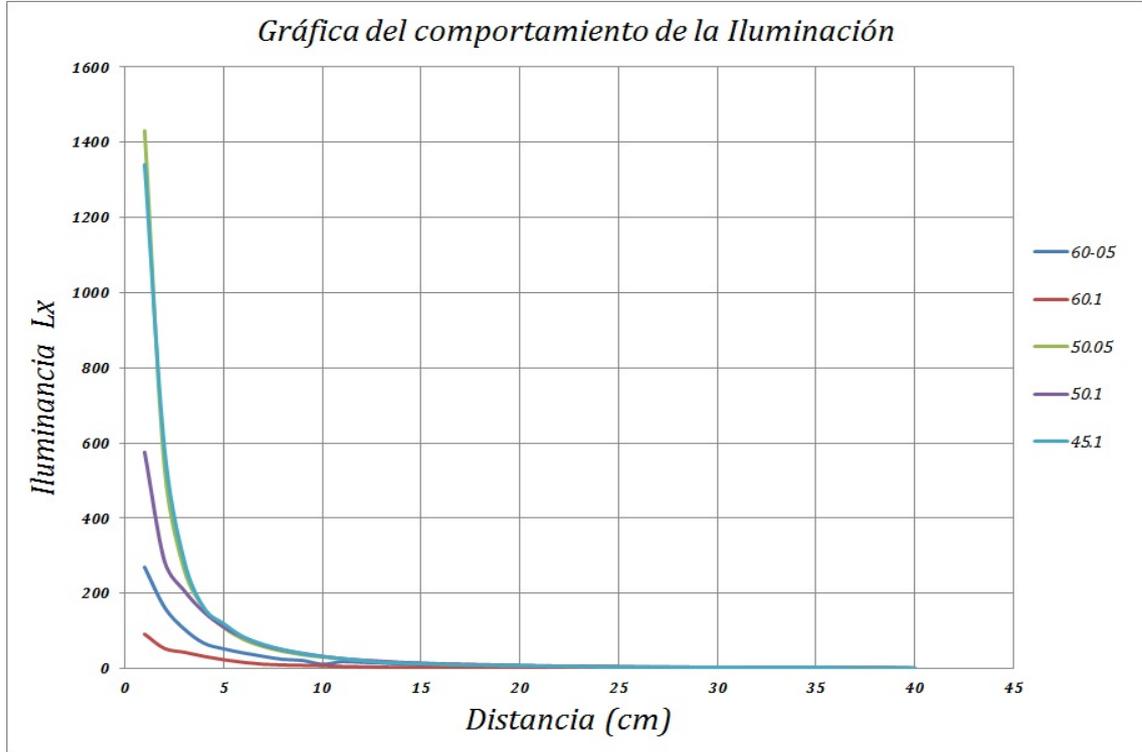


Figura 4.24: Distancia contra iluminancia

En la gráfica 4.5.3 podemos observar claramente cómo se comportan los diseños experimentales, como máxima iluminancia se presenta el diseño experimental de 50 grados (inclinación de la superficie de refracción) a 5 milímetros (distancia del primer LED de la superficie refractora), enseguida esta el diseño experimental de 45 grados a un centímetro, después se encuentra el diseño de 40 grados a 1 centímetro, posteriormente esta el diseño de 50 grados a un centímetro, luego se presenta el diseño de 60 grados a medio centímetro y por último el diseño experimental de 60 grados a un centímetro.

Retomando el capítulo 3.3.2 (Niveles de iluminación) la iluminación en exteriores generales como patios y estacionamientos es de 20 lx como mínimo, en interiores de pasillos y escaleras (generales), presenta una iluminación de 50 lx, en interiores de oficina de 200 a 500 lx en restaurantes de 80 a 300 lx, por mencionar algunos.

Nuestros diseños experimentales alcanzan una iluminación de hasta 1400 lx en una habitación carente de luz, por lo que si se diseña un sistema de iluminación con estos diseños experimentales, podemos adquirir la iluminación necesaria para iluminar en espacios que requieren hasta 1000 lx.

Del capítulo 3.4.1 (Ley de los cuadrados inversos) tenemos la siguiente ecuación:

$$E = \frac{I}{D^2} \quad (4.66)$$

Despejando la Intensidad luminosa de la Ecuación 4.66 tenemos la siguiente expresión:

$$I = D^2 \cdot E \quad (4.67)$$

De los resultados obtenidos en el Cuadro 4.17 y de la Ecuación 4.67 podemos obtener la intensidad luminosa para cada arreglo experimental. A continuación se muestran los resultados y gráficas obtenidos por cada diseño experimental utilizando la ley de los cuadrados inversos.

Cuadro 4.18: Intensidad luminosa

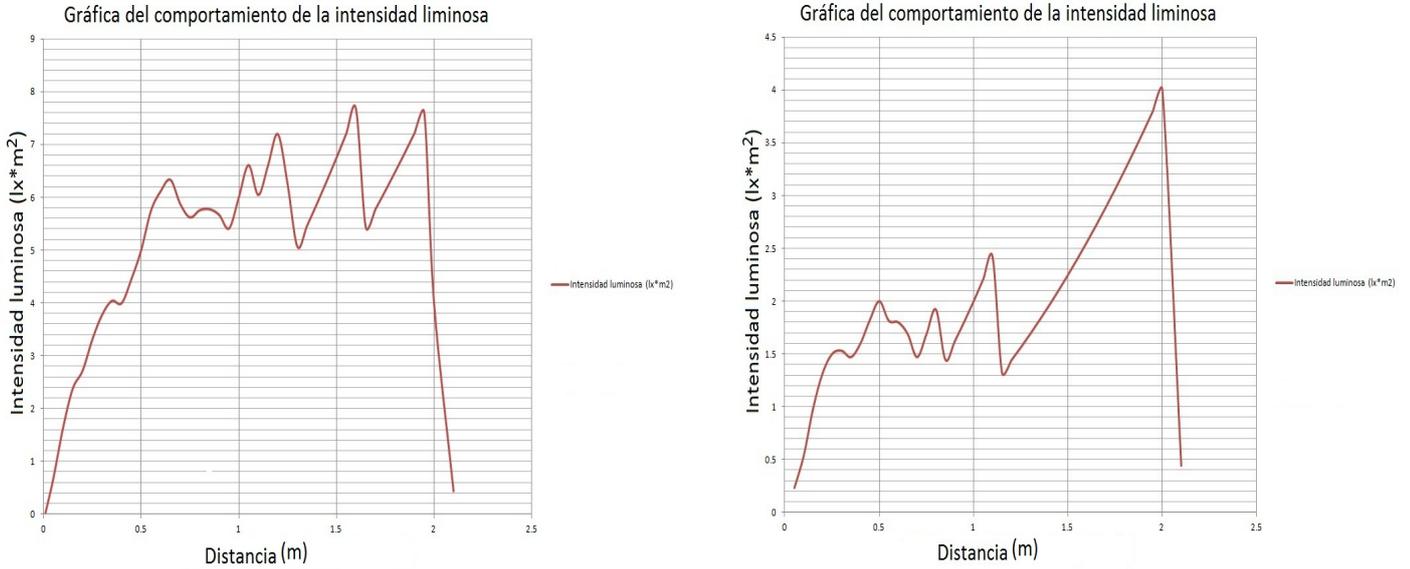
Distancia (m)	Iluminación (lx)	intensidad luminosa ($lx \cdot m^2$)	Distancia (m)	Iluminación (lx)	intensidad luminosa ($lx \cdot m^2$)
0.05	270	0.675	0.05	92	0.23
0.1	164	1.64	0.1	54	0.54
0.15	106	2.385	0.15	44	0.99
0.2	68	2.72	0.2	33	1.32
0.25	53	3.3125	0.25	24	1.5
0.3	42	3.78	0.3	17	1.53
0.35	33	4.0425	0.35	12	1.47
0.4	25	4	0.4	10	1.6
0.45	22	4.455	0.45	9	1.8225
0.5	20	5	0.5	8	2
0.55	19	5.7475	0.55	6	1.815
0.6	17	6.12	0.6	5	1.8
0.65	15	6.3375	0.65	4	1.69
0.7	12	5.88	0.7	3	1.47
0.75	10	5.625	0.75	3	1.6875
0.8	9	5.76	0.8	3	1.92
0.85	8	5.78	0.85	2	1.445
0.90	7	5.67	0.90	2	1.62
0.95	6	5.415	0.95	2	1.805
1	6	6	1	2	2
1.05	6	6.615	1.05	2	2.205
1.1	5	6.05	1.1	2	2.42
1.15	5	6.6125	1.15	1	1.3225
1.2	5	7.2	1.2	1	1.44
1.25	4	6.25	1.25	1	1.5625
1.3	3	5.07	1.3	1	1.69
1.35	3	5.4675	1.35	1	1.8225
1.4	3	5.88	1.4	1	1.96
1.45	3	6.3075	1.45	1	2.1025
1.5	3	6.75	1.5	1	2.25
1.55	3	7.2075	1.55	1	2.4025
1.6	3	7.68	1.6	1	2.56
1.65	2	5.445	1.65	1	2.7225
1.7	2	5.78	1.7	1	2.89
1.75	2	6.125	1.75	1	3.0625
1.8	2	6.48	1.8	1	3.24
1.85	2	6.845	1.85	1	3.4225
1.9	2	7.22	1.9	1	3.61
1.95	2	7.605	1.95	1	3.8025
2	1	4	2	1	4

a) Diseño experimental de 60 grados a 5 mm.

b) Diseño experimental de 60 grados a 10 mm.

En el Cuadro 4.18 se muestran dos cuadros de la intensidad luminosa en $lx \cdot m^2$ con los diseños experimentales que tienen una pendiente refractante colocada a 60 grados, en el inciso a) con una posición del primer led a 5mm y en el inciso b) con una posición del primer led a 10mm

de la pendiente refractante. En el Cuadro 4.18 a) se puede observar que la intensidad luminosa no es lineal ni homogénea. De la misma manera podemos observar el Cuadro 4.18 b) que no cumple una homogeneidad. Se observa que los datos obtenidos en ambos cuadros la intensidad luminosa se comporta de manera inconsistente y como una función de creciente y decreciente en diferentes regiones o distancias en donde se tomaron las lecturas de iluminación.



a) Diseño experimental de 60 grados a 5 mm. b) Diseño experimental de 60 grados a 10 mm.

Figura 4.25: Gráficas del comportamiento de la intensidad luminosa

En la Figura 4.25 se muestran las gráficas del comportamiento de la intensidad luminosa del Cuadro 4.18 a) y b) en el Cuadro 4.25 del inciso a) podemos observar que en la distancia de 1.65m alcanza su máxima intensidad luminosa con 7.68lx · m². Por otra parte en la Figura 4.25 b) se observa que la máxima intensidad luminosa se encuentra en una distancia de 2m con una intensidad de 4lx · m².

Cuadro 4.19: Intensidad luminosa

Distancia (m)	Iluminación (lx)	intensidad luminosa ($lx \cdot m^2$)
0.05	1431	3.5775
0.1	538	5.38
0.15	265	5.9625
0.2	162	6.48
0.25	110	6.875
0.3	78	7.02
0.35	59	7.2275
0.4	46	7.36
0.45	37	7.4925
0.5	31	7.75
0.55	26	7.865
0.6	22	7.92
0.65	19	8.0275
0.7	16	7.84
0.75	14	7.875
0.8	12	7.68
0.85	11	7.9475
0.90	10	8.1
0.95	9	8.1225
1	8	8
1.05	7	7.7175
1.1	7	8.47
1.15	6	7.935
1.2	6	8.64
1.25	5	7.8125
1.3	5	8.45
1.35	4	7.29
1.4	4	7.84
1.45	4	8.41
1.5	4	9
1.55	3	7.2075
1.6	3	7.68
1.65	3	8.1675
1.7	3	8.67
1.75	3	9.1875
1.8	3	9.72
1.85	2	6.845
1.9	2	7.22
1.95	2	7.605
2	2	8

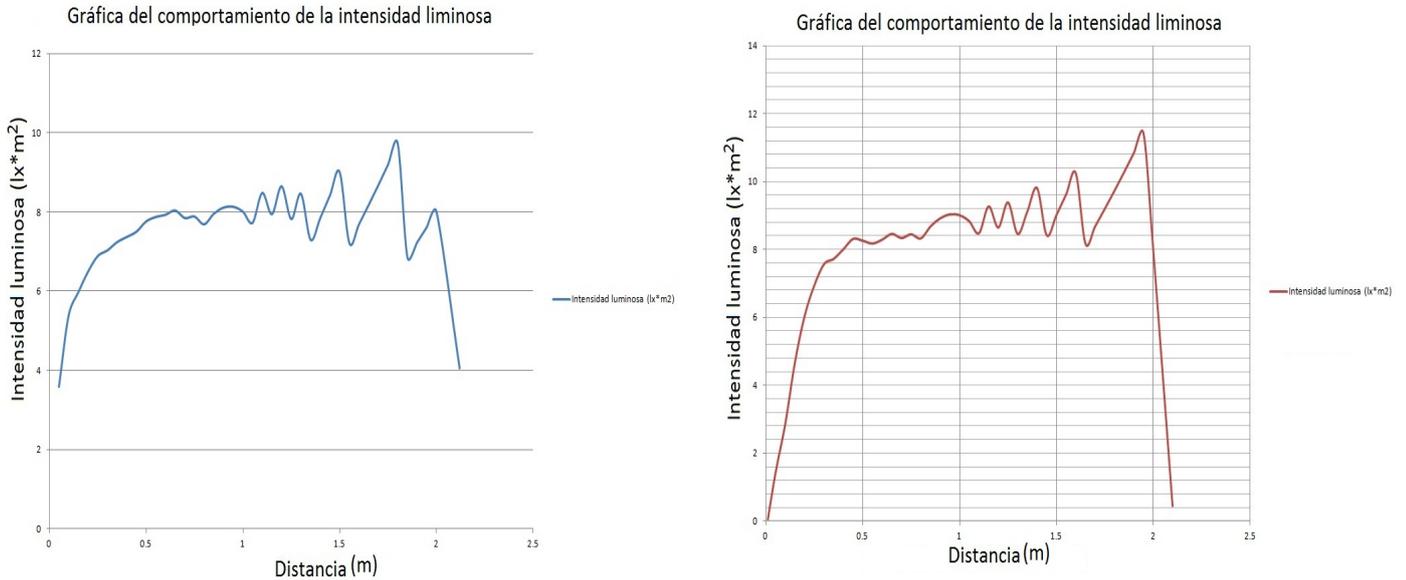
a) Diseño experimental de 50 grados a 5 mm.

Distancia (m)	Iluminación (lx)	intensidad luminosa ($lx \cdot m^2$)
0.05	576	1.44
0.1	287	2.87
0.15	208	4.68
0.2	151	6.04
0.25	111	6.9375
0.3	84	7.56
0.35	63	7.7175
0.4	50	8
0.45	41	8.3025
0.5	33	8.25
0.55	27	8.1675
0.6	23	8.28
0.65	20	8.45
0.7	17	8.33
0.75	15	8.4375
0.8	13	8.32
0.85	12	8.67
0.90	11	8.91
0.95	10	9.025
1	9	9
1.05	8	8.82
1.1	7	8.47
1.15	7	9.2575
1.2	6	8.64
1.25	6	9.375
1.3	5	8.45
1.35	5	9.1125
1.4	5	9.8
1.45	4	8.41
1.5	4	9
1.55	4	9.61
1.6	4	10.24
1.65	3	8.1675
1.7	3	8.67
1.75	3	9.1875
1.8	3	9.72
1.85	3	10.2675
1.9	3	10.83
1.95	3	11.4075
2	2	8

b) Diseño experimental de 50 grados a 10 mm.

En el Cuadro 4.19 se muestran dos cuadros de la intensidad luminosa en $lx \cdot m^2$ con los diseños experimentales que tienen una pendiente refractante colocada a 50 grados, en el inciso a) con una posición del primer led a 5mm y en el inciso b) con una posición del primer led a 10mm

de la pendiente refractante. En el Cuadro 4.19 a) se puede observar que la intensidad luminosa no es lineal ni homogénea. De la misma manera podemos observar el Cuadro 4.19 b) que no cumple una homogeneidad. Se observa que los datos obtenidos en ambos cuadros la intensidad luminosa se comporta de manera inconsistente y como una función de creciente y decreciente en diferentes regiones o distancias en donde se tomaron las lecturas de iluminación.



a) Diseño experimental de 50 grados a 5 mm. b) Diseño experimental de 50 grados a 10 mm.

