

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO DE UN EQUIPO PARA OBTENER EL INFORME
FOTOMÉTRICO DE UNA LUMINARIA**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Electricista

Br. Luis E. Rojas M.
Tutores: Prof. Luz S. Moreno M.
Prof. Jorge L. Sosa A.

Mérida, Julio, 2009

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE UN EQUIPO PARA OBTENER EL INFORME
FOTOMÉTRICO DE UNA LUMINARIA**

Br. Luis E. Rojas M.

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente jurado.

Prof.^a Marisol Dávila C.
C.I. 10.107.821

Prof.^a Luz S. Moreno M
C.I. 10.715.525

Prof. Jorge L. Sosa A.
C.I. 10.714.245

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme y ayudarme todos los días de mi vida.

A mis padres Joan Mardomingo y Luis Rojas, por brindarme todo su amor y apoyo incondicional.

A mi hermano Luiyomer Rojas Mardomingo por estar siempre a mi lado y acompañándome en todo momento.

A toda mi Familia por compartir enseñanzas, sueños y logros a lo largo de mi carrera.

A mis compañeros, amigos y a todas aquellas personas que estuvieron a lo largo de mi carrera compartiendo sueños, ilusiones y metas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Los Andes y al grupo de profesores, por su apoyo y enseñanza que me brindaron durante estos años.

Al Tutor Prof. Jorge Luis Sosa, por apoyarme, en la última etapa de mi carrera, gracias profesor por confiar en mí...

A la Profesora Luz Stella Moreno, por toda la ayuda prestada, y guiarme en el desarrollo de este proyecto, gracias.

A todos mis amigos de LIC Ciencias, por su colaboración y atención prestada.

A todos las personas que de una manera u otra me han permitido alcanzar esta meta...

Luis Enrique Rojas Mardomingo. Diseño de un Equipo para Obtener el Informe Fotométrico de una Luminaria. Universidad de Los Andes. Tutores: Ing. Luz Stella Moreno Martín, Ing. Jorge Luis Sosa Avendaño. Junio 2009.

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo diseñar un equipo para obtener el informe fotométrico de una luminaria. Este proyecto se inicia con el diseño y construcción de la parte electromecánica, diseño de un dispositivo capaz de obtener los diferentes cambios de la sensación de luz, simulando los espectros obtenidos por el ojo humano, el diseño de un dispositivo capaz de controlar la parte electromecánica a través de rutinas básicas usando un microcontrolador 18f452A y componentes electrónicos conectados en diferentes circuitos impreso donde todo el control estará representado por dicho microcontrolador 18f452A, y se desarrolló un programa a través de un software de interfaz gráfico como lo es Visual Basic, el cual es capaz de representar los datos obtenidos. Los datos se transmitirán a través de un iFT232 a la PC. Para el estudio del funcionamiento del sistema se realizan tres etapas separadas, para luego conectar todo el sistema. Las cuales son pruebas de comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos y la PC. Se efectuó pruebas del circuito sensible a la luz y un control de patrones en el software para la interpretación en forma numérica de los datos obtenidos.

Se logro controlar los motores de paso a través de el drivers implementado con el ULN28003 y las rutinas implementadas en el microprocesador, la obtención de voltajes analógicos que representan los diferentes cambios de iluminación a través del sensor óptico diseñado para la sensibilidad de la luz, dicho voltaje se procesa en el microcontrolador para la obtención de un valor digital el cual se envía a la PC. estos datos digitales son llevados a valores decimales para ser interpretados por los usuarios, se implementan las rutinas necesarias para el comportamiento del sistema, control, obtención de datos, etc., así como rutinas de comunicación serial para interactuar con el computador. Esta interfaz recibe los datos provenientes del equipo de medición, los almacena en una base de datos y realiza gráficas.

Descriptor: Informe Fotométrico, Microcontroladores, iFT232, Fototransistor

ÍNDICE GENERAL

	pp
APROBACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO	pp
I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos del proyecto	3
1.2.1 Objetivos Generales	3
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Alcance	4
1.4 Limitaciones	5
1.5 Metodología	5
II MARCO TEORICO	6
2.1 Luz	7
2.2 Longitud de Ondas Luminosas	8
2.3 Frecuencia, Longitud de Onda y Velocidad de Onda	11
2.3.1 Frecuencia y Longitud de Onda	11
2.3.2 Velocidad de Onda	12
2.4 Leyes de Snell	13
2.4.1 Primera Ley de Snell o Ley de la Reflexión	14
2.4.2 Segunda Ley de Snell o Ley de la Reflexión	16
2.5 Magnitudes Fotométricas y Radiométricas	17
2.5.1 Espectro Visible	18

2.5.2	Flujo de Potencia Radiante	20
2.5.3	Curva Estándar de Visibilidad de la Comisión Internacional de la Luz (CIE) (Commission Internationale de l'Eclairage)	20
2.5.4	Flujo Luminoso	21
2.5.5	Intensidad Radiante y Luminosa	22
2.5.6	Irradiancia e Iluminancia	23
2.5.7	Radiancia y Luminancia	24
2.5.8	Relación entre Luminancia e Iluminancia	27
2.5.9	Emitancia Luminosa	28
2.5.10	Relación entre Emitancia y Luminancia	28
2.6	Principios de la Detección de Luz con Semiconductores	29
2.6.1	Por Efecto Fotoeléctrico Externo	30
2.6.2	Por Efecto Fotoeléctrico Interno	30
2.7	Medición de Magnitudes Fotométricas	34
2.7.1	Medición de Iluminancia	36
III DISEÑO DE UN EQUIPO PARA OBTENER EL INFORME FOTOMETRICO DE UNA LUMINARIA		46
3.1	Diseño del Hardware	46
3.1.1	Circuito de Bloque #1	49
3.1.2	Circuito de Bloque #2	56
3.1.3	Circuito de Bloque #3	59
3.2	Diseño del Software	61
3.2.1	Ventana Principal	62
3.2.2	Ventana Secundaria	63
3.2.3	Ventana de Procesamiento de Datos	64
3.2.4	Opciones de Gráficas	65
IV RESULTADOS OBTENIDOS		67

CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS	77
ANEXOS	79

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	pp.
2.1 Propagación de una Onda de Luz	8
2.2 Longitud de Onda	11
2.3 Índice de Refracción del Vidrio	13
2.4 Ley de Reflexión de Snell	15
2.5 Ley de Refracción de Snell	17
2.6 Espectro Electromagnético	18
2.7 Curva Correspondiente al Ojo Adaptado a Condiciones Claras	19
2.8 Curva de Sensibilidad del Ojo	21
2.9 Luminancia de una Superficie	26
2.10 Conexión de Detector Fotoconductor	31
2.11 Niveles Permitidos de un Electrón en un Metal	32
2.12 Niveles permitidos de Electrones	34
2.13 Ley Inversa de los Cuadrados	38
2.14 Solido Fotométrico	40
2.15 Curva Fotométrica de una Lámpara Incandescente	41
2.16 Sistemas de Coordenadas C-Y	42
2.17 Curva de Distribución Simétrica	43
2.18 Curva de Distribución Asimétrica	44
2.19 Curvas de Isolux	45
3.1 Diagramas de Bloques del Hardware	47
3.2 Diagrama Completo del Hardware Diseñado	48
3.3 Cara Posterior del Circuito Impreso Bloque #1	50
3.4 Cara Posterior Circuito Impreso Bloque #1 (baquelita)	51
3.5 Cara Anterior Circuito Impreso Bloque #1	51

3.6	Cara Anterior Circuito Impreso Bloque #1 ensamblado	52
3.7	Circuito Integrado iFT232	54
3.8	Cara Posterior Circuito Bloque #2	56
3.9	Cara Posterior Circuito Impreso Bloque #2 (baquelita)	57
3.10	Cara Anterior Circuito Impreso Bloque #2 con el sensor	58
3.11	Diseño Electromecánico Bloque #2 Modelo 1	59
3.12	Cara posterior Circuito Impreso Bloque #3 en Eagle	60
3.13	Circuito impreso Bloque #3 ensamblado	60
3.14	Ventana Principal del Software	63
3.15	Ventana Secundaria del Software	64
3.16	Ventana de Barra Dinámica del Software	65
3.17	Opciones de Gráficas	66
4.1	Figura 4.1 Inicio de Barrido De Bombillo	68
4.2	Barrido de Bombillo Fluorescente	69
4.3	Ventana principal del estudio del Fluorescente.	69
4.4	Ventana Secundaria	70
4.5	Matriz de intensidades de Bombillo Fluorescente	71
4.6	Diagrama polar de Bombillo Fluorescente	71
4.7	Curvas de isolux de bombillo fluorescente.	72
4.8	Curva de isolux de bombillo incandescente.	73
4.9	Diagrama polar de bombillo incandescente	73

LISTA DE TABLAS

TABLA	pp.
2.1 Tabla de Espectro Electromagnético	10

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se orienta al desarrollo de un prototipo funcional para la obtención del informe fotométrico de una luminaria. Para la investigación experimental se desarrolla un equipo a los efectos de analizar los resultados con elementos disponibles en Venezuela, para proseguir, si así se considera, en un programa más amplio de aplicación para el área de luminotecnia en diferentes áreas de investigación y aplicación de la Universidad de los Andes.

El informe fotométrico se origina de una fusión entre la radiometría y la fotometría, donde la radiometría tiene sus bases fundamentales en las leyes físicas y la fotometría se experimenta un poco más la parte óptica y la sensibilidad de los colores y ambientes.

La obtención de informes fotométricos presenta una ayuda muy confiable al momento de establecer iluminaciones de áreas, dando de esta forma un equilibrio entre iluminación y estética. El equipo de medición proporcionará información acerca de las diferentes intensidades de iluminación dependiendo del ángulo de incidencia, el cual muestra diferentes tipos de comportamientos en luminarias y lámparas que existen en el mercado y permite reducir costos por iluminación excesiva generando contaminación lumínica.

Múltiples razones, de carácter técnico, económico y social, han propiciado investigaciones importantes en materia de iluminación, llevando consigo grandes hallazgos al encontrar la forma de plasmar intensidades lumínicas de una lámpara.

El Trabajo de Grado se presenta en cuatro capítulos:

Capítulo I. Planteamiento del problema. En este capítulo se definen algunos aspectos generales del proyecto tales como los objetivos, tipo y diseño de la investigación, entre otros.

Capítulo II. Marco teórico. Con este capítulo se identifican los conocimientos básicos de fotometría y radiometría, bases teóricas que fundamentan el desarrollo de informes fotométricos.

Capítulo III. Diseño de un equipo para obtener el informe fotométrico de una luminaria. Muestra los diseños tanto de hardware como de software del equipo utilizado para obtener la medición. El diseño del hardware en su mayoría es parte electrónica, con una parte electromecánica, mientras que el diseño del software se utilizó un programa llamado Visual Basic.net para crear la interfaz con el usuario y los procesamientos en la computadora. Se usó un compilador en lenguaje C que es el PCW de la casa CCS.Inc. Para la programación del PIC.

Capítulo IV. Resultados Obtenidos. En este capítulo se encontrarán los ensayos realizados al equipo diseñado. Y parte de la calibración analógica realizada para el microprocesador, así como del software implementado

Finalmente se presentan las Conclusiones y Recomendaciones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La escuela de Ingeniería Eléctrica carece de equipos e instalaciones adecuadas para realizar las prácticas en el área de luminotecnia, es decir, no se tiene actualmente laboratorios destinados a realizar medidas a luminarias, con el fin de obtener su respectivo informe fotométrico, en el cual se presente el diagrama polar, curvas de isolux y matriz de intensidades luminosas de dicha luminaria

Es por esta razón que se presenta este proyecto con la finalidad de diseñar un sistema que se encargue de realizar mediante un respectivo sistema de control de motores, la rotación de la luminaria a medir y de esta manera conseguir tanto la variación precisa de los ángulos C y Y requeridos para obtener mediante un instrumento denominado goniómetro las medidas necesarias para elaborar el informe.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Generales

Diseñar un equipo que permita obtener el informe fotométrico de cualquier luminaria, el cual sería incorporado en el futuro laboratorio de luminotecnia.

1.2.2 Específicos

- Diseñar y montar la parte mecánica del equipo encargado de rotar la luminaria en los dos ejes.
- Diseñar el equipo encargado de realizar las medidas de intensidad luminosa a la luminaria
- Realizar el software que controle la parte mecánica y electrónica.

1.3 ALCANCE:

La recopilación de información a través de internet y bibliografía técnica para el desarrollo del hardware y software a utilizar en dicho proyecto.

Se diseñaron partes del sistema de forma independiente, el diseño del hardware en tres bloques los cuales son: el diseño del circuito impreso principal donde se encontrara el PIC18f452 y el iFT232, que establecen la comunicación con la PC y con el circuito electromecánico. Un circuito constituido por una LDR donde se tomaran los datos analógicos de voltaje que serán tomados por el microcontrolador y llevados a valores digitales. Por último, un circuito electromecánico donde se encontraran los piñones diseñados acoplados mecánicamente a través de motores paso a paso para el movimiento de la luminaria en los ejes ya mencionados.

Por otro lado se realizó el diseño del software el cual se encarga de tomar los datos emitidos por el microcontrolador a través del iFT232 para desarrollar la matriz de intensidades relativas y dibujar las gráficas respectivas. El software se realizó a través de Visual Basic el cual esta diseñado para un entorno de Windows de muy fácil manejo.

1.4 LIMITACIONES

Dentro de las limitaciones para el desarrollo del proyecto se tiene el poco conocimiento en los programas de cálculo matemático avanzado para el desarrollo de gráficos de alto nivel y la carencia de accesibilidad a componentes electrónicos en Venezuela, ya que la mayoría son importados.

1.5 METODOLOGÍA

Se buscará información en la red (INTERNET) y en diferentes referencias bibliográficas de los diferentes diseños realizados para la obtención del informe fotométrico de una luminaria.

Se realiza un sistema original en base a los conocimientos adquiridos en la carrera. Se diseña una parte electromecánica, acoplando engranajes que estarán controlados por motores paso a paso para el movimiento de la luminaria o bombillo, estos motores estarán conectados a unos drivers que serán los ULN2003 para el control a través del microcontrolador. Aparte, se hará el diseño de un dispositivo que actúa de forma sensible a la luz usando una resistencia variable a la luz para así determinar las distintas intensidades obtenidas, las cuales serán transmitidas al microcontrolador en forma de voltajes analógicos. Adicionalmente a uno de los engranajes ubicados en los motores paso a paso se les adaptará sensores de movimiento para el límite máximo en el eje y. Luego de la obtención analógica de los datos, el microcontrolador es capaz de digitalizar los datos para la transmisión a la PC. Y de esta forma realizar los cambios suficientes al programa para la visualización de los mismos en formato decimal, así también como gráfica para mayor facilidad al usuario.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Es sabido que existen diversos tipos de energía: mecánica, térmica, electrostática y electromagnética. Cuando “se enciende la luz”, se conecta el filamento metálico de una lámpara incandescente a través de una diferencia de potencial, lo cual hace fluir carga eléctrica por el filamento de un modo parecido a como la diferencia de presión de una manguera de riego hace fluir el agua por su interior.

El flujo de electrones constituye la corriente eléctrica. Usualmente se asocia la corriente al movimiento de cargas en cables conductores, pero la corriente eléctrica surge de cualquier flujo de carga. Cuando la corriente eléctrica se propaga a través de los conductores y llega a un receptor se transforma en éste en otro tipo de energía. Si el cuerpo o fuente emisora irradia energía, la propagación se produce por radiación en forma de ondas, que son las perturbaciones físicas que se propagan a través de un determinado medio o en el vacío.

Las ondas electromagnéticas propagan energía producida por oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos y no necesitan un medio material de propagación. Por ejemplo, la luz.

Dentro de las diferentes formas de propagación de las ondas se definen diversos regímenes. Desde el punto de vista de la luminotecnia, interesa el régimen periódico, que se define como aquel que se repite a intervalos regulares de tiempo y que se expresa gráficamente mediante varias formas de onda. Aquí la forma de onda representa oscilaciones como fenómenos en los que la magnitud física es función periódica de una variable independiente (el tiempo), cuyo valor medio es nulo. Es decir. Se trata de funciones armónicas simples o fundamentales, como el seno o el coseno, de una sola variable, unidimensional y

transversales (se propagan perpendicularmente a la dirección en que vibran las partículas).

En definitiva, existe un conjunto muy amplio de fenómenos físicos, eléctricos y electromagnéticos, entre los que se incluye la electricidad, la luz, el sonido, las ondas hertzianas o el oleaje del mar, cuyas características quedan determinadas mediante el estudio de las ondas sinusoidales.

2.1 LUZ

La definición de la luz, dada por la OSA (*Optical Society of América*) se expresa en los siguientes términos: "**La luz es aquel aspecto de la energía radiante que un observador humano percibe a través de las sensaciones visuales producidas por el estímulo de la retina del ojo**". La luz parece tener una doble naturaleza ondulatoria-corpúscular. Cuando se estudia determinados fenómenos, como por ejemplo, el caso de las interferencias y la difracción, o cuando nos preocupa la propagación de la luz, la teoría ondulatoria electromagnética da una explicación completa de estos fenómenos. (fuente: Alfonso Martín Marcos, Apuntes de Fotometría, www.diac.upm.es/acceso_profesores/asignaturas/television/stv/fotometria.pdf)

Se puede deducir con certeza que la luz tiene carácter ondulatorio, pero también hay pruebas de que la luz consiste en pequeños paquetes de energía localizados, pudiendo comunicar toda su energía a un sólo átomo. A estas partículas se les da el nombre de fotones o cuantos de luz. Según se avanza en el espectro de frecuencia, las ondas de radio, que ocupan la región baja, se comportan en todos los aspectos importantes como radiación electromagnética clásica, lo que está relacionado con el hecho de que la energía de sus fotones, (h), es muy pequeña ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ julios.seg) y, por tanto, el número de fotones (f) es muy grande. Del mismo modo, la luz visible de intensidad normal contiene tantos fotones que su comportamiento medio, es explicado por la teoría ondulatoria, siempre que las interacciones

con los átomos individuales de la materia no comprometan los estados cuantificados de energía de estos últimos.

2.2 LONGITUD DE ONDAS LUMINOSAS

Maxwell demostró que la luz ocupa una gama del espectro electromagnético, es decir, que la luz está formada por ondas electromagnéticas que tienen la misma velocidad en el espacio libre y que difieren en su longitud de onda. Estas ondas transportan energía, cuyo valor viene dado por el vector de Poynting:

$$P(t) = E(t) \times B(t) \quad (2.1)$$

Siendo $E(t)$ y $B(t)$ los valores instantáneos de los vectores de intensidad de campo eléctrico y magnético respectivamente. La dirección de propagación de la onda viene dada por la del vector de Poynting, los cuales son perpendiculares entre si. Ver figura 2.1 (Física de la Luz. Fuente: UNI-FIEE. Lima Peru. Sistemas de TV 2005, <http://aniak.uni.edu.pe/tv/09%20unidades%20luminosas%202005-1.pdf>).

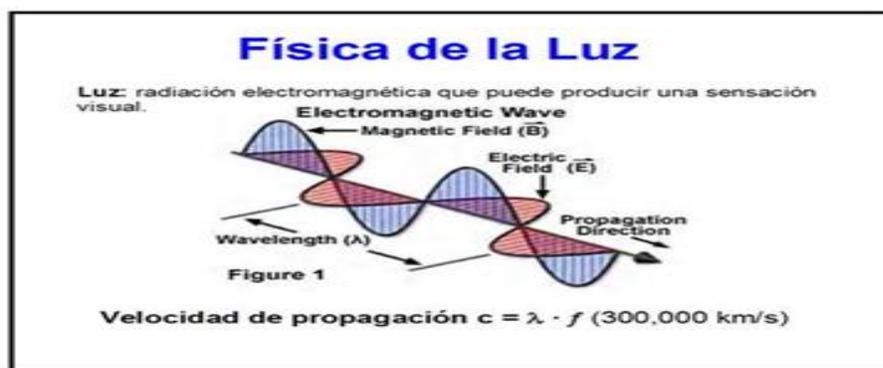


Figura 2.1 Propagación de una Onda de Luz

La ciencia que estudia la luz desde el punto de vista ondulatorio recibe el nombre de óptica física. Sin embargo, para muchos casos esta teoría se puede simplificar, dando lugar a la óptica geométrica, que estudia la luz por el método de los rayos luminosos, y que se utiliza para estudiar la mayor parte de los instrumentos ópticos. En este caso los caminos de propagación se denominan "rayos luminosos" e indican la dirección del flujo de energía, y son perpendiculares a los frentes de onda.

La velocidad de propagación de la luz en el vacío es una constante de la naturaleza que tiene un valor de $c = 300000 \text{ Km/s}$, y en otro medio distinto difiere ligeramente, estando ligado este valor con las características del medio. En el caso del vacío, la velocidad de propagación puede expresarse a través de la relación de Maxwell:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 300000 \text{ Km/s} \quad (2.2)$$

Las ondas más cortas para las que el ojo es sensible son las violetas (380nm). Las más largas que el ojo es capaz de apreciar son las rojas, correspondientes a longitudes de onda de 780nm. La zona del espectro electromagnético comprendida entre estos límites se denomina Espectro Visible, y es una pequeñísima parte del espectro total. En la Tabla 2.1. (Fuente: Alfonso Martín Marcos, Apuntes de Fotometría, www.diac.upm.es/acceso_profesores/asignaturas/television/stv/fotometria.pdf) se indican las distintas zonas del espectro electromagnético, desde las frecuencias más bajas hasta las más altas, con la colocación en su seno del espectro visible

Cada una de las frecuencias del espectro visible produce sobre el ojo una sensación de color distinta. Las frecuencias más bajas corresponden a tonos rojos, las frecuencias intermedias son tonos amarillos, verdes, etc. y las más altas corresponden a tonos violetas.

Tabla 2.1 Tabla de Espectro Electromagnético

Denominación de la zona	Margen de frecuencias	Margen de longitudes de onda
ELF	0 Hz a 30 Hz	∞ a 10^4 Km
SLF	30 Hz a 300 Hz	10^4 Km a 10^3 Km
ULF	300 Hz a 3 KHz	10^3 Km a 10^2 Km
VLF	3 KHz a 30 KHz	10^2 Km a 10 Km
LF	30 KHz a 300 KHz	10 Km a 1 Km
MF	300 KHz a 3 MHz	1 Km a 100 m
HF	3 MHz a 30 MHz	100 m a 10 m
VHF	30 MHz a 300 MHz	10 m a 1 m
UHF	300 MHz a 3 GHz	1m a 0.1 m
SHF	3 GHz a 30 GHz	0.1 m a 1 cm
EHF	30 GHz a 300 GHz	1cm a 1 mm
SIN DENOMINACION	300 GHz a 1 THz	1mm a 0.3 mm
INFRARROJO	1 THz a 790 THz	0.3mm a 780 nm
ESPECTRO VISIBLE	790 THz a 3×10^{15} Hz	780nm a 380 nm
ULTRAVILOETA	790 THz a 3×10^{15} Hz	380nm a 100 nm
RAYOS X	3×10^{15} Hz a 3×10^{19} Hz	100 nm a 10^{-2} nm
RAYOS GAMMA	3×10^{19} Hz a 3×10^{22} Hz	10^{-2} nm a 10^{-5} nm
RAYOS COSMICOS	3×10^{22} Hz a ∞	10^{-5} nm a 0

2.3 FRECUENCIA, LONGITUD Y VELOCIDAD DE ONDA

2.3.1 Frecuencia y Longitud de Onda

Se define la **longitud de onda** (λ) como la distancia que recorre el **pulso** mientras una partícula del medio que recorre la onda realiza una oscilación completa. El tiempo que tarda en realizar la oscilación se llama **período** (T) y la **frecuencia** (f) es el número de oscilaciones (**vibraciones** completas) que efectúa cualquier partícula, del medio perturbado por donde se propaga la onda, en un segundo.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.3)$$

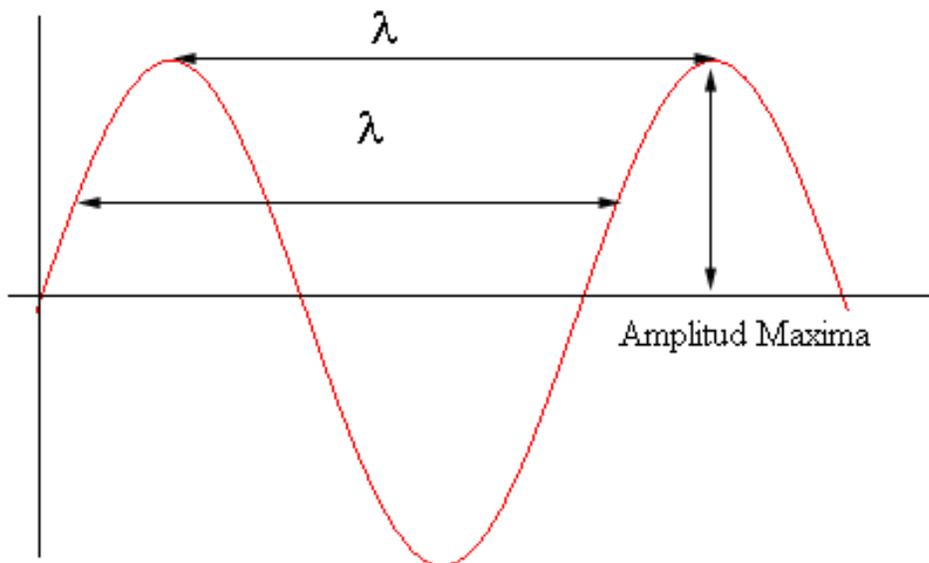


Figura 2.2 Longitud de Onda

2.3.2 Velocidad de Propagación de una Onda:

Todas las ondas tienen una velocidad de propagación finita, en cuyo valor influyen las fuerzas recuperadoras elásticas del medio y determinados factores de la masa del medio: la densidad lineal en las cuerdas; la profundidad del agua bajo la superficie, o el coeficiente adiabático, la masa molecular y la temperatura en el caso de la propagación del sonido en un gas.

