



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE LABORATORIO PARA LA VISUALIZACIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO

#### TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**QUINAPALLO RODRÍGUEZ EDISON XAVIER**

**edison.quinapallo@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: FIS. YÁNEZ SALCEDO MARCO VINICIO M.Sc.**

**marco.yanez@epn.edu.ec**

**Quito, enero 2020**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Edison Xavier Quinapallo Rodriguez**, bajo mi supervisión.

---

Fis. Marco Yáñez M. Sc

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, EDISON XAVIER QUINAPALLO RODRIGUEZ, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Edison Xavier Quinapallo Rodríguez

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a Dios, mi Familia, y mis amigos.

Edison Q. R.

## AGRADECIMIENTO

Resulta imposible poder nombrar a todas las personas que fueron parte de esta etapa en mi vida. Pero a través de estas humildes líneas deseo expresar mis más sinceros agradecimientos:

A Dios, mi fundamento de vida.

A mis padres, Segundo y Lupe, por estar en cada momento y ser apoyo fundamental en mi etapa universitaria.

A mi hermana Poleth por ser un apoyo y siempre mostrarse solidaria ante cualquier necesidad.

A Evelin Majin, que estando en cada momento importante de mi carrera, me brindó una ayuda inigualable para poder completar ésta meta.

A los profesores que brindaron de su tiempo y de sus sabios consejos para completar el presente trabajo: Físico Marco Yáñez, Ing. Ángel Portilla.

A mis mentores, David Noboa y Lucy Enríquez, quienes gracias a su guía y consejo lograron un impacto profundo en mi vida.

A mi mejor amigo, quien me acompañó en todo el proceso de mi vida universitaria, y quien me brindó ayuda sin titubear en cada proyecto, Freddy Fernández.

A mis amigas y amigos que brindaron tanto apoyo y ayuda de gran valor: Vanessa Chulde, Ibrahim Mero, Kelvin Arias, Iván García, Xavier Sandoval, Mireya Osorio, Wladimir Chancusi, David Camacho, Carolina Pacalla, Erika Lara, David Vaca, Jhon Torres, y a todos los compañeros del NIUPI.

Edison Q. R.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN .....	i
DECLARACIÓN .....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de Investigación.....	1
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos.....	2
<b>1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
1.1. Reseña Histórica .....	3
1.2. Propiedades de la luz .....	6
1.2.1. La rapidez de la Luz.....	6
1.2.2. La Reflexión .....	7
1.2.3. La Refracción.....	7
1.3. El Efecto Fotoeléctrico.....	8
1.3.1. Frecuencia de Umbral y Potencial de Frenado.....	9
1.3.2. Explicación sobre el Fotón.....	11
1.3.3. Comportamiento Experimental del Efecto Fotoeléctrico.....	13
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>14</b>
2.1. Parámetros de diseño y estudio de alternativas.....	14
2.1.1. Parámetros de Diseño .....	14

2.1.2.	Estudio de Alternativas .....	16
<b>2.1.2.1.</b>	<b>Fuente de luz .....</b>	16
<b>2.1.2.2.</b>	<b>Fototubos .....</b>	17
<b>2.1.2.3.</b>	<b>Estructura y armazón del equipo .....</b>	17
2.2.	Selección de un fototubo adecuado para el equipo de laboratorio .....	18
2.2.1.	Fotoelectricidad.....	18
2.2.2.	Fototubos .....	19
2.2.3.	Selección del Fototubo .....	21
2.3.	Diseño, cálculo y selección de los componentes de la fuente de luz .....	21
2.3.1.	Diseño de la fuente de luz .....	21
2.3.2.	Parámetros específicos para una fuente de luz visible.....	22
<b>2.3.2.1.</b>	<b>Flujo Luminoso.....</b>	22
<b>2.3.2.2.</b>	<b>Eficacia Luminosa.....</b>	22
<b>2.3.2.3.</b>	<b>Iluminancia.....</b>	23
<b>2.3.2.4.</b>	<b>Cálculo del valor de iluminancia de varias fuentes de luz.....</b>	23
<b>2.3.2.5.</b>	<b>Índice de Exposición de Color.....</b>	24
2.3.3.	Alternativas para la fuente de luz .....	24
<b>2.3.3.1.</b>	<b>Ponderación para la selección de la fuente de luz .....</b>	24
2.3.4.	Diseño de la Luminaria .....	29
<b>2.3.4.1.</b>	<b>Determinación de parámetros de diseño de la luminaria .....</b>	30
Distribución adecuada de la luz .....	30	
Control de deslumbramiento .....	30	
Ambientación de espacio.....	30	
Optimización de rendimiento energético .....	31	
<b>2.3.4.2.</b>	<b>Aplicación de parámetros en el diseño de la luminaria .....</b>	32
2.3.5.	Construcción de la Luminaria .....	32
2.3.6.	Sistema de control de la fuente de luz .....	33
<b>2.3.6.1.</b>	<b>Diseño del sistema de Control .....</b>	33