Figura 4.26: Gráficas del comportamiento de la intensidad luminosa

En la Figura 4.26 se muestran las gráficas del comportamiento de la intensidad luminosa del Cuadro 4.19 a) y b) en el Cuadro 4.26 del inciso a) podemos observar que en la distancia de 1.8m alcanza su máxima intensidad luminosa con $9.72lx \cdot m^2$. Por otra parte en la Figura 4.26 b) se observa que la máxima intensidad luminosa se encuentra en una distancia de 1.95m con una intensidad de $11.4075lx \cdot m^2$.

Cuadro 4.20: Intensidad luminosa

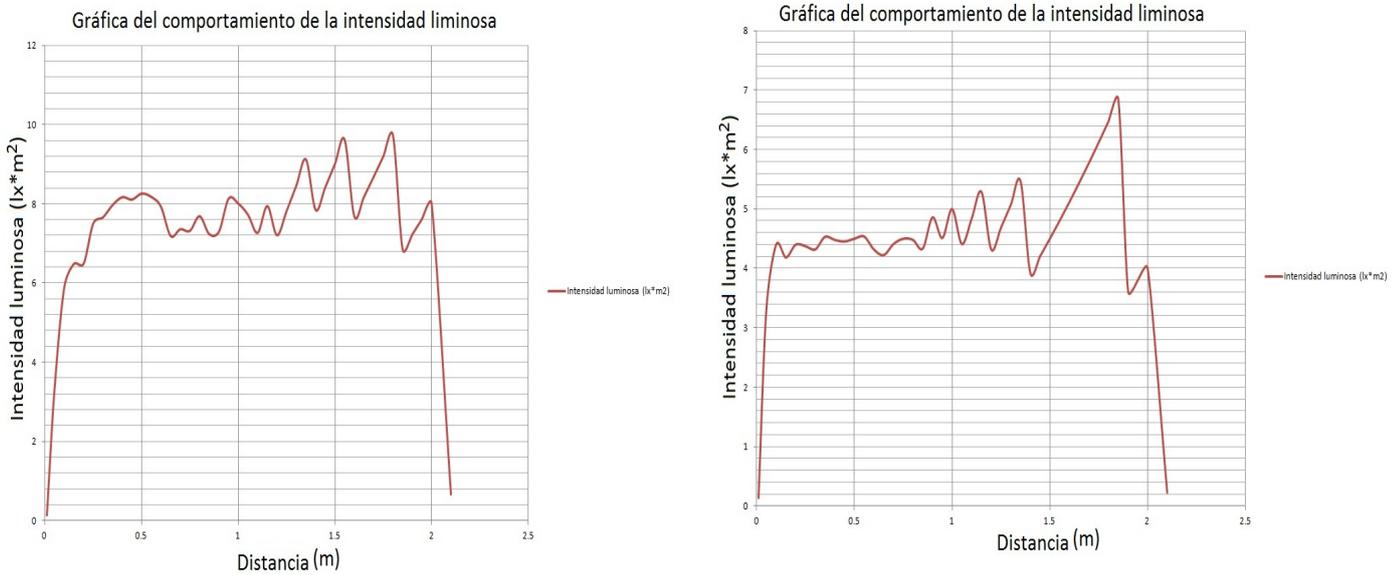
Distancia (m)	Iluminación (lx)	intensidad luminosa ($lx \cdot m^2$)	Distancia (m)	Iluminación (lx)	intensidad luminosa ($lx \cdot m^2$)
0.05	1341	3.3525	0.05	1320	
0.1	589	5.89	0.1	440	4.4
0.15	288	6.48	0.15	186	4.185
0.2	162	6.48	0.2	110	4.4
0.25	120	7.5	0.25	70	4.375
0.3	85	7.65	0.3	48	4.32
0.35	65	7.9625	0.35	37	4.5325
0.4	51	8.16	0.4	28	4.48
0.45	40	8.1	0.45	22	4.455
0.5	33	8.25	0.5	18	4.5
0.55	27	8.1675	0.55	15	4.5375
0.6	22	7.92	0.6	12	4.32
0.65	17	7.1825	0.65	10	4.225
0.7	15	7.35	0.7	9	4.41
0.75	13	7.3125	0.75	8	4.5
0.8	12	7.68	0.8	7	4.48
0.85	10	7.225	0.85	6	4.335
0.90	9	7.29	0.90	6	4.86
0.95	9	8.1225	0.95	5	4.5125
1	8	8	1	5	5
1.05	7	7.7175	1.05	4	4.41
1.1	6	7.26	1.1	4	4.84
1.15	6	7.935	1.15	4	5.29
1.2	5	7.2	1.2	3	4.32
1.25	5	7.8125	1.25	3	4.6875
1.3	5	8.45	1.3	3	5.07
1.35	5	9.1125	1.35	3	5.4675
1.4	4	7.84	1.4	2	3.92
1.45	4	8.41	1.45	2	4.205
1.5	4	9	1.5	2	4.5
1.55	4	9.61	1.55	2	4.805
1.6	3	7.68	1.6	2	5.12
1.65	3	8.1675	1.65	2	5.445
1.7	3	8.67	1.7	2	5.78
1.75	3	9.1875	1.75	2	6.125
1.8	3	9.72	1.8	2	6.48
1.85	2	6.845	1.85	2	6.845
1.9	2	7.22	1.9	1	3.61
1.95	2	7.605	1.95	1	3.8025
2	2	8	2	1	4

a) Diseño experimental de 45 grados a 10 mm.

b) Diseño experimental de 40 grados a 10 mm.

En el Cuadro 4.20 se muestran dos cuadros de la intensidad luminosa en $lx \cdot m^2$ con los diseños experimentales que tienen una pendiente refractante colocada a 45 grados y 40 grados respectivamente, en el inciso a) con una posición del primer led a 10mm y en el inciso b) con

una posición del primer led a 10mm de la pendiente refractante. En el Cuadro 4.20 a) se puede observar que la intensidad luminosa no es lineal ni homogénea. De la misma manera podemos observar el Cuadro 4.20 b) que no cumple una homogeneidad. Se observa que los datos obtenidos en ambos cuadros la intensidad luminosa se comporta de manera inconsistente y como una función de creciente y decreciente en diferentes regiones o distancias en donde se tomaron las lecturas de iluminación.



a) Diseño experimental de 45 grados a 10 mm. b) Diseño experimental de 40 grados a 10 mm.

Figura 4.27: Gráficas del comportamiento de la intensidad luminosa

En la Figura 4.27 se muestran las gráficas del comportamiento de la intensidad luminosa del Cuadro 4.19 a) y b) en el Cuadro 4.26 del inciso a) podemos observar que en la distancia de 1.95m alcanza su máxima intensidad luminosa con $7.605lx \cdot m^2$. Por otra parte en la Figura 4.26 b) se observa que la máxima intensidad luminosa se encuentra en una distancia de 1.85m con una intensidad de $6.845lx \cdot m^2$.

4.5.1. Costos de los diseños experimentales.

Nuestros diseños experimentales están constituidos con 4 LED's ultrabrillantes, según steren el costo de cada LED es de \$9.00. El material que se utilizara en los diseños experimentales es acrílico (plástico) que se vende en forma de lamina con las dimensiones de 1.2x1.8 metros. A continuación se harán los costos para cada diseño experimental.

1. Diseño de 60 grados a 1 centímetro

En la Figura 4.28 se muestra el diseño experimental que tiene una superficie de refracción con una inclinación de 60 grados y está colocada a una distancia de un centímetro con respecto al primer LED, nos muestra las dimensiones del espesor, el ancho y la altura que tendrá nuestro diseño.

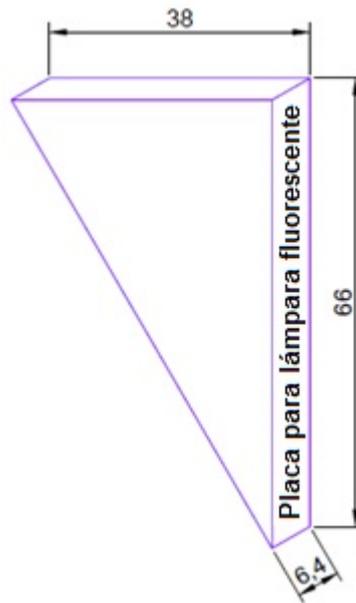


Figura 4.28: Vista del diseño experimental de 60 grados a un centímetro con una inclinación de 30 grados (las medidas están en cm).

En el diseño experimental se utilizara una placa para lámpara fluorescente que comercialmente se vende para el diseño experimental de 122x60 cm con un costo de \$110.20, sabiendo que necesitamos cortes de 6.4x66 cm en la lamina comercial nos abarcarían para 9 diseños.

Para el diseño del circuito impreso se retoman los valores de la posición del primer LED y el último LED y se obtiene la distancia que hay entre estos. La distancia que hay entre el primer LED y el ultimo LED es de 19.39 cm, comercialmente existe una tabla fenolica de 10x20 cm la cual tiene un costo de \$22 y las dimensiones que se darán en la tabla fenolica para nuestro diseño experimental son de 20x2 cm, la cual nos abarcarían 5 piezas.

Se utilizo papel aluminio para refractar los rayos del LED a la pantalla que se deseo homogenizar, el índice de refracción del papel aluminio es del 70 % y su costo es de \$10.00.

En la Figura 4.29 se muestra las dimensiones de los cortes en una lámina de acrílico de 1.8x1.2 metros y los diseños que saldrían en cada lámina.

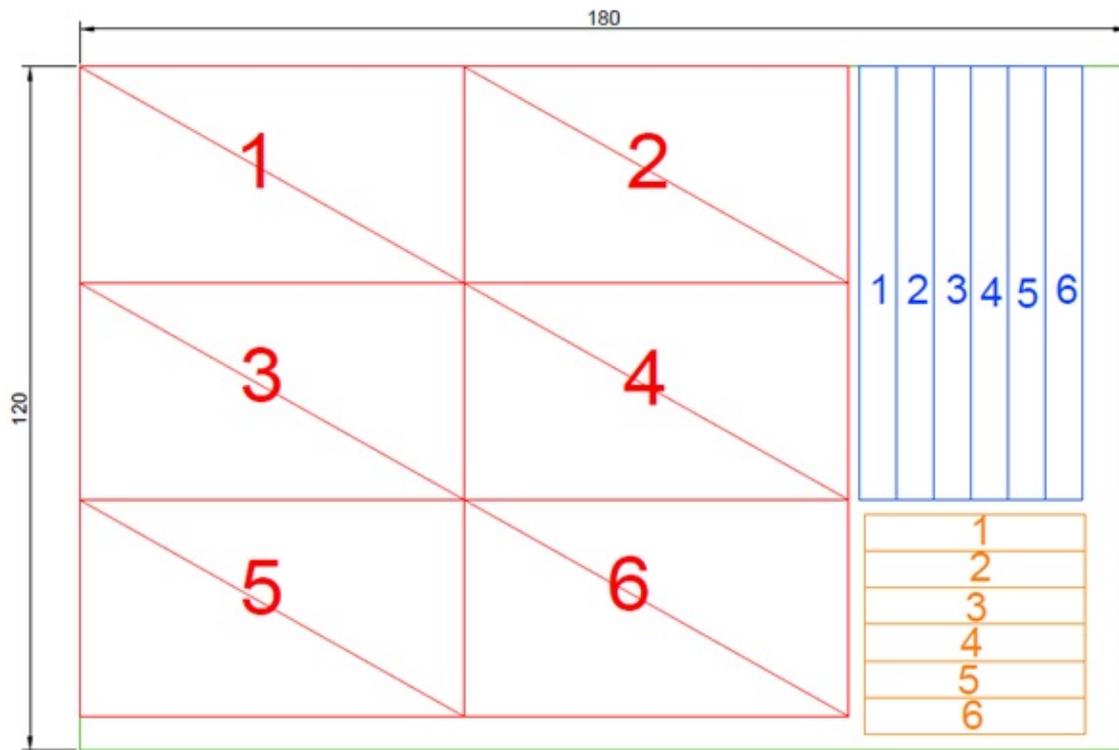


Figura 4.29: Cortes en la lámina de acrílico para el diseño experimental de 60 grados a un centímetro.

En cada lámina de acrílico saldrán 6 diseños experimentales, por lo tanto el costo de materiales es expone en el Cuadro 4.21.

Cuadro 4.21: Evaluación económica por diseño experimental.

Material	Precio	piezas	Costo
LED	\$9.00	4	\$36.00
Acrílico	\$771.00	1	\$128.5
Placa para lámpara fluorescente	\$110.20	1	\$12.3
Tabla fenolica	\$22	1	\$4.4
Cloruro férrico	\$26.00	1	\$26.00
Papel aluminio	\$10.00	1	\$10.00
Total			\$217.2

2. Diseño de 60 grados a medio centímetro

A continuación en la Figura 4.30 se muestran las medidas del diseño experimental cuando la superficie de refracción se encuentra a 60 grados de inclinación y el primer LED está colocado a medio centímetro de dicha superficie.

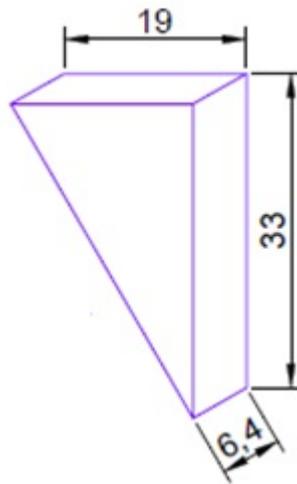


Figura 4.30: Vista del diseño experimental de 60 grados a medio centímetro con una inclinación de 30 grados (las medidas están en cm).

En el diseño experimental se utilizara una placa para lámpara fluorescente que comercialmente se vende para el diseño experimental de 60x60 cm con un costo de \$65.00, sabiendo que necesitamos cortes de 6.4x33 cm en la lamina comercial nos abarcarían para 13 diseños.

Para el diseño del circuito impreso se retoman los valores de la posición del primer LED y el último LED y se obtiene la distancia que hay entre estos. La distancia que hay entre el primer LED y el ultimo LED es de 9.7 cm, comercialmente existe una tabla fenolica de 10x5 cm la cual tiene un costo de \$7 y las dimensiones que se darán en la tabla fenolica para nuestro diseño experimental son de 10x2 cm, la cual nos abarcarían 2 piezas.

En la Figura 4.31 se muestran las dimensiones de los cortes en una lámina de acrílico de 1.8x1.2 metros y los diseños que saldrían en cada lámina, para el diseño experimental, tratando de obtener el mayor número de diseños en la lámina se ajustan las dimensiones del diseño experimental.

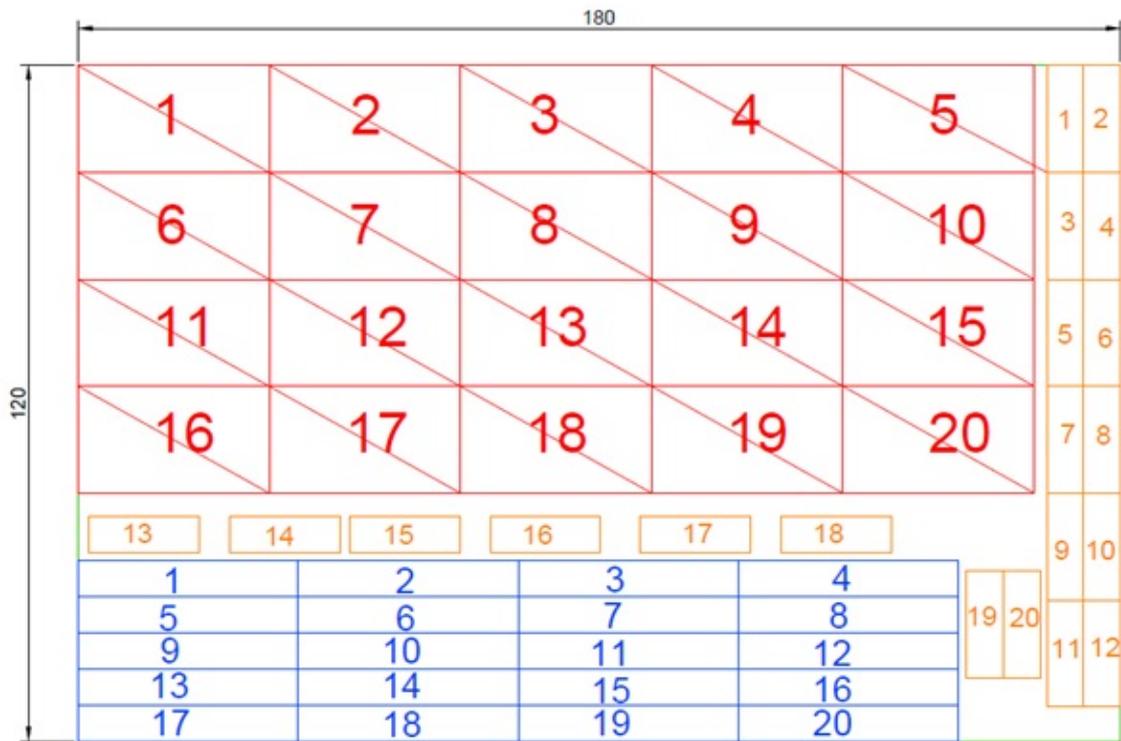


Figura 4.31: Cortes en la lámina de acrílico para el diseño experimental de 60 grados a medio centímetro.