En todos los casos la velocidad es constante, y como siempre será:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Veamos qué es el Δx que la onda recorre en un tiempo Δt . El periodo (T) será el tiempo que transcurre entre dos instantes consecutivos en los cuales un punto del medio vuelve a poseer las mismas propiedades. (f) es la frecuencia del movimiento oscilatorio del punto. Por su parte, el espacio recorrido por la onda en ese tiempo (t) será la distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran con la misma propiedad. A esa distancia se le llama longitud de onda, λ Por lo tanto,

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (2.5)$$

2.4 LEYES DE SNELL

Para una onda determinada, el índice de refracción de un medio (siempre se considera respecto del vacío), se define como el cociente entre la velocidad de propagación de la onda en el vacío y la velocidad de propagación en el citado medio.

$$n(\lambda) = \frac{c}{v_f(\lambda)} \quad (2.6)$$

Como la velocidad de propagación de una onda luminosa en cualquier medio es siempre inferior a la velocidad a la que se propaga en el vacío, el índice de refracción de los medios siempre es algo superior a la unidad. En la figura 2.3, se han representado los valores del índice de refracción del vidrio para tres frecuencias diferentes, pudiendo observarse que dicho índice de refracción disminuye con la longitud de onda o lo que es lo mismo, aumenta con la frecuencia.

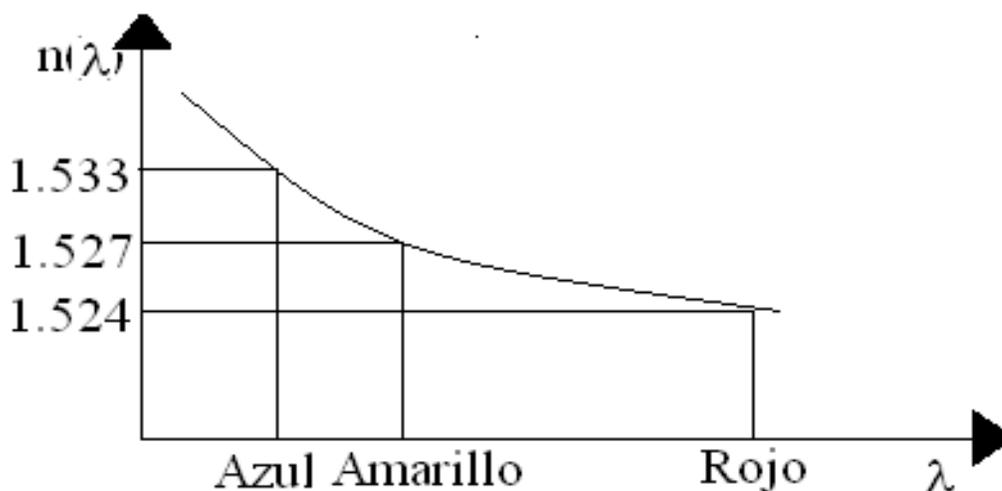


Figura 2.3 Índice de Refracción del vidrio.

Cuando una señal luminosa se propaga en un medio y de pronto se encuentra en su camino otro medio diferente, parte de la energía se refleja de nuevo hacia el primer medio y parte de la energía se propaga en el segundo medio.

Las leyes de Snell establecen las direcciones en las que se reflejan y propagan estas dos nuevas señales luminosas a las que se hacen referencia. A continuación se establecen las relaciones matemáticas que las definen.

2.4.1 PRIMERA LEY DE SNELL O LEY DE LA REFLEXION

Para deducir las conclusiones establecidas por esta Ley, se supone la situación que se representa en la figura 2.4. Los rayos luminosos inciden sobre la superficie formando un ángulo con la normal a la superficie que se llamará $2i$ y se reflejarán hacia atrás con un ángulo que se llama $2r$.

Los puntos P y P' son dos puntos del frente de onda que tienen igual fase, porque se puede considerar que la onda de llegada es plana si el foco emisor de luz se encuentra relativamente alejado. Trasladando esta situación a las proximidades de separación de los dos medios, para poder trabajar con más comodidad (aunque se sabe que en las proximidades donde se encuentra el cambio entre los medios existirán irregularidades), esa misma situación se contemplará en los puntos O y A.

La onda que se refleja hacia atrás, lejos de la superficie de separación también será plana, por lo que se puede considerar a los puntos Q y Q' como dos puntos de igual fase en la onda reflejada, que llevados a la discontinuidad, como se hizo anteriormente, se convierten en los puntos C y B.

Para que la fase de la onda en los puntos C y B tenga igual fase, partiendo de que en los puntos O y A también la tenía, está claro que el desfase introducido en la trayectoria OC

ha de ser el mismo que el ocasionado en la trayectoria AB. En estas condiciones, sabiendo que el movimiento es siempre en el primer medio y que por lo tanto la constante de fase es siempre constante, a la cual llamaremos k_1 , se puede establecer la relación

$$k_1 \cdot \overline{OC} = k_1 \cdot \overline{AB} \quad (2.7)$$

y expresando las dos distancias en función de la magnitud OB, la ecuación anterior queda de la forma siguiente:

$$k_1 \cdot \overline{OB} \text{sen}(\theta_r) = k_1 \cdot \overline{OB} \text{sen}(\theta_i) \quad (2.8)$$

Simplificando se observa que $2r = 2i$

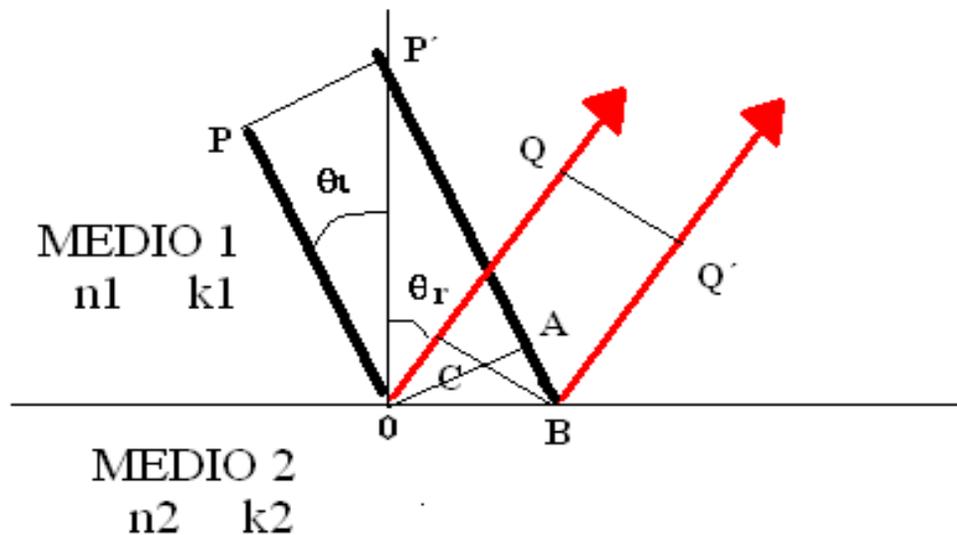


Figura 2.4 Ley de Reflexión de Snell

2.4.2 SEGUNDA LEY DE SNELL O LEY DE REFRACCION.

Analizando dos medios caracterizados por índices de refracción (n_1) y (n_2) separados por una superficie S. Los rayos de luz que atraviesen los dos medios se refractarán en la superficie variando su dirección de propagación dependiendo del ratio entre los índices de refracción (n_1) y (n_2). Se observa la figura 2.5.

Para un rayo luminoso con un ángulo de incidencia θ_1 sobre el primer medio, se tiene que el rayo se propaga en el segundo medio con un ángulo de refracción θ_2 cuyo valor se obtiene por medio de la ley de Snell.

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (2.9)$$

Obsérvese que para el caso de $\theta_1 = 0$ (rayos incidentes de forma perpendicular a la superficie) los rayos refractados emergen con un ángulo $\theta_2 = 0$ para cualquier (n_1) y (n_2). La simetría de la ley de Snell implica que las trayectorias de los rayos de luz son reversibles. Es decir, si un rayo incidente sobre la superficie de separación con un ángulo de incidencia θ_1 se refracta sobre el medio con un ángulo de refracción θ_2 , entonces un rayo incidente en la dirección opuesta desde el medio 2 con un ángulo de incidencia θ_2 se refracta sobre el medio 1 con un ángulo θ_1 .

Una regla cualitativa para determinar la dirección de la refracción es que el rayo en el medio de mayor índice de refracción se acerca siempre a la dirección de la normal a la superficie. La velocidad de la luz en el medio de mayor índice de refracción es siempre menor.

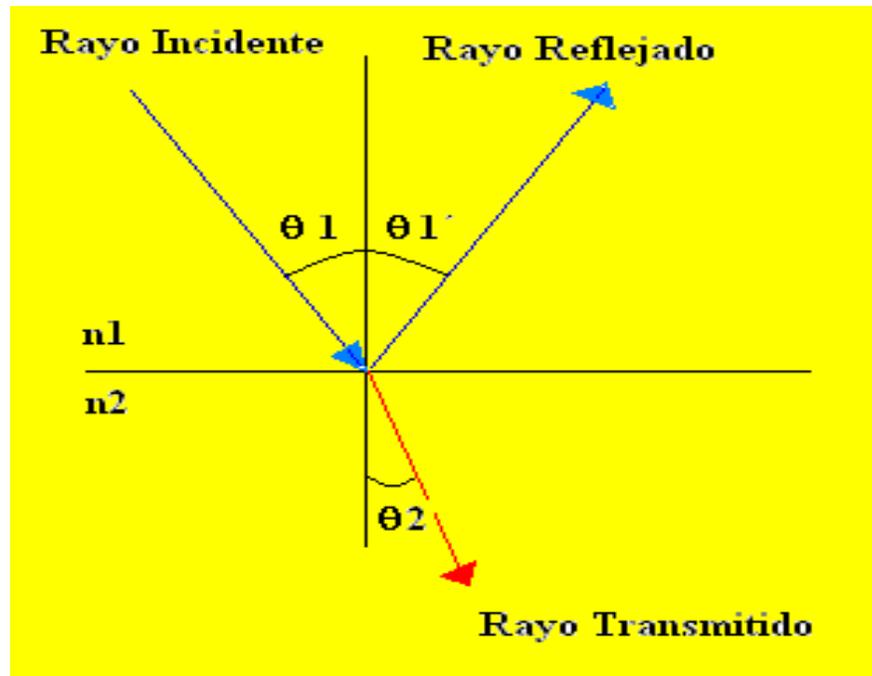


Figura 2.5 Ley de Refracción de Snell

2.5 MAGNITUDES FOTOMETRICAS Y RADIOMETRICAS

Se conoce por **fotometría** a la parte de la Física que estudia las medidas de las magnitudes que están asociadas a la luz, de la misma forma que **Radiometría** es la parte de la Física que estudia las medidas de las magnitudes que están asociadas con la energía radiante.

Como ejemplos de fuentes radiantes se pueden citar algunas, tales como los emisores de radio, los cuerpos calientes, las descargas eléctricas creadas en el vacío o en un gas, etc. Dentro de las fuentes radiantes, se conoce por fuentes luminosas a aquellas que son capaces de impresionar al sentido de la vista.

Una de las fuentes radiantes de mayor importancia es el Sol, cuyo máximo de radiación se encuentra en el espectro visible, pero no sólo radia luz, sino que tiene un espectro continuo, radiando casi como un cuerpo negro ideal que estuviera a una temperatura aproximada de $6.000\text{ }^\circ\text{K}$.

La radiometría esta relacionada con la medida de la radiación, ¿Cuántos fotones son creados, emitidos, dispersados, reflejados y absorbidos? Mientras la fotometría es un sistema de medida que intenta cuantificar la intensidad de luz en una manera que es relevante a la visión humana, la cantidad de luz útil al sistema visual humano.

2.5.1 ESPECTRO VISIBLE

El ojo humano genera **sensación de luz** cuando radiaciones del espectro electromagnético comprendidas dentro de determinado rango de longitudes de onda, inciden sobre la retina. En la figura 2.6, se muestra el espectro de radiación electromagnética, con indicación de la zona correspondiente a las radiaciones visibles. (Fuente: Edison. Aprendizaje basado en internet, http://edison.upc.es/curs/llum/luz_vision/graficos/espec.gif)

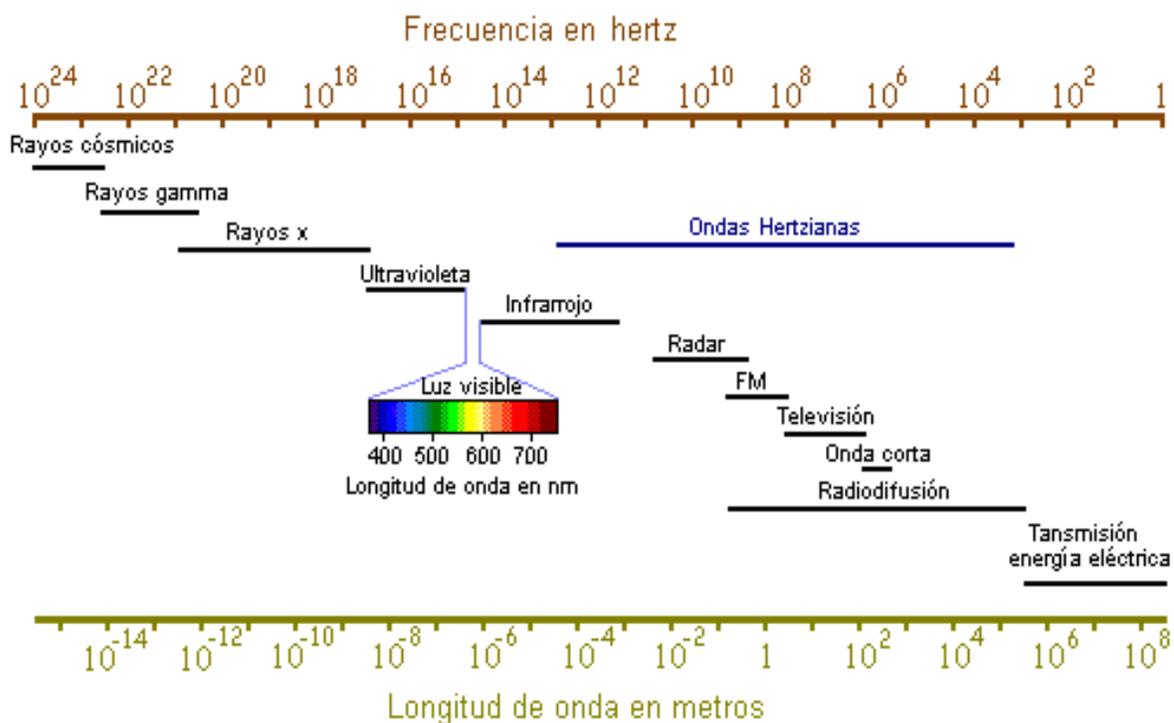


Figura 2.6 Espectro Electromagnético.

Las radiaciones electromagnéticas se desplazan a la velocidad de la luz, cuyo valor es $c=300000$ Km/s. Si T es el tiempo en que se cumple una oscilación completa de una determinada radiación, la frecuencia de la oscilación será $f = 1/T$, cumpliéndose además que $\lambda \cdot v = c$, siendo λ la longitud de onda. Toda radiación electromagnética da lugar a una energía radiante, que al incidir sobre la superficie de un cuerpo negro se transforma en calor. El ojo discrimina las diferentes longitudes de onda en este rango, por la sensación de color. Por ejemplo el azul y el violeta corresponden a las longitudes de onda más cortas, el rojo a las longitudes de onda más largas, y el amarillo y verde a la parte media del espectro visible. La sensibilidad del ojo humano no es uniforme, sino que varía con la longitud de onda en la forma que se muestra en la figura 2.7. (Fuente: UNI-FIEE. Lima Peru. Sistemas de TV 2005, <http://aniak.uni.edu.pe/tv/09%20unidades%20luminosas%202005-1.pdf>)

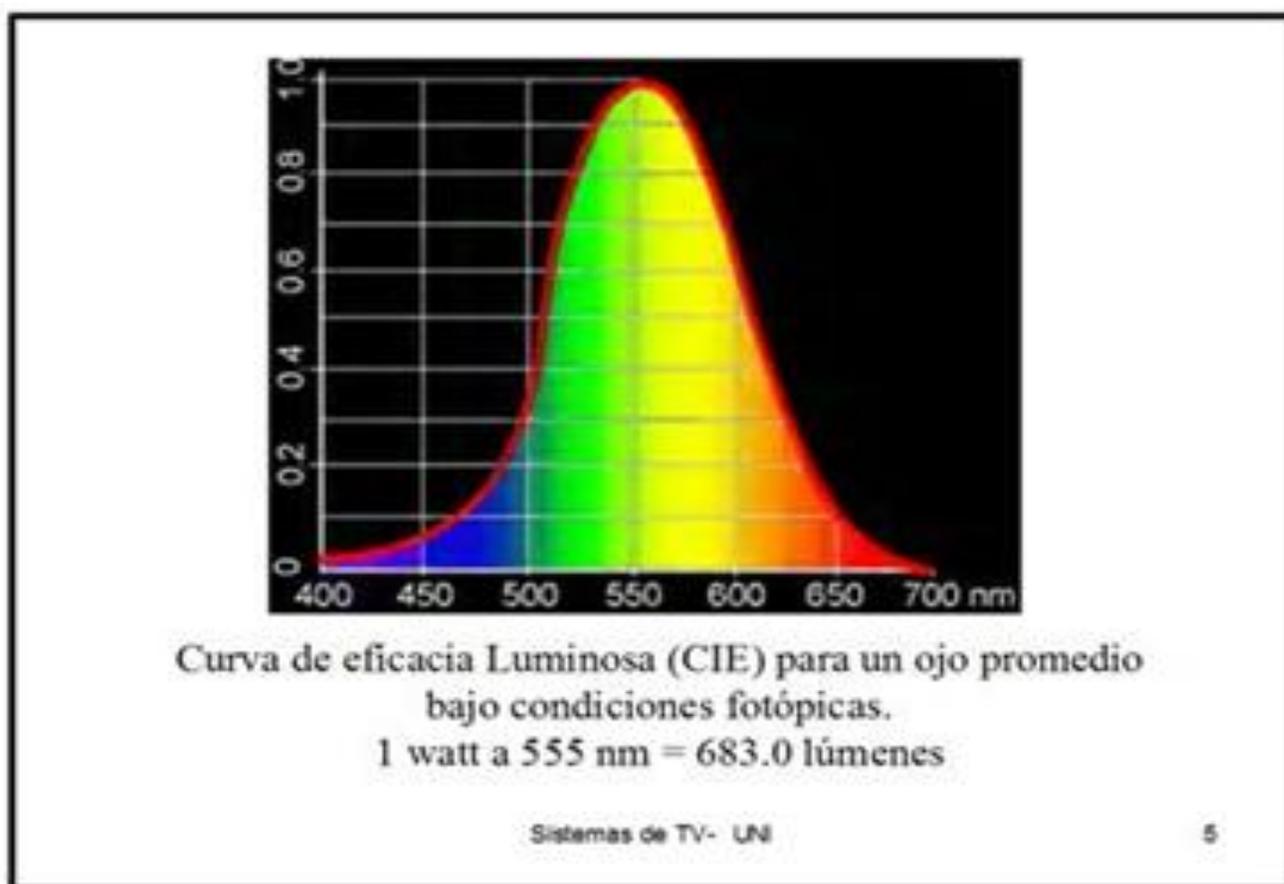


Figura 2.7 La curva corresponde al ojo adaptado a condiciones claras.

2.5.2 FLUJO O POTENCIA RADIANTE.

El flujo radiante θe es igual a la potencia total en [W] de la radiación electromagnética emitida o recibida. El **flujo espectral radiante** $\theta e(\lambda)$ es el flujo radiante por unidad de intervalo de longitud de onda (considerado como 1nm), expresado en [W/nm]. El flujo radiante total θe se determina integrando $\theta e(\lambda)$ sobre la totalidad del espectro:

$$\theta e = \int_0^{\infty} \theta e(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

2.5.3 CURVA ESTANDAR DE VISIBILIDAD DE LA CIE

Con el fin de proporcionar una base estándar para la comparación de radiaciones con diferentes longitudes de onda, la CIE ha adoptado dos funciones particulares de **eficiencia luminosa espectral** que están definidas por valores tabulados.

Estas son la función $V(\lambda)$ referida a la visión fotópica (diurna) y que se muestra en la figura 2.8, y la función $V'(\lambda)$ referida a visión escotópica (nocturna). (Fuente: Edison. Aprendizaje basado en internet, http://edison.upc.es/curs/llum/luz_vision/p_visual.html) Los valores de la función $V(\lambda)$ se encuentran tabulados a intervalos de longitudes de onda de 1nm sobre el rango de 360 hasta 830nm [13]. Esta función tiene su valor máximo (unitario) en $\lambda = 555\text{nm}$.

Visión fotópica: relativo a la visión con luz brillante, con luz adaptada a los ojos que es percibida por los conos de la retina.

Visión escotópica: adaptación del ajuste visual a la oscuridad.

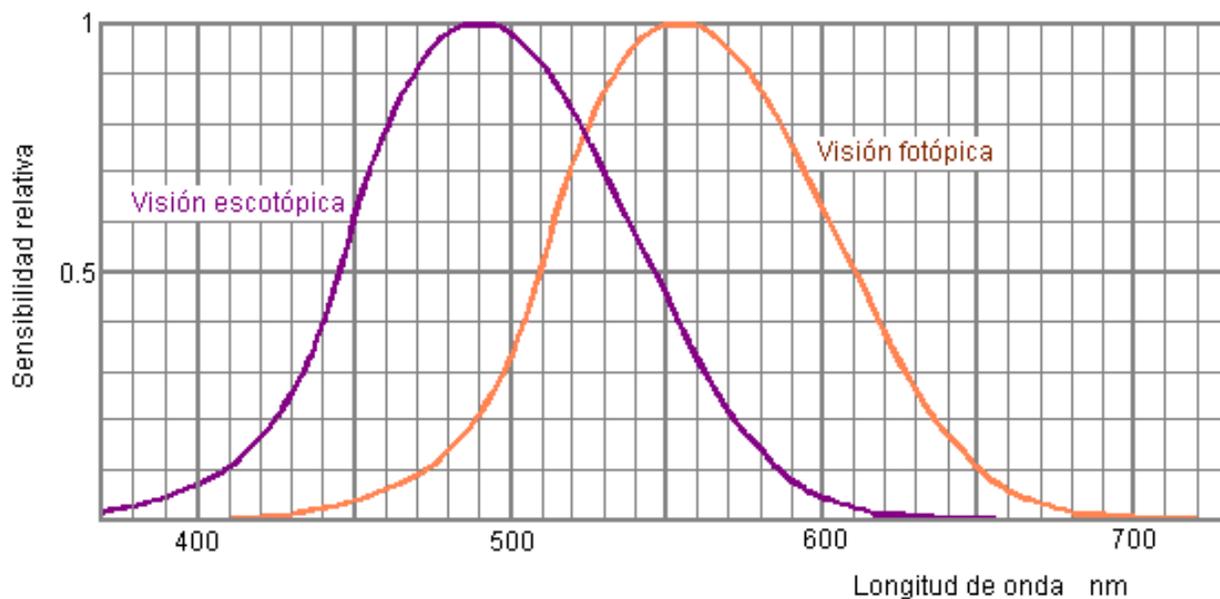


Figura 2.8 curva de sensibilidad del ojo.

2.5.4 FLUJO LUMINOSO

Unidad de potencia útil al ojo, relacionada con el Watt y es definida como la eficiencia espectral luminosa para luz monocromática a la respuesta visual de picos a una longitud de onda de 555 nm.

En el rango visible del espectro electromagnético, o sea longitudes de onda desde 380 nm hasta 780 nm, se considera que el flujo radiante tiene asociado un flujo luminoso θv el cual es una medida de la respuesta visual. La unidad de flujo luminoso es el **lumen** expresado como [lm] y se define en términos de la candela, donde una fuente puntual emitiendo una intensidad uniforme de 1 [cd] en todas direcciones emite un flujo luminoso total de 4π [lm].

El lumen se puede definir como el flujo luminoso asociado con flujo radiante de $1/683$ [W] para $\lambda = 555\text{nm}$ en aire.

Se emplea un factor de escala conocido como *eficacia luminosa* \mathbf{K} de la radiación, que es una medida de la capacidad de la radiación para producir sensación visual. Se la define como el cociente del flujo luminoso en [lm] y el flujo radiante en [W], o sea $K = \theta_v / \theta_e$. La *máxima eficacia luminosa espectral de radiación para visión fotópica* se conoce como \mathbf{K}_m , cuyo valor es $K_m = 683$ [lm/W]. Para visión escotópica será $K'_m = 1700$ [lm/W]. Para cualquier otra distribución de flujo radiante la eficacia luminosa \mathbf{K} será menor que \mathbf{K}_m y el cociente \mathbf{K}/\mathbf{K}_m se conoce como la *eficiencia luminosa* de la radiación, denominada \mathbf{V} . De esta definición surge el concepto de la función $V(\lambda)$ o *eficiencia luminosa espectral relativa* mencionada anteriormente, la cual, para $K_m = 683$ será:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{683} \quad (2.11)$$

El **flujo luminoso** θ_v es obtenido a partir del flujo radiante $\theta_e(\lambda)$ utilizando alguna de las funciones de eficiencia espectral luminosa de la CIE como factor de ponderación en cada componente espectral, aplicando luego el factor K_m . Para visión fotópica el flujo luminoso θ_v puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$\theta_v = \int_0^{\infty} \theta_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.12)$$

2.5.5 INTENSIDAD RADIANTE Y LUMINOSA

Estas cantidades se usan para describir el flujo emitido por una fuente en una dirección determinada. La Intensidad Radiante I_e , medida en [W/Sr] es una cantidad radiométrica relacionada con el flujo radiante por la siguiente ecuación:

$$I_e = \frac{d\theta_e}{d\Omega} \quad (2.13)$$

Donde $d\Omega$ es un elemento de ángulo sólido, expresado en [Sr].

La Intensidad Luminosa I_v , expresada en [cd] (candela) es una cantidad fotométrica relacionada con el flujo luminoso por la ecuación:

$$I_v = \frac{d\theta_v}{d\Omega} \quad (2.14)$$

y relacionada con la distribución espectral de intensidad radiante $I_e(\lambda)$ por la ecuación:

$$I_v = Km. \int_{360}^{830} I_e(\lambda). V(\lambda). d\lambda \quad (2.15)$$

Una candela es equivalente a un lumen por estereorradián (1 cd = 1 lm.Sr-1). La candela es la magnitud fotométrica base del SI (Sistema Internacional de unidades) y se define como sigue:

“La candela es la intensidad luminosa, en una determinada dirección, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} [Hz] y que tiene una intensidad radiante de $1/683$ [W/Sr] en esa dirección”.

2.5.6 IRRADIANCIA E ILUMINANCIA

Se usan para describir el flujo incidente sobre un punto de una superficie.