<b>2.3.6.2. Construcción del circuito de control</b> .....	35
2.4. Implementación de la alimentación eléctrica del equipo .....	36
2.5. Diseño y construcción de la estructura del equipo .....	37
2.5.1. Diseño de la estructura .....	38
<b>2.5.1.1. Cálculos estructurales</b> .....	40
<b>2.5.1.2. Cálculo de Esfuerzos</b> .....	40
<b>2.5.1.3. Adaptación del Armazón</b> .....	42
<b>2.5.1.4. Selección del tipo de Unión</b> .....	42
2.6. Construcción y Montaje del Equipo.....	43
2.6.1. Introducción.....	43
2.6.2. Requerimientos .....	43
2.6.3. Materiales.....	43
2.6.4. Mano de Obra .....	44
2.6.5. Maquinaria, equipos y herramientas .....	44
2.6.6. Proceso Constructivo.....	44
2.6.7. Construcción .....	45
2.6.8. Montaje .....	47
2.7. Protocolo de pruebas .....	48
Etapa de Encendido .....	48
Etapa de Selección de Luz .....	48
Etapa de medición.....	48
2.8. Costos.....	50
2.8.1. Costos Directos.....	50
2.8.2. Costos de Materiales, herramientas, y equipos .....	51
2.8.3. Costos de Fabricación, Maquinado y Montaje.....	51
2.8.4. Costos de Diseño.....	52
2.8.5. Total Costos Directos .....	52
2.9. Costos Indirectos.....	53



2.9.1.	Materiales Consumibles .....	53
2.9.2.	Transporte.....	53
2.9.3.	Total Costos Indirectos .....	53
2.10.	Costo Total de la Máquina.....	54
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
3.1.	Procedimiento experimental.....	55
3.2.	Recopilación y Análisis de datos.....	55
3.3.	Análisis de Datos.....	56
3.4.	Errores de Medición .....	59
3.5.	Discusión de Resultados.....	60
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>61</b>
4.1.	CONCLUSIONES.....	61
4.2.	RECOMENDACIONES .....	62
	<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>65</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON SU EXPLICACIÓN DE LA TEORÍA CLÁSICA DE ONDAS. ....	13
TABLA 2.1 SIGNIFICADO DE CADA VARIABLE DE LA ECUACIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO DE EINSTEIN [2].....	14
TABLA 2.2 DESIGNACIÓN DE LONGITUDES DE ONDA PARA CADA SECCIÓN DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....	15
TABLA 2.3 FUNCIÓN DE TRABAJO DE ALGUNOS METALES. ....	16
TABLA 2.4 EQUIPOS DEL TIPO FOTOTUBOS AL VACÍO DISPONIBLES EN EL CATÁLOGO DE RCA.....	17
TABLA 2.5 VALORES PARA CADA CRITERIO DE PONDERACIÓN.....	24
TABLA 2.6 CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS DE FUENTES DE LUZ DISPONIBLES EN EL MERCADO .....	25
TABLA 2.7 CARACTERÍSTICAS DE MERCADO DE FUENTES DE LUZ DISPONIBLES.....	25
TABLA 2.8 ASIGNACIÓN DE LAS SOLUCIONES POSIBLES.....	26
TABLA 2.9 CRITERIOS DE VALORACIÓN.....	26
TABLA 2.10 EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE CADA CRITERIO .....	27
TABLA 2.11 EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DEL CRITERIO <b>EXISTENCIA DE COLORES</b> .....	27
TABLA 2.12 EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DEL CRITERIO <b>ÍNDICE DE EXPOSICIÓN DE COLOR</b> .....	27
TABLA 2.13 <b>E</b> VALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DEL CRITERIO <b>EFICACIA LUMINOSA</b> .....	28
TABLA 2.14 <b>E</b> VALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DEL CRITERIO <b>VOLUMEN</b> .....	28
TABLA 2.15 <b>E</b> VALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DEL CRITERIO <b>PRECIO</b> .....	28
TABLA 2.16 TABLA DE CONCLUSIONES .....	29
TABLA 2.17 VALORES DE INTENSIDAD LUMINOSA CON RESPECTO A LA DISTANCIA. ....	31
TABLA 2.18 COMPONENTES DEL EQUIPO DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO CON SUS REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS. ....	37
TABLA 2.19 ESPACIOS REQUERIDOS POR CADA COMPONENTE. ....	39
TABLA 2.20 MATERIA PRIMA.....	43
TABLA 2.21 MAQUINARIA, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS. ....	44
TABLA 2.22 SIMBOLOGÍA PARA DIAGRAMA DE FLUJO.....	45
TABLA 2.23 SIMBOLOGÍA DE OPERACIONES PARA DIAGRAMA DE FLUJO. ....	46
TABLA 2.24 VALORES DE MATERIALES Y HERRAMIENTAS. ....	51
TABLA 2.25 VALORES DE FABRICACIÓN Y MONTAJE. ....	52
TABLA 2.26 VALORES DE DISEÑO .....	52
TABLA 2.27 VALORES TOTALES.....	52
TABLA 2.28 VALORES DE MATERIALES CONSUMIBLES .....	53
TABLA 2.29 VALORES TOTALES.....	53
TABLA 2.30 VALORES DE COSTO TOTAL.....	54
TABLA 3.1 VALORES DE PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO. ....	57
TABLA 3.2 VALORES DE PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO. ....	57