En cada lámina de acrílico saldrán 20 diseños experimentales, por lo tanto el costo de materiales es expone en el Cuadro 4.22.

Cuadro 4.22: Evaluación económica por diseño experimental.

Material	Precio	piezas	Costo
LED	\$9.00	4	\$36.00
Acrílico	\$771.00	1	\$38.60
Placa para lámpara fluorescente	\$65	1	\$5.00
Tabla fenolica	\$7	1	\$3.50
Cloruro férrico	\$26.00	1	\$26.00
Papel aluminio	\$10.00	1	\$10.00
Total			\$115.60

3. Diseño de 50 grados a un centímetro

En la Figura 4.32 se muestran las medidas del diseño experimental cuando la superficie de refracción se encuentra a 50 grados de inclinación y el primer LED está colocado a un centímetro de dicha superficie.

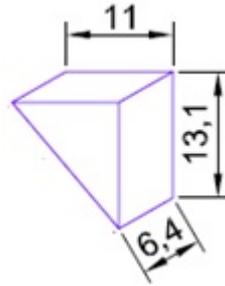


Figura 4.32: Vista del diseño experimental de 50 grados a un centímetro con una inclinación de 30 grados (las medidas están en cm).

En el diseño experimental se utilizara una placa para lámpara fluorescente que comercialmente se vende para el diseño experimental de 30x30 cm con un costo de \$23.44, sabiendo que necesitamos cortes de 6.4x13.1 cm en la lamina comercial nos abarcarían para 8 diseños.

Para el diseño del circuito impreso se retoman los valores de la posición del primer LED y el último LED y se obtiene la distancia que hay entre estos. La distancia que hay entre el primer LED y el ultimo LED es de 6.5 cm, comercialmente existe una tabla fenolica de 10x5 cm la cual tiene un costo de \$7 y las dimensiones que se darán en la tabla fenolica para nuestro diseño experimental son de 7x2 cm, la cual nos abarcarían 2 piezas.

Las dimensiones de los cortes en la lámina de acrílico de 1.8x1.2 metros y los diseños que saldrían en cada lámina se muestran en la Figura 4.33, para el diseño experimental, tratando de obtener el mayor número de diseños en la lámina se ajustan las dimensiones del diseño experimental.

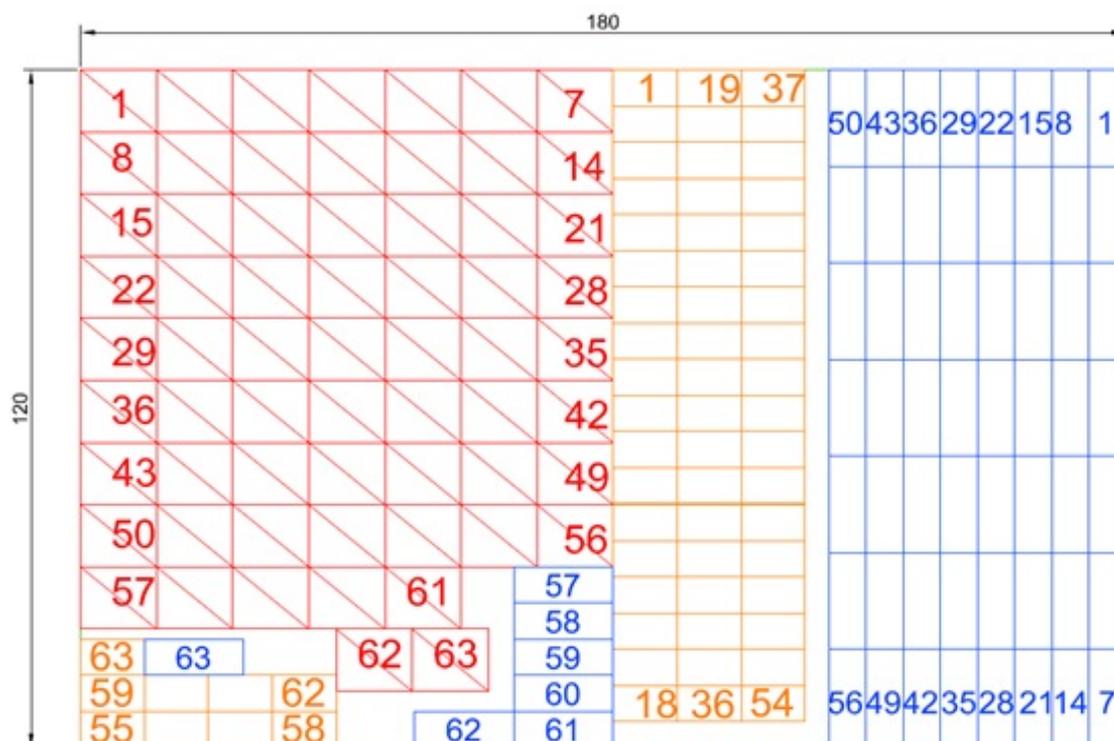


Figura 4.33: Cortes en la lámina de acrílico para el diseño experimental de 50 grados a un centímetro.

En cada lámina de acrílico saldrán 63 diseños experimentales, por lo tanto el costo de materiales es expone en el Cuadro 4.23.

Cuadro 4.23: Evaluación económica por diseño experimental.

Material	Precio	piezas	Costo
LED	\$9.00	4	\$36.00
Acrílico	\$771.00	1	\$12.30
Placa para lámpara fluorescente	\$23.44	1	\$2.93
Tabla fenolica	\$7	1	\$3.50
Cloruro férrico	\$26.00	1	\$26.00
Papel aluminio	\$10.00	1	\$10.00
Total			\$90.73

En la Figura 4.34 se muestran las medidas del diseño experimental cuando la superficie de refracción se encuentra a 50 grados de inclinación y el primer LED está colocado a medio centímetro de dicha superficie.

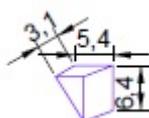


Figura 4.34: Vista del diseño experimental de 50 grados a medio centímetro con una inclinación de 30 grados (las medidas están en cm).

4.5 Mediciones de Iluminación.

En el diseño experimental se utilizara una placa para lámpara fluorescente que comercialmente se vende para el diseño experimental de 30x30 cm con un costo de \$23.44, sabiendo que necesitamos cortes de 5.4x6.4 cm en la lamina comercial nos abarcarían para 20 diseños.

Para el diseño del circuito impreso se retoman los valores de la posición del primer LED y el último LED y se obtiene la distancia que hay entre estos. La distancia que hay entre el primer LED y el ultimo LED es de 3.14 cm, comercialmente existe una tabla fenolica de 10x5 cm la cual tiene un costo de \$7 y las dimensiones que se darán en la tabla fenolica para nuestro diseño experimental son de 3.5x2 cm, la cual nos abarcarían 2 piezas.

Las dimensiones de los cortes en la lámina de acrílico de 1.8x1.2 metros y los diseños que saldrían en cada lámina se muestran en la Figura 4.35, para el diseño experimental, tratando de obtener el mayor número de diseños en la lámina se ajustan las dimensiones del diseño experimental.

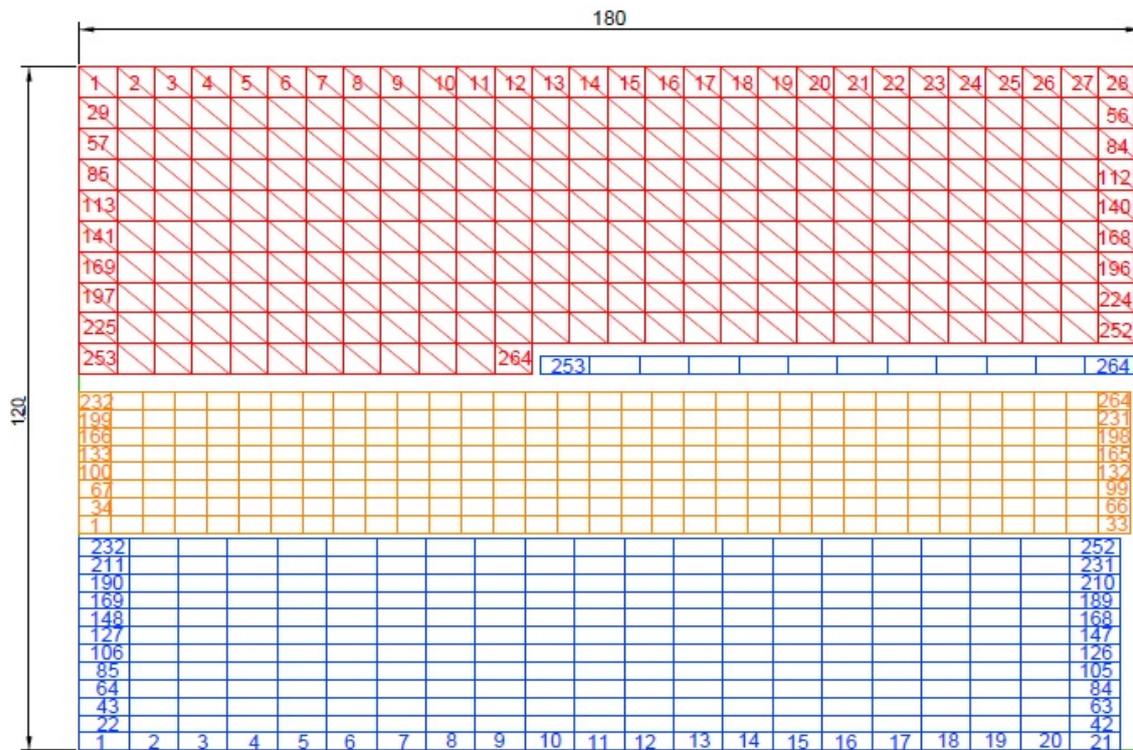


Figura 4.35: Cortes en la lámina de acrílico para el diseño experimental de 50 grados a un centímetro.

En cada lámina de acrílico saldrán 264 diseños experimentales, por lo tanto el costo de materiales es expone en el Cuadro 4.24.

Cuadro 4.24: Evaluación económica por diseño experimental.

Material	Precio	piezas	Costo
LED	\$9.00	4	\$36.00
Acrílico	\$771.00	1	\$2.92
Placa para lámpara fluorescente	\$23.44	1	\$1.18
Tabla fenolica	\$7	1	\$3.50
Cloruro férrico	\$26.00	1	\$26.00
Papel aluminio	\$10.00	1	\$10.00
Total			\$79.60

5. Diseño de 45 grados a un centímetro

En la Figura 4.36 se muestran las medidas del diseño experimental cuando la superficie de refracción se encuentra a 45 grados de inclinación y el primer LED está colocado a un centímetro de dicha superficie.

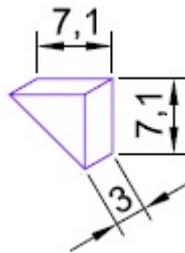


Figura 4.36: Vista del diseño experimental de 45 grados a un centímetro con una inclinación de 30 grados (las medidas están en cm).

En el diseño experimental se utilizara una placa para lámpara fluorescente que comercialmente se vende para el diseño experimental de 30x30 cm con un costo de \$23.44, sabiendo que necesitamos cortes de 3x7.1 cm en la lamina comercial nos abarcarían para 40 diseños.

Para el diseño del circuito impreso se retoman los valores de la posición del primer LED y el último LED y se obtiene la distancia que hay entre estos. La distancia que hay entre el primer LED y el ultimo LED es de 4.19 cm, comercialmente existe una tabla fenolica de 5x5 cm la cual tiene un costo de \$5 y las dimensiones que se darán en la tabla fenolica para nuestro diseño experimental son de 4.5x1.5 cm, la cual nos abarcarían 3 piezas.

Las dimensiones de los cortes en la lámina de acrílico y los diseños que saldrían en cada lámina se muestran en la Figura 4.37, para el diseño experimental, tratando de obtener el mayor número de diseños en la lámina se ajustan las dimensiones del diseño experimental.

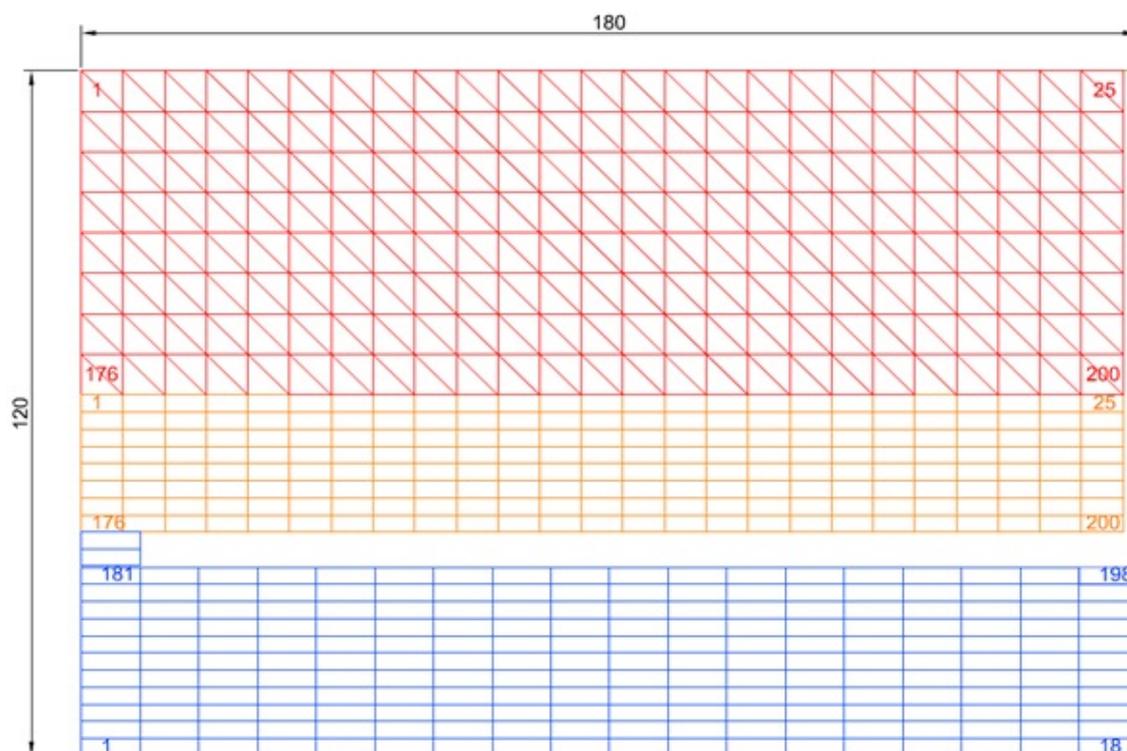


Figura 4.37: Cortes en la lámina de acrílico para el diseño experimental de 45 grados a un centímetro.

En cada lámina de acrílico saldrán 200 diseños experimentales, por lo tanto el costo de materiales se expone en el Cuadro 4.25.

Cuadro 4.25: Evaluación económica por diseño experimental.

Material	Precio	piezas	Costo
LED	\$9.00	4	\$36.00
Acrílico	\$771.00	1	\$3.9
Placa para lámpara fluorescente	\$23.44	1	\$0.59
Tabla fenolica	\$5	1	\$1.67
Cloruro férrico	\$26.00	1	\$26.00
Papel aluminio	\$10.00	1	\$10.00
Total			\$78.16

6. Diseño de 40 grados a un centímetro

En la Figura 4.38 se muestran las medidas del diseño experimental cuando la superficie de refracción se encuentra a 45 grados de inclinación y el primer LED está colocado a medio centímetro de dicha superficie.