La Irradiancia (E_e) es el flujo radiante por unidad de área que incide sobre una superficie de área A y se mide en $[W/m^2]$. Es una cantidad radiométrica relacionada con el flujo radiante por la siguiente ecuación:

$$E_e = \frac{d\theta_e}{dA} \quad (2.16)$$

La Iluminancia (E_v), expresada en $[lux = lm/m^2]$, es una magnitud fotométrica relacionada con el flujo luminoso mediante la ecuación:

$$E_v = \frac{d\theta_v}{dA} \quad (2.17)$$

y se relaciona con la distribución espectral de Irradiancia $E_e(\lambda)$ por la ecuación:

$$I_v = Km. \int_{360}^{830} E_e(\lambda).V(\lambda).d\lambda \quad (2.18)$$

2.5.7 RADIANCIA Y LUMINANCIA

Estas magnitudes se utilizan para describir el flujo en una dirección y en un punto especificado de la trayectoria del rayo.

La Radiancia (L_e), expresada en $[W.Sr^{-1}.m^{-2}]$, es una cantidad radiométrica relacionada con el flujo radiante mediante la ecuación:

$$Le = \frac{d\theta e}{d\Omega dA \cdot \cos(\theta)} \quad (2.19)$$

Donde dA es el área de un elemento de la superficie que contiene al punto especificado, θ es el ángulo entre la normal al elemento y la dirección del rayo, y $d\Omega$ es el ángulo sólido que contiene dicha dirección y dentro del cual se propaga el flujo elemental $d\theta e$.

La Luminancia (Lv), expresada en [$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$], es una cantidad fotométrica relacionada con el flujo luminoso mediante la siguiente expresión:

$$Lv = \frac{d\theta v}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos(\theta)} \quad (2.20)$$

y se relaciona con la distribución espectral de Radiancia $Le(\lambda)$ por la ecuación:

$$Lv = Km \cdot \int_{360}^{830} Le(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.21)$$

El concepto de Luminancia está directamente relacionado con la Claridad percibida por el observador, o sea con el efecto visual que la iluminación produce en la superficie considerada. Según esto, una definición menos rigurosa de Luminancia puede obtenerse si se tiene en cuenta que una superficie brillante extensa puede considerarse como un ensamble de pequeños elementos de superficie luminosos de área dA , y en donde cada uno de estos elementos actúa como fuente puntual. Esta situación se ilustra en la figura 2.9.

La intensidad luminosa dI de cada elemento de superficie dA , observado desde una dirección particular, es proporcional al área proyectada $d\dot{A}$ en esta dirección (ver figura 2.9), siendo la constante de proporcionalidad simbolizada con L ; por lo tanto:

$$dI = L \cdot d\dot{A} \quad (2.22)$$

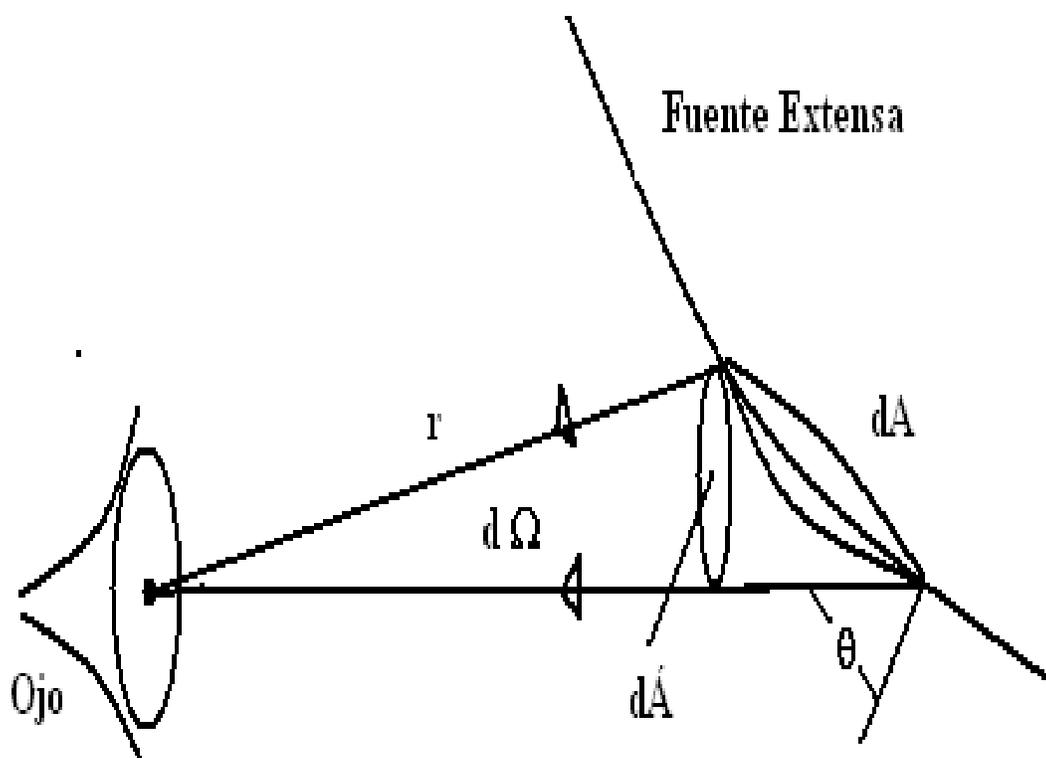


Figura 2.9 luminancia de una superficie

L es denominada la "Luminancia de la superficie" y representa la intensidad luminosa por unidad de área proyectada $d\dot{A} = dA \cdot \cos(\theta)$. Si a la ecuación (2.20) se escribe como:

$$\frac{d\theta v}{d\Omega} = Lv. dA. \cos(\theta) \quad (2.23)$$

Se verá la correspondencia entre esta última expresión y la (2.22).

Se puede demostrar que la luminancia de cualquier superficie en un medio no emisor, no absorbente y no dispersor, permanece constante a lo largo de un haz luminoso que atraviese la superficie. Esta afirmación verifica la observación cotidiana de que en aire limpio la claridad de una superficie no depende de su distancia al observador.

2.5.8 RELACION ENTRE LUMINANCIA E ILUMINANCIA

La luminancia de una fuente extendida puede variar con la posición de la fuente y con la dirección desde donde se la observa, y si estas variaciones se conocen, se puede encontrar la iluminancia producida por la fuente en una dada ubicación, según se explica a continuación.

La iluminancia dE producida sobre un plano a una distancia r desde un elemento de la fuente con intensidad dI , es según la **ley de inversa de los cuadrados**

$$dE = \frac{dI \cdot \cos(\theta)}{r^2} \quad (2.24)$$

Siendo θ el ángulo como se muestra en la figura 2.9.

Sustituyendo dI de acuerdo con la ecuación (2.22) y con la definición de ángulo sólido tal que $d\Omega = \frac{dA \cdot \cos(\theta)}{r^2}$, se obtiene la ecuación $dE = L \cdot \cos(\theta) \cdot d\Omega$, la cual después de integrar se transforma en:

$$E = \int_{\Omega} L \cdot \cos(\theta) d\Omega \quad (2.25)$$

Esta ecuación puede ser usada para calcular la iluminancia producida por una fuente extensa de luminancia L .

2.5.9 EMITANCIA LUMINOSA

La Emitancia luminosa (Mv) en un punto sobre una superficie, es igual al flujo luminoso total emitido por unidad de área. Para un elemento de área dA que emite un flujo total de $d\theta$ (sobre un ángulo sólido de 2π Sr) se tiene lo siguiente:

$$Mv = \frac{d\theta}{dA} \quad (2.26)$$

Esta magnitud fotométrica se mide en [lm/m^2]. Para una fuente difusora uniforme existe una relación entre su Emitancia luminosa y su luminancia, es decir: $Mv = \pi \cdot Lv$. Se obtiene calculando el flujo luminoso total que llega a una superficie hemisférica centrada sobre una fuente plana que se supone cumple con la ley de Lambert (2.7.1.2 b).

Ley de Lambert: cuando la Radiación Electromagnética (REM) incide sobre la materia, al llegar energía a esta, sus electrones pueden cambiar de estado. Los tipos de interacción entre la REM y la materia pueden ser múltiples: reflexión, refracción, dispersión, polarización, absorción.

2.5.10 RELACION ENTRE EMITANCIA Y LUMINANCIA

Combinando la ecuación (2.26) con la (2.14) se llega a lo siguiente:

$$M = I \cdot \frac{d\Omega}{dA} \quad (2.27)$$

Además, de la figura 2.9 se sabe que $d\Omega = \frac{dA \cdot \cos(\theta)}{r^2} = Lv \cdot dA \cdot \cos(\theta)$, y reemplazando en (2.18) se obtiene:

$$M = \frac{I}{r^2} \cos(\theta) \quad (2.28)$$

Lo cual es el equivalente de la ley de inversa de los cuadrados para emitancia. Si se escribe en forma diferencial la ecuación (2.28) se obtiene:

$$dM = \frac{dI}{dr^2} \cdot \cos(\theta) \quad (2.29)$$

Si ahora se procede en forma análoga a lo efectuado en (2.5.8) se llega a $dM = L \cdot \cos(\theta) d\Omega$, la cual después de integrar se transforma en:

$$M = \int_{\Omega} L \cdot \cos(\theta) d\Omega \quad (2.30)$$

2.6 PRINCIPIOS DE LA DETECCION DE LUZ CON SEMICONDUCTORES

Según la definición de la CIE, un **detector de radiación óptica** (fotodetector) es un dispositivo en el cual la radiación óptica incidente produce un efecto físico mensurable. Existen principalmente dos categorías: los **cuánticos** y los **térmicos**. Los detectores térmicos se basan en la sobre elevación de temperatura, producida por la radiación. Los detectores cuánticos se basan en la interacción de fotones de ciertas energías con los electrones del material del detector o de algunas de sus partes.

Los detectores cuánticos se clasifican según dos tipos básicos:

2.6.1 Por efecto fotoeléctrico externo:

La radiación incidente, con energía $h\nu$, provoca la emisión de electrones del material del fotocátodo, con energía cinética $E_k = h\nu - \theta_0$ (θ_0 : potencial de extracción del material del fotocátodo). Los electrones son colectados por un electrodo (ánodo) a potencial positivo, originando una señal proporcional a la radiación incidente. Este efecto es la base de las fotocélulas de vacío, fotocélulas gaseosas y fotomultiplicadores.

2.6.2 Por efecto fotoeléctrico interno:

Se basa en la producción de algún cambio en las características eléctricas de un material (por lo general un semiconductor) debido a la llegada y absorción de fotones. Dicho cambio puede ser la generación de electrones libres, de huecos libres o de pares electrón-hueco (e-h). El efecto fotoeléctrico interno posee dos formas básicas:

- a) **Efecto fotoconductorivo:** Las cargas liberadas por los fotones incidentes modifican la resistividad del material del fotodetector. Estando el detector polarizado, se mide la variación de la tensión, que es la señal de salida V_s .

El funcionamiento de la LDR se basa en el hecho de que la resistencia eléctrica de una película de sulfuro de cadmio (CdS) varía en función de la intensidad de la luz que incide sobre la superficie de la película. Esta resistencia es muy elevada en la oscuridad y es baja con una iluminación intensa.

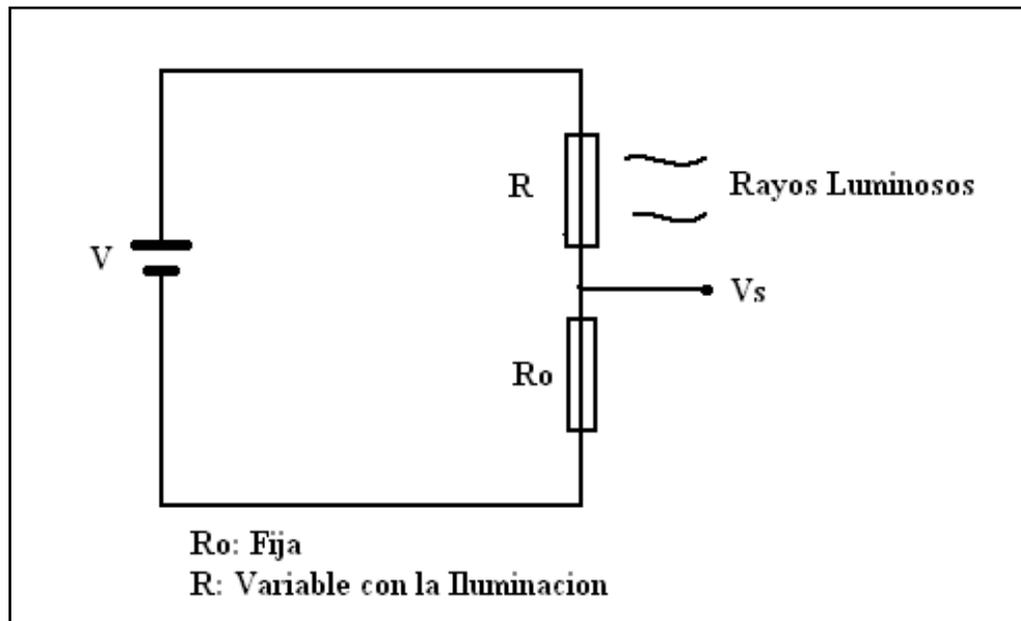


Figura 2.10 Conexión de Detector Fotoconductorivo

b) Efecto **foto voltaico**: Las cargas liberadas por el arribo de fotones se encuentran en una zona donde existen campos eléctricos que los barren rápidamente. El caso más común es el de la unión P-N polarizada inversa.

La "detectividad" de un dado detector de estado sólido respecto de un grupo de fotones está determinada en primer lugar por la relación entre las energías de los fotones y los estados de energía permitidos para los electrones en el sólido.

En el sólido, los estados permitidos de energía de un electrón correspondiente a un solo átomo se dividen en una gran cantidad de bandas estrechas permitidas según el principio de exclusión de Pauli (dos electrones no pueden ocupar el mismo estado). En la siguiente figura se muestra la gran cantidad de niveles permitidos para el caso de un metal.

Pauli: La función de onda de un sistema con fermiones idénticos, como es el caso de los electrones, debe ser totalmente antisimétrica en el espacio combinado de las coordenadas espaciales y de spin. El principio de exclusión de Pauli introduce el acoplamiento entre las variables espaciales y de spin del electrón como la única forma de expresar el carácter antisimétrico de las funciones de onda y que sea imposible que dos partículas del sistema tengan las mismas funciones de onda (o estado), lo que violaría la precondition de indistinguibilidad de las partículas.

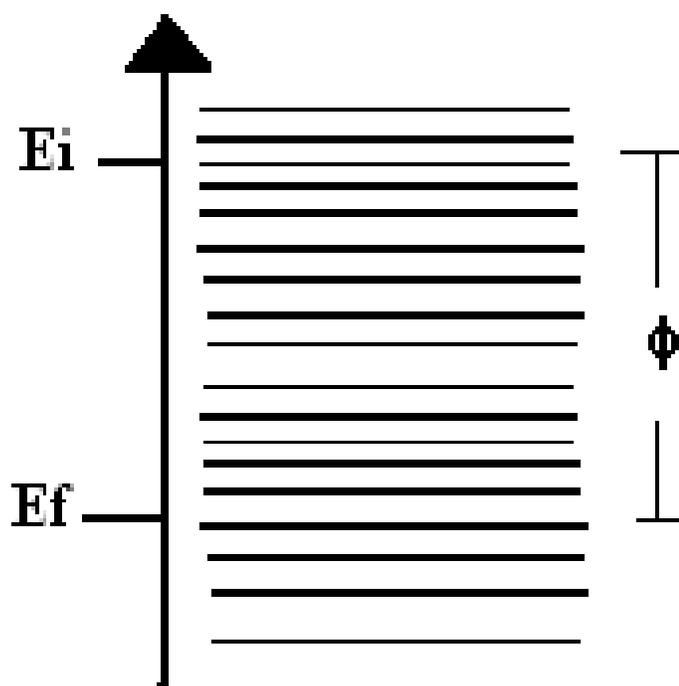


Figura 2.11 Niveles Permitidos de un Electrón en un Metal.

A la temperatura del cero absoluto, el nivel ocupado con la más alta energía es el que define el "nivel de Fermi". La función trabajo de un metal es $\theta = E_i - E_f$, donde E_i es la energía de ionización y E_f es la energía correspondiente al nivel de Fermi.

Nivel de Fermi: es la energía de nivel más alto ocupado por un sistema cuántico a temperatura cero se denota por E_f y recibe su nombre del físico Italo-Americano Enrico Fermi.

Un material aislante se diferencia de un conductor ya que en los conductores los electrones pueden pasar libremente de un átomo a otro cuando se aplica una diferencia de potencial (o tensión eléctrica) entre los extremos del conductor. En un material aislante existe una región (o banda) con un valor de muchos electrones de valencia. Esta banda, en términos de energía, delimita en el material dos zonas que se conocen como bandas de valencia y de conducción (ver figura 2.12). El valor de la barrera de potencial que deben vencer los electrones para pasar de la banda de valencia a la de conducción se denomina E_g [eV].

Aquellos semiconductores que poseen un valor de conductividad situado entre el correspondiente a un material conductor y el de un aislante se conocen con el nombre de "semiconductor intrínseco". Se aplica este nombre debido a que el material es un semiconductor a la temperatura de interés sin la ayuda de proceso alguno (agregado de impurezas) que haga que el material se vuelva semiconductor. La excitación de electrones dentro de la banda de conducción produce "huecos" (estados permitidos desocupados por electrones que han migrado a la banda de conducción) en la banda de valencia; por lo tanto se establece una corriente de huecos con carga positiva cuando se produce una migración de electrones de valencia. En equilibrio térmico el número de huecos es igual al de electrones.

Los detectores cuánticos producirán una señal siempre y cuando la energía de los fotones sea mayor que la energía interna E_g necesaria para liberar los portadores de carga, o sea:

$$E_{\text{foton}} = h\nu > E_g \quad (2.31)$$

Por ejemplo, para detectores fotoconductivos en base a semiconductores intrínsecos ocurre lo siguiente:

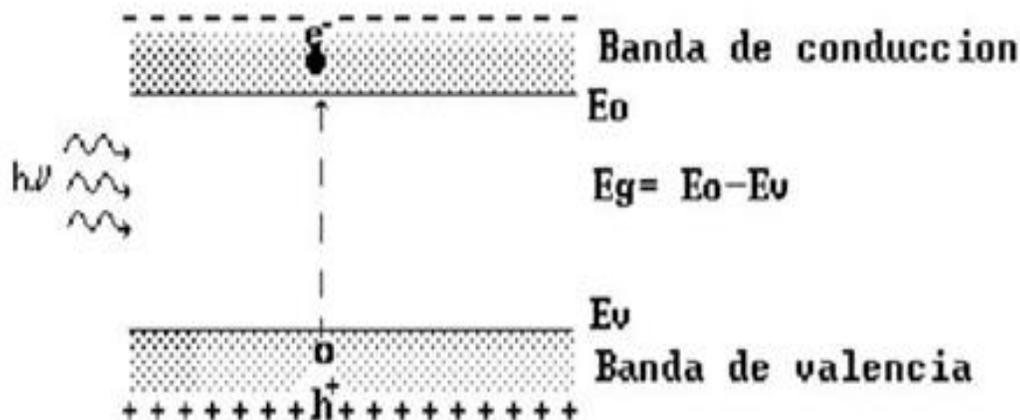


Figura 2.12 Niveles Permitidos de Electrones

En este caso se deberá cumplir que $h\nu > E_0 - E_v$ para que se produzca la fotoconducción.

Se encuentra actualmente muy difundido el uso de detectores contruidos mediante células fotovoltaicas de Silicio (Si), para tareas de fotometría física como así también en radiometría. Respecto de otros materiales semiconductores como el Selenio y el Germanio, la principal ventaja que ofrece la utilización de Si para estos fines es la obtención de una muy buena **linealidad** entre el flujo de radiación incidente y la fotocorriente que se mide a la salida, siempre que la medición se efectúe con la célula fotovoltaica en "cortocircuito".

2.7 MEDICION DE MAGNITUDES FOTOMETRICAS

Se define a la *fotometría* como la **medición de radiación en función de la respuesta visual humana**, o sea que sólo comprende mediciones en el rango del espectro visible al ojo

humano, con longitudes de onda de entre 380 hasta 780 nm. La radiación electromagnética de longitudes de onda en este rango se conoce generalmente como **luz**.

La unidad fundamental de fotometría del Sistema Internacional es la Candela, con posesión de una nueva definición desde Octubre de 1.979, en que fue adoptada por la XVI Conferencia General de Pesas y Medidas y dice así:

"La Candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540 THZ ($\lambda=555$ nm) y cuya intensidad radiante en esa dirección es 1/683 watio/estereorradián".

Hay que resaltar que la frecuencia de la definición corresponde al máximo de la curva patrón de luminosidad, por lo que esta nueva definición de la Candela implica realmente la definición del factor de conversión de watio a lúmenes, que aparece en la definición del rendimiento luminoso máximo. Hasta llegar a esta definición de la unidad de Intensidad luminosa ha habido muchas otras, pero la característica común de todas ellas ha sido la pretensión de poseer una fuente de fácil reproducción en cualquier lugar y momento, que no se altere con el paso del tiempo y que genere una intensidad luminosa constante durante la ejecución de la medida.

La definición anterior a ésta fue adoptada el 1 de Enero de 1.948. Se acordó entonces que la unidad de intensidad luminosa se llamara Candela y se definió así:

"La Candela es la intensidad luminosa de (1/60) de cm^2 de la superficie del cuerpo negro a la temperatura de solidificación del platino ($2043^{\circ}K$), radiada perpendicularmente a dicha superficie".

El lumen, unidad de potencia luminosa, se deriva de la unidad de intensidad luminosa, la Candela:

"El lumen es la potencia luminosa radiada por una fuente omnidireccional de intensidad luminosa igual a una Candela en un estereorradián".

El Talbot, unidad de energía luminosa radiada por una fuente, se deriva de la unidad de potencia luminosa, el lumen:

"El Talbot es la energía luminosa radiada por una fuente de potencia constante e igual a "1" lumen, durante 1 segundo".

Cada una de las magnitudes luminosas se utiliza en determinado momento. Un ejemplo para el que importa la energía luminosa emitida, es en el proceso de impresionado de la película fotográfica: La impresión de la película es mayor, cuánto más energía luminosa incide sobre ella, siendo esta energía recibida independiente del tiempo de exposición.

Según la CIE (Commission Internationale de L'Éclairage), un **fotómetro** es un instrumento que mide cantidades fotométricas, las cuales se obtienen a partir de las cantidades radiométricas mediante algunas convenciones (ley de aditividad, función $V(\lambda)$, definición de la unidad de intensidad luminosa). La lectura en este instrumento de medición deberá observarse en una pantalla con lectura ya sea analógica o digital.

Las mediciones de luz serán más útiles si la respuesta del fotómetro, en términos de la distribución espectral de energía radiante, es similar a la correspondiente al ojo humano. Debido a que la respuesta del ojo a la energía luminosa difiere para cada observador, la CIE ha establecido una curva de la respuesta del observador estándar, también conocida como curva estándar de visibilidad, curva mostrada en la figura 2.7 y corresponde a la función de eficiencia luminosa espectral para visión fotópica, o función $V(\lambda)$ de la figura 2.8.

2.7.1 MEDICIÓN DE LA ILUMINANCIA (E)

2.7.1.1 Luxómetro

El luxómetro, o instrumento medidor de iluminancia, consta de una cabeza fotométrica inserta en el instrumento o bien externa unida por un cable al mismo, de un transductor y de una unidad de lectura (display). La fuente de energía puede estar incorporada al instrumento. Por medio de la incorporación de accesorios adecuados el luxómetro podrá ser capaz no sólo de medir iluminancia sobre plano vertical u horizontal, sino también iluminancias esféricas, cilíndricas y semicilíndricas.

2.7.1.2 Leyes Básicas a tener en cuenta en la medición

Las mediciones de cantidades fotométricas y también radiométricas frecuentemente toman en consideración dos leyes básicas que son las siguientes:

a) **Ley de Inversa de los Cuadrados:**

Establece que la iluminancia E en un punto de una superficie varía *directamente* con la intensidad luminosa I de la fuente luminosa, y varía *inversamente* con el cuadrado de la distancia d entre la fuente y el punto considerado. Si la superficie que contiene a este punto es normal a la dirección de la luz incidente, la ley se expresa como sigue:

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (2.32)$$

De esta forma se puede establecer la relación de iluminancias S_1 y S_2 que hay entre dos planos separados una distancia d y D de la fuente de luz respectivamente:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{D^2}{d^2} \quad (2.33)$$

Situación la cual se observa en la figura 2.13, (Fuente: Edison. Aprendizaje basado en internet, <http://edison.upc.es/curs/llum/fotometria/magnitud.html>)

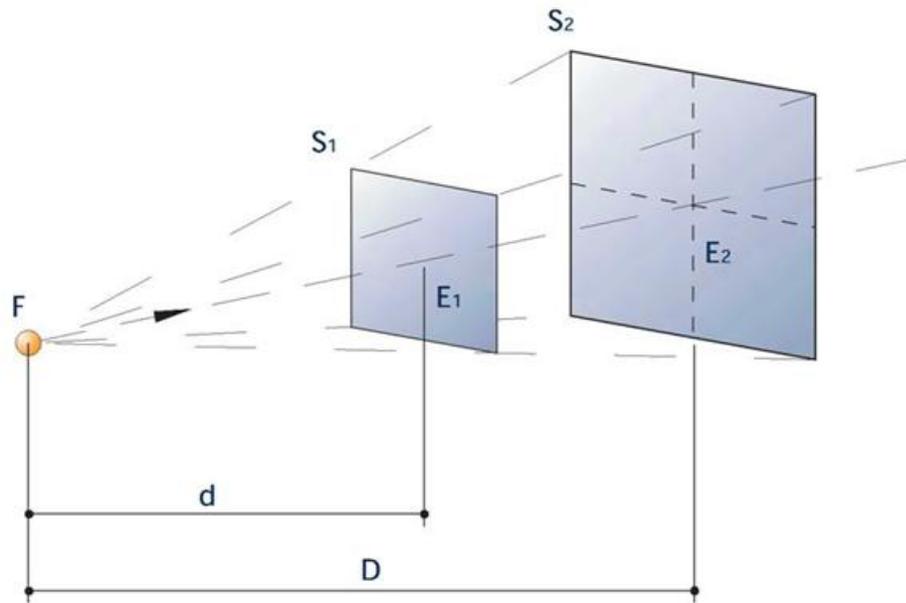


Figura 2.13 Ley Inversa de los Cuadrados

Esto se cumple con un error de hasta el 0.5% cuando el valor de **d** es por lo menos cinco veces la máxima dimensión de la fuente emisora.

b) **Ley del Coseno:**

Esta ley, también conocida como ley de Lambert, establece que la iluminancia sobre cualquier superficie, varía con el coseno del ángulo de incidencia. El ángulo de incidencia θ , es el

ángulo entre la normal a la superficie considerada y la dirección de la luz incidente. Combinando ambas leyes se puede expresar lo siguiente:

$$E = \frac{I}{d^2} \cdot \cos(\theta) \quad (2.34)$$

c) **Ley del Coseno-Cubo:**

Es una consecuencia útil de la ley del coseno. Reemplazando d por $h/\cos\theta$ en (2.34), se puede escribir como:

$$E_S = \frac{I \cos^3(\theta)}{h^2}. \quad (2.35)$$

2.7.1.3 Representación Gráfica de Magnitudes Luminosas

El conjunto de la intensidad luminosa de una fuente de luz en todas las direcciones constituye lo que se conoce como *distribución luminosa*. Las fuentes de luz utilizadas en la práctica tienen una superficie luminosa más o menos grande, cuya intensidad de radiación se ve afectada por la propia construcción de la fuente, presentando valores diversos en las distintas direcciones.