TABLA 3.3 VALORES CALCULADOS Y MEDIDOS DE PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO.....	58
TABLA 3.4 VALORES PERTENECIENTES AL ERROR ESTADÍSTICO DEL PARÁMETRO DE VOLTAJE DE FRENADO (FUENTE: [PROPIA]).....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. FUENTE [2] .....	5
FIGURA 1.2 REPRESENTACIÓN EN ESQUEMA DE A) Y C) REFLEXIÓN ESPECULAR, Y B) Y D) REFLEXIÓN DIFUSA. FUENTE [3] .....	7
FIGURA 1.3 ESQUEMA DE UN RAYO DE LUZ QUE INCIDE DE FORMA OBLICUA EN UNA INTERFASE AIRE-VIDRIO. FUENTE [3].....	8
FIGURA 1.4 LA LUZ HACE QUE EL CÁTODO EMITA ELECTRONES QUE SON IMPULSADOS POR EL CAMPO ELÉCTRICO HACIA EL ÁNODO. ....	9
FIGURA 1.5 CORRIENTE FOTOELÉCTRICA ( $i$ ) PARA UNA FRECUENCIA CONSTANTE ( $f$ ) DE LUZ, EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL $V_{AC}$ DEL ÁNODO CON RESPECTO AL CÁTODO. ....	11
FIGURA 2.1 DIAGRAMA DE LA ENERGÍA DEL ELECTRÓN VERSUS LA DISTANCIA.....	18
FIGURA 2.2 FUNDAMENTOS DE UN FOTOTUBO.....	20
FIGURA 2.3 DIMENSIONES DEL FOTOTUBO DEL EQUIPO [FUENTE: 15].....	23
FIGURA 2.4 MODELO DISEÑADO A BASE DE UN SOFTWARE CAD.....	32
FIGURA 2.5 CONSTRUCCIÓN DE LUMINARIA .....	33
FIGURA 2.6 CIRCUITO ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL DE LEDS .....	34
FIGURA 2.7 MODELO DEL CIRCUITO PARA CONTROLAR LA FUENTE DE LUZ.....	35
FIGURA 2.8 PLACA ELECTRÓNICA TIPO SHIELD PARA UTILIZAR EN MÓDULOS ARDUINO [FUENTE: 18].....	36
FIGURA 2.9 ENSAMBLAJE FINAL DEL CIRCUITO DE CONTROL.....	36
FIGURA 2.10 COMPONENTES DEL EQUIPO DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO. [FUENTE: PROPIA].....	38
FIGURA 2.11 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA TOMANDO EN CUENTA LAS CONSIDERACIONES DE LA TABLA 2.17 Y FIGURA 2.10 .....	39
FIGURA 2.12 DIAGRAMA DE FUERZAS DE LA ESTRUCTURA.....	40
FIGURA 2.13 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....	46
FIGURA 2.14 MONTAJE DEL EQUIPO.....	47
FIGURA 2.15 MONTAJE DE LA FUENTE DE LUZ CON EL FOTOTUBO.....	47
FIGURA 2.16 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LUZ INFRARROJA.....	49
FIGURA 2.17 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LUZ VERDE, EN SUS TRES INTENSIDADES [FUENTE: PROPIA].....	49
FIGURA 2.18 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LUZ AZUL, EN SUS TRES INTENSIDADES [FUENTE: PROPIA].....	49
FIGURA 2.19 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LUZ ROJA, EN SUS TRES INTENSIDADES [FUENTE: PROPIA].....	50
FIGURA 2.20 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LUZ ULTRAVIOLETA.....	50
FIGURA 3.1 CONFIGURACIÓN DEL VOLTÍMETRO PARA MEDICIÓN. (FUENTE: PROPIA) .....	56
FIGURA 3.2 CONFIGURACIÓN DEL VOLTÍMETRO PARA MEDICIÓN.....	58