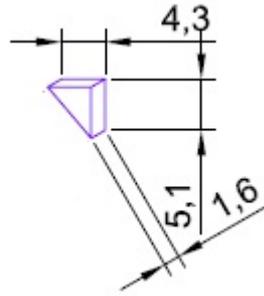


Figura 4.38: Vista del diseño experimental de 40 grados a un centímetro con una inclinación de 30 grados (las medidas están en cm).

En el diseño experimental se utilizara una placa para lámpara fluorescente que comercialmente se vende para el diseño experimental de 30x30 cm con un costo de \$23.44, sabiendo que necesitamos cortes de 1.6x5.1 cm en la lamina comercial nos abarcarían para 90 diseños.

Para el diseño del circuito impreso se retoman los valores de la posición del primer LED y el último LED y se obtiene la distancia que hay entre estos. La distancia que hay entre el primer LED y el ultimo LED es de 2.95 cm, comercialmente existe una tabla fenolica de 5x5 cm la cual tiene un costo de \$5 y las dimensiones que se darán en la tabla fenolica para nuestro diseño experimental son de 3.2x1 cm, la cual nos abarcarían 5 piezas.

Las dimensiones de los cortes en la lámina de acrílico y los diseños que saldrían en cada lámina se muestran en la Figura 4.39, para el diseño experimental, tratando de obtener el mayor número de diseños en la lámina se ajustan las dimensiones del diseño experimental.

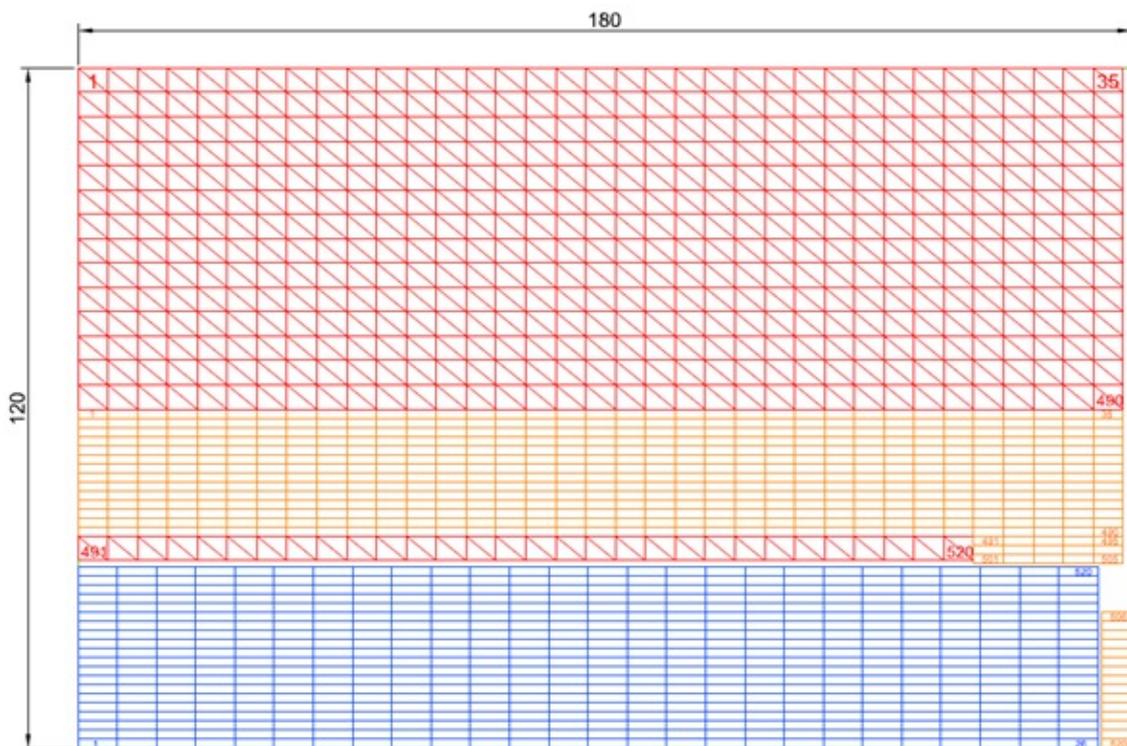


Figura 4.39: Cortes en la lámina de acrílico para el diseño experimental de 40 grados a un centímetro.

En cada lámina de acrílico saldrán 520 diseños experimentales, por lo tanto el costo de materiales es expone en el Cuadro 4.26.

Cuadro 4.26: Evaluación económica por diseño experimental.

Material	Precio	piezas	Costo
LED	\$9.00	4	\$36.00
Acrílico	\$771.00	1	\$1.50
Placa para lámpara fluorescente	\$23.44	1	\$0.26
Tabla fenolica	\$5	1	\$5.00
Cloruro férrico	\$26.00	1	\$26.00
Papel aluminio	\$10.00	1	\$10.00
Total			\$78.76

5 Conclusiones y Trabajo a Futuro.

En el proyecto de investigación se puede concluir en:

1. Entre mayor sea la distancia de la posición del primer LED con respecto a la superficie de refractora, mayor serán las dimensiones del diseño experimental y entre menor sea la distancia de la posición de nuestro diseño experimental aunque no es homogéneo, se puede implementar según el Cuadro 3.2 en un área de trabajo de exteriores generales como: patios y estacionamientos en el cual se tiene que cubrir una iluminación mínima de 20 lx. También se implementa en interiores como son: pasillos, salas de espera, salas de descansó, entre otros, con un mínimo de iluminación de 100 lx. Según las necesidades que se requieran, nuestro diseño experimental se puede implementar para alcanzar los niveles de iluminación necesarios. el primer LED con respecto a la superficie de refractora, menor serán las dimensiones del diseño experimental.
2. Entre mayor sea el ángulo de inclinación de de la superficie refractora, mayor serán las dimensiones del diseño del diseño experimental y entre menor sea el ángulo de inclinación de la superficie refractora, menor serán las dimensiones del diseño experimental.
3. Según el Cuadro 4.15 y el Cuadro 4.16, los diseños experimentales no homogenizan la luz blanca del diodo emisor de luz (LED).
4. La iluminancia será mayor en los diseños experimentales que presenten dimensiones pequeñas, como es el caso de los diseños que tienen un ángulo de inclinación de la superficie refractora de 45 grados y 50 grados con una distancia de colocación del primer LED de 10 mm y 5 mm respectivamente, esto se muestra en la Figura 4.23 y la Figura 4.24. Y entre mayores dimensiones presente el diseño experimental, menor iluminancia reflejara el diseño experimental como se muestra en la Figura 4.24, los diseños con un ángulo de inclinación de la superficie refractora de 60 grados y 50 grados con una distancia de posición del primer LED de 10 mm para cada diseño, son los diseños con menor iluminancia.

Por último el proyecto de investigación consistió en colimar los rayos refractados del LED con un ángulo de apertura de 30 grados. Comercialmente en los LED's, existen diferentes ángulos de apertura, como lo es de 25, 30, 40, 50, 60 y 120 grados. Si se colocara otro tipo de LED a nuestro diseño experimental los resultados obtenidos cambiarían y los rayos del LED no estarían colimados, por lo tanto las dimensiones del proyecto experimental serian diferentes. Cabe mencionar que la superficie de reflexión fue a 30 grados de inclinación, se pretende realizar pruebas con un ángulo de inclinación de la superficie de refracción con ángulos mayores de 30 grados y ángulos menores a 30 grados. En el diseño experimental se utilizó un LED ultrabrillante, como propuesta a futuro se utilizara un LED RGB, presentando los cambios obtenidos con el LED ultrabrillante. Se diseñó el sistema de iluminación en una superficie lineal, esto se debe a que la superficie de refracción es plana, si se hubiera utilizado una superficie cóncava o convexa, la superficie podría ser parabólico o esférico. Este es un punto interesante en el cual se pueden hacer estudios para observar el comportamiento de los rayos del LED y su eficiencia en iluminación. Otro punto interesante es manejar el mismo diseño experimental pero utilizando un arreglo matricial en los LED de tal manera que los rayos de LED estén colimados, esto es con la intención de aprovechar mejor este dispositivo electrónico.

4.5.1.1. Control de un LED con PWM

PWM proviene de las siglas en ingles de “Pulse Width Modulation” o modulación por ancho de pulso, es habitualmente usado de controlar la cantidad de energía aplicada a una carga en electrónica digital. Su aplicación es extensa: para el control de motores, iluminación LED, sensores, etc.

Esta acción tiene en cuenta la modificación del proceso de trabajo de una señal de tipo periódico (Generalmente de tipo cuadrada). El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente en la Ecuación 4.68:

$$D = \frac{\tau}{T} \times 100 \tag{4.68}$$

En donde:

D es el ciclo de trabajo

τ es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)

T es el período de la función

En la Figura 4.40 se puede observar el ciclo de trabajo del PWM en un 10, 30, 50 y 90 %.

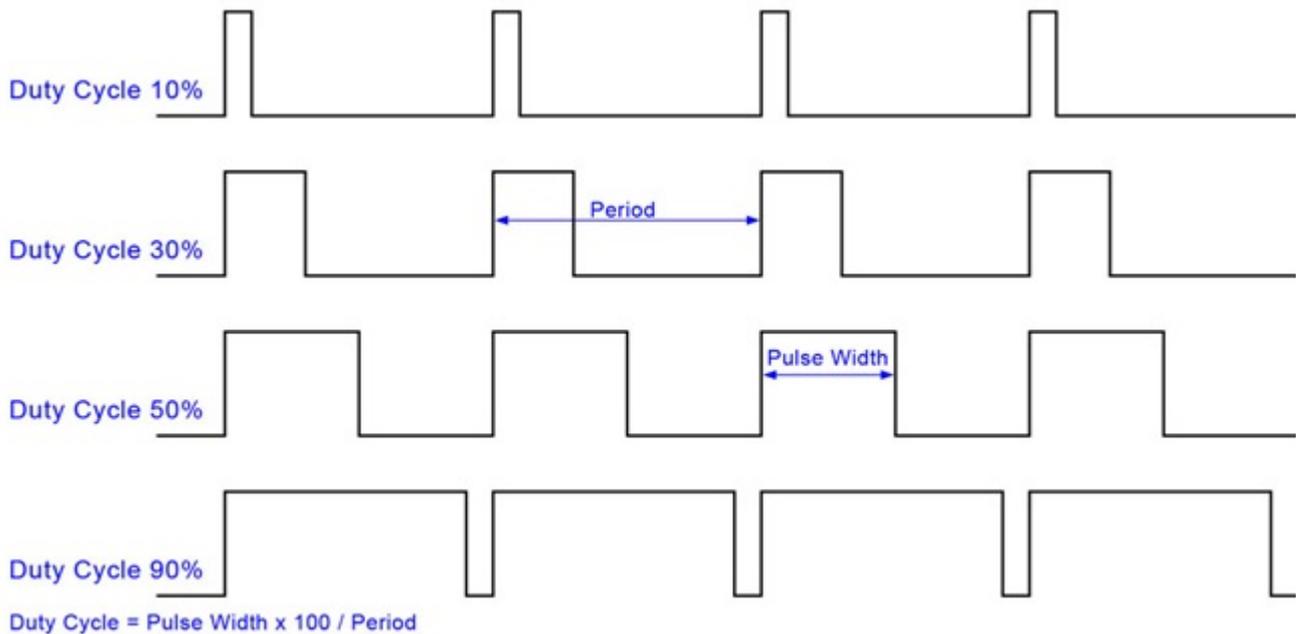


Figura 4.40: Ciclo de trabajo del PWM

Se implemento un controlador para un LED utilizando la técnica del PWM, se utilizo un microcontrolador de Microchip, el PIC16877a. Vease anexo 3. Mediante 2 canales del ADC se leera el voltaje de 2 potenciómetros que varían el ciclo de trabajo y el periodo del PWM. El diagrama esquemático se muestra en la Figura 4.41

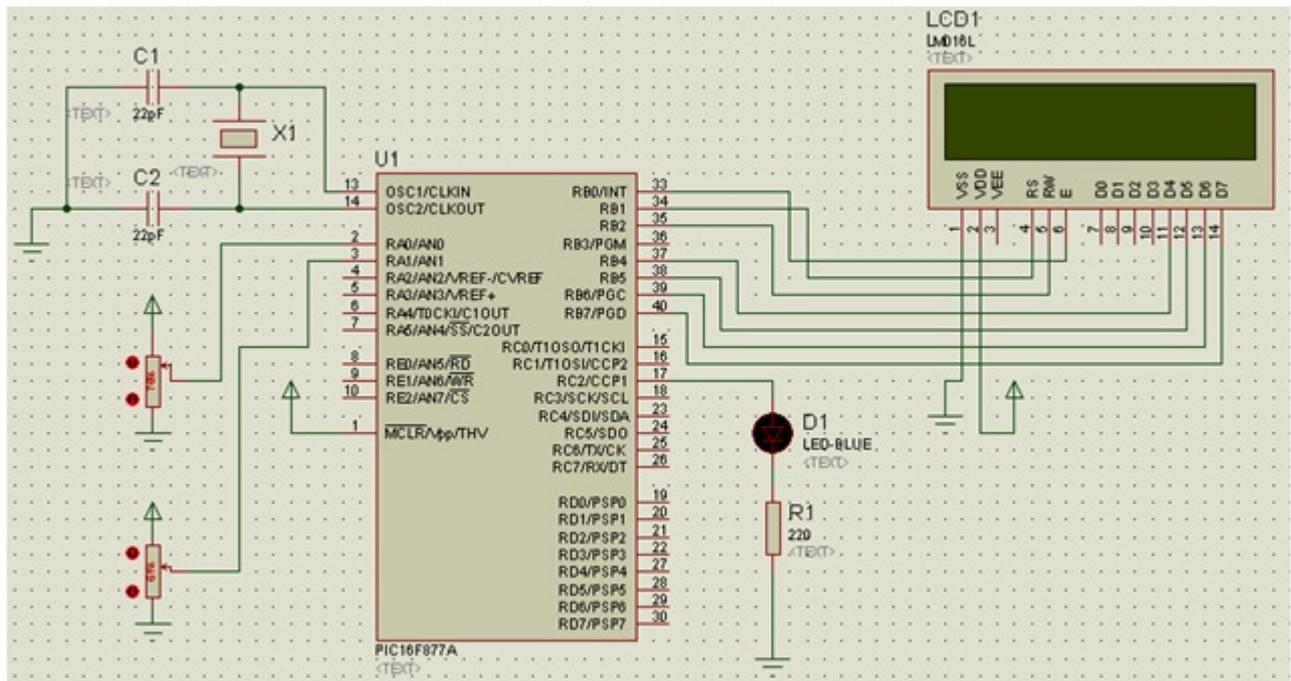


Figura 4.41: Diagrama esquemático del PWM

En la Figura 4.42 se muestra el diagrama esquemático del PWM midiendo la frecuencia.