Con aparatos especiales (como el Goniómetro) se puede determinar la intensidad luminosa de una fuente de luz en todas las direcciones del espacio con relación a un eje vertical. Si se representa por medio de vectores (I) la intensidad luminosa de una fuente de luz

en las infinitas direcciones del espacio, se engendra un volumen que representa el valor del flujo total emitido por la fuente, el cual viene definido por la expresión:

$$\Phi = \int_v \vec{I} \cdot \vec{d\omega} \quad (2.36)$$

El sólido que se obtiene recibe el nombre de sólido fotométrico. En la Fig. 2.14 (Fuente: Manual de Luminotecnia de Indalux, INDALUX 2002, <http://www.indal.es/portal/docs/Documentaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnica/Documentaci%C3%B3n%20Web%20Indalux/Luminotecnia/>). Se puede apreciar el sólido fotométrico de una lámpara incandescente.

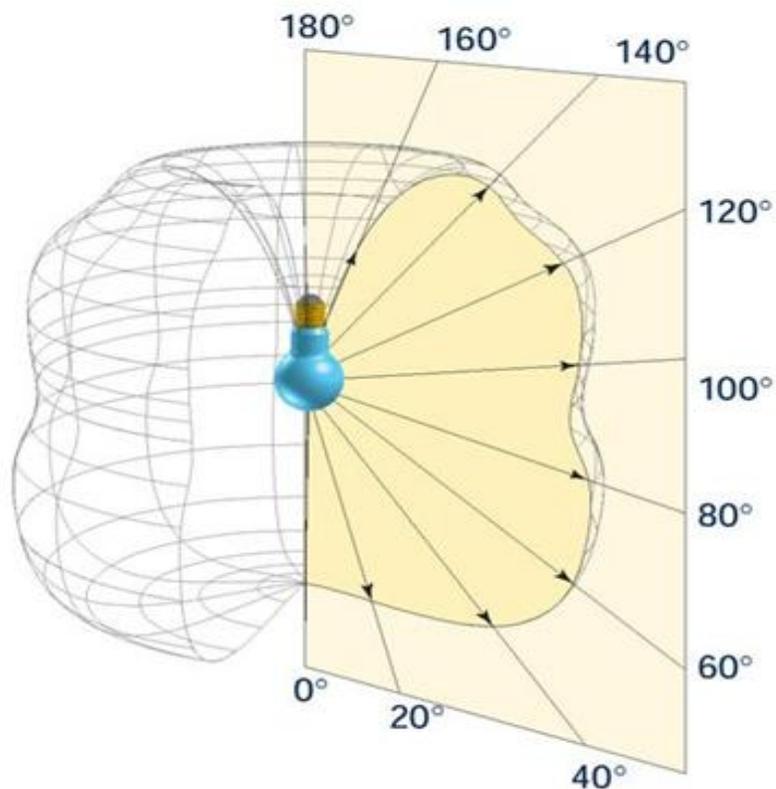


Figura 2.14 Sólido Fotométrico.

Si se hace pasar un plano por el eje de simetría de la fuente luminosa, por ejemplo, un plano meridional, se obtiene una sección limitada por una curva que se denomina curva fotométrica o curva de distribución luminosa (Fig. 2.15). (Fuente: Manual de Luminotecnia de Indalux, INDALUX 2002, <http://www.indal.es/portal/docs/Documentaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnica/Documentaci%C3%B3n%20Web%20Indalux/Luminotecnia>).

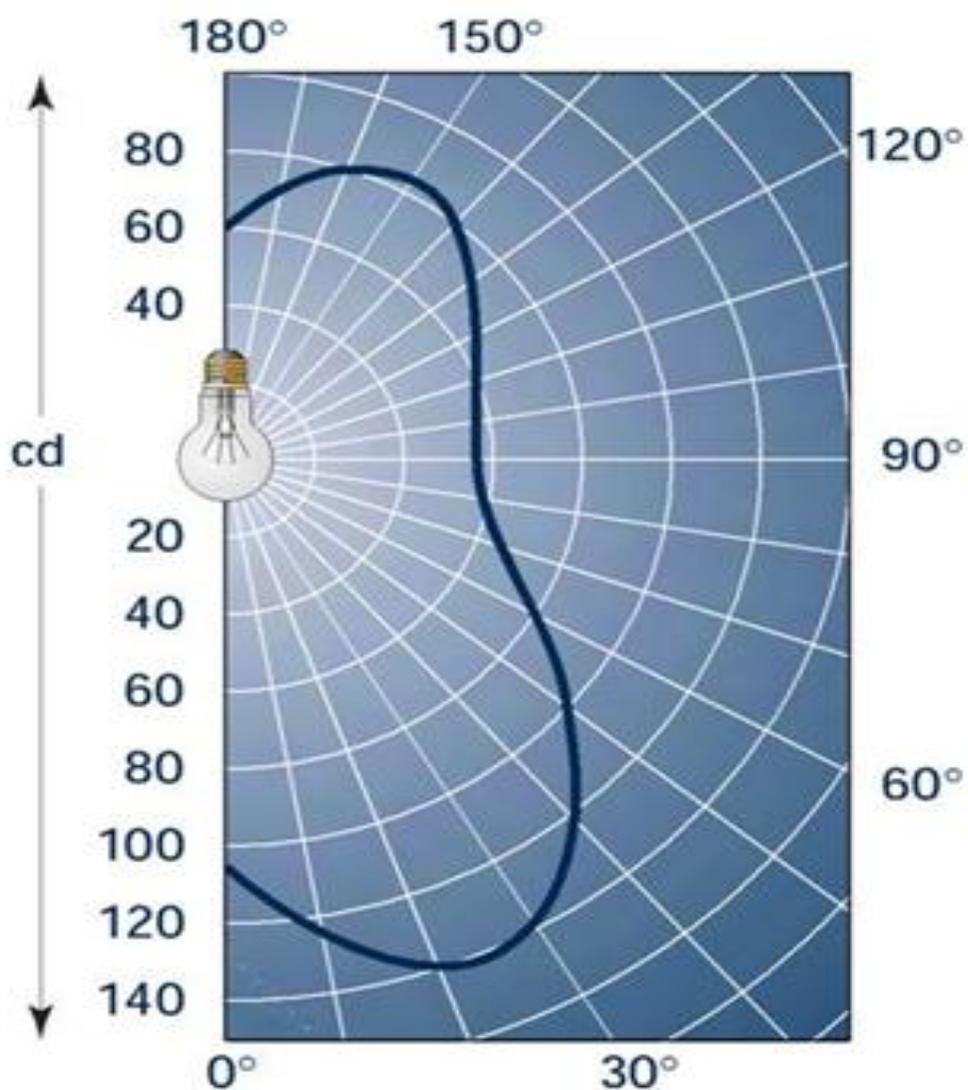


Figura 2.15 Curva Fotométrica de una Lámpara Incandescente.

Mediante la curva fotométrica de una fuente de luz se puede determinar con exactitud la intensidad luminosa en cualquier dirección, dato necesario para algunos cálculos de iluminación. Las direcciones del espacio por las cuales se radia una intensidad luminosa se puede determinar por dos coordenadas. Uno de los sistemas de coordenadas más usado para la obtención de curvas fotométricas es el “C - γ ” que se puede ver en la Fig. 2.16. (Fuente: <http://www.indal.es/portal/docs/Documentaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnica/Documentaci%C3%B3n%20Web%20Indalux/Luminotecnia/05.%20Magnitudes%20luminosas.pdf>)

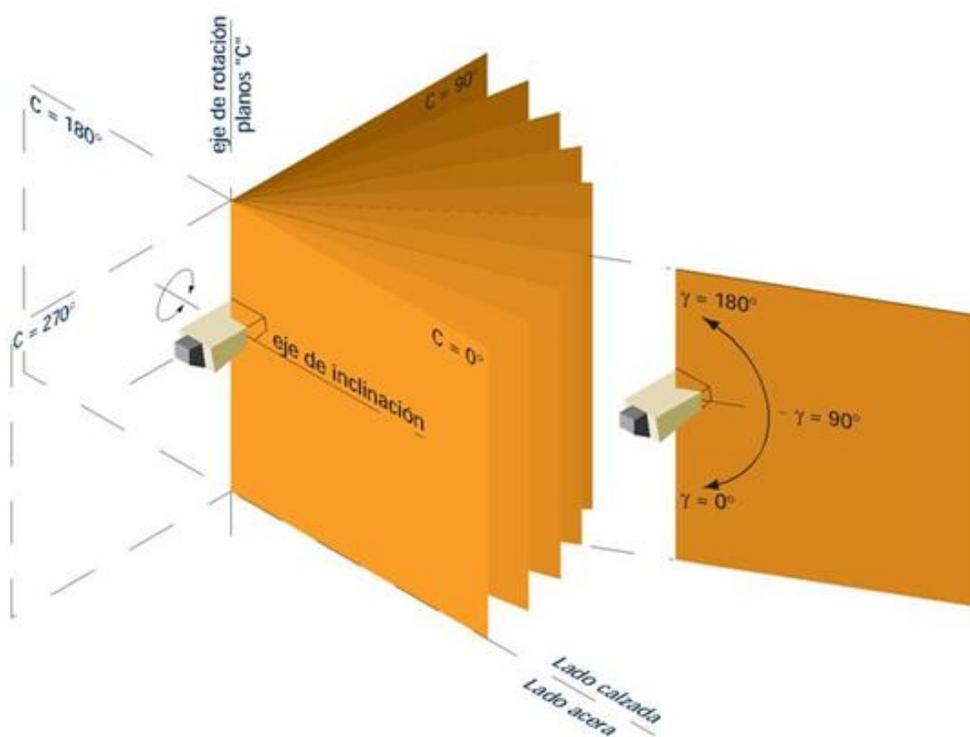


Figura 2.16 Sistemas de Coordenadas C- γ

Las curvas fotométricas se dan referidas a un flujo luminoso emitido de 1.000 lm. Y como el caso más general es que la fuente de luz emita un flujo superior, los valores de la intensidad luminosa correspondientes se hallan mediante una regla de tres simple. Cuando se aloja una lámpara en un reflector, se distorsiona su flujo proporcionando un volumen cuya

forma es distinta, ya que depende de las características propias del reflector. Por consiguiente, las curvas de distribución según los distintos planos son diferentes.

En las dos siguientes figuras se puede observar dos ejemplos en los que se han representado las curvas de distribución de dos reflectores.

El de la Fig.2.17 es simétrico, y tiene idénticas curvas para cualquiera de los planos meridionales, por lo que una sola curva es suficiente para su identificación fotométrica. (Fuente:<http://www.indal.es/portal/docs/Documentaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnica/Documentaci%C3%B3n%20Web%20Indalux/Luminotecnia/05.%20Magnitudes%20luminosas.pdf>)

El ejemplo de la Fig. 2.18 es asimétrico y cada plano tiene una curva diferente, por lo que es necesario conocer todos los planos. (Fuente:<http://www.indal.es/portal/docs/Documentaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnica/Documentaci%C3%B3n%20Web%20Indalux/Luminotecnia/05.%20Magnitudes%20luminosas.pdf>)

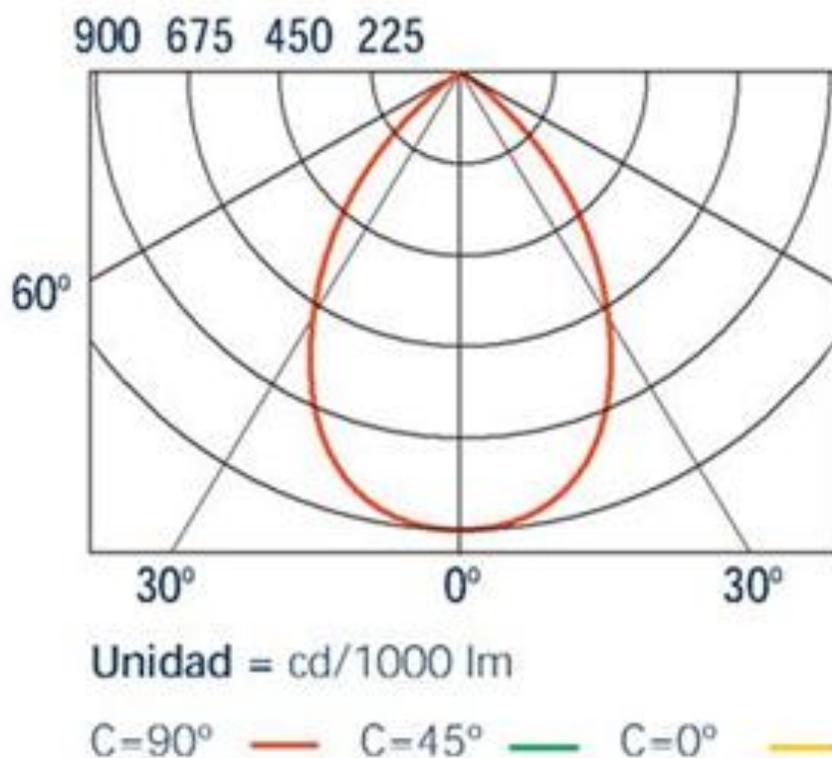


Figura 2.17 Curva de Distribución Fotométrica Simétrica

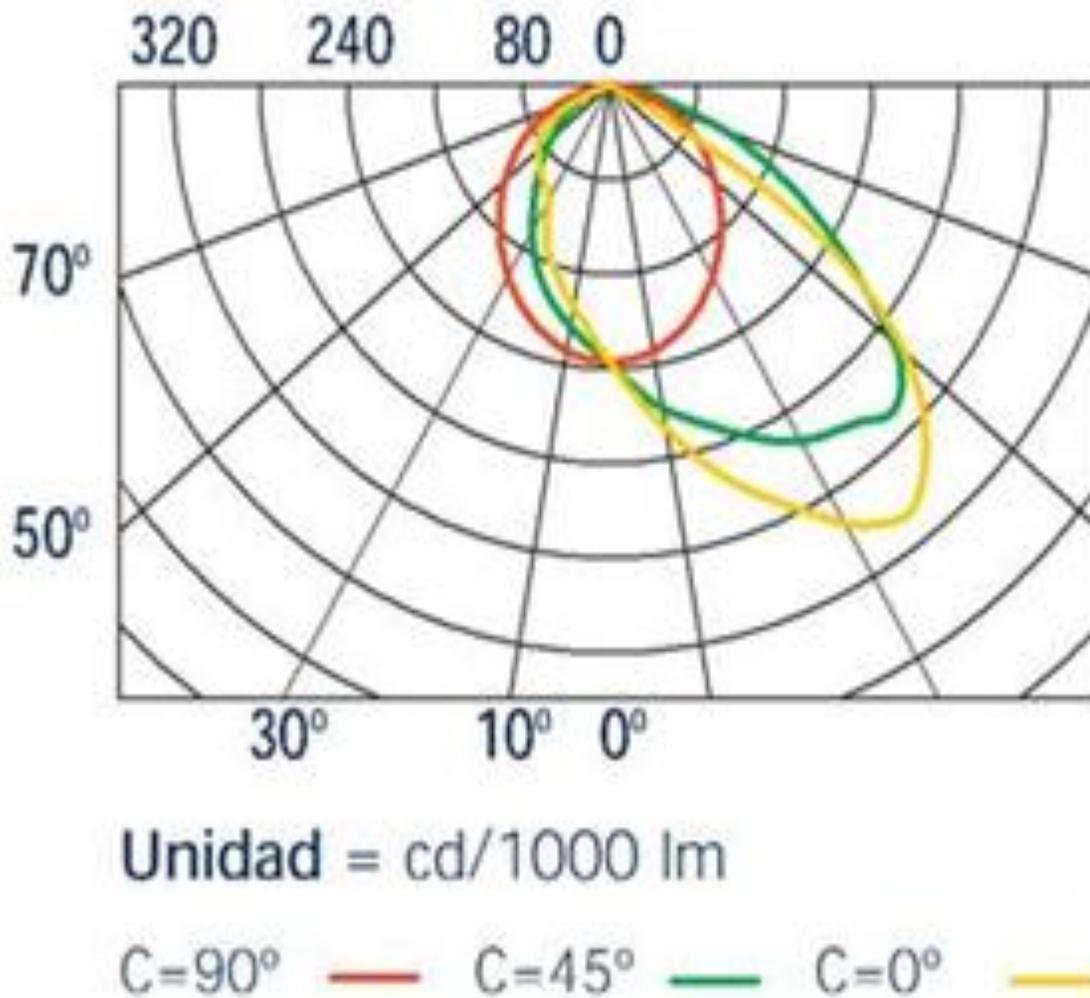


Figura 2.18 Curva de Distribución Fotométrica Asimétrica

El flujo emitido por una fuente luminosa proporciona una iluminación (iluminancia) en una superficie, cuyos valores se miden en lux. Si se proyectan estos valores sobre un mismo plano y se unen por medio de una línea los de igual valor, entonces da lugar a las curvas isolux figura 2.19. (Fuente: Manual de Luminotecnia de Indalux, INDALUX 2002, <http://www.indal.es/portal/docs/Documentaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnica/Documentaci%C3%B3n%20Web%20Indalux/Luminotecnia>).

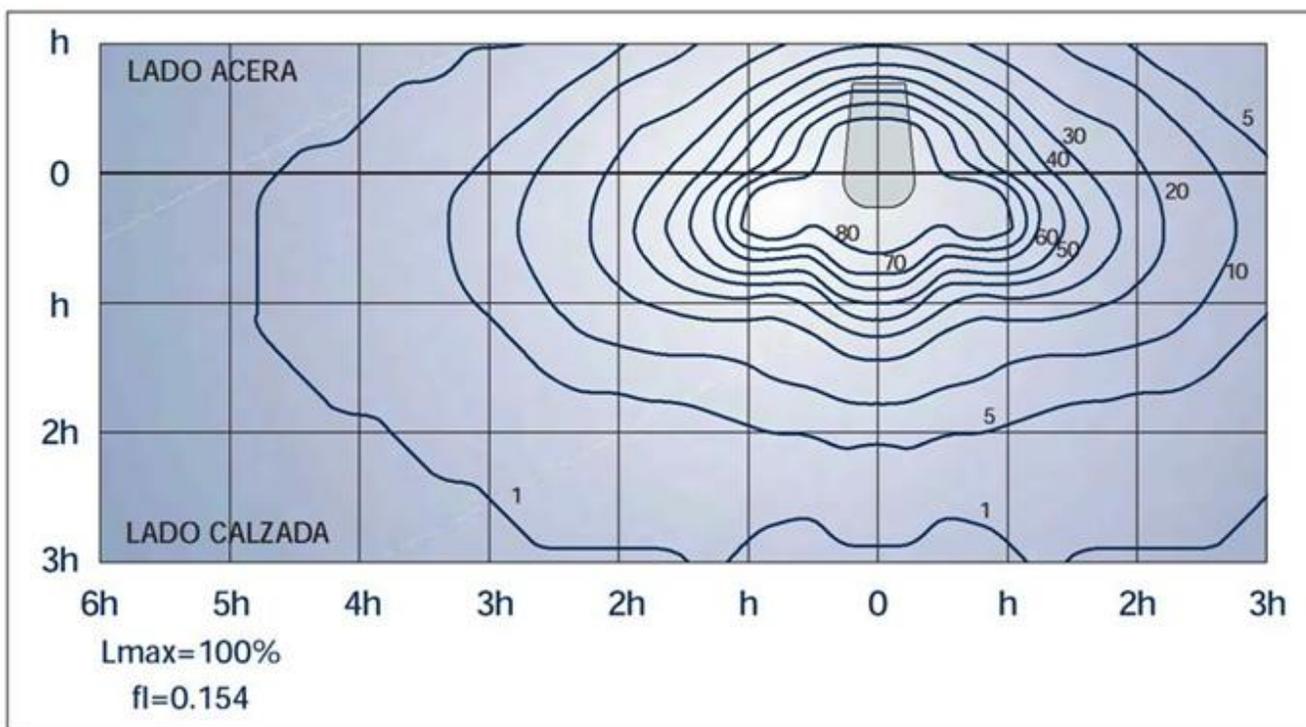


Figura 2.19 Curvas de Isolux

CAPÍTULO III

DISEÑO DE UN EQUIPO PARA OBTENER EL INFORME FOTOMÉTRICO DE UNA LUMINARIA

En este capítulo se encuentran los pasos y materiales utilizados para el diseño del equipo de medición, se presentan dos bloques dentro del diseño uno en base al hardware diseñado y el otro bloque en base a los software utilizados para el desarrollo del mismo.

3.1 DISEÑO DEL HARDWARE

El hardware está conformado por varios circuitos que se describirán más adelante. El componente principal para el desarrollo del equipo es un microcontrolador 18F452, fácil de controlar, versátil, manejable y económico.

A continuación se explica el diseño del hardware basado en el diagrama de bloques de la figura 3.1. Este diseño podría ser el inicio para el desarrollo de equipos para obtener informes fotométricos de luminarias, a partir del uso de Microcontroladores dentro de la Escuela de Eléctrica.

Se dividió en tres bloques el diseño del hardware básicamente porque los elementos se encuentran a distancia entre ellos y necesitan estar interconectados a través de cableado para la transmisión de los datos necesarios para el funcionamiento del mismo, y se desarrolló distintos circuitos integrados para la colocación de los mismos de manera fija.

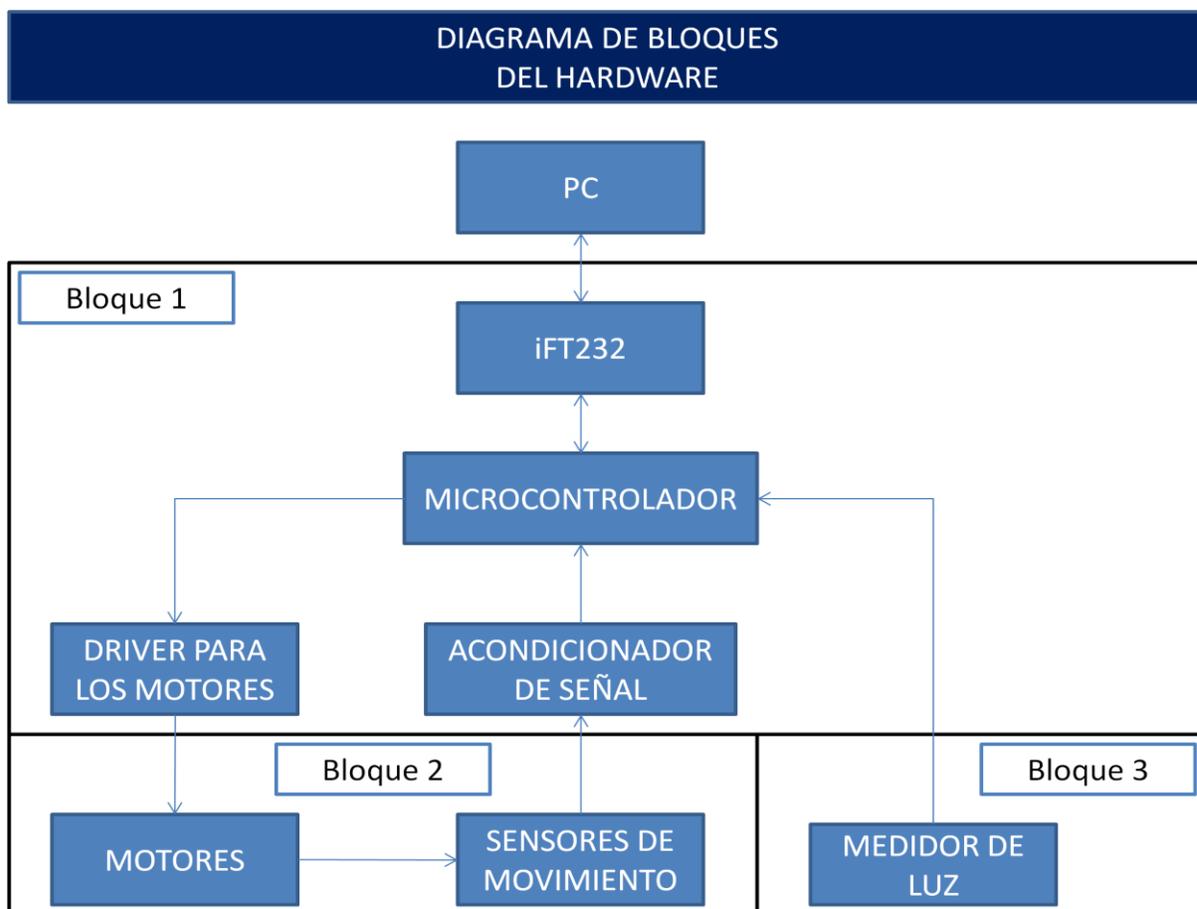


Figura 3.1 Diagrama de Bloques del Hardware

En la figura 3.2 se observa el diagrama completo del hardware base de todo el sistema, incluyendo los tres bloques en que se dividió el sistema, excluyendo la PC y los sensores de final de carrera colocados a los motores de paso, como también la simulación del bombillo, ya que en Proteus que es el programa usado no simula los cambios en la resistencia variable LDR por efecto de LUZ

Aquí lo que se muestra es el tipo de conexión que se realizó entre componentes al momento de conformar los bloques que describimos en la figura 3.1, también se observa que no se encuentra el iFT232 que es la conexión entre la PC y el Microcontrolador debido a que es un equipo encapsulado que se encuentra saliendo al mercado de muy fácil manejo y no se encuentra su componente dentro del programa Proteus.