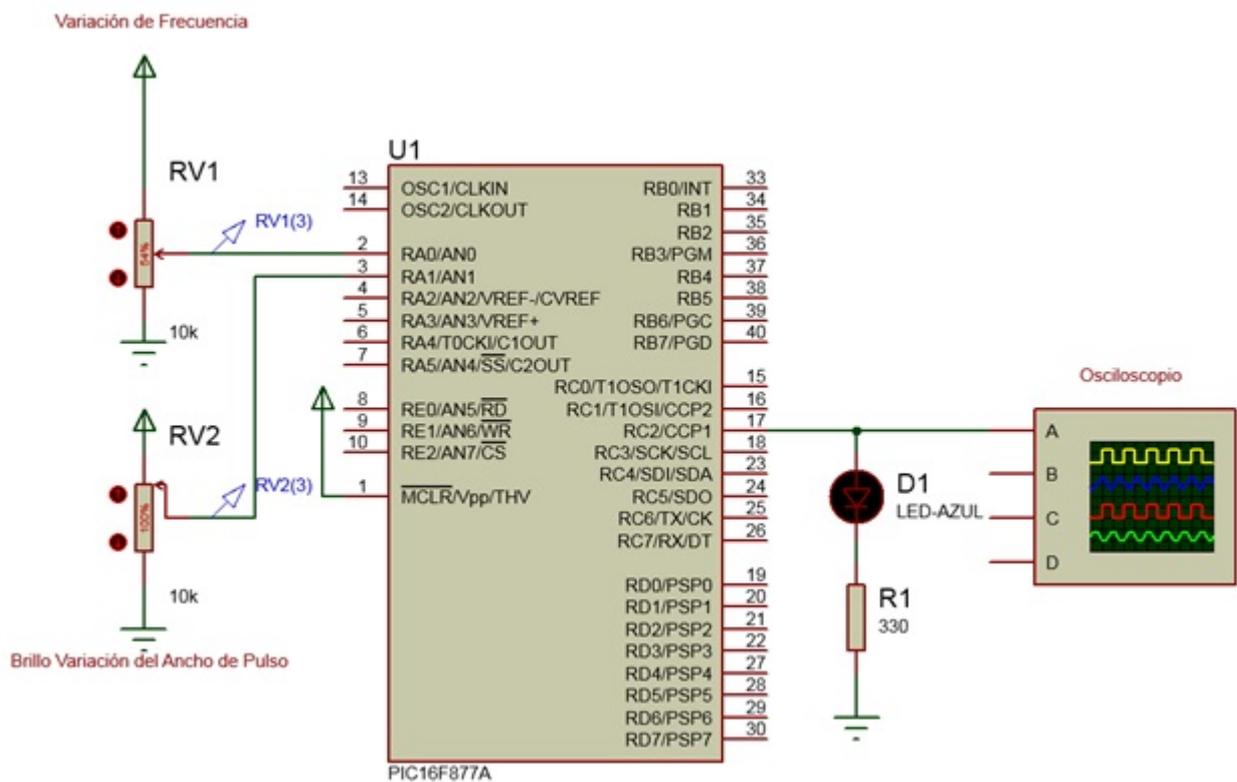


Figura 4.42: Diagrama esquemático del ciclo de trabajo del PWM.

El Módulo PWM del PIC 16F877 tiene una resolución máxima de 10 bit y su salida se toma del pin RC2, por lo cual debe estar configurado como salida en el registro Tris C.

El Periodo del Modulo PWM es configurado dando un valor al registro PR2. Este periodo puede ser calculado usando la Ecuación 4.69:

$$PWM_{PERIODO} = [(PR2) + 1] \bullet 4 \bullet TOSC \bullet PRESCALER_{TIMER2} \quad (4.69)$$

Como ya es sabido la frecuencia está determinada por 1/Periodo PWM. Cuando el valor del Timer 2 alcanza el valor de PR2, los siguientes eventos ocurren en el siguiente ciclo de tiempo:

- TMR2 es limpiado
- El pin CCP1 es puesto a 1
- El Periodo de trabajo del PWM es cambiado de CCPR1H a CCPR1L

El ciclo de trabajo del PWM es determinado escribiendo al registro CCPR1L y CCP1CON<5:4> (10 bits de resolución).

El ciclo de trabajo se obtiene usando la Ecuación 4.70:

$$TiempodeTrabajoPWM = (CCPR1L : CCP1CON < 5 : 4 >) \bullet TOSC \bullet (TMR2PrescaleValue) \quad (4.70)$$

Para modificar el ciclo de trabajo, en cualquier momento se puede escribir a CCPR1L y CCP1CON<5:4>, pero estos valores no serán tomados en consideración hasta que el Timer alcance al PR2 y reinicie su operación tomando en cuenta los nuevos valores.

$$Tiempodetrabajo = \frac{\%Ciclodetrabajo}{Fpwm} \quad (4.71)$$

Para calcular la máxima resolución del PWM a determinada frecuencia usamos la Ecuación 4.72:

$$Resolucion = \frac{\log\left(\frac{FOSC}{F_{PWM}}\right)}{\log(2)} bits \quad (4.72)$$

Pasos para la configuración del Modulo PWM del PIC 16F877A:

1. Configurar el Periodo dando un valor al registro PR2.
2. Configurar el Ciclo de Trabajo escribiendo en: CCPR1L:CCP1CON<5:4>.
3. Limpiar el Tris C, 2 para asignar la salida del modulo (CCP1).
4. Asignar el valor del Prescale del Timer 2 (T2CON).
5. Configurar el modulo CCP1 para operación PWM.

En el Cuadro 4.27 se muestra la configuración de Frecuencia para el PWM en el microcontrolador.

Cuadro 4.27: Frecuencia del PWM.

PWM Frequency	1.22 KHz.	4.88 KHz.	19.53 KHz.	78.12.KHz	156.3 KHz.	208.3 KHz.
Timer Prescaler (1, 4, 16)	16	4	1	1	1	1
PR2 Value	0xFF	0xFF	0xFF	0x3F	0x1F	0x17
Maximum Resolution (bits)	10	10	10	8	7	6.5

En nuestro caso el periodo de nuestro PWM variara de 2HZ a 8Khz, según la Ecuación 4.73:

$$PERIODO_{PWM} = \frac{f_{osc}}{(PR2 + 1) \bullet Valorpreescaler \bullet 4} \quad (4.73)$$

Ya que PR2, variara de 0 a 255, según la lectura del potenciómetro. El valor de preescaler es de 16, y la frecuencia del oscilador que se está utilizando es de 32.768Khz. Vease anexo 4.

El circuito y código se simulo antes de implementarse, en el simulador Isis de Proteus, se capturaron las siguientes graficas:

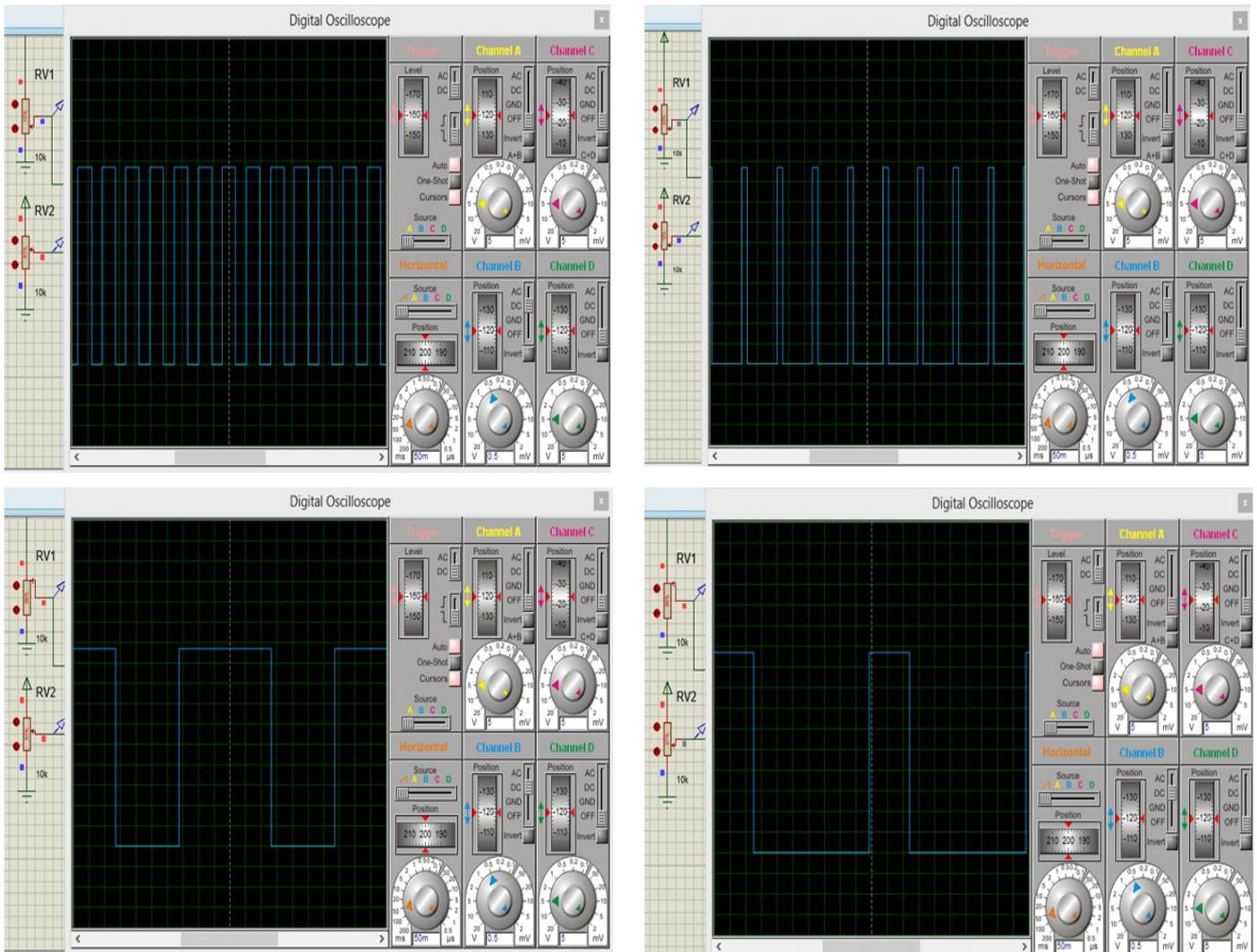


Figura 4.43: Comportamiento del Ciclo de trabajo del PWM.

En la Figura 5.1 se muestran las graficas observandose que a medida que aumenta el ciclo de trabajo, deja de importar el periodo de la señal, ya que al estar más tiempo encendido que apagado, el ojo humano solo puede observar el tiempo encendido del LED.

ANEXO 1

LED ultrabrillante de 3 mm, color blanco



Precio \$9 MXN

Comprar 

Precio Medio Mayoreo: \$6.10*

Precio Mayoreo: \$4.80*

*Precios más IVA

*Consulta las escalas de precios en tu tienda Steren, haz [clic aquí](#)

Checar existencias

Producto Disponible

Modelo: 3/BLANCO ULTRA

Características técnicas

- Rangos Máximos ($T_a = 25^\circ \text{C}$)
- Voltaje: 2.4 Vcc
- Intensidad luminosa: 1300 a 1600 mcd
- Corriente: 10 mA
- Angulo de iluminación: 30° respecto a la horizontal
- Diámetro: 3 mm
- Largo: 5,25 mm
- Consumo nominal: (no aplica)
- Consumo en espera: (no aplica)
- Color: blanco Peso: 3.2 grm

Características	Símbolo	Valores	Unidad
Corriente continua DC	IF	20	mA
Voltaje inverso	VR	5	V
Potencia de disipación	PD	80	mW
Rango temperatura de operación	Topr	-40 ~ +85	$^\circ \text{C}$
Rango temperatura de almacenamiento	Tstg	-40 ~ +85	$^\circ \text{C}$

Características	Símbolo	Condición de prueba	Mín.	Tipo	Máx.	Unidad
Voltaje continuo	VF	IF=20mA	-	3.3	3.8	V
Corriente inversa	IR	VR=5V	-	50	-	mA
Intensidad luminosa	Iv	IF=20mA	3800	4000	-	mcd
Longitud de onda dominante	λ_d	IF=10mA	-	-	-	nm
Angulo de visión	-	-	-	30	-	grados

LED ultrabrillante de 5 mm, color blanco



Precio \$12 MXN

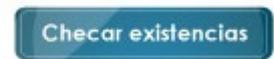


Precio Medio Mayoreo: \$6.20*

Precio Mayoreo: \$4.70*

*Precios más IVA

*Consulta las escalas de precios en tu tienda Steren, haz [clic aquí](#)



Producto Disponible

Modelo: 5/BLANCO ULTRA

Características técnicas

- Rangos Máximos ($T_a = 25^\circ \text{C}$)
- Voltaje: 3,5 a 4 Vcc
- Intensidad luminosa: 600 a 800 mcd
- Corriente: 20 mA
- Angulo de iluminación: 30° respecto a la horizontal
- Diámetro: 5 mm
- Largo: 8,6 mm
- Consumo nominal: (no aplica)
- Consumo en espera: (no aplica)
- Color: transparente Peso: 1.7 gm

Características	Símbolo	Valores	Unidad
Corriente continua DC	IF	20	mA
Voltaje inverso	VR	5	V
Potencia de disipación	PD	120	mW
Rango temperatura de operación	Topr	-35 ~ +85	$^\circ \text{C}$
Rango temperatura de almacenamiento	Tstg	-40 ~ +85	$^\circ \text{C}$

Características	Símbolo	Condición de prueba	Mín.	Tipo	Máx.	Unidad
Voltaje continuo	VF	IF=20mA	-	3.35	4.1	V
Corriente inversa	IR	VR=5V	-	100	-	mA
Intensidad luminosa	Iv	IF=20mA	600	800	-	mcd
Longitud de onda dominante	λ_d	IF=10mA	-	700	-	nm
Angulo de visión	-	-	-	30	-	grados

LED ultrabrillante de 10 mm luz blanca



Precio \$9 MXN



Precio Medio Mayoreo: \$5.40*

Precio Mayoreo: \$4.10*

*Precios más IVA

*Consulta las escalas de precios en tu tienda Steren, haz [clic aquí](#)



Producto Disponible

Modelo: 10/BLANCO ULTRA

LED ultrabrillante de 10 mm con luz blanca.

Características técnicas

- Rangos Máximos ($T_a = 25^\circ \text{C}$)
- Voltaje: 3.3 Vcc
- 10 mm de diámetro
- 13,5 mm de largo
- Intensidad luminosa de 3300 a 3700 mcd
- Angulo de iluminación de 40 grados.
- Consumo nominal: (no aplica)
- Consumo en espera: (no aplica)
- Color: transparente Peso: 3.7 gm

Características	Símbolo	Valores	Unidad
Corriente continua DC	IF	20	mA
Voltaje inverso	VR	5	V
Potencia de disipación	PD	80	mW
Rango temperatura de operación	Topr	-40 ~ +85	° C
Rango temperatura de almacenamiento	Tstg	-40 ~ +85	° C

Características	Símbolo	Condición de prueba	Mín.	Tipo	Máx.	Unidad
Voltaje continuo	VF	IF=20mA	-	3.3	3.5	V
Corriente inversa	IR	VR=5V	-	-	50	mA
Intensidad luminosa	Iv	IF=20mA	3500	3800	-	mcd
Longitud de onda dominante	λ_d	IF=10mA	-	-	-	nm
Angulo de visión	-	-	-	40	-	grados

ANEXO 2

Anexo 2

Anexo 3

Anexo 4

CODIGO DEL MICROCONTROLADOR:

```
#include<16F877a.h>
#device adc=10
#use delay(clock=32.768KHZ)
#fuses xt,NOWDT
#use standard_IO(C)
int16 lectura_adc1,lectura_adc2;
int8 PR2; int8 duty;
int16 porcentaje_duty;
void main(){
setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,255,1);
setup_ccp1(CCP_PWM);
set_pwm1_duty(0);
setup_adc_ports(AN0_AN1_AN3);
setup_adc(adc_clock_INTERNAL);
while(1){
set_adc_channel(0);
delay_ms(1);
lectura_adc1=read_adc();
if (lectura_adc1<=4){
pr2=1; }
else{pr2=lectura_adc1/4;}
set_adc_channel(1);
delay_ms(1);
lectura_adc2=read_adc();
porcentaje_duty=(lectura_adc2*0.0977);
duty=(porcentaje_duty*pr2)/100;
setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, pr2, 1);
set_pwm1_duty(duty); delay_ms(5);
}
}
```


ANEXO 3



PIC16F87XA

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory, Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM), Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during Sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with external \overline{RD} , \overline{WR} and \overline{CS} controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module
 - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

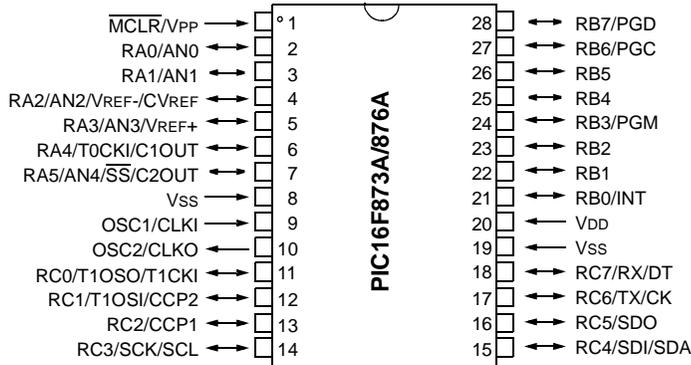
- Low-power, high-speed Flash/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