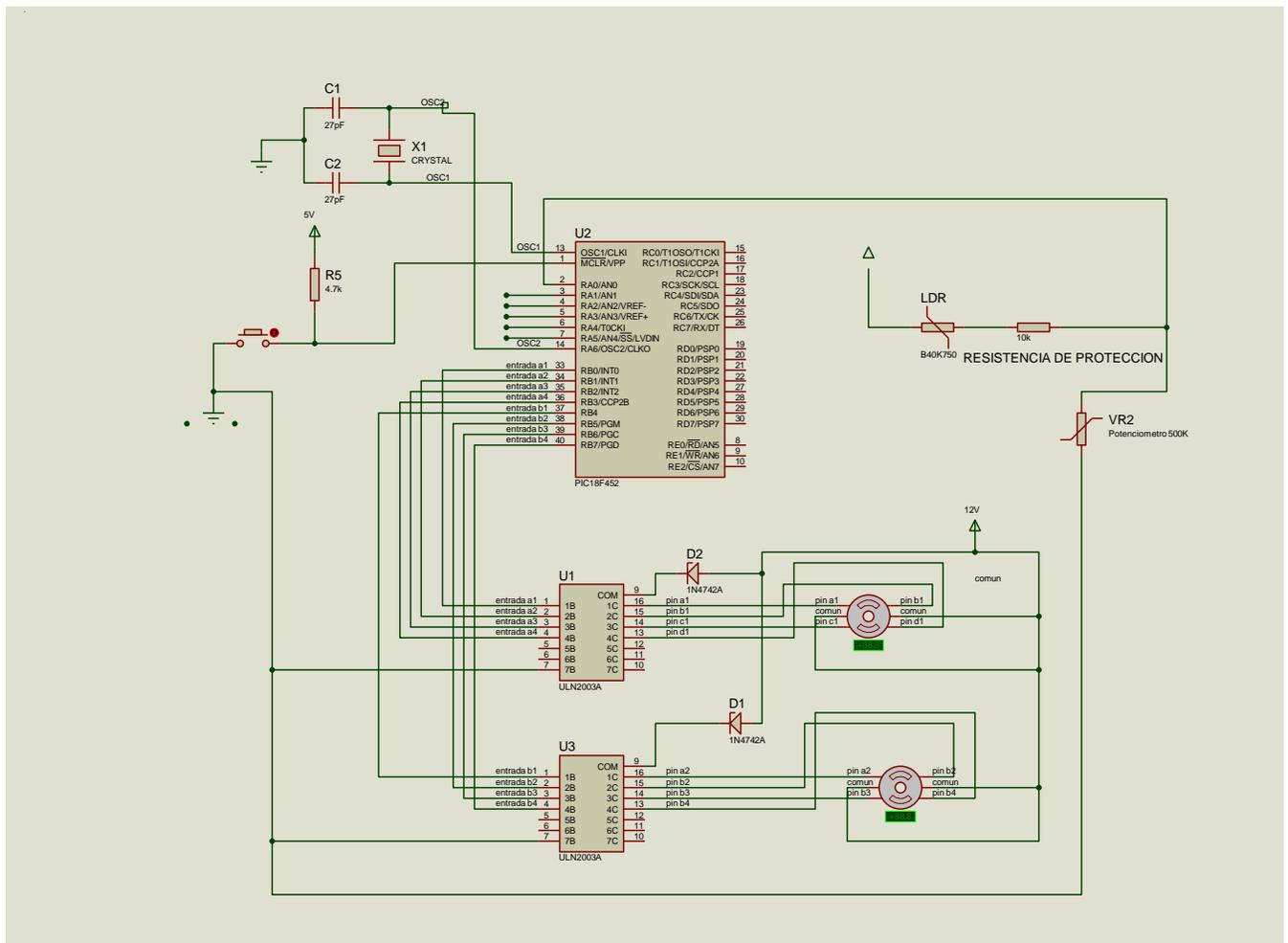


Figura 3.2 Diagrama Completo del Hardware Diseñado

El sistema consta de 3 bloques funcionales:

Bloque #1

Este bloque consta de un microcontrolador el cual es el cerebro del sistema, en el se toman todas las decisiones de control y adquisición de datos. Dentro de este bloque se encuentra también los drivers para el control de motores el cual consta de dos ULN2003 el cual es una

configuración Darlington, el acondicionamiento de la señal de los fotodiodos realizada con un LM311 el cual es un comparador de voltaje, finalmente un iFT232 donde este dispositivo cumple la función de convertidor USB a serial TTL para Microcontroladores microchip™ pic® y viceversa para la comunicación con el computador. Mas adelante se muestran etapas del diseño del bloque.

El Bloque #2

Este bloque consta de dos swiches ópticos o fototransistor, este elemento sensible se encargará de limitar el movimiento del sistema electromecánico, también se encuentran dos motores paso a paso los cuales están conectados mecánicamente a unos discos con engranajes para el movimiento de la luminaria.

Bloque #3

En este bloque se encuentra el aparato a utilizar para la medición de la intensidad de luz de la luminaria. Conformado por una LDR, una resistencia de $10K\Omega$ un potenciómetro el cual se usará para calibrar la señal analógica

3.1.1 Circuito de Bloque # 1 : conformado por:

1 PIC 18f452, 2 ULN2003AN, 1 iFT232, 2 LM311, 1 Cristal de cuarzo de 4 MHz, Resistencias, condensadores, diodos zener, jumper y swiches Como se muestra en las figuras 3.3 y 3.4 donde se observan el circuito impreso que se realizo en Eagle, figura 3.3 y en la figura 3.4 se observa ya el circuito impreso luego del proceso de quemado de pistas.

Dentro de este bloque se encuentra el motor de todo el sistema, ya que las rutinas de los motores y la lectura de datos se alojarán en este bloque a través del microcontrolador, el controlador contiene una serie de secuencias lógicas programadas en CCS de tal manera que tome decisiones del comportamiento del equipo, también procesará las señales analógicas enviadas a través del bloque #3 donde las emisiones de luz que reciba dicho bloque generará los valores analógicos correspondientes. Los ULN2003AN que no es más que una configuración Darlington de colector abierto funcionará como buffer inversor con salida de alta impedancia, al recibir una señal desde el microcontrolador este activará la salida correspondiente colocándola en un bajo de manera que cierre la bobina para el paso de la señal, este dispositivo al no presentar pulsos en la entrada sus salidas se comportan como alta impedancia, ayudando de esta forma el movimiento preciso de los motores.

Los LM311 servirán de comparadores lógicos donde estará limitado en 5 V. máximo y entenderá como un uno (1) lógico señales analógicas superiores a los 2.5 V, de lo contrario se comportará como un cero lógico (0).

En la figura 3.5 se puede observar el circuito anterior simulado en Eagle de los componentes sobre el circuito impreso, y en la figura 3.6 se observa los componentes ya colocados sobre el circuito impreso para su funcionamiento.

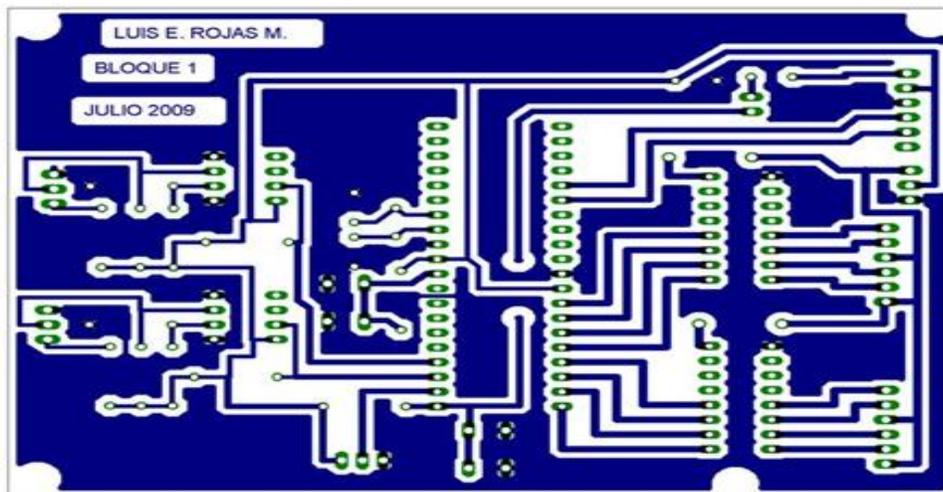


Figura 3.3 Cara Posterior del Circuito Impreso Bloque #1

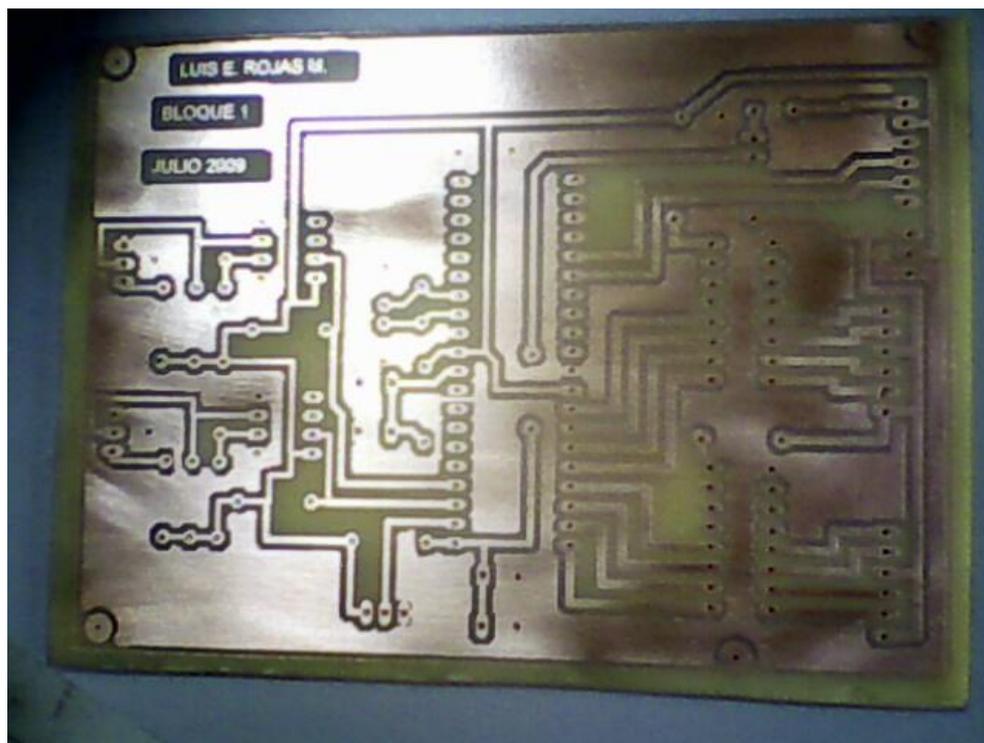


Figura 3.4 Cara Posterior Circuito Impreso Bloque #1 (baquelita)

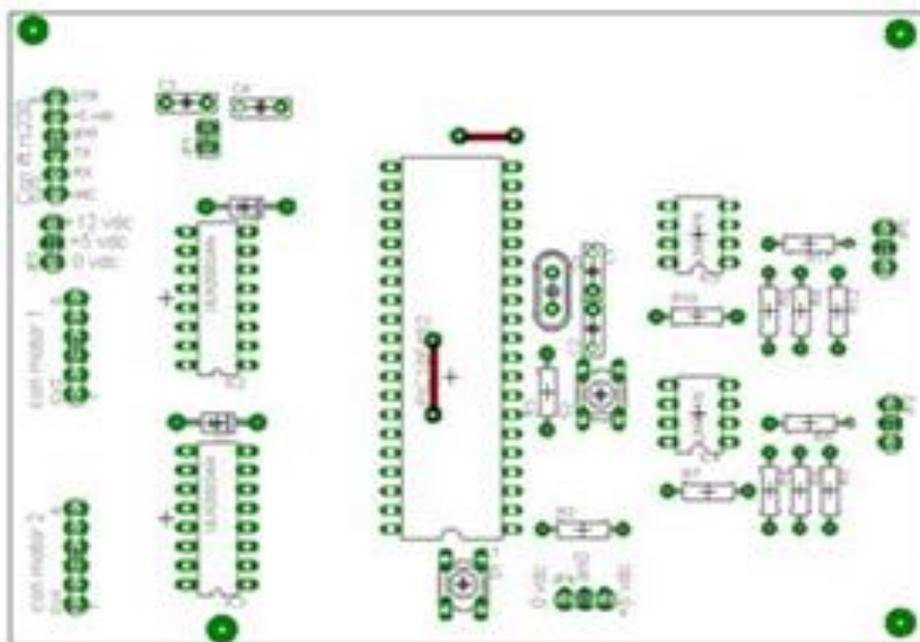


Figura 3.5 Cara Anterior del Circuito Impreso Bloque #1

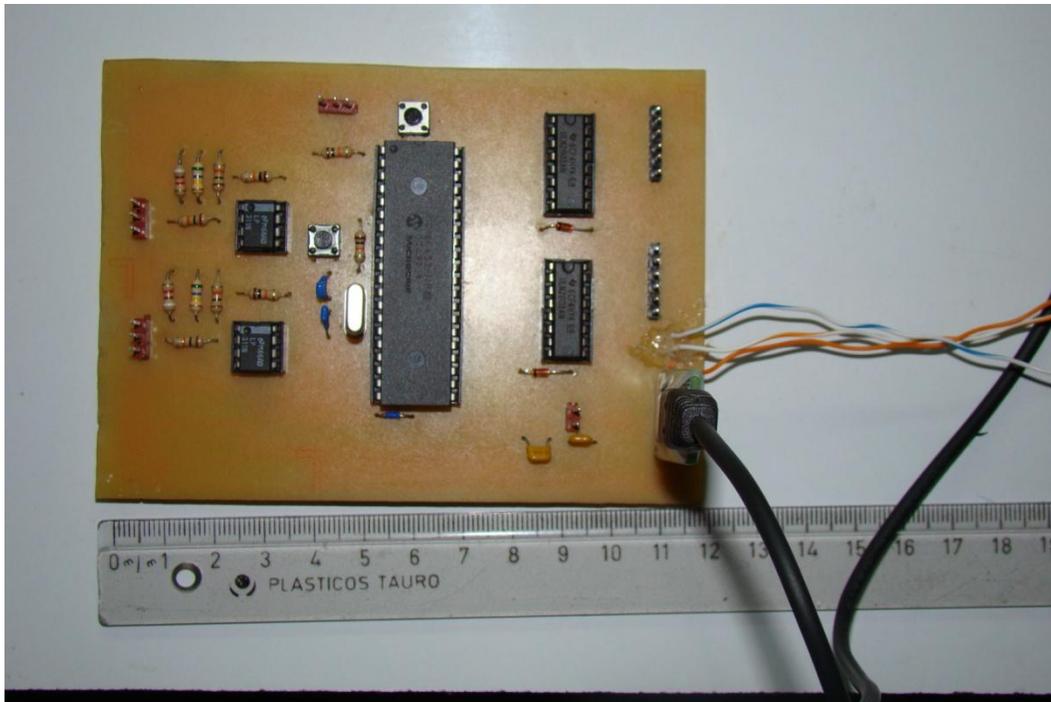


Figura 3.6 Cara Anterior Circuito Impreso Bloque #1 ensamblado

a. *Microcontrolador PIC18F452*

Usando 52a referencia: Microprocesadores, MANUAL PIC18FXX2. Microchip Technology.inc. 2006 [5]. Disponible en: <http://www.microchip.com>.

El microcontrolador PIC18F452 de Microchip pertenece a una gran familia de Microcontroladores de 10 bits (bus de datos) que tienen las siguientes características generales que lo distinguen de otras familias:

- Arquitectura Harvard
- Tecnología RISC
- Tecnología CMOS

Estas características se conjugan para lograr un dispositivo altamente eficiente en el uso de la memoria de datos y programa y por lo tanto en la velocidad de ejecución. Los Microcontroladores que produce Microchip cubren un amplio rango de dispositivos cuyas características pueden variar como sigue:

- Encapsulado (desde 8 pines hasta 68 pines)
- Tecnología de la memoria incluida (EPROM, ROM, Flash)
- Voltajes de operación (desde 2.5 V hasta 6 V)
- Frecuencia de operación (Hasta 20 MHz)

b. Configuración del PIC18F452 para el hardware.

De las 6 líneas del puerto (**RA**) se configura una como entradas analógicas (**RA0**), es usada para la señal proveniente del bloque #3 donde se encuentra la LDR, la cual se usará como sensor. Mientras que los puertos (**RA1**, **RA2**) se usan como entradas de los LM311, los cuales se usarán para detectar los límites del motor en el eje y.

Las 8 líneas del puerto (**RB**) están conectados a los dos ULN2003AN usados como drivers para controlar los motores de paso, los cuales proporcionaran el movimiento del equipo. El pin (**RE10**) usado como bootloader, para una fácil reprogramación del microcontrolador. La transmisión de datos serial hacia el computador es a través del pin **25** (**RC6**), mientras que la recepción de datos es por el pin **26** (**RC7**). Esto con el fin de graficar y monitorear el proceso. La comunicación entre el PIC y el computador se realiza por medio de un protocolo de transmisión RS232, a través del iFT232, el cual simula la conexión serial al computador por un puerto USB.

La alimentación del PIC son los pines **11** y **32** con un valor de + **5 V**. La tierra son los pines **12** y **31** con un valor de 0 V. Posee además un circuito de reset pin **1** (**MCLR**), siglas que significan “MASTER CLEAR RESET”, esto con el fin de reiniciar el microcontrolador a la hora de una interrupción del programa principal, al accionar el pulsador todos los puertos quedan en alta impedancia, referidos a tierra.

c. Convertidor USB a serial TTL para Microcontroladores microchip™ pic® ift232

El convertidor iFT232 es un convertidor de bus USB a puerto SERIAL RS232 con niveles de tensión TTL, el cual, puede ser utilizado en una gran cantidad de aplicaciones junto a los microcontroladores PIC®, Atmel®, Motorola®, Parallax™ y cualquier otro fabricante de microcontroladores existentes en el mercado actual.

Es excelente a la hora de disponer de una conexión a puerto serial, sobre todo en la actualidad que los computadores personales tipo portátiles no la tienen disponible. Con el iFT232 se soluciona este problema, ya que se puede utilizar un puerto del tipo USB desde su PC ya sea portátil o de escritorio y conectarlo directamente a UART de su microcontrolador. La tarjeta iFT232 se comportará como un puerto serial virtual RS232 tipo COM y podrá utilizar todos los recursos de programación para puerto serial de los cuales usted dispone.

Circuito que se observa en la figura 3.7, muy fácil de trabajar ya que se tiene conexión directa con el microprocesador, ahorrando trabajo y espacio.

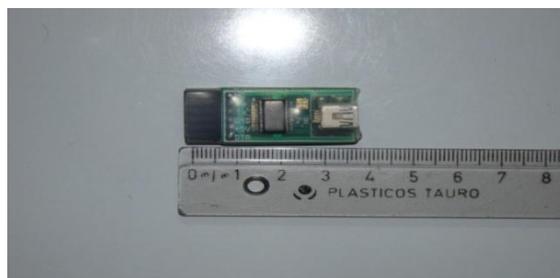


Figura 3.7 Circuito Integrado iFT232

d. LM311

Comparadores de colector abierto disponible en <http://www.national.com/ds/LM/LM311.pdf>

Los terminales de salida del colector y emisor son accesibles externamente para permitir que el usuario polarice Q_o con un voltaje diferente a la alimentación del integrado. Típica aplicación para conversión de niveles de voltaje analógico en niveles digitales (interfaces). Este circuito de colector abierto será usado para acondicionar la señal proveniente de los fototransistores de manera de manipular con mayor rango los altos y bajos lógicos (1 y 0).

e. ULN2003AN

Disponible en http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/U/L/N/2/ULN2003AN.shtml

El integrado ULN2003AN incluye siete circuitos para manejar cargas de potencia media, en especial pequeños motores y cargas inductivas, con la capacidad de controlar corriente hasta 600 mA. En cada circuito y una tensión entre 4,5 V a 24 V.

Los circuitos individuales se pueden usar de manera independiente para controlar cargas de todo tipo y, en el caso de ser motores, manejar cualquier sentido de giro.

El integrado permite formar, entonces, siete configuraciones Darlington de colector abierto, con los que se puede realizar el manejo de motores. En este caso el manejo será bidireccional, con frenado rápido y con posibilidad de implementar fácilmente el control de velocidad.

Las salidas tienen un diseño que permite el manejo directo de cargas inductivas tales como relés, solenoides, motores de corriente continua y motores por pasos, ya que incorpora internamente los diodos de protección de contracorriente para cargas inductivas, sin embargo para el diseño de nuestro equipo se colocaron diodos a las salidas y entradas del ULN2003 de manera de protección del equipo por las corrientes de refluo las cuales pueden descontrolar el movimiento en la secuencia que elijamos girar.

3.1.2 Circuito de Bloque #2 conformado por:

2 Fototransistores H2_H21A1, 2 motores de paso 60x9. En la figura 3.8 se observa el sistema de pistas del circuito impreso del bloque #2, las cuales son para el montaje del fototransistor. Y en la figura 3.9 se observa el circuito impreso ya diseñado.

Dentro de este bloque se encuentra parte fundamental del sistema, los fototransistores trabajaran como detectores de límite del movimiento en el eje y del dispositivo, también se encuentra la parte electromecánica conformada por los motores de paso, los cuales se encargaran de generar el torque necesario para desplazar la bombilla en todos los sentidos necesarios para la obtención de los datos.

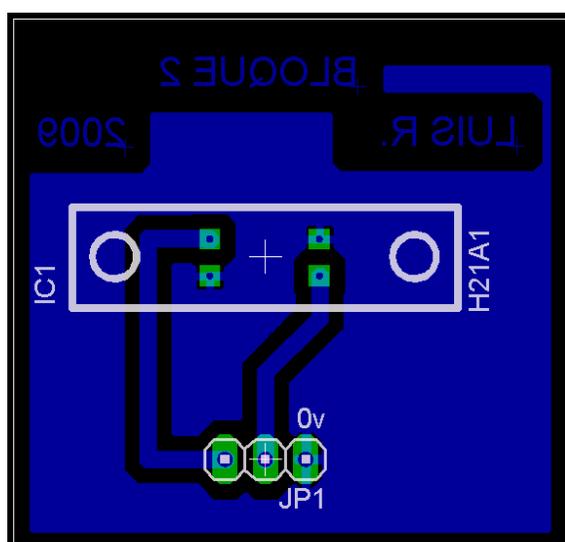


Figura 3.8 Cara Posterior Circuito Bloque #2



Figura 3.9 Cara Posterior Circuito Impreso Bloque #2 (baquelita)

a) *Fototransistor H2_H21A1*

Disponible en http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/H/2/1/A/H21A1.shtml

Es un sensor acoplado por un transistor con un fotodiodo, su función principal radica en la transmisión de energía al existir luz, lo cual activa el transistor, colocando un bajo en la salida. Esta acoplado de manera que la corriente que circule por el diodo se encuentre dentro del rango permitido, para lo cual se colocó una resistencia de 9.1 K Ω en el transmisor y una resistencia de carga en el colector de 560K Ω .

De manera inversa cuando no circula luz este se encuentra en estado de corte, haciendo que el dispositivo refleje la tensión de alimentación del colector la cual es un alto. En la figura 3.10 se observa el fototransistor ya adaptado al circuito impreso, donde las resistencias antes mencionadas se encuentran en el bloque #1 para que este dispositivo sea mas pequeño y de fácil adaptación.

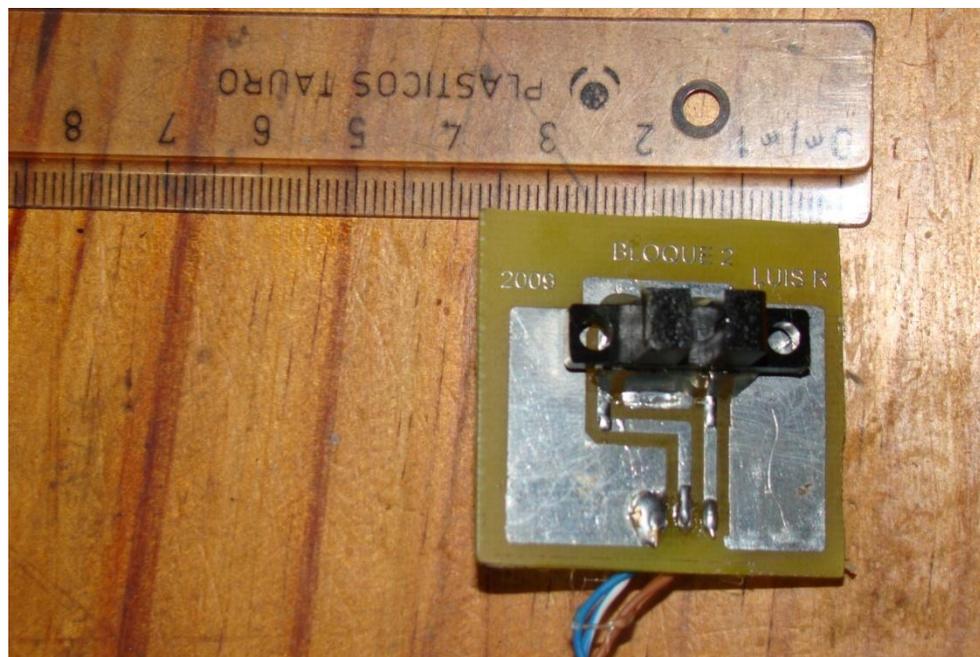


Figura 3.10 Cara Anterior Circuito Impreso Bloque #2 con el sensor

b. Motores de paso unipolares modelo 60x9

La principal característica de este motor es que se puede posicionar su eje en una determinada posición de giro, además es posible tener un control muy preciso de su velocidad de giro.

El estator de estos motores está constituido por varios electroimanes y el rotor por uno o varios imanes permanentes, a las diferentes bobinas del estator se alimenta mediante impulsos, proporcionados normalmente por un circuito electrónico, que en este caso serán los ULN2003AN, consiguiendo que el rotor se posicione paso a paso según sea el avance de dichos impulsos.

En la figura 3.11 se puede observar el diseño de la parte electromecánica donde participan los motores en el movimiento de la luminaria, se encuentran trabajando de forma perpendicular de manera de girar la bombilla en los ejes necesarios para la formación de las curvas de isolux y el diagrama polar.