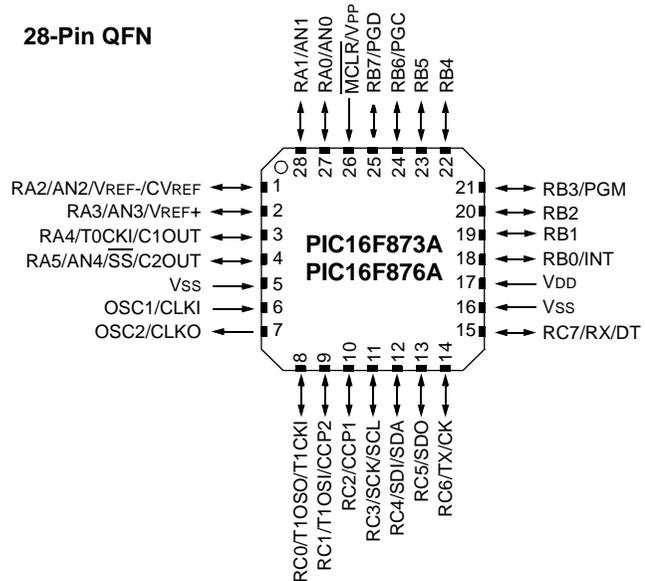
PIC16F87XA

Pin Diagrams

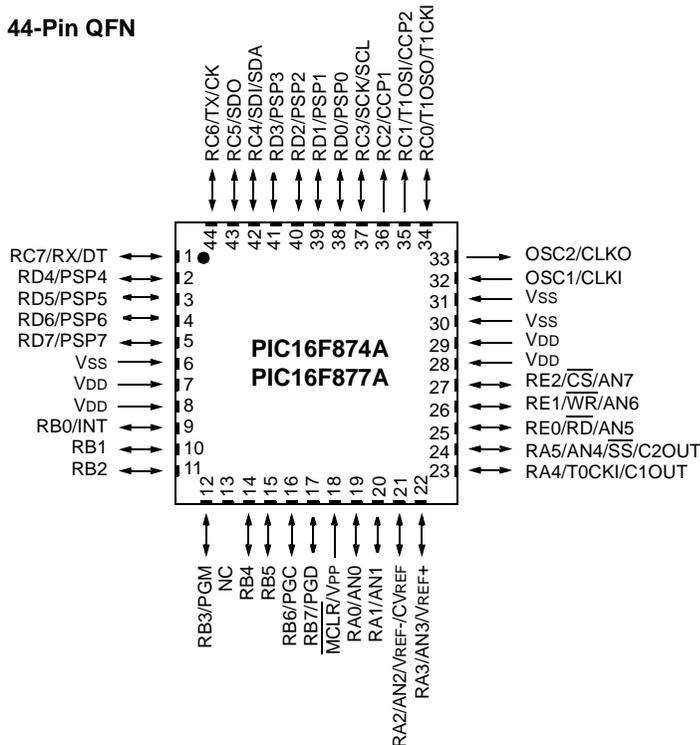
28-Pin PDIP, SOIC, SSOP



28-Pin QFN



44-Pin QFN



PIC16F87XA

FIGURE 1-2: PIC16F874A/877A BLOCK DIAGRAM

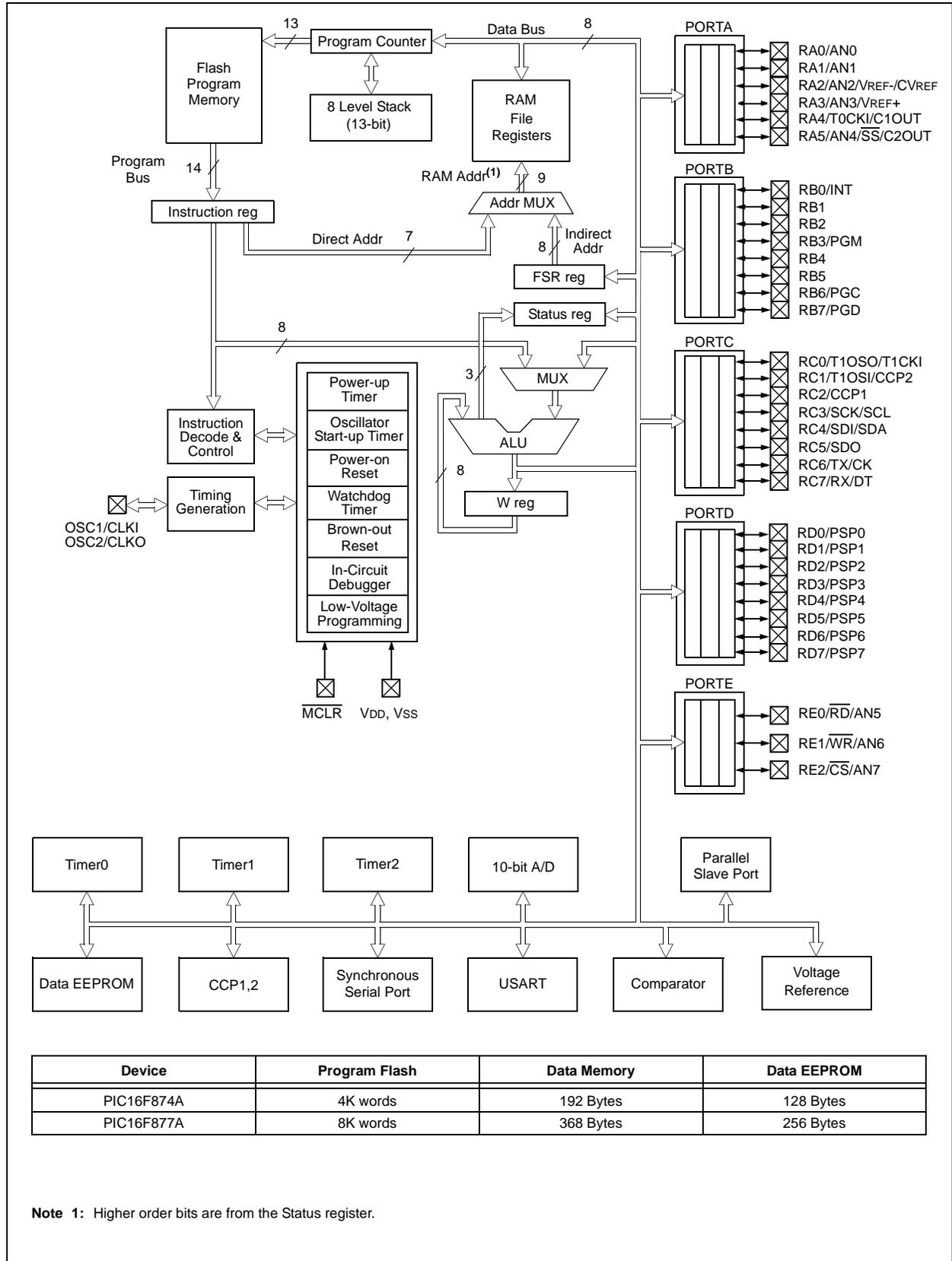


TABLE 1-3: PIC16F874A/877A PINOUT DESCRIPTION (CONTINUED)

Pin Name	PDIP Pin#	PLCC Pin#	TQFP Pin#	QFN Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
RB0/INT RB0 INT	33	36	8	9	I/O I	TTL/ST ⁽¹⁾	PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-up on all inputs. Digital I/O. External interrupt.
RB1	34	37	9	10	I/O	TTL	Digital I/O.
RB2	35	38	10	11	I/O	TTL	Digital I/O.
RB3/PGM RB3 PGM	36	39	11	12	I/O I	TTL	Digital I/O. Low-voltage ICSP programming enable pin.
RB4	37	41	14	14	I/O	TTL	Digital I/O.
RB5	38	42	15	15	I/O	TTL	Digital I/O.
RB6/PGC RB6 PGC	39	43	16	16	I/O I	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O. In-circuit debugger and ICSP programming clock.
RB7/PGD RB7 PGD	40	44	17	17	I/O I/O	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O. In-circuit debugger and ICSP programming data.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
 — = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

- Note 1:** This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.
Note 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.
Note 3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC Oscillator mode and a CMOS input otherwise.

PIC16F87XA

TABLE 1-3: PIC16F874A/877A PINOUT DESCRIPTION (CONTINUED)

Pin Name	PDIP Pin#	PLCC Pin#	TQFP Pin#	QFN Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
RC0/T1OSO/T1CKI RC0 T1OSO T1CKI	15	16	32	34	I/O O I	ST	PORTC is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Timer1 oscillator output. Timer1 external clock input.
RC1/T1OSI/CCP2 RC1 T1OSI CCP2	16	18	35	35	I/O I I/O	ST	Digital I/O. Timer1 oscillator input. Capture2 input, Compare2 output, PWM2 output.
RC2/CCP1 RC2 CCP1	17	19	36	36	I/O I/O	ST	Digital I/O. Capture1 input, Compare1 output, PWM1 output.
RC3/SCK/SCL RC3 SCK SCL	18	20	37	37	I/O I/O I/O	ST	Digital I/O. Synchronous serial clock input/output for SPI mode. Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RC4/SDI/SDA RC4 SDI SDA	23	25	42	42	I/O I I/O	ST	Digital I/O. SPI data in. I ² C data I/O.
RC5/SDO RC5 SDO	24	26	43	43	I/O O	ST	Digital I/O. SPI data out.
RC6/TX/CK RC6 TX CK	25	27	44	44	I/O O I/O	ST	Digital I/O. USART asynchronous transmit. USART1 synchronous clock.
RC7/RX/DT RC7 RX DT	26	29	1	1	I/O I I/O	ST	Digital I/O. USART asynchronous receive. USART synchronous data.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
 — = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

- Note 1:** This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.
2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.
3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC Oscillator mode and a CMOS input otherwise.

TABLE 1-3: PIC16F874A/877A PINOUT DESCRIPTION (CONTINUED)

Pin Name	PDIP Pin#	PLCC Pin#	TQFP Pin#	QFN Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
RD0/PSP0 RD0 PSP0	19	21	38	38	I/O I/O	ST/TTL ⁽³⁾	PORTD is a bidirectional I/O port or Parallel Slave Port when interfacing to a microprocessor bus. Digital I/O. Parallel Slave Port data.
RD1/PSP1 RD1 PSP1	20	22	39	39	I/O I/O	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Parallel Slave Port data.
RD2/PSP2 RD2 PSP2	21	23	40	40	I/O I/O	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Parallel Slave Port data.
RD3/PSP3 RD3 PSP3	22	24	41	41	I/O I/O	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Parallel Slave Port data.
RD4/PSP4 RD4 PSP4	27	30	2	2	I/O I/O	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Parallel Slave Port data.
RD5/PSP5 RD5 PSP5	28	31	3	3	I/O I/O	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Parallel Slave Port data.
RD6/PSP6 RD6 PSP6	29	32	4	4	I/O I/O	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Parallel Slave Port data.
RD7/PSP7 RD7 PSP7	30	33	5	5	I/O I/O	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Parallel Slave Port data.
RE0/RD/AN5 RE0 RD AN5	8	9	25	25	I/O I I	ST/TTL ⁽³⁾	PORTE is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Read control for Parallel Slave Port. Analog input 5.
RE1/WR/AN6 RE1 WR AN6	9	10	26	26	I/O I I	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Write control for Parallel Slave Port. Analog input 6.
RE2/CS/AN7 RE2 CS AN7	10	11	27	27	I/O I I	ST/TTL ⁽³⁾	Digital I/O. Chip select control for Parallel Slave Port. Analog input 7.
Vss	12, 31	13, 34	6, 29	6, 30, 31	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	11, 32	12, 35	7, 28	7, 8, 28, 29	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
NC	—	1, 17, 28, 40	12, 13, 33, 34	13	—	—	These pins are not internally connected. These pins should be left unconnected.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
 — = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

- Note** 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.
 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.
 3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC Oscillator mode and a CMOS input otherwise.

2.0 MEMORY ORGANIZATION

There are three memory blocks in each of the PIC16F87XA devices. The program memory and data memory have separate buses so that concurrent access can occur and is detailed in this section. The EEPROM data memory block is detailed in **Section 3.0 “Data EEPROM and Flash Program Memory”**.

Additional information on device memory may be found in the PICmicro® Mid-Range MCU Family Reference Manual (DS33023).

2.1 Program Memory Organization

The PIC16F87XA devices have a 13-bit program counter capable of addressing an 8K word x 14 bit program memory space. The PIC16F876A/877A devices have 8K words x 14 bits of Flash program memory, while PIC16F873A/874A devices have 4K words x 14 bits. Accessing a location above the physically implemented address will cause a wraparound.

The Reset vector is at 0000h and the interrupt vector is at 0004h.

FIGURE 2-1: PIC16F876A/877A PROGRAM MEMORY MAP AND STACK

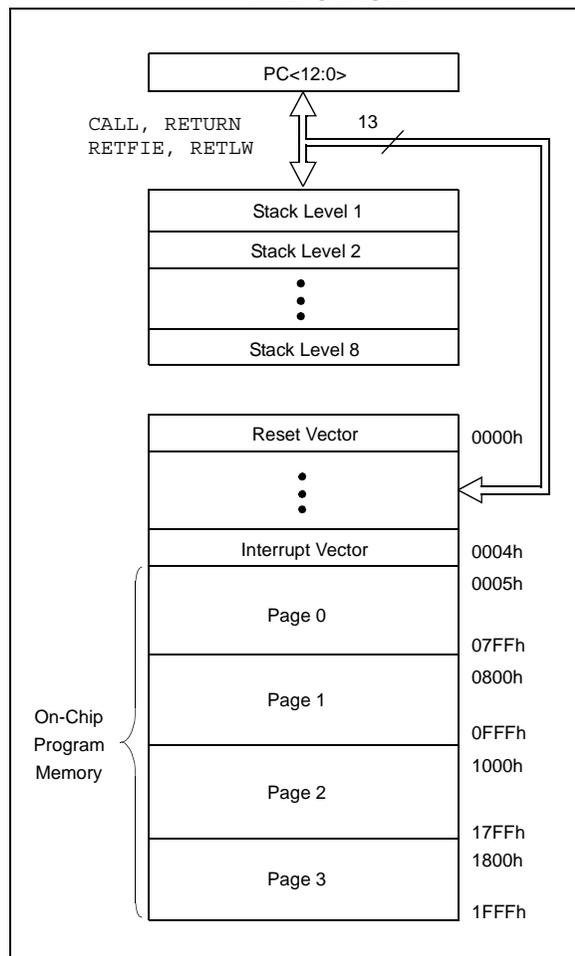
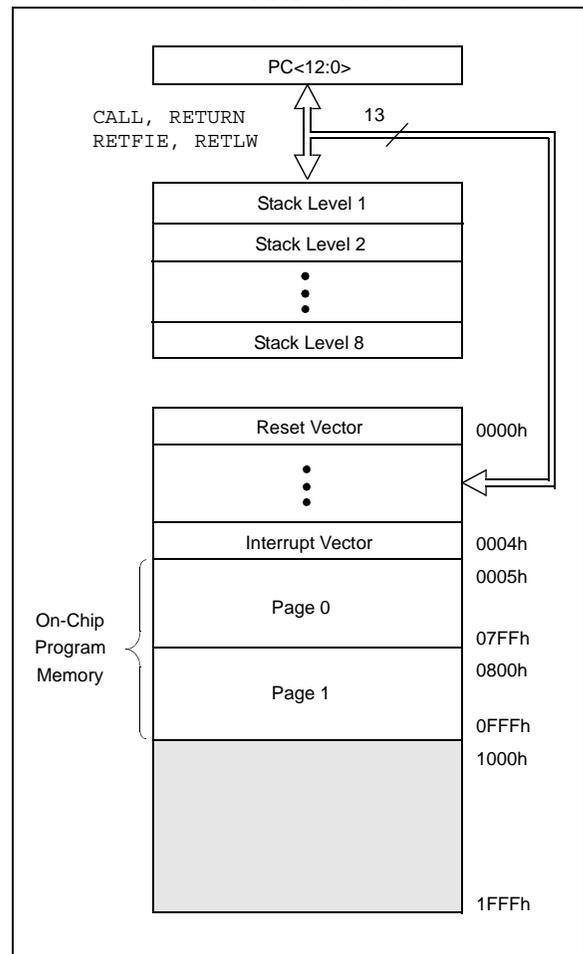


FIGURE 2-2: PIC16F873A/874A PROGRAM MEMORY MAP AND STACK



PIC16F87XA

2.2 Data Memory Organization

The data memory is partitioned into multiple banks which contain the General Purpose Registers and the Special Function Registers. Bits RP1 (Status<6>) and RP0 (Status<5>) are the bank select bits.