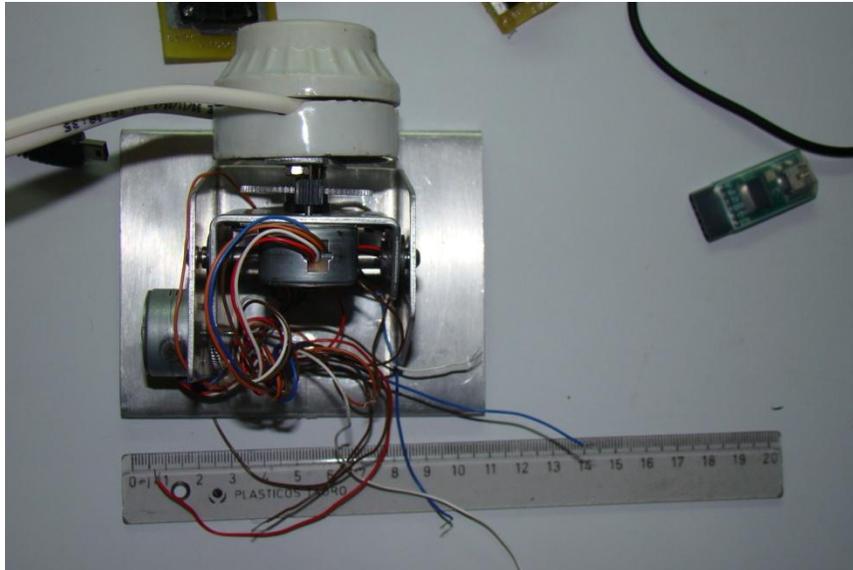


Figura 3.11 Diseño Electromecánico Bloque #2 Modelo 1

3.1.3 Circuito de Bloque #3 conformado por:

Fotorresistencia LDR C-2795, potenciómetro de $500\text{k}\Omega$, y resistencia de $10\text{k}\Omega$.

Dentro de este circuito se encuentra el instrumento sensible a la luz (LDR), dicho dispositivo se encuentra en serie al potenciómetro de $500\text{k}\Omega$ y una resistencia de $10\text{k}\Omega$. Donde la función del potenciómetro es de variar el rango de valores analógicos con el propósito de aumentar el rango de medidas y mantener una tensión que el microprocesador pueda convertir a digital. La resistencia de $10\text{k}\Omega$ se encuentra como dispositivo de seguridad al momento de que la LDR se encuentre en corto y accidentalmente el potenciómetro se encuentre en su valor mínimo.

En la figura 3.12 se observa el diseño de las pistas usadas para este bloque, el cual es la parte que simula el comportamiento del ojo humano al momento de realizar las medidas. En la figura 3.13 se observa el equipo ya diseñado el cual será usado para la prueba y toma de datos, se observa la LDR a usar y el potenciómetro colocado.

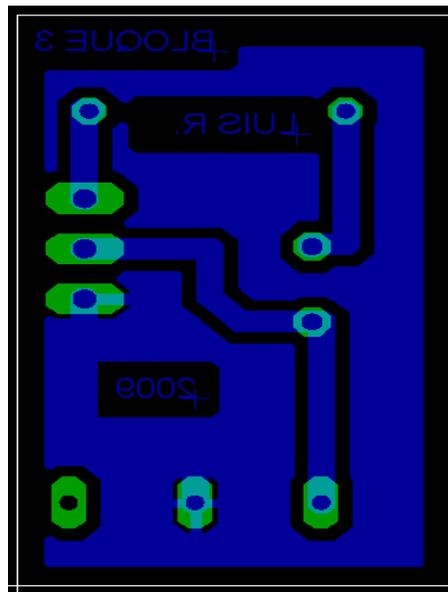


Figura 3.12 Cara Posterior circuito bloque #3 en Eagle.



Figura 3.13 Circuito impreso Bloque #3 ensamblado.

a. LDR C-2795

Disponible en: <http://www.electan.com/catalog/datasheets/cebek/CE-C2795.pdf>

Fotorresistencia o resistencia dependiente de la luz, consistente en una célula de Sulfuro de Cadmio, altamente estable, encapsulada con una resina epoxi transparente, resistente a la humedad. La respuesta espectral es similar a la del ojo humano. Su nivel de resistencia aumenta cuando el nivel de luz disminuye.

3.2 DISEÑO DEL SOFTWARE

A continuación se explica el diseño del Software usando una interfaz gráfica como lo es Visual Basic y un microcontrolador PIC18f452, en el cual se muestran los diagramas de flujo los cuales definirán las rutinas para los bloques #2 y #3. En el cual se darán las ordenes para el movimiento de los motores y donde simultáneamente se tomaran lecturas a través del circuito del bloque #3, el barrido de dicho programa se efectuará dentro de los rangos de (0-180°) en el eje C, y (0-90°) en el eje y.

Dentro del microcontrolador se desarrollará la conversión de los datos a ser transmitidos al PC, ya que las lecturas obtenidas se encuentran en forma analógica (voltajes).

Los movimientos de los motores se desarrolló de tal manera que para lectura mínima en ambos ejes sea de 5°, cada uno de estos pasos de 5° se tomaran tres lecturas las cuales serán promediadas para obtener un valor promedio.

El diseño en Visual Basic se presentara la interfaz entre el usuario y el equipo, siendo el control al cual el usuario tiene acceso. El software se encarga de llevar a cabo rutinas para la

presentación de las curvas de isolux, diagrama polar, así como también mostrar la matriz de intensidades luminosas obtenida por el equipo.

Básicamente el software diseñado en visual se centrará en la interfaz gráfica con el usuario y en una serie de comando en los cuales enlazará rutinas de visual con análisis matemáticos ya diseñados en Excel, para de esta forma realizar los cálculos necesarios y generar los gráficos necesarios para la interpretación de los datos.

Visual exportará a Excel los valores obtenidos a través del puerto USB. Donde luego llamará a rutinas de Excel donde luego de ordenar los datos. Generará las gráficas para luego ser llamadas por visual y mostrarlas en el computador.

3.2.1 Ventana Principal.

En la figura 3.14 se encuentra la ventana principal del software diseñado en Visual Basic donde se necesitará introducir los datos necesarios para el funcionamiento del equipo. El primer dato necesario es el número o nombre del ensayo, donde se introducirá el nombre con el cual se guardará el informe.

Más abajo se encontrará la opción de introducir el tipo de lámpara a examinar. También se pedirá la marca, modelo y flujo. Seguido aparecerán tres opciones a realizar con el software, el primer botón que aparece es **Siguiente**. Donde el software pasará a otra ventana para continuar con el proceso del informe fotométrico.

Aparecerá el botón de **Ejemplo** donde el software pasará automáticamente a tablas de datos ya guardadas para generar el informe. Finalmente aparecerá el botón de **Salir** con el cual automáticamente cerrará la ventana.



Figura 3.14 Ventana Principal del Software

3.2.2 Ventana Secundaria.

Esta ventana se despliega automáticamente al hacer click en **Siguiente**, donde se debe introducir la altura del montaje, al cual se realizará la medición y el ángulo al cual iniciará el barrido.

Adicionalmente también aparecen tres botones que presentan las opciones a realizar, una de ellas es **Atrás** donde se tiene la opción de regresar a la ventana principal y comenzar de nuevo.

Encontramos el botón de **Iniciar Procesar** donde el software enviará los códigos necesarios al microcontrolador para el comienzo del barrido, simultáneamente cambiará la ventana desplegando una barra dinámica que se cargará a medida que los datos sean cargados en el sistema. También presenta la opción de **Salir** la cual ejecuta el mismo procedimiento que el realizado en la ventana anterior. Se puede observar en la figura 3.15

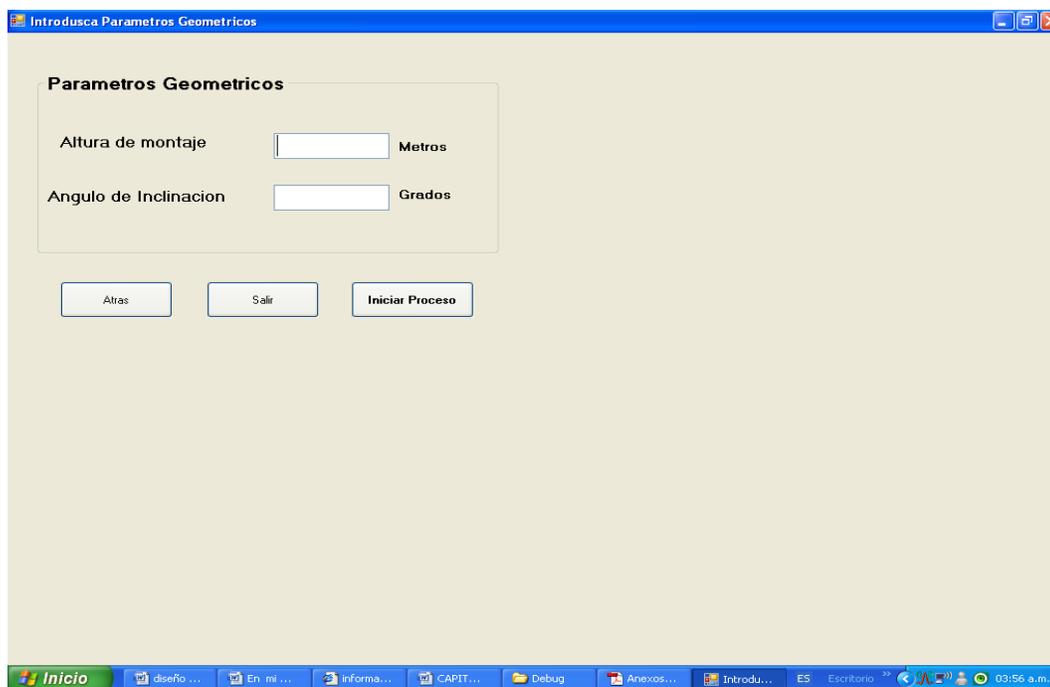


Figura 3.15 Ventana Secundaria del Software

3.2.3 Ventana de Procesamiento de Datos

Esta ventana se encontrará desplegada el tiempo que necesite el microcontrolador y el software para recopilar los datos y procesarlos, como se puede observar en la figura 3.16.

Muestra una barra dinámica la cual ira cambiando de color a medida que el proceso este avanzando para de esta manera informar el estado del programa realizando los cálculos

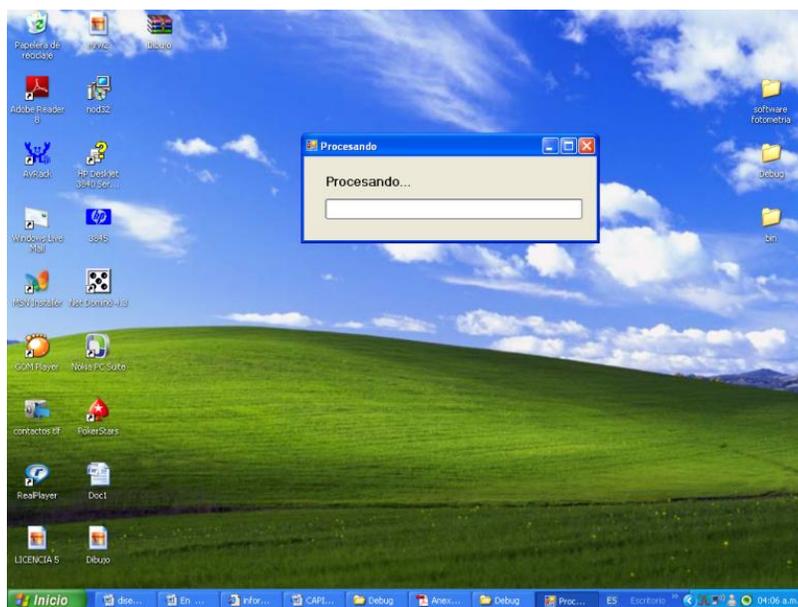


Figura 3.16 Ventana de Barra Dinámica del Software.

3.2.4 Opciones de Gráficas

Esta ventana se abrirá automáticamente al terminar de procesar los datos, también se aprecia esta ventana si en la ventana principal se presiona el botón de **Ejemplo**, ya que automáticamente busca datos ya guardados como ejemplos.

Esta ventana despliega una serie de opciones para la comodidad del usuario, donde encontrará cuatro botones con diferentes opciones al usuario, al hacer click en **Matriz de Intensidades** el programa mostrará en pantalla la matriz de intensidades de dicha luminaria. Al igual que al hacer click en los botones de **Curvas de Isolux** o **Diagrama Polar**, donde mostrará cada una de las gráficas seleccionadas en pantalla.

Por último se tiene el botón de **Generar Informe** donde automáticamente el programa exportará todos los datos obtenidos a un archivo en Word y automáticamente guarda el

archivo para revisarlo en un futuro y finalizará el programa. Se puede observar en la figura 3.17.

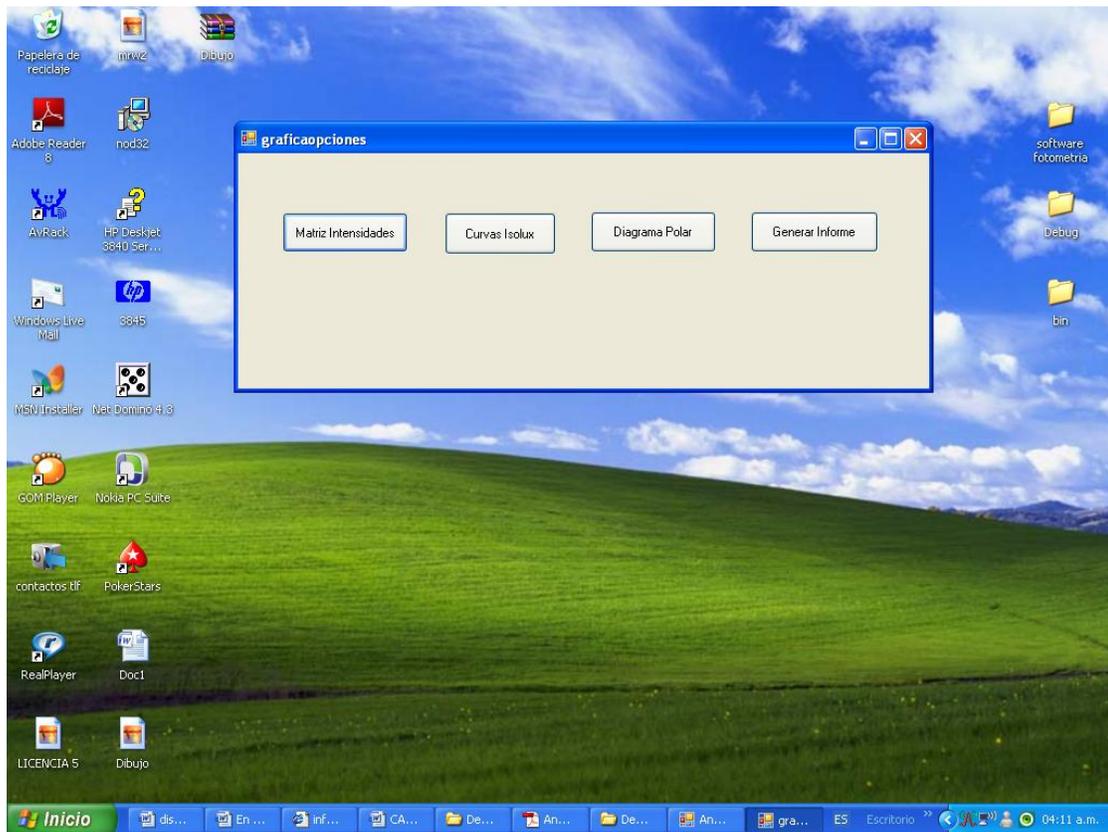


Figura 3.17 Opciones de Gráficas

CAPÍTULO IV

RESULTADOS OBTENIDOS

No fue posible realizar la calibración del equipo debido a que no se encontró en ninguno de los laboratorios que prestaron su ayuda un equipo adecuado para obtener muestras patrón y de esta forma codificar los valores que arrojaría el programa al hacer la conversión de digital a decimal, pero se realizaron medidas con el sensor, para verificar el comportamiento del equipo, por lo tanto las calibraciones se dejaron para posteriores trabajos.

Se realizaron medidas con el sensor diseñado de tal forma de evaluar el comportamiento del equipo, se procuró establecer el rango de medida analógica al valor máximo, de forma que el rango de medidas mínimo que la resolución del convertidor analógico/digital del microprocesador sea $5/1024$, lo cual da una resolución de aproximadamente 4 mV, se realizaron barridos a dos bombillos diferentes, en el primero se estudio un bombillo de 18 W. marca YAMAHA de 1000 Lm. De tal forma que el valor arrojado por el convertidor se asoció a 1000 Lm o cerca, solo para estudiar un patrón de comportamiento del equipo. Durante el estudio de dicha bombilla se observó que el flujo era continuo en casi todas las direcciones, se observó que el valor del medidor analógico fue mayor al momento de inicio, que fue donde la lámpara se encontraba a 0 grados en ambos ejes.

En la figura 4.1 se observa el momento de inicio del barrido. El cual se realizó a una distancia aproximada del sensor de 0.60 m. y estableciendo un rango arbitrario como patrón de 1000 Lm.

Se observó el comportamiento analógico del sensor a través de un multímetro como el que se observa en la figura 4.1, en la figura se puede observar a mano derecha y arriba el sensor diseñado. El cual se encuentra en este momento en forma perpendicular al bombillo debido al inicio del experimento. Se observa sobre la mesa el circuito de bloque #1. El cual esta controlando todos los movimientos del equipo, a partir de aquí los motores de paso realizaron el respectivo barrido, el cual fue de tomar aproximadamente 162 muestras las cuales generan el barrido en los ejes C-y, variando en el eje C desde 0 a 180 y en y desde 0-90.

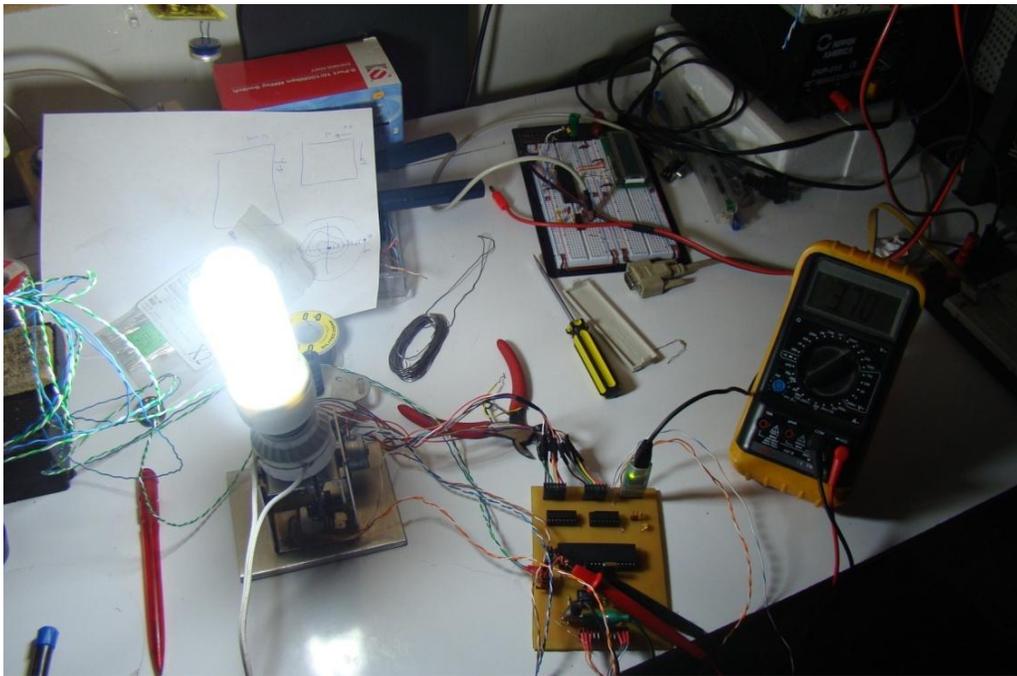


Figura 4.1 Inicio de Barrido De Bombillo

Como ya se dijo anteriormente esta lámpara se comportó de manera que a medida que el ángulo de incidencia era mayor el valor analógico que resultó en el equipo no varió relativamente mucho.

A continuación se muestra la figura 4.2 donde se observa el barrido que esta efectuando el equipo y el bombillo se encuentra a un ángulo de incidencia.

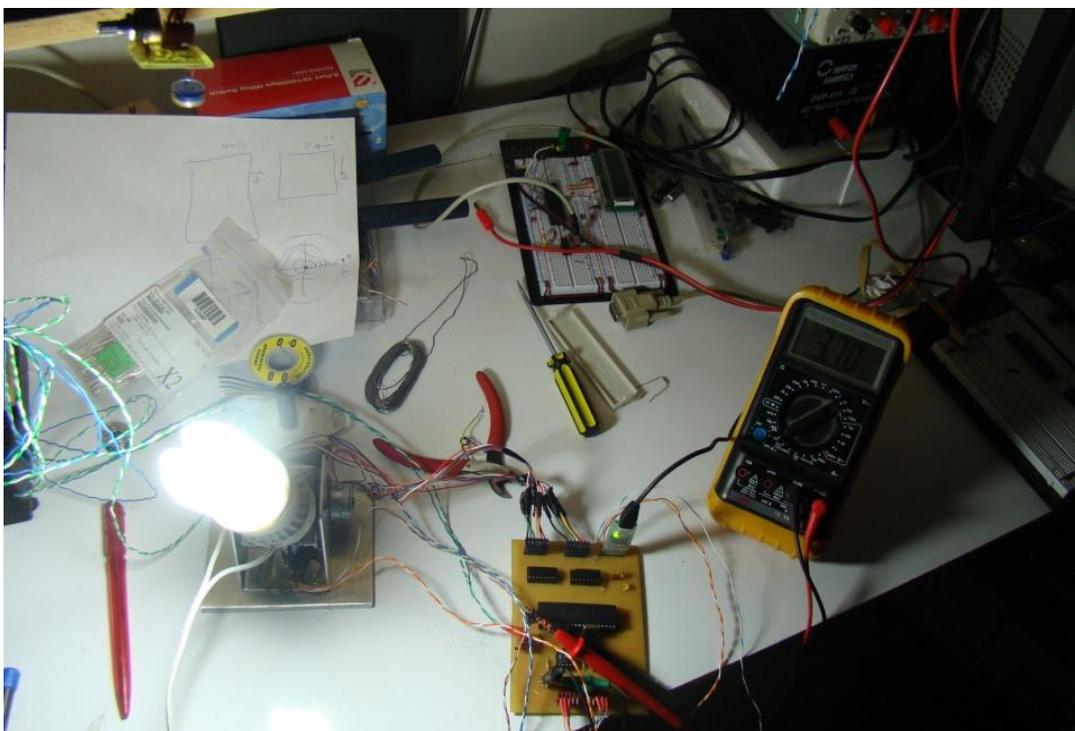


Figura 4.2 Barrido de Bombillo Fluorescente

A continuación se muestra las diferentes ventanas observadas al momento del barrido del bombillo fluorescente,

Analisis Fotometrico

Automatizacion de Informe fotometrico

Ensayo Nro

Tipo Lampara

Caracteristica Lampara

Marca

Ampolla

Flujo

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

Figura 4.3 Ventana principal del estudio del Fluorescente.

En la figura 4.4 se introduce alguno de los parámetros necesarios para efectuar el barrido del bombillo. Donde se observa el valor inicial del barrido y la altura a la cual se hizo el estudio.

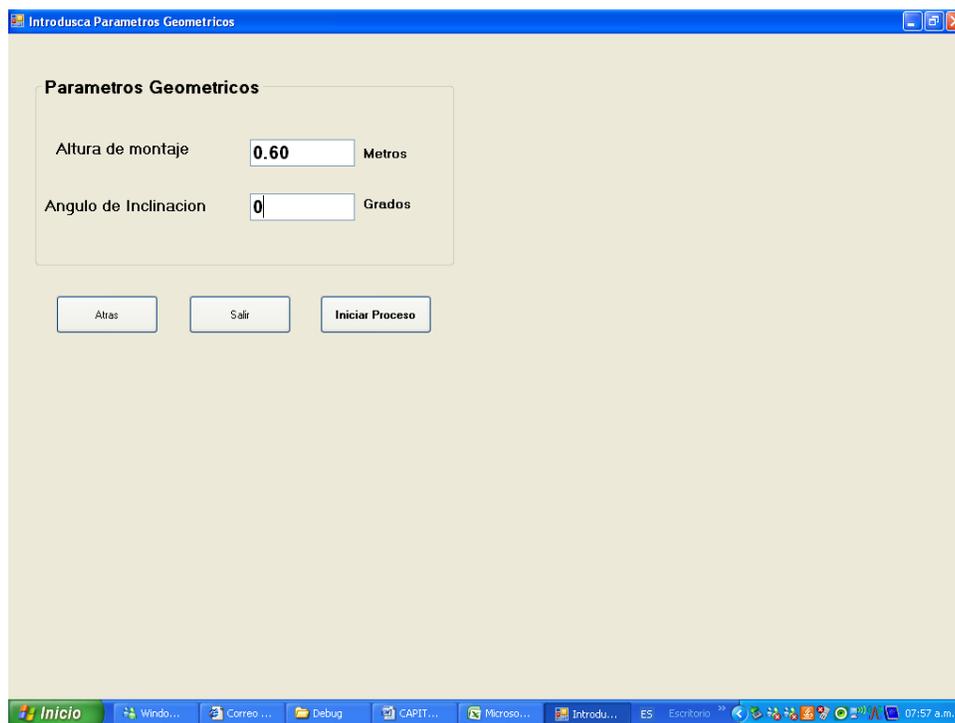


Figura 4.4 Ventana Secundaria

Como ya la estructura del software se explicó en el capítulo anterior, a partir de aquí solo se mostrará las curvas y las matrices de intensidades obtenidas por ambos bombillos.

Como se puede observar en la figura 4.5 se observa la matriz de intensidades generada a través del software diseñado y los datos obtenidos con el microprocesador. En este barrido se observó que los datos obtenidos por el equipo están acordes a lo planteado al momento de tomar la lectura, claro esta que no es un dato exacto de lo que se desea que haga el instrumento, pero se demuestra que si es capaz de enviar y recibir datos y generar gráficas a con la ayuda de un patrón establecido previamente.