RP1:RP0	Bank
00	0
01	1
10	2
11	3

Each bank extends up to 7Fh (128 bytes). The lower locations of each bank are reserved for the Special Function Registers. Above the Special Function Registers are General Purpose Registers, implemented as static RAM. All implemented banks contain Special Function Registers. Some frequently used Special Function Registers from one bank may be mirrored in another bank for code reduction and quicker access.

Note: The EEPROM data memory description can be found in **Section 3.0 “Data EEPROM and Flash Program Memory”** of this data sheet.

2.2.1 GENERAL PURPOSE REGISTER FILE

The register file can be accessed either directly, or indirectly, through the File Select Register (FSR).

FIGURE 2-3: PIC16F876A/877A REGISTER FILE MAP

File Address		File Address		File Address		File Address	
Indirect addr. ^(*)	00h	Indirect addr. ^(*)	80h	Indirect addr. ^(*)	100h	Indirect addr. ^(*)	180h
TMR0	01h	OPTION_REG	81h	TMR0	101h	OPTION_REG	181h
PCL	02h	PCL	82h	PCL	102h	PCL	182h
STATUS	03h	STATUS	83h	STATUS	103h	STATUS	183h
FSR	04h	FSR	84h	FSR	104h	FSR	184h
PORTA	05h	TRISA	85h		105h		185h
PORTB	06h	TRISB	86h	PORTB	106h	TRISB	186h
PORTC	07h	TRISC	87h		107h		187h
PORTD ⁽¹⁾	08h	TRISD ⁽¹⁾	88h		108h		188h
PORTE ⁽¹⁾	09h	TRISE ⁽¹⁾	89h		109h		189h
PCLATH	0Ah	PCLATH	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah
INTCON	0Bh	INTCON	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh
PIR1	0Ch	PIE1	8Ch	EEDATA	10Ch	EECON1	18Ch
PIR2	0Dh	PIE2	8Dh	EEADR	10Dh	EECON2	18Dh
TMR1L	0Eh	PCON	8Eh	EEDATH	10Eh	Reserved ⁽²⁾	18Eh
TMR1H	0Fh		8Fh	EEADRH	10Fh	Reserved ⁽²⁾	18Fh
T1CON	10h		90h		110h		190h
TMR2	11h	SSPCON2	91h		111h		191h
T2CON	12h	PR2	92h		112h		192h
SSPBUF	13h	SSPADD	93h		113h		193h
SSPCON	14h	SSPSTAT	94h		114h		194h
CCPR1L	15h		95h		115h		195h
CCPR1H	16h		96h		116h		196h
CCP1CON	17h		97h	General Purpose Register 16 Bytes	117h	General Purpose Register 16 Bytes	197h
RCSTA	18h	TXSTA	98h		118h		198h
TXREG	19h	SPBRG	99h		119h		199h
RCREG	1Ah		9Ah		11Ah		19Ah
CCPR2L	1Bh		9Bh		11Bh		19Bh
CCPR2H	1Ch	CMCON	9Ch		11Ch		19Ch
CCP2CON	1Dh	CVRCON	9Dh		11Dh		19Dh
ADRESH	1Eh	ADRESL	9Eh		11Eh		19Eh
ADCON0	1Fh	ADCON1	9Fh		11Fh		19Fh
	20h		A0h		120h		1A0h
General Purpose Register 96 Bytes		General Purpose Register 80 Bytes		General Purpose Register 80 Bytes		General Purpose Register 80 Bytes	
			EFh		16Fh		1EFh
		accesses 70h-7Fh	F0h	accesses 70h-7Fh	170h	accesses 70h - 7Fh	1F0h
	7Fh		FFh		17Fh		1FFh
Bank 0		Bank 1		Bank 2		Bank 3	

Unimplemented data memory locations, read as '0'.
 * Not a physical register.

Note 1: These registers are not implemented on the PIC16F876A.
Note 2: These registers are reserved; maintain these registers clear.

PIC16F87XA

FIGURE 2-4: PIC16F873A/874A REGISTER FILE MAP

File Address		File Address		File Address		File Address	
Indirect addr. ^(*)	00h	Indirect addr. ^(*)	80h	Indirect addr. ^(*)	100h	Indirect addr. ^(*)	180h
TMR0	01h	OPTION_REG	81h	TMR0	101h	OPTION_REG	181h
PCL	02h	PCL	82h	PCL	102h	PCL	182h
STATUS	03h	STATUS	83h	STATUS	103h	STATUS	183h
FSR	04h	FSR	84h	FSR	104h	FSR	184h
PORTA	05h	TRISA	85h		105h		185h
PORTB	06h	TRISB	86h	PORTB	106h	TRISB	186h
PORTC	07h	TRISC	87h		107h		187h
PORTD ⁽¹⁾	08h	TRISD ⁽¹⁾	88h		108h		188h
PORTE ⁽¹⁾	09h	TRISE ⁽¹⁾	89h		109h		189h
PCLATH	0Ah	PCLATH	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah
INTCON	0Bh	INTCON	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh
PIR1	0Ch	PIE1	8Ch	EEDATA	10Ch	EECON1	18Ch
PIR2	0Dh	PIE2	8Dh	EEADR	10Dh	EECON2	18Dh
TMR1L	0Eh	PCON	8Eh	EEDATH	10Eh	Reserved ⁽²⁾	18Eh
TMR1H	0Fh		8Fh	EEADRH	10Fh	Reserved ⁽²⁾	18Fh
T1CON	10h		90h		110h		190h
TMR2	11h	SSPCON2	91h				
T2CON	12h	PR2	92h				
SSPBUF	13h	SSPADD	93h				
SSPCON	14h	SSPSTAT	94h				
CCPR1L	15h		95h				
CCPR1H	16h		96h				
CCP1CON	17h		97h				
RCSTA	18h	TXSTA	98h				
TXREG	19h	SPBRG	99h				
RCREG	1Ah		9Ah				
CCPR2L	1Bh		9Bh				
CCPR2H	1Ch	CMCON	9Ch				
CCP2CON	1Dh	CVRCON	9Dh				
ADRESH	1Eh	ADRESL	9Eh				
ADCON0	1Fh	ADCON1	9Fh				
	20h		A0h		120h		1A0h
General Purpose Register 96 Bytes		General Purpose Register 96 Bytes		accesses 20h-7Fh		accesses A0h - FFh	
	7Fh		FFh		16Fh 170h		1EFh 1F0h
Bank 0		Bank 1		Bank 2		Bank 3	
					17Fh		1FFh

 Unimplemented data memory locations, read as '0'.
 * Not a physical register.

Note 1: These registers are not implemented on the PIC16F873A.
Note 2: These registers are reserved; maintain these registers clear.

PIC16F87XA

2.2.2 SPECIAL FUNCTION REGISTERS

The Special Function Registers are registers used by the CPU and peripheral modules for controlling the desired operation of the device. These registers are implemented as static RAM. A list of these registers is given in Table 2-1.

The Special Function Registers can be classified into two sets: core (CPU) and peripheral. Those registers associated with the core functions are described in detail in this section. Those related to the operation of the peripheral features are described in detail in the peripheral features section.

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Details on page:	
Bank 0												
00h ⁽³⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	31, 150	
01h	TMR0	Timer0 Module Register								xxxx xxxx	55, 150	
02h ⁽³⁾	PCL	Program Counter (PC) Least Significant Byte								0000 0000	30, 150	
03h ⁽³⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C	0001 1xxx	22, 150	
04h ⁽³⁾	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer								xxxx xxxx	31, 150	
05h	PORTA	—	—	PORTA Data Latch when written: PORTA pins when read							--0x 0000	43, 150
06h	PORTB	PORTB Data Latch when written: PORTB pins when read								xxxx xxxx	45, 150	
07h	PORTC	PORTC Data Latch when written: PORTC pins when read								xxxx xxxx	47, 150	
08h ⁽⁴⁾	PORTD	PORTD Data Latch when written: PORTD pins when read								xxxx xxxx	48, 150	
09h ⁽⁴⁾	PORTE	—	—	—	—	—	RE2	RE1	RE0	---- -xxx	49, 150	
0Ah ^(1,3)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter					---0 0000	30, 150	
0Bh ⁽³⁾	INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	RBIE	TMR0IF	INTF	RBIF	0000 000x	24, 150	
0Ch	PIR1	PSPIF ⁽³⁾	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	0000 0000	26, 150	
0Dh	PIR2	—	CMIF	—	EEIF	BCLIF	—	—	CCP2IF	-0-0 0--0	28, 150	
0Eh	TMR1L	Holding Register for the Least Significant Byte of the 16-bit TMR1 Register								xxxx xxxx	60, 150	
0Fh	TMR1H	Holding Register for the Most Significant Byte of the 16-bit TMR1 Register								xxxx xxxx	60, 150	
10h	T1CON	—	—	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	$\overline{T1SYNC}$	TMR1CS	TMR1ON	--00 0000	57, 150	
11h	TMR2	Timer2 Module Register								0000 0000	62, 150	
12h	T2CON	—	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0	-000 0000	61, 150	
13h	SSPBUF	Synchronous Serial Port Receive Buffer/Transmit Register								xxxx xxxx	79, 150	
14h	SSPCON	WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM3	SSPM2	SSPM1	SSPM0	0000 0000	82, 82, 150	
15h	CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register 1 (LSB)								xxxx xxxx	63, 150	
16h	CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register 1 (MSB)								xxxx xxxx	63, 150	
17h	CCP1CON	—	—	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	--00 0000	64, 150	
18h	RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D	0000 000x	112, 150	
19h	TXREG	USART Transmit Data Register								0000 0000	118, 150	
1Ah	RCREG	USART Receive Data Register								0000 0000	118, 150	
1Bh	CCPR2L	Capture/Compare/PWM Register 2 (LSB)								xxxx xxxx	63, 150	
1Ch	CCPR2H	Capture/Compare/PWM Register 2 (MSB)								xxxx xxxx	63, 150	
1Dh	CCP2CON	—	—	CCP2X	CCP2Y	CCP2M3	CCP2M2	CCP2M1	CCP2M0	--00 0000	64, 150	
1Eh	ADRESH	A/D Result Register High Byte								xxxx xxxx	133, 150	
1Fh	ADCON0	ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON	0000 00-0	127, 150	

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented, read as '0', r = reserved.

Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

- Note 1:** The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8>, whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.
- 2:** Bits PSPIE and PSPIF are reserved on PIC16F873A/876A devices; always maintain these bits clear.
- 3:** These registers can be addressed from any bank.
- 4:** PORTD, PORTE, TRISD and TRISE are not implemented on PIC16F873A/876A devices, read as '0'.
- 5:** Bit 4 of EEADRH implemented only on the PIC16F876A/877A devices.

PIC16F87XA

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY (CONTINUED)

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Details on page:	
Bank 1												
80h ⁽³⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	31, 150	
81h	OPTION_REG	RBP \bar{U}	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	23, 150	
82h ⁽³⁾	PCL	Program Counter (PC) Least Significant Byte								0000 0000	30, 150	
83h ⁽³⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	$\bar{T}O$	$\bar{P}D$	Z	DC	C	0001 1xxx	22, 150	
84h ⁽³⁾	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer								xxxx xxxx	31, 150	
85h	TRISA	—	—	PORTA Data Direction Register						--11 1111	43, 150	
86h	TRISB	PORTB Data Direction Register								1111 1111	45, 150	
87h	TRISC	PORTC Data Direction Register								1111 1111	47, 150	
88h ⁽⁴⁾	TRISD	PORTD Data Direction Register								1111 1111	48, 151	
89h ⁽⁴⁾	TRISE	IBF	OBF	IBOV	PSPMODE	—	PORTE Data Direction bits				0000 -111	50, 151
8Ah ^(1,3)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter						---0 0000	30, 150
8Bh ⁽³⁾	INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	RBIE	TMR0IF	INTF	RBIF	0000 000x	24, 150	
8Ch	PIE1	PSPIE ⁽²⁾	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	0000 0000	25, 151	
8Dh	PIE2	—	CMIE	—	EEIE	BCLIE	—	—	CCP2IE	-0-0 0--0	27, 151	
8Eh	PCON	—	—	—	—	—	—	$\bar{P}OR$	$\bar{B}OR$	---- --qq	29, 151	
8Fh	—	Unimplemented								—	—	
90h	—	Unimplemented								—	—	
91h	SSPCON2	GCEN	ACKSTAT	ACKDT	ACKEN	RCEN	PEN	RSEN	SEN	0000 0000	83, 151	
92h	PR2	Timer2 Period Register								1111 1111	62, 151	
93h	SSPAD	Synchronous Serial Port (I ² C mode) Address Register								0000 0000	79, 151	
94h	SSPSTAT	SMP	CKE	D \bar{A}	P	S	R \bar{W}	UA	BF	0000 0000	79, 151	
95h	—	Unimplemented								—	—	
96h	—	Unimplemented								—	—	
97h	—	Unimplemented								—	—	
98h	TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	0000 -010	111, 151	
99h	SPBRG	Baud Rate Generator Register								0000 0000	113, 151	
9Ah	—	Unimplemented								—	—	
9Bh	—	Unimplemented								—	—	
9Ch	CMCON	C2OUT	C1OUT	C2INV	C1INV	CIS	CM2	CM1	CM0	0000 0111	135, 151	
9Dh	CVRCON	CVREN	CVROE	CVRR	—	CVR3	CVR2	CVR1	CVR0	000- 0000	141, 151	
9Eh	ADRESL	A/D Result Register Low Byte								xxxx xxxx	133, 151	
9Fh	ADCON1	ADFM	ADCS2	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	00-- 0000	128, 151	

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented, read as '0', r = reserved.
Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

- Note 1:** The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8>, whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.
- 2:** Bits PSPIE and PSPIF are reserved on PIC16F873A/876A devices; always maintain these bits clear.
- 3:** These registers can be addressed from any bank.
- 4:** PORTD, PORTE, TRISD and TRISE are not implemented on PIC16F873A/876A devices, read as '0'.
- 5:** Bit 4 of EEADRH implemented only on the PIC16F876A/877A devices.

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY (CONTINUED)

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Details on page:	
Bank 2												
100h ⁽³⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)									0000 0000	31, 150
101h	TMR0	Timer0 Module Register									xxxx xxxx	55, 150
102h ⁽³⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte									0000 0000	30, 150
103h ⁽³⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C	0001 1xxxx	22, 150	
104h ⁽³⁾	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer									xxxx xxxx	31, 150
105h	—	Unimplemented									—	—
106h	PORTB	PORTB Data Latch when written: PORTB pins when read									xxxx xxxx	45, 150
107h	—	Unimplemented									—	—
108h	—	Unimplemented									—	—
109h	—	Unimplemented									—	—
10Ah ^(1,3)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter						---0 0000	30, 150
10Bh ⁽³⁾	INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	RBIE	TMR0IF	INTF	RBIF	0000 000x	24, 150	
10Ch	EEDATA	EEPROM Data Register Low Byte									xxxx xxxx	39, 151
10Dh	EEADR	EEPROM Address Register Low Byte									xxxx xxxx	39, 151
10Eh	EEDATH	—	—	EEPROM Data Register High Byte						---x xxxx	39, 151	
10Fh	EEADRH	—	—	—	— ⁽⁵⁾	EEPROM Address Register High Byte					---- xxxx	39, 151
Bank 3												
180h ⁽³⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)									0000 0000	31, 150
181h	OPTION_REG	\overline{RBP}	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	23, 150	
182h ⁽³⁾	PCL	Program Counter (PC) Least Significant Byte									0000 0000	30, 150
183h ⁽³⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C	0001 1xxxx	22, 150	
184h ⁽³⁾	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer									xxxx xxxx	31, 150
185h	—	Unimplemented									—	—
186h	TRISB	PORTB Data Direction Register									1111 1111	45, 150
187h	—	Unimplemented									—	—
188h	—	Unimplemented									—	—
189h	—	Unimplemented									—	—
18Ah ^(1,3)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter						---0 0000	30, 150
18Bh ⁽³⁾	INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	RBIE	TMR0IF	INTF	RBIF	0000 000x	24, 150	
18Ch	EECON1	EEPGD	—	—	—	WRERR	WREN	WR	RD	x--- x000	34, 151	
18Dh	EECON2	EEPROM Control Register 2 (not a physical register)									---- ----	39, 151
18Eh	—	Reserved; maintain clear									0000 0000	—
18Fh	—	Reserved; maintain clear									0000 0000	—

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented, read as '0', r = reserved.
Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

- Note 1:** The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8>, whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.
- 2:** Bits PSPIE and PSPIF are reserved on PIC16F873A/876A devices; always maintain these bits clear.
- 3:** These registers can be addressed from any bank.
- 4:** PORTD, PORTE, TRISD and TRISE are not implemented on PIC16F873A/876A devices, read as '0'.
- 5:** Bit 4 of EEADRH implemented only on the PIC16F876A/877A devices.