F1	F2		F3		F4		F5		F6		F7
Barrido	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	450	440	420	420	380	380	370	360	340	325	
10	450	440	420	410	370	380	360	350	335	320	
20	450	440	430	410	380	370	360	350	340	310	
30	450	440	420	410	380	370	350	340	330	310	
40	450	430	430	410	370	360	360	340	330	310	
50	450	440	420	410	380	370	360	330	335	310	
60	450	430	430	415	370	370	350	330	340	325	
70	450	440	430	415	360	350	350	340	325	320	
80	450	440	425	420	360	355	340	340	330	315	
90	450	445	420	410	370	360	350	340	340	315	
100	450	440	425	410	370	370	360	330	340	325	
110	450	430	430	415	380	350	340	340	340	330	
120	450	420	420	415	380	360	350	340	320	320	
130	450	420	430	410	370	350	360	330	320	320	
140	450	420	420	410	370	360	350	340	325	320	
150	450	440	420	410	380	360	340	340	325	320	
160	450	450	420	410	380	360	360	330	330	320	
170	450	430	430	410	380	360	350	330	320	320	
180	450	420	430	410	370	350	350	330	330	320	

Figura 4.5 Matriz de intensidades de Bombillo Fluorescente

En la figura 4.6 se observa el diagrama polar reflejado por el equipo diseñado donde los valores del 1 al 11 representan la distribución del ángulo C desde -90 a 0 y 0 a 90 donde el valor del cero en esta gráfica estará entre los valores 7 y 6 respectivamente de la gráfica. Se representó con estos valores por falta de un equipo patrón, se recuerda que solo se esta realizando la prueba de que el diseño funciona.

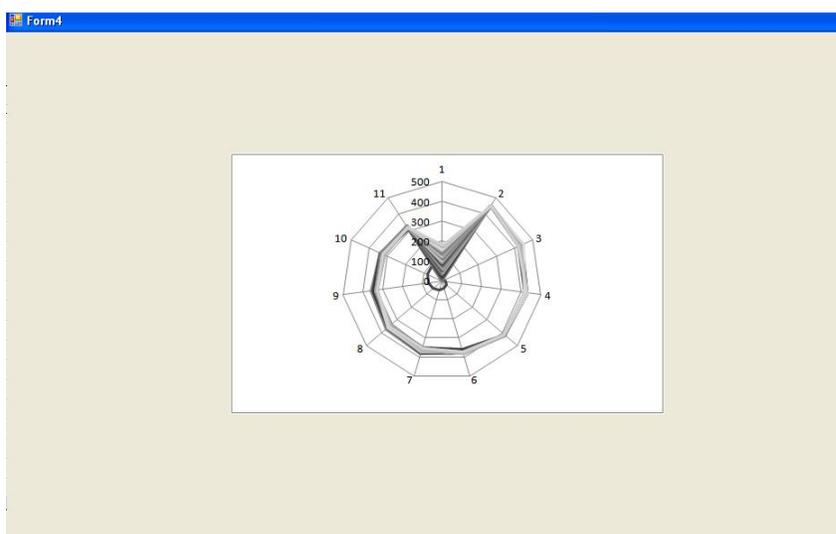


Figura 4.6 Diagrama polar de Bombillo Fluorescente

En la siguiente figura se aprecia que existe una variación muy poca con respecto a los valores obtenidos en diferentes ángulos de y . se puede observar con satisfacción, que la gráfica refleja valores de intensidad máxima en el punto centro que es lo esperado en este tipo de graficas, por lo tanto se esta demostrando que el software diseñado si logra hacer las curvas necesarias requeridas.

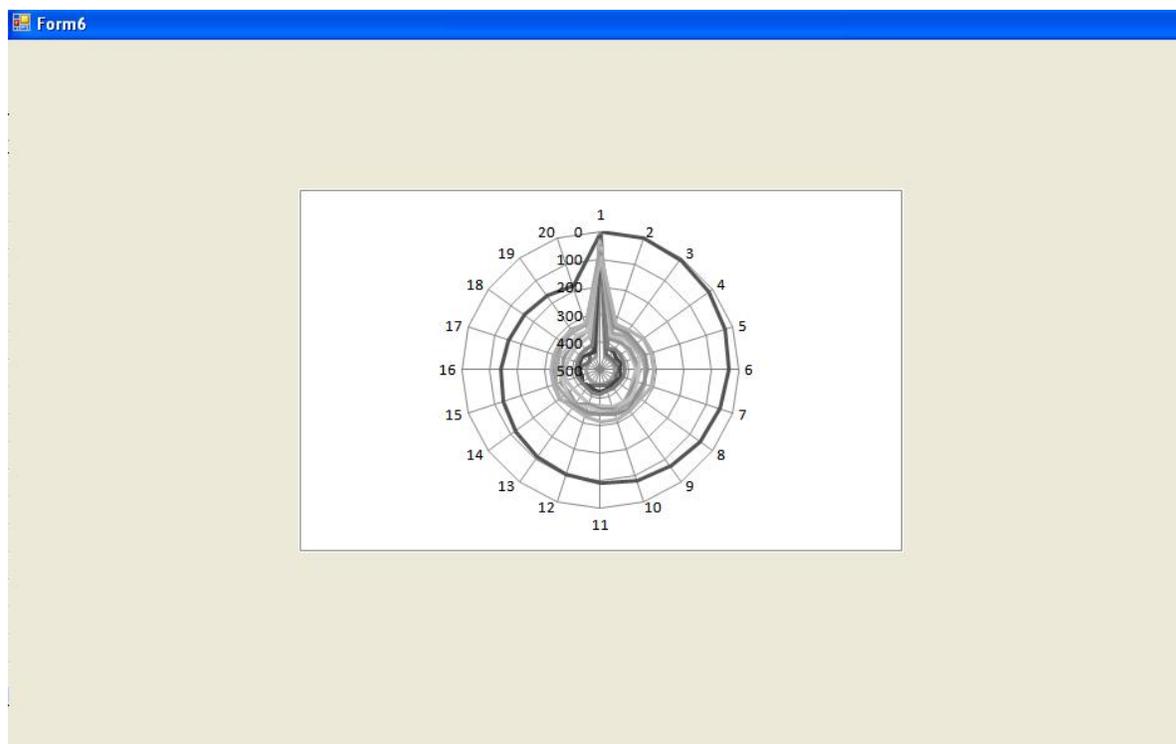


Figura 4.7 Curvas de isolux de bombillo fluorescente.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos al momento del barrido de una lámpara incandescente de 100 W. para estas gráficas que se obtienen, se puede observar que difieren de las anteriores solo en el rango de variación de voltaje analógico, lo cual genera obviamente un valor de intensidad más alto en el instrumento.

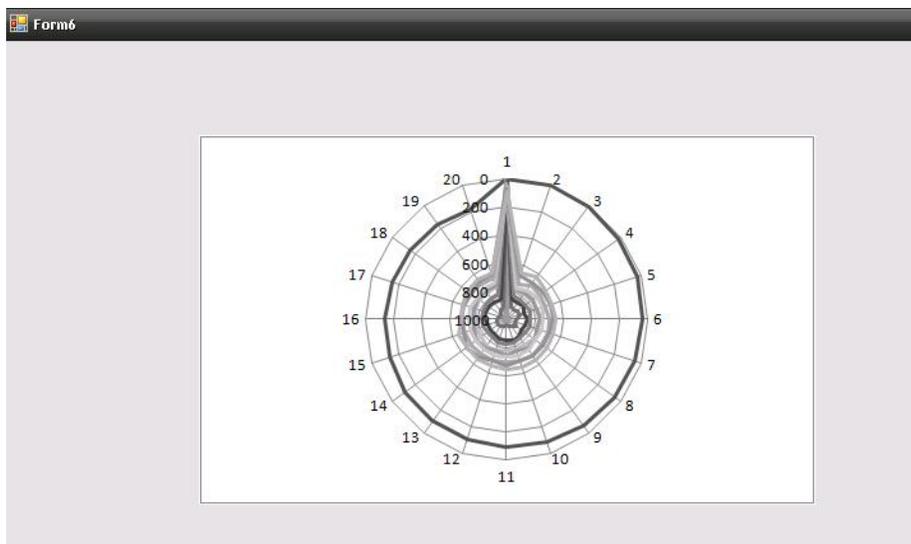


Figura 4.8 Curva de isolux de bombillo incandescente.

Análogamente al ver el comportamiento del sensor fue de esperarse que en trazado del diagrama polar resultara un valor similar a la comparación anterior de las curvas de isolux, obteniendo que aquí también se presentó el desfase entre ambas ya que el bombillo incandescente se refleja valores al doble que el fluorescente, lo cual no es cierto.

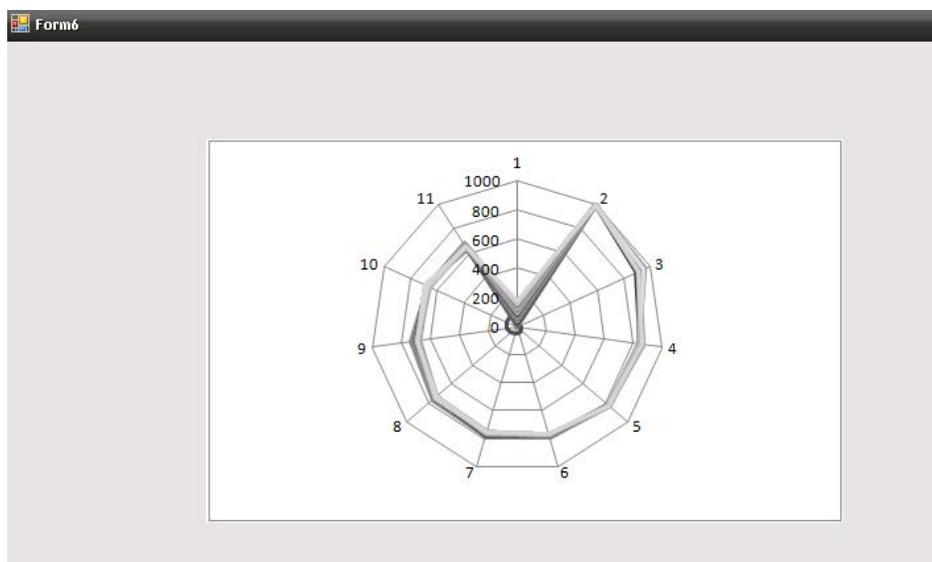


Figura 4.9 Diagrama polar de bombillo incandescente

CONCLUSIONES

- Para el diseño y construcción de la estructura del equipo, se consideró los diferentes métodos de obtención de datos para realizar informes fotométricos, basándose en el uso de la LDR como receptor de luz, como también la estructura electromecánica donde se fijan los motores para el movimiento de la luminaria y el diseño del sistema electrónico base fundamental del sistema ya que se encuentra el microprocesador el cual genera todas las rutinas estipuladas y donde se realiza el proceso de transformación de la información de analógica a digital.
- Para garantizar una lectura estable en la medición se tiene un potenciómetro para tener acceso al rango de medidas dentro del margen establecido el cual es mantener un voltaje de salida al microprocesador entre 0 y 5 V. como también la lectura de tres veces el mismo punto y tomar el promedio y de esta manera obtener un valor más exacto.
- Para el diseño del hardware del equipo se optó a utilizar un Microcontrolador PIC18F452, ya que presenta un rango de 1024 bits para la conversión de la información a digital y es de fácil programación, de esta manera controlar los drivers con los cuales se mueven los motores de paso.
- Se desarrollo pruebas para obtener el comportamiento del equipo de medición, para así poder asegurar su correcto funcionamiento. Más no se calibró con un equipo adecuado para la obtención exacta de los resultados. Es decir, al conectar todos los bloques en conjunto se procedió a variar de forma extrema la luz incidente en la LDR y de esta forma observar los valores de voltaje arrojados hacia el microcontrolador, y de manera simultanea observar el valor digital mostrado en pantalla, luego este valor digital mostrado en pantalla se relaciono con un valor decimal para una interpretación mas fácil por parte del usuario.

- El programa Visual Basic permitió observar el comportamiento de un grupo de muestras a través de librerías de gráficas existentes en el entorno de Windows, para de esta forma lograr palpar lo necesario para el entendimiento del usuario. Aquí se procesó la información digital enviada desde el microcontrolador a través del iFT232 al computador y llevada a un valor decimal para mostrarla en una hoja de datos y graficar las curvas necesarias para generar el informe del ensayo.

RECOMENDACIONES

- Para obtener el mayor rendimiento del equipo se ha de procurar que reciba solo la cantidad de luz posible emitida por la bombilla en estudio, por lo tanto hacer el ensayo en un cuarto oscuro.
- Se recomienda encapsular los circuitos electrónicos impresos para no deteriorarlos y mantenerlos en lugares frescos.
- Se aconsejaría diseñar un dispositivo para el acondicionamiento de señal analógica, como un amplificador diferencial de instrumentación, así el rango visible por el Microcontrolador será mas amplio lo cual conlleva a una mejor resolución de los datos obtenidos.
- Acondicionar los equipos electromecánicos de tal forma que logren mover luminarias de mayor peso. Se puede hacer a través de transferencia de potencia por el método de reducción o ampliación de engranajes.
- Acoplar al software una herramienta matemática de alto nivel para el desarrollo de los cálculos en caso que sean necesarios. Quizás con Matlab, o ejecutando software libre como lo puede ser Python.
- Buscar la manera de encontrar un equipo patrón para calibrar el equipo y de esta manera obtener las curvas necesarias para palpar el diseño para el cual fue creado

REFERENCIAS

- Alberto Jose Cabello. Tesis de Magister en Luminotecnia. Fotometria con detectores em arreglo matricial. [en línea]. Recuperado el 12 de octubre del 2008, <http://www.herrera.unt.edu.ar/dllyv/publicaciones/Trabajos%20Cabello/Fotometr%EDa%20con%20Detectores%20en%20Arreglo%20Matricial%5BTesis%20Magis%85.pdf>
- Alfonso Martín Marcos, Apuntes de Fotometria, [en línea]. Recuperado el 5 de noviembre del 2008, www.diac.upm.es/acceso_profesores/asignaturas/television/stv/fotometria.pdf
- Diego Alvarez. Programa Lux, Software para cálculos de iluminancia para el caso de iluminación vial. [en línea]. Recuperado el 6 de marzo del 2009, http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/fotomet/Luxamerica_Software_Iluminacion.pdf
- Edison. Aprendizaje basado en internet, [en línea]. Recuperado el 8 de mayo del 2009, http://edison.upc.es/curs/llum/luz_vision/graficos/espec.gif
- Javier Garcia Fernandez, Oriol Boix. Luminotecnia. [en línea]. Recuperado el 5 de diciembre Del 2008, <http://edison.upc.es/curs/llum/fotometria/magnitud.html>.
- Juan Alercio Alamos. Luminotecnia-Iluminación. El prisma portal para investigadores y profesionales. [en línea]. Recuperado el 15 de noviembre del 2008, http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_electrica_y_electronica/luminotecniaailuminacion
- Manual de Luminotecnia de Indalux, INDALUX 2002. [en línea]. Recuperado el 16 de junio del 2006, <http://www.indal.es/portal/docs/Documentaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnica/Documentaci%C3%B3n%20Web%20Indalux/Luminotecnia>.

- Robots, pasión por La Robótica en Argentina. [en línea]. Recuperado el 6 de marzo del 2009, http://robots-argentina.com.ar/MotorCC_L293D.html.
- UNI-FIEE. Lima Peru. Sistemas de TV 2005. [en línea]. Recuperado el 15 de febrero del 2009, <http://aniak.uni.edu.pe/tv/09%20unidades%20luminosas%202005-1.pdf>
- Video sistemas [en línea] recuperado 16 de noviembre del 2008, http://www.videosistemas.com/CIRCUITOS/circuitos_varios_1.pdf
- Webelectronica, el portal de la comunidad de electrónicos.com.ar [en línea] recuperado el 18 de noviembre del 2008, <http://www.clubse.com.ar/download/pdf/montajes/nota72.htm>
- Wikimedia Commons. Ley de Snell. [en línea]. Recuperado el 8 de marzo del 2009, [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ley_de_snell_\(es\).svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ley_de_snell_(es).svg)
- Wwww.elergomista.com. Técnicas Instrumentales. Ley de Lambert. [en línea]. Recuperado el 4 de diciembre del 2008, <http://www.elergonomista.com/tecnicas/lambert.htm>

ANEXOS

D. Informes Fotométricos.

D.1. Informe del Reflector de Revolución

Laboratorio de Luminotecnia - UPC
 Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
 08220 - Terrassa (Barcelona)
 Tel +34 93 739 83 73
 Fax +34 93 739 83 80
 e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °

Informe Número: ENS002

Fecha ensayo: 28/11/2005

Descripción del aparato

Luminaria: Luminaria revolución

Lámpara: VSAP 150 W Tubular clara

Flujo: 17548 lm

Inclinación Luminaria: 0.0 °

Observaciones

Documentación adjunta

- Rendimiento total del aparato.
- % Flujo lumínico hacia el hemisferio superior.
- % Flujo lumínico hacia el hemisferio inferior.
- % Flujo inferior emitido hacia la parte posterior (calzada).
- % Flujo inferior emitido hacia la parte anterior (acera).
- Diagrama polar en los planos C0-180, C90-270 y el plano C de Intensidad máxima.
- Diagrama de curvas isolux unitarias, referidas a 1 m de altura.
- Diagrama de curvas del factor de utilización.
- Diagrama Rectangular.
- Diagrama Isocandela en malla rectangular.
- Matriz de Intensidades según planos C - Gamma.
- Diagrama Isocandela en malla circular.

Laboratorio de Luminotecnia - UPC
 Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
 08220 - Terrassa (Barcelona)
 Tel +34 93 739 83 73
 Fax +34 93 739 83 80
 e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °

Descripción del ensayo

Ensayo según planos C – gamma

Ángulos de medida

C inicial: 0.0 ° C final: 355.0 °

Gamma inicial: 0.0 ° Gamma final: 180.0 °

Resultados

- Rendimiento total de la luminaria (%): **77.82 %**
- Emisión hacia el hemisferio Superior (%)

Flujo Hemisferio Superior	
% FHS = -----	FHS inst = 0.10 % [FHS = 0.08 %]
Flujo Luminaria	

- Emisión hacia el hemisferio Inferior (%)

Flujo Hemisferio Inferior	
% FHI = -----	FHI inst = 99.90 % [FHI = 77.74 %]
Flujo Luminaria	

- Emisión hacia la parte anterior (%)

Flujo Hemisferio Anterior	
% FIC = -----	FIC inst = 54.61 % [FIC = 42.50 %]
Flujo Luminaria	

- Emisión hacia la parte posterior (%)

Flujo Hemisferio Posterior	
% FIA = -----	FIA inst = 45.29 % [FIA = 35.24 %]
Flujo Luminaria	

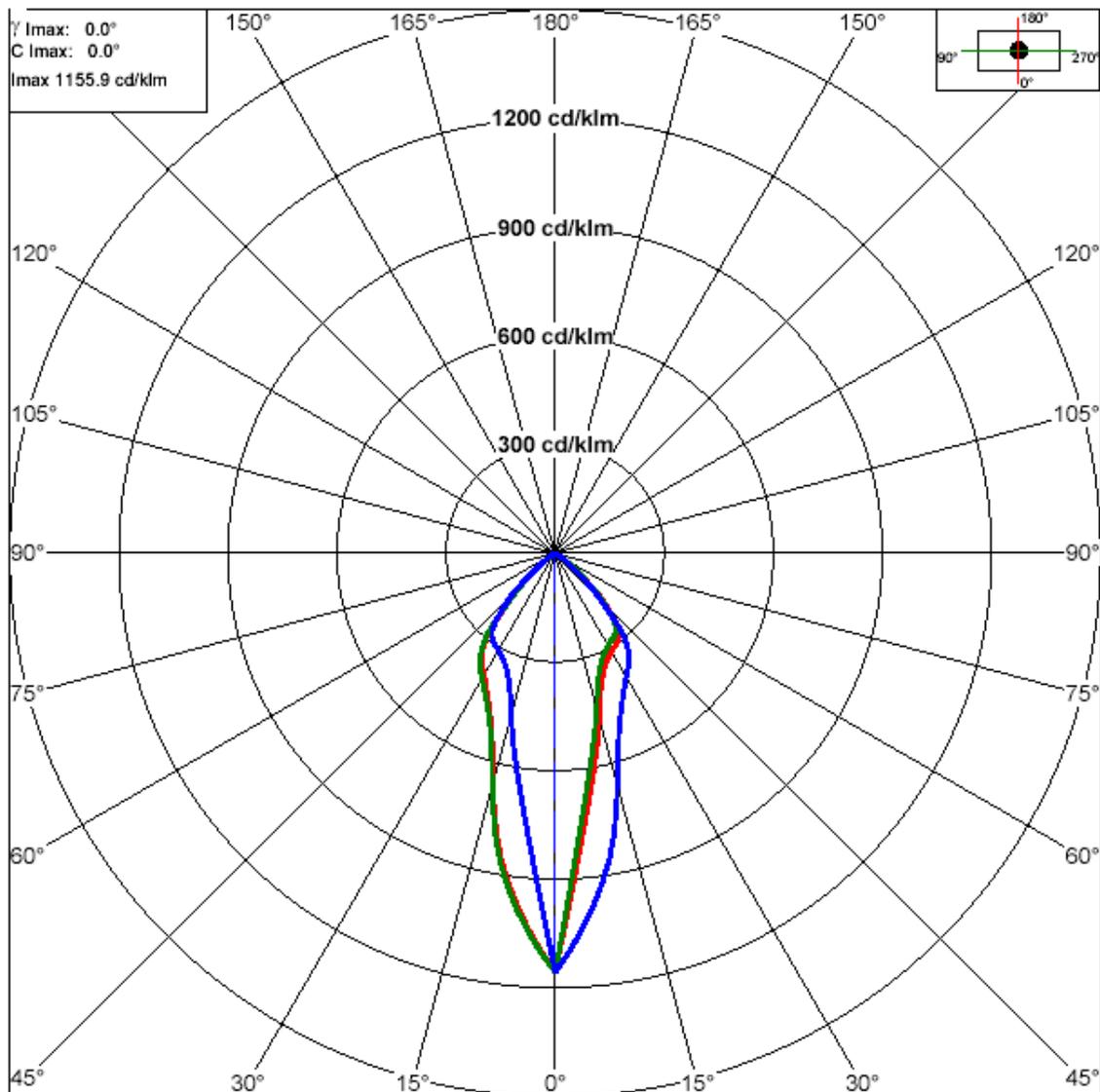
Laboratorio de Luminotecnia - UPC
Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
08220 - Terrassa (Barcelona)
Tel +34 93 739 83 73
Fax +34 93 739 83 80
e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0°

DIAGRAMA POLAR REFERIDO A 1000 lm



Laboratorio de Luminotecnia - UPC
 Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
 08220 - Terrassa (Barcelona)
 Tel +34 93 739 83 73
 Fax +34 93 739 83 80
 e-mail carlos.sierra@upc.edu

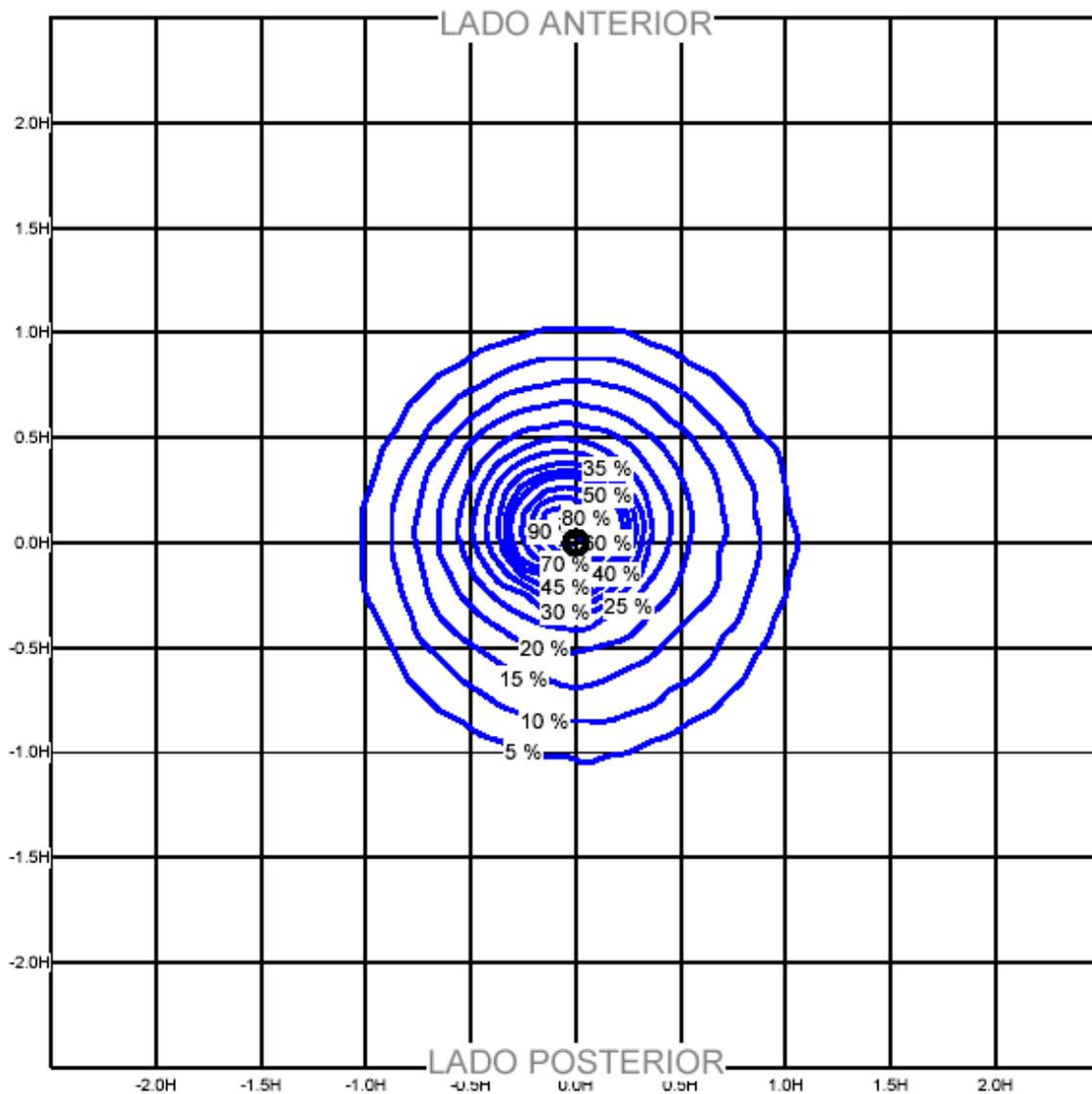


INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °

CURVAS ISOLUX UNITARIAS

Emax: 1155.9 lux Altura 1.0 m Flujo 1000 lm



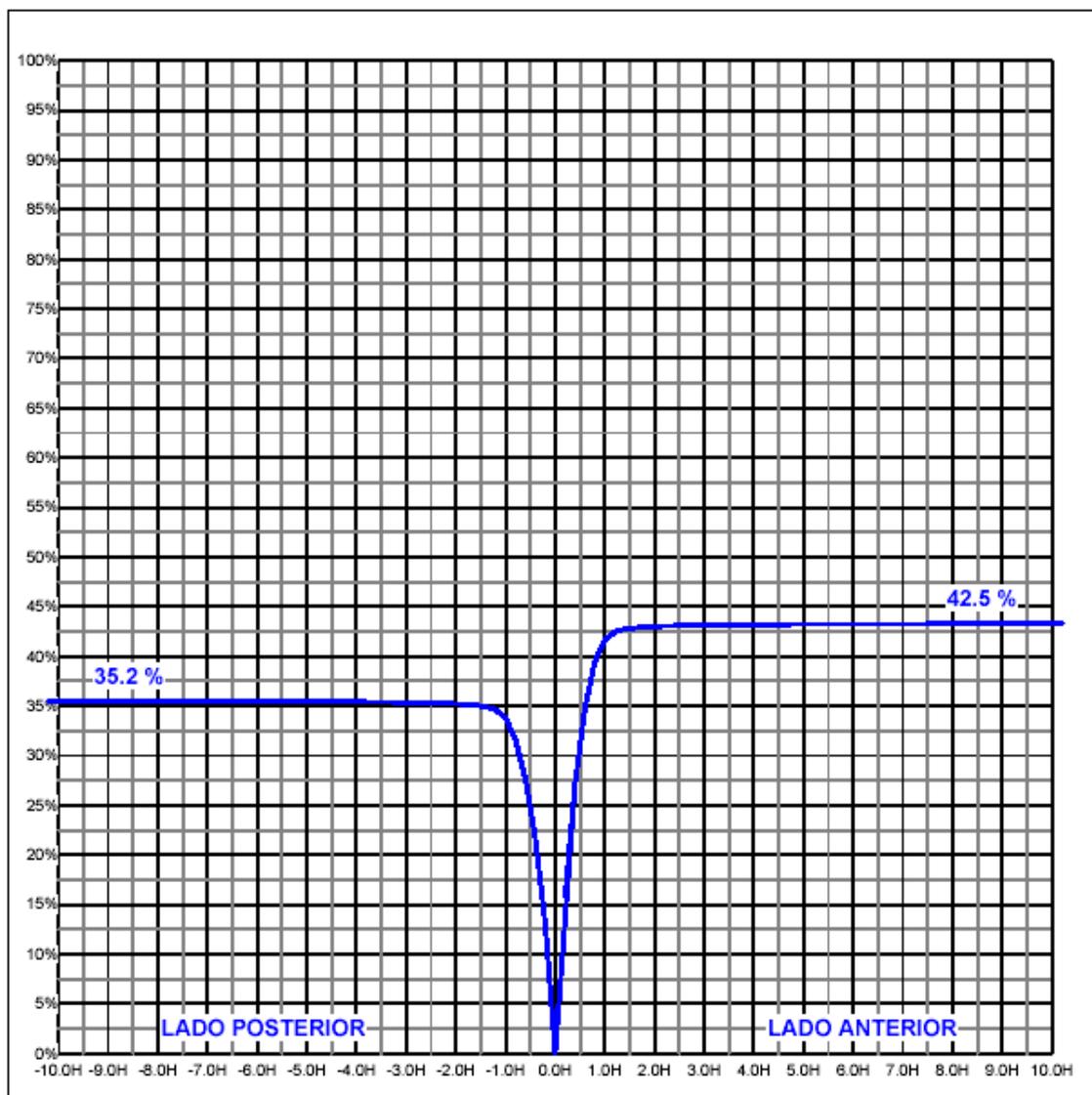
Laboratorio de Luminotecnia - UPC
Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
08220 - Terrassa (Barcelona)
Tel +34 93 739 83 73
Fax +34 93 739 83 80
e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °

CURVAS DEL FACTOR DE UTILIZACIÓN



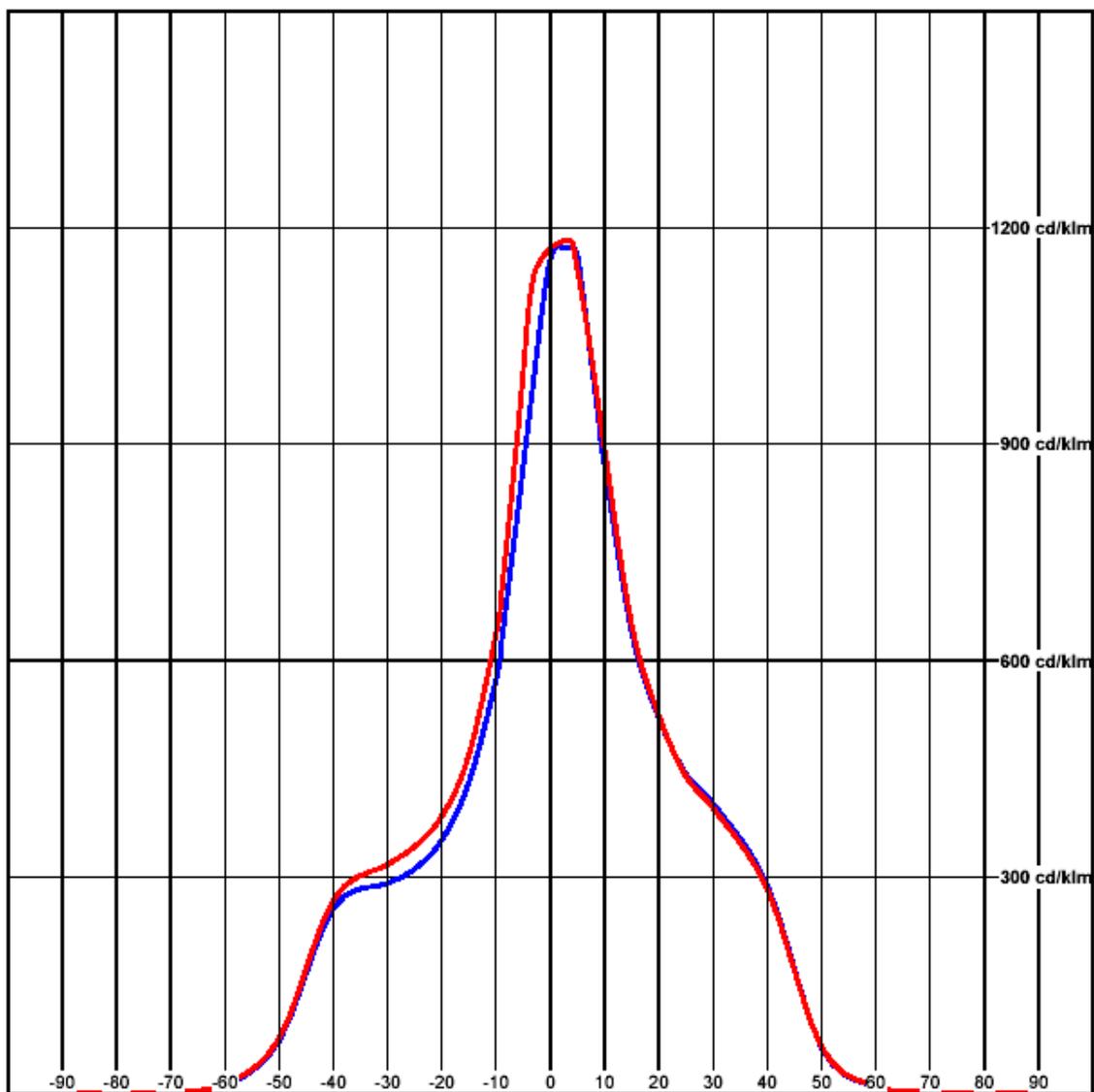
Laboratorio de Luminotecnia - UPC
Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
08220 - Terrassa (Barcelona)
Tel +34 93 739 83 73
Fax +34 93 739 83 80
e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0°

DIAGRAMA RECTANGULAR REFERIDO A 1000 lm

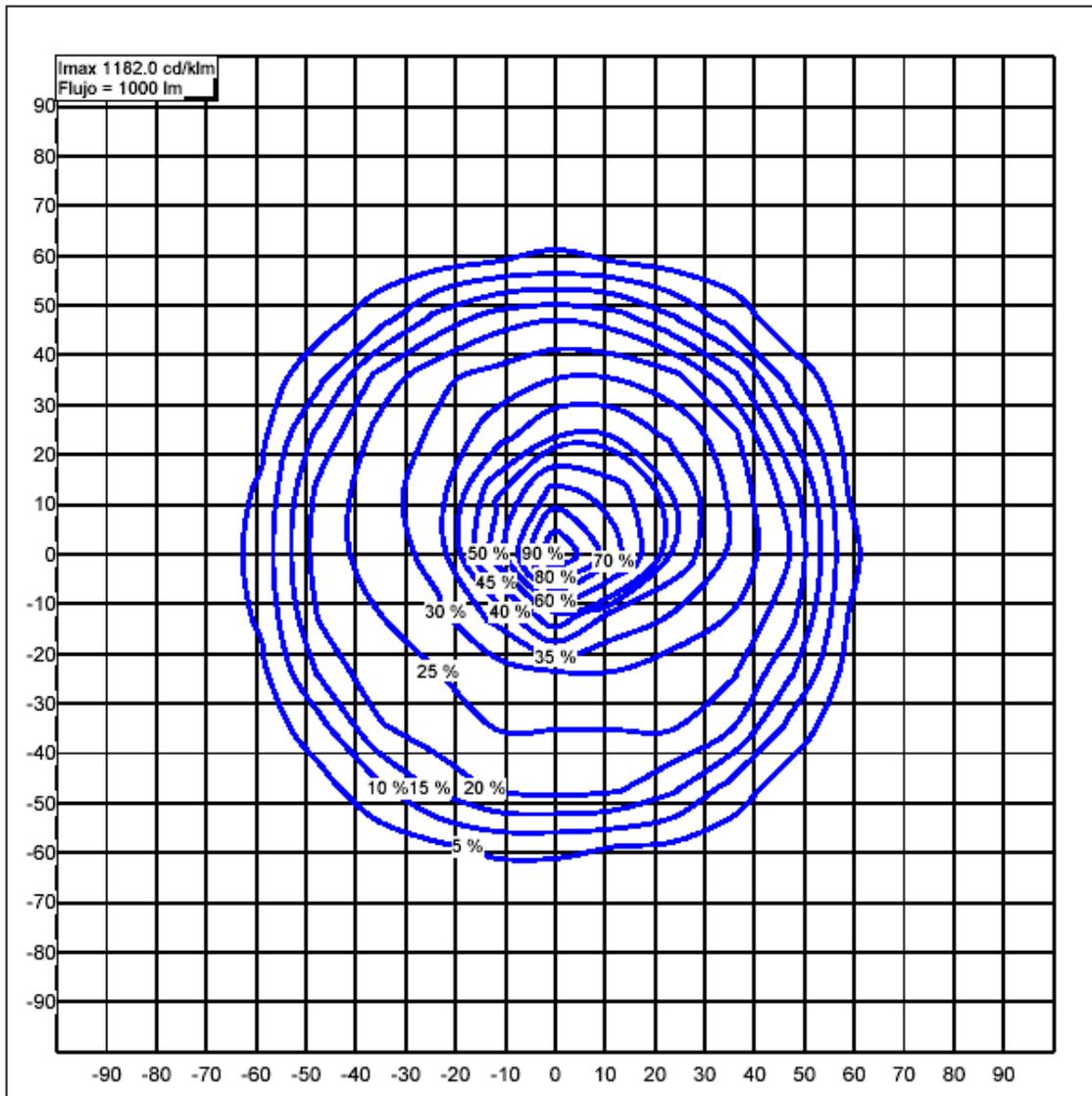


Laboratorio de Luminotecnia - UPC
Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
08220 - Terrassa (Barcelona)
Tel +34 93 739 83 73
Fax +34 93 739 83 80
e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °



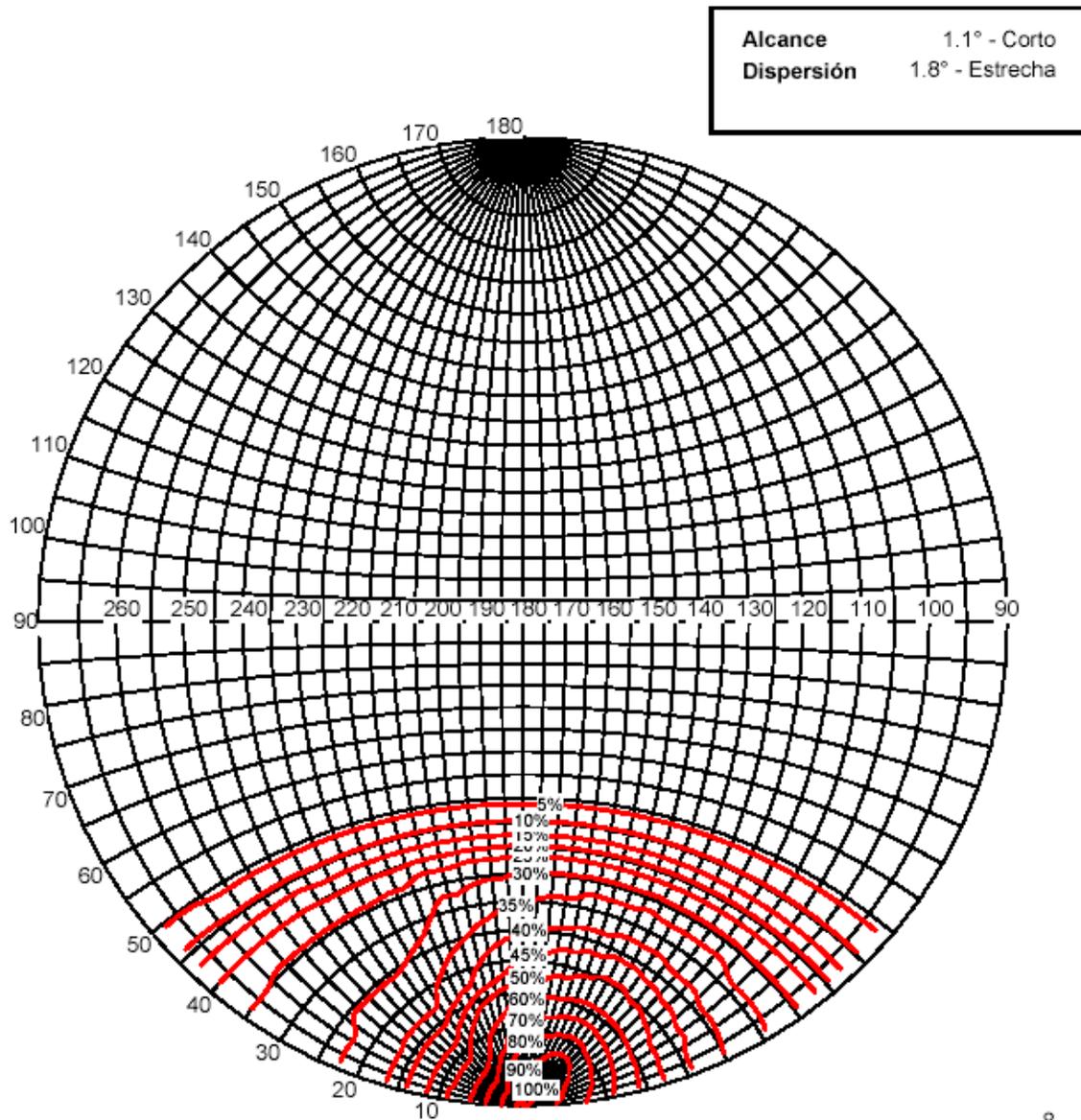
Laboratorio de Luminotecnia - UPC
 Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
 08220 - Terrassa (Barcelona)
 Tel +34 93 739 83 73
 Fax +34 93 739 83 80
 e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °

DIAGRAMA ISOCANDELA EN MALLA CIRCULAR REFERIDO A 1000 lm



Laboratorio de Luminotecnia - UPC
 Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
 08220 - Terrassa (Barcelona)
 Tel +34 93 739 83 73
 Fax +34 93 739 83 80
 e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °

MATRIZ DE INTENSIDADES REFERIDA A 1000 lm [C - Gamma] - (I)

	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	60.0	75.0	90.0	105.0	120.0	135.0	150.0	165.0	180.0	
0.0	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9
10.0	610.5	628.2	640.3	648.9	666.7	683.1	691.3	707.9	721.9	735.4	750.1	776.8	820.9	889.6	912.0	956.7	984.0	992.5	983.4	968.1	968.1
20.0	373.6	382.6	389.1	394.4	402.0	407.2	414.5	421.4	428.0	434.8	444.1	463.1	491.6	521.1	542.3	564.5	579.4	585.0	578.6	570.6	570.6
30.0	312.0	318.1	321.8	326.0	329.9	333.9	337.9	341.7	345.7	349.7	355.5	367.2	384.7	402.0	412.7	423.0	429.9	433.0	428.7	424.0	424.0
35.0	297.8	302.8	306.2	308.7	311.5	314.6	317.7	320.4	323.4	326.2	330.3	336.6	350.5	362.3	369.6	377.0	381.5	383.3	380.6	377.5	377.5
40.0	266.6	270.1	271.8	273.6	274.7	275.0	276.8	277.9	279.2	280.6	281.4	283.6	287.2	288.9	291.7	292.7	293.6	294.2	293.1	292.2	292.2
45.0	185.0	184.8	183.4	181.9	180.3	178.8	177.3	175.8	174.2	172.7	171.5	169.1	165.4	162.0	161.3	160.8	160.6	160.2	160.7	161.0	161.0
47.5	130.8	130.3	128.9	127.5	126.0	124.7	123.3	121.8	120.4	118.9	118.2	116.6	114.0	111.6	111.4	111.3	111.1	111.0	111.3	111.5	111.5
50.0	78.2	77.4	74.9	73.4	72.7	71.6	70.0	68.9	67.2	66.5	65.5	65.1	63.6	64.0	62.7	63.2	63.0	63.6	63.2	63.7	63.7
52.5	52.0	51.4	50.4	49.5	48.5	47.6	46.6	45.7	44.8	43.9	43.6	43.0	42.2	41.5	41.4	41.3	41.4	41.4	41.5	41.6	41.6
55.0	29.1	28.5	27.0	27.0	26.3	25.4	24.7	24.3	23.6	22.9	22.8	22.4	22.2	22.0	21.4	20.8	20.8	20.6	20.9	21.1	21.1
57.5	20.6	20.3	19.8	19.4	18.9	18.5	18.0	17.6	17.2	16.8	16.6	16.3	15.8	15.4	15.2	15.1	15.1	15.1	15.2	15.2	15.2
60.0	13.9	13.6	13.2	13.0	12.6	12.4	12.0	11.8	11.5	11.3	11.1	10.8	10.5	10.2	10.2	10.1	10.1	10.2	10.1	10.2	10.2
62.5	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	9.2	9.0	8.8	8.6	8.5	8.3	8.0	7.8	7.7	7.7	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
65.0	7.4	7.2	7.1	7.0	6.9	6.7	6.6	6.4	6.3	6.3	6.1	6.0	5.8	5.6	5.6	5.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
67.5	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	5.0	4.9	4.8	4.7	4.5	4.4	4.4	4.4	4.5	4.6	4.5	4.5	4.5
70.0	4.2	4.1	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.6	3.5	3.4	3.3	3.3	3.4	3.4	3.5	3.4	3.4	3.4
72.5	3.5	3.5	3.4	3.4	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
75.0	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
77.5	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2
80.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8
82.5	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	1.8	1.8	1.8
85.0	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.7	1.7
87.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.5	1.4	1.4	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.5	1.5
90.0	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3
92.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1
95.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.0	0.9
97.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
100.0	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.2	0.5	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.5	0.5
102.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
105.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
135.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
165.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Laboratorio de Luminotecnia - UPC
 Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
 08220 - Terrassa (Barcelona)
 Tel +34 93 739 83 73
 Fax +34 93 739 83 80
 e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °

MATRIZ DE INTENSIDADES REFERIDA A 1000 lm [C - Gamma] - (II)

	160.0	165.0	170.0	175.0	180.0	185.0	190.0	195.0	200.0	205.0	210.0	215.0	220.0	225.0	230.0	235.0	240.0	245.0	250.0	255.0	260.0	265.0	270.0
0.0	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9
10.0	954.9	938.6	923.3	908.4	894.3	879.3	865.3	850.5	795.6	757.3	727.7	696.6	655.9	627.1	593.3	565.4	561.3	558.9	562.3	573.7	586.6	599.9	613.2
20.0	562.2	553.5	546.8	537.7	530.9	523.0	513.4	498.7	482.4	465.2	449.8	432.7	417.0	400.8	384.7	369.9	366.6	362.7	358.6	351.9	345.2	338.5	331.8
30.0	419.5	414.8	410.2	405.6	400.7	396.3	391.2	382.3	372.7	363.5	354.0	344.6	335.2	325.7	316.3	307.0	305.3	302.1	297.3	292.4	287.5	282.6	277.7
35.0	374.6	371.1	367.7	364.7	362.3	358.2	354.7	347.8	341.3	333.4	326.0	318.9	311.8	304.4	297.1	290.0	289.0	287.4	284.7	282.0	279.3	276.6	273.9
40.0	291.3	290.0	289.8	288.9	287.5	286.2	284.7	281.7	278.5	275.5	271.8	267.4	264.3	260.6	257.1	253.7	254.1	255.3	257.6	259.9	262.2	264.5	266.8
45.0	161.0	161.3	161.8	161.7	162.1	162.4	162.5	162.7	162.8	162.8	162.7	162.6	162.7	162.7	162.7	162.8	164.6	168.3	173.8	178.6	183.4	188.2	193.0
47.5	111.7	111.8	111.9	112.2	112.4	112.5	112.7	112.7	112.7	112.7	112.7	112.6	112.7	112.6	112.6	112.5	114.0	117.0	121.3	125.4	129.5	133.6	137.7
50.0	63.7	64.1	64.1	63.7	64.1	65.3	65.5	65.3	64.0	63.6	63.9	63.9	63.5	63.5	62.9	63.3	63.8	65.2	69.0	73.5	77.9	82.4	86.9
52.5	41.7	41.9	42.0	42.1	42.3	42.5	42.6	42.4	42.1	41.9	41.6	41.4	41.2	41.0	40.9	40.6	41.4	43.0	45.4	47.9	50.4	52.9	55.4
55.0	21.1	21.3	21.7	21.9	21.5	22.5	22.7	22.4	21.2	21.8	21.2	20.7	20.4	20.3	19.9	19.6	20.2	21.2	23.4	25.4	27.4	29.4	31.4
57.5	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	16.0	15.8	15.6	15.3	15.1	15.0	14.8	14.6	14.4	14.3	14.6	15.4	16.5	17.7	18.9	20.1	21.3
60.0	10.2	10.3	10.3	10.4	10.4	10.6	10.6	10.5	10.3	10.3	10.1	10.0	9.9	9.8	9.7	9.7	9.8	10.2	10.9	11.6	12.3	13.0	13.7
62.5	7.9	7.9	7.9	8.0	8.0	8.1	8.1	8.0	7.9	7.9	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6	7.5	7.6	7.8	8.2	8.6	9.0	9.4	9.8
65.0	5.7	5.7	5.8	5.8	5.8	5.8	5.9	5.8	5.8	5.8	5.7	5.7	5.7	5.6	5.6	5.6	5.6	5.7	5.9	6.1	6.3	6.5	6.7
67.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.6	4.6	4.6	4.5	4.5	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4	4.5	4.5	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
70.0	3.4	3.4	3.4	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	3.3	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5
72.5	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
75.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
77.5	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
80.0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
82.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
85.0	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
87.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
90.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
92.5	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
95.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
97.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
100.0	0.2	0.4	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.2	0.5	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
102.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
105.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
135.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
165.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Laboratorio de Luminotecnia - UPC
 Carretera Nac. 152 - Km. 14.5 - IPCT
 08220 - Terrassa (Barcelona)
 Tel +34 93 739 83 73
 Fax +34 93 739 83 80
 e-mail carlos.sierra@upc.edu



INFORME FOTOMÉTRICO ENS002

Inclinación luminaria 0.0 °

MATRIZ DE INTENSIDADES REFERIDA A 1000 lm [C - Gamma] - (III)

	285.0	300.0	310.0	315.0	320.0	325.0	330.0	335.0	340.0	345.0	350.0	355.0
0.0	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9	1155.9
10.0	559.7	552.1	548.7	547.3	551.5	557.4	560.7	571.1	574.8	576.9	587.1	594.7
20.0	344.8	339.2	335.5	334.1	337.6	341.6	345.5	348.8	354.2	357.3	362.5	366.7
30.0	288.1	283.7	280.7	279.3	282.7	286.0	289.5	292.9	296.3	299.7	302.8	306.4
35.0	277.8	273.1	270.0	268.5	271.5	274.5	277.7	280.6	283.6	286.7	290.1	292.7
40.0	253.8	247.7	243.9	242.3	244.7	247.3	249.9	252.1	255.5	258.2	260.3	262.5
45.0	174.6	170.0	166.9	165.5	167.4	169.5	171.7	173.8	175.8	178.0	180.1	182.1
47.5	122.1	118.6	116.2	115.0	116.7	118.4	120.2	121.8	123.4	125.2	126.9	128.5
50.0	69.6	67.5	65.6	65.4	66.1	67.8	68.9	70.5	71.7	72.4	74.0	75.5
52.5	46.6	45.3	44.5	44.0	44.9	45.7	46.5	47.4	48.2	49.1	50.0	50.9
55.0	24.9	24.4	24.4	24.3	24.8	25.3	25.5	26.0	26.7	27.2	27.0	26.4
57.5	17.7	17.8	17.9	17.9	18.2	18.5	18.8	19.0	19.4	19.7	20.0	20.3
60.0	11.7	11.8	12.0	12.2	12.3	12.5	12.6	12.9	13.0	13.3	13.4	13.7
62.5	8.8	9.0	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.8	9.9	10.0	10.2	10.3
65.0	6.3	6.5	6.6	6.8	6.8	6.8	6.9	7.0	7.1	7.2	7.2	7.3
67.5	4.9	5.1	5.2	5.3	5.3	5.4	5.4	5.4	5.5	5.5	5.6	5.7
70.0	3.6	3.8	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1	4.2
72.5	3.1	3.2	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5
75.0	2.7	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0
77.5	2.2	2.3	2.4	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
80.0	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
82.5	1.8	1.8	1.9	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
85.0	1.7	1.8	1.8	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
87.5	1.4	1.5	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
90.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
92.5	1.0	1.0	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
95.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8
97.5	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
100.0	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.5	0.2	0.4	0.1	0.2	0.3	0.3
102.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
105.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
135.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
165.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0