8.3 PWM Mode (PWM)

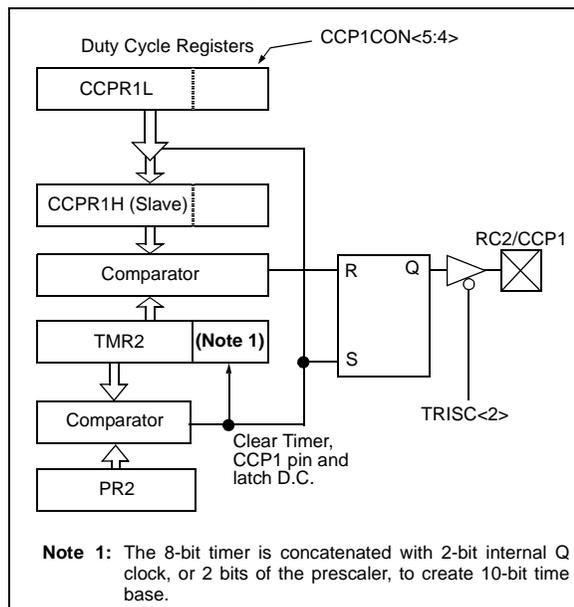
In Pulse Width Modulation mode, the CCPx pin produces up to a 10-bit resolution PWM output. Since the CCP1 pin is multiplexed with the PORTC data latch, the TRISC<2> bit must be cleared to make the CCP1 pin an output.

Note: Clearing the CCP1CON register will force the CCP1 PWM output latch to the default low level. This is not the PORTC I/O data latch.

Figure 8-3 shows a simplified block diagram of the CCP module in PWM mode.

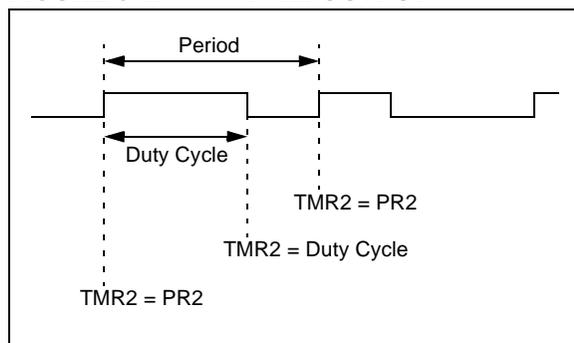
For a step-by-step procedure on how to set up the CCP module for PWM operation, see **Section 8.3.3 “Setup for PWM Operation”**.

FIGURE 8-3: SIMPLIFIED PWM BLOCK DIAGRAM



A PWM output (Figure 8-4) has a time base (period) and a time that the output stays high (duty cycle). The frequency of the PWM is the inverse of the period (1/period).

FIGURE 8-4: PWM OUTPUT



8.3.1 PWM PERIOD

The PWM period is specified by writing to the PR2 register. The PWM period can be calculated using the following formula:

$$\text{PWM Period} = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot T_{\text{OSC}} \cdot (\text{TMR2 Prescale Value})$$

PWM frequency is defined as 1/[PWM period].

When TMR2 is equal to PR2, the following three events occur on the next increment cycle:

- TMR2 is cleared
- The CCP1 pin is set (exception: if PWM duty cycle = 0%, the CCP1 pin will not be set)
- The PWM duty cycle is latched from CCPR1L into CCPR1H

Note: The Timer2 postscaler (see **Section 7.1 “Timer2 Prescaler and Postscaler”**) is not used in the determination of the PWM frequency. The postscaler could be used to have a servo update rate at a different frequency than the PWM output.

8.3.2 PWM DUTY CYCLE

The PWM duty cycle is specified by writing to the CCPR1L register and to the CCP1CON<5:4> bits. Up to 10-bit resolution is available. The CCPR1L contains the eight MSBs and the CCP1CON<5:4> contains the two LSBs. This 10-bit value is represented by CCPR1L:CCP1CON<5:4>. The following equation is used to calculate the PWM duty cycle in time:

$$\text{PWM Duty Cycle} = (\text{CCPR1L:CCP1CON<5:4>}) \cdot T_{\text{OSC}} \cdot (\text{TMR2 Prescale Value})$$

CCPR1L and CCP1CON<5:4> can be written to at any time, but the duty cycle value is not latched into CCPR1H until after a match between PR2 and TMR2 occurs (i.e., the period is complete). In PWM mode, CCPR1H is a read-only register.

The CCPR1H register and a 2-bit internal latch are used to double-buffer the PWM duty cycle. This double-buffering is essential for glitch-free PWM operation.

When the CCPR1H and 2-bit latch match TMR2, concatenated with an internal 2-bit Q clock or 2 bits of the TMR2 prescaler, the CCP1 pin is cleared.

The maximum PWM resolution (bits) for a given PWM frequency is given by the following formula.

EQUATION 8-1:

$$\text{Resolution} = \frac{\log\left(\frac{F_{\text{OSC}}}{F_{\text{PWM}}}\right)}{\log(2)} \text{ bits}$$

Note: If the PWM duty cycle value is longer than the PWM period, the CCP1 pin will not be cleared.

PIC16F87XA

8.3.3 SETUP FOR PWM OPERATION

The following steps should be taken when configuring the CCP module for PWM operation:

1. Set the PWM period by writing to the PR2 register.
2. Set the PWM duty cycle by writing to the CCPR1L register and CCP1CON<5:4> bits.
3. Make the CCP1 pin an output by clearing the TRISC<2> bit.
4. Set the TMR2 prescale value and enable Timer2 by writing to T2CON.
5. Configure the CCP1 module for PWM operation.

TABLE 8-3: EXAMPLE PWM FREQUENCIES AND RESOLUTIONS AT 20 MHz

PWM Frequency	1.22 kHz	4.88 kHz	19.53 kHz	78.12kHz	156.3 kHz	208.3 kHz
Timer Prescaler (1, 4, 16)	16	4	1	1	1	1
PR2 Value	0xFFh	0xFFh	0xFFh	0x3Fh	0x1Fh	0x17h
Maximum Resolution (bits)	10	10	10	8	7	5.5

TABLE 8-4: REGISTERS ASSOCIATED WITH CAPTURE, COMPARE AND TIMER1

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other Resets
0Bh,8Bh, 10Bh, 18Bh	INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	RBIE	TMR0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
0Ch	PIR1	PSPIF ⁽¹⁾	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	0000 0000	0000 0000
0Dh	PIR2	—	—	—	—	—	—	—	CCP2IF	---- --0	---- --0
8Ch	PIE1	PSPIE ⁽¹⁾	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	0000 0000	0000 0000
8Dh	PIE2	—	—	—	—	—	—	—	CCP2IE	---- --0	---- --0
87h	TRISC	PORTC Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
0Eh	TMR1L	Holding Register for the Least Significant Byte of the 16-bit TMR1 Register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
0Fh	TMR1H	Holding Register for the Most Significant Byte of the 16-bit TMR1 Register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
10h	T1CON	—	—	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	T1SYN \bar{C}	TMR1CS	TMR1ON	--00 0000	--uu uuuu
15h	CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register 1 (LSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
16h	CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register 1 (MSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
17h	CCP1CON	—	—	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	--00 0000	--00 0000
1Bh	CCPR2L	Capture/Compare/PWM Register 2 (LSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Ch	CCPR2H	Capture/Compare/PWM Register 2 (MSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Dh	CCP2CON	—	—	CCP2X	CCP2Y	CCP2M3	CCP2M2	CCP2M1	CCP2M0	--00 0000	--00 0000

Legend: x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used by Capture and Timer1.

Note 1: The PSP is not implemented on 28-pin devices; always maintain these bits clear.

PIC16F87XA

TABLE 8-5: REGISTERS ASSOCIATED WITH PWM AND TIMER2

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other Resets
0Bh,8Bh, 10Bh, 18Bh	INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	RBIE	TMR0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
0Ch	PIR1	PSPIF ⁽¹⁾	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	0000 0000	0000 0000
0Dh	PIR2	—	—	—	—	—	—	—	CCP2IF	---- --0	---- --0
8Ch	PIE1	PSPIE ⁽¹⁾	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	0000 0000	0000 0000
8Dh	PIE2	—	—	—	—	—	—	—	CCP2IE	---- --0	---- --0
87h	TRISC	PORTC Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
11h	TMR2	Timer2 Module's Register								0000 0000	0000 0000
92h	PR2	Timer2 Module's Period Register								1111 1111	1111 1111
12h	T2CON	—	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0	-000 0000	-000 0000
15h	CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register 1 (LSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
16h	CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register 1 (MSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
17h	CCP1CON	—	—	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	--00 0000	--00 0000
1Bh	CCPR2L	Capture/Compare/PWM Register 2 (LSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Ch	CCPR2H	Capture/Compare/PWM Register 2 (MSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Dh	CCP2CON	—	—	CCP2X	CCP2Y	CCP2M3	CCP2M2	CCP2M1	CCP2M0	--00 0000	--00 0000

Legend: x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used by PWM and Timer2.

Note 1: Bits PSPIE and PSPIF are reserved on 28-pin devices; always maintain these bits clear.

Bibliografía

- [1] Foeoeletrónica, Circuitos y tablas, en forma catalogada, para los campos de aplicación de la Foeoeletrónica, Ing. Wilhelm Hennig, pag. [1, 4 y 5].
- [2] Dispositivos electrónicos tomo II, Margarita García Burciaga de Cepeda y Arturo Cepeda Salinas, pg. 253.
- [3] Diseño electrónico, circuitos y sistemas, Tercera edición, C.J. Savant Jr., Martin S. Roden, Gordon L. Carpenter, pg. 130
- [4] The Study on the Reliability of High Power LED Streetlights, YAO Dong-Ge, CHEN Jian-Xin
- [5] Latest trends in led lighting, Makoto Bessho and Keiichi Shimizu
- [6] High Precision Indoor Positioning Using Lighting LED and Image Sensor, Mohammad ShaifurRahmant, Md. MejbaulHaquet, Ki-Doo Kim.
- [7] The Design and Implementation of Stand-Alone Solar Power LED Lighting Systems, Jin-Maun and Ho Chung-Chih Lu, ISBN: 978-960-474-262-2.
- [8] Energy-Aware Wireless Sensor Network with Ambient Intelligence for Smart LED Lighting System Control, T. P. Huynh, Y. K. Tan and K. J. Tseng.
- [9] Física, Conceptos y aplicaciones, Tippens, MC Graw Hill, Tercera edición, pg. 484 - 486.
- [10] Manual de luminotecnia para interiores, Carlos Laszlo, pg.5.
- [11] Manual de luminotecnia para interiores, Carlos Laszlo, pg.15.
- [12] Física, Conceptos y aplicaciones, Tippens, ed. Graw Hill, Tercera edición, pg. 479.
- [13] Física, Conceptos y aplicaciones, Tippens, ed. Graw Hill, Tercera edición, pg. 494 y 495
- [14] Física, Conceptos y aplicaciones, Tippens, ed. MC Graw Hill, Tercera edición, pg. 495
- [15] Manual del alumbrado, Westinghouse, ed. dossat, Tercera edición, pg. 16.
- [16] Física, Conceptos y aplicaciones, Tippens, ed. MC Graw Hill, Tercera edición, pg. 496 y 498.
- [17] Manual de luminotecnia para interiores, Carlos Laszlo, pg.15.
- [18] Física, Conceptos y aplicaciones, Tippens, ed. MC Graw Hill, Tercera edición, pg. 497.

-
- [19] Física, Conceptos y aplicaciones, Tippens, ed. MC Graw Hill, Tercera edición, pg. 499
- [20] Física, Conceptos y aplicaciones, Tippens, ed. MC Graw Hill, Tercera edición, pg. 500-50
- [21] Física general, S. Burbano de Ercilla, Ed. 321., ed. Tobar, pg. 57
- [22] Física para la ciencia y la tecnología: Luz. Vol. 2B, Tipler Mosca, ed. Reverte, Ed. 51, págs. 940 y 94
- [23] Manual de óptica geométrica, Adelina Felipe y César Albarrán, p
- [24] Alumbrado eléctrico y sus instalaciones, José Roldán Vitoria, Creaciones Copyright, pg
- [25] Alumbrado eléctrico y sus instalaciones, José Roldán Vitoria, Creaciones Copyright, pg. 5
- [26] Técnicas y aplicaciones de la iluminación, Luis C. Fernández Salazar, McGraw-Hill, pg. 19-22 y 24
- [27] Electrotecnia: Ciclos formativos, Peter Bastian, ed. Akal ediciones, pg. 441
- [28] Manual de Instalaciones de Alumbrado y Fotometría, Jorge Chapa Carreón, ed. Limusa Noriega editores, págs. 63 y 64
- [29] El ABC Del Alumbrado Y Las Instalaciones Eléctricas En baja tensión, Enrique Harper, 2da. Ed., ed. Limusa Noriega editores, pg. 110
- [30] Foelectrónica, circuitos y tablas, en forma catalogada, para los campos de aplicación de la Foto electrónica, Roberto Fuchs, marcombo Boixareu editores, págs. 4 y 5.
- [31] Diseño electrónico circuitos y sistemas, C. J. Savant Jr., ed. Pearson Educación, págs. 130 y 131.
- [32] Sistemas de comunicaciones electrónicas, Tomasi, cuarta edición, ed. Prantice Hall, págs. 452 y 453
- [33] Iluminación con tecnología LED, Alfonso Gago, ed. Paraninfo, págs. 3, 4, 6, 9, 22 y 24.
- [34] Geometría descriptiva y sus aplicaciones: Curvas y superficies. T. II, Ángel Taibo Fernández, ed. Tébar flores, págs. 55 y 56.
- [35] Análisis de formas complejas en disciplinas proyectuales: diseño, arquitectura y artes plásticas, Mará Carmen Pseudo Chiva, ed. Cultiva Libros, pg. 11.
- [36] Geometría para ingenieros, Volumen 1, Carlos Cobos Gutiérrez, ed. Tebar, págs. 211.
- [37] Cálculo de varias variables: trascendentes tempranas, James Stewart, Ed. 61, págs. 805 y 806.

- [38] Física universitaria con física moderna: Volumen 2, Francis Weston Sears, ed. Pearson, pg. 1251
- [39] Física, Joseph W. Kane, ed. Reverté, Ed. 2^a, pg., 517 y 518.
- [40] Manual de óptica geométrica, Adelina Felipe Marcet, pg. 19.
- [41] El ABC Del Alumbrado Y Las Instalaciones Eléctricas En Baja Tensión, Gilberto Enriquez Harper, ed. Limusa, Ed. 2^a, pg. 149.
- [42] <http://asinom.stps.gob.mx:8145/upload/noms/Nom-025.pdf>
- [43] Manual de luminotecnia para interiores, Carlos Laszlo, pg. 31.
- [44] Manual de luminotecnia para interiores, Carlos Laszlo, pg. 53.
- [45] Manual de Instalaciones de Alumbrado y Fotometría, Jorge Chapa Carreón, ed. Limusa, págs. 192 y 193.
- [46] Manual de Instalaciones de Alumbrado y Fotometría, Jorge Chapa Carreón, ed. Limusa, págs. 193 y 194.
- [47] El ABC del alumbrado y las instalaciones eléctricas en baja tensión, Gilberto Enrique Harper, ed. Limusa, Ed. 2^a, pg. 206.
- [48] Manual de Instalaciones de Alumbrado y Fotometría, Jorge Chapa Carreón, ed. Limusa, págs. 199 y 200.
- [49] Manual de Instalaciones de Alumbrado y Fotometría, Jorge Chapa Carreón, ed. Limusa, pg. 200.
- [50] Manual de instalaciones electromecánicas en casa y edificios: Hidráulicas, sanitarias, aire acondicionado, gas, eléctricas y alumbrado, Enríquez Harper, ed. Limusa, págs. 389-393.
- [51] Manual de luminotecnia para interiores, Carlos Laszlo, pg. 57.