## RESUMEN

El presente documento tiene por objetivo dar a conocer el diseño y la construcción de un experimento de física moderna, el cual es; el efecto fotoeléctrico. Se explican los parámetros específicos tomados en cuenta de la ecuación del efecto fotoeléctrico de Einstein para diseñar los diferentes dispositivos que brindarán como resultado una medición de la constante de Planck y la función de trabajo del fotocátodo. A través del uso de sistemas de selección de alternativas por ponderaciones se elige las alternativas más adecuadas para el cumplimiento a cabalidad de las condiciones del efecto fotoeléctrico. Se construye el equipo dando como resultado los distintos valores planteados al principio de la investigación. En donde se obtienen valores de la constante de Planck mediante el uso de la ecuación del efecto fotoeléctrico, incluyendo los parámetros de frecuencia de la luz, función de trabajo y voltaje de frenado. Se evalúan los datos obtenidos y se comparan con los datos teóricos obtenidos por Einstein.

**Palabras clave:** Efecto fotoeléctrico, equipo de laboratorio, Física moderna

## **ABSTRACT**

The presented document has its objective to introduce the design and construction of a crucial modern physics problem, which is; the photoelectric effect. The specific parameters are explained, for which they were taken in account by the equation of Einstein's photoelectric effect, to build all the equipment to obtain Planck's constant and the work function. Through the use of selection systems of high consideration the best alternatives are chosen so that the conditions of the photoelectric effect are met. The equipment is built giving results of the values that were proposed in the beginning of the investigation. The data is evaluated and compared with the theoretical data obtained by Einstein.

**Keywords:** Photoelectric Effect, Modern Physics, Laboratory equipment

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE LABORATORIO PARA LA VISUALIZACIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO**

## **INTRODUCCIÓN**

La explicación del efecto fotoeléctrico por el cual Albert Einstein fue galardonado el premio Nobel es sumamente importante para la comprensión de la naturaleza de la luz. La inexistencia de equipos, tanto a nivel nacional como regional, que sean enfocados en el estudio del efecto fotoeléctrico y que posean un nivel apropiado para la investigación, genera una falencia a nivel de equipamiento de laboratorios académicos, así como en la imposibilidad de apreciar visualmente un fenómeno natural de gran interés educativo y científico [11]. Por tal motivo, surge la necesidad de diseñar y construir un equipo de laboratorio que permita visualizar el efecto fotoeléctrico externo y calcular datos con la finalidad de registrar el voltaje requerido para detener los electrones con mayor nivel de energía emitidos por el cátodo de un fototubo y demostrar la ecuación del efecto fotoeléctrico de Einstein.

## **Pregunta de Investigación**

¿Se puede comprobar directa o indirectamente con materiales y tecnología actual el efecto fotoeléctrico de tal manera que sea útil en la comprensión de la naturaleza de la luz?

## **Objetivo general**

Diseñar y construir un equipo de laboratorio que permita simular el efecto fotoeléctrico, a la vez que determina las variables necesarias para satisfacer la ecuación del efecto fotoeléctrico de Einstein.

## **Objetivos específicos**

- Diseñar y construir una fuente de luz que permita variar las longitudes de onda en un rango de 400-700 nm así como su intensidad.
- Diseñar o seleccionar un fototubo tal que coincida con las dimensiones del haz de luz producido por la fuente de luz construida
- Acoplar el fototubo con los materiales seleccionados para el ánodo y el cátodo
- Diseñar la estructura del equipo de tal manera que se acoplen ergonómicamente a la fuente de luz y el fototubo
- Diseñar y construir el circuito eléctrico de todos los componentes de medición del equipo
- Evaluar los datos obtenidos para diferentes longitudes de onda e intensidades



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Reseña Histórica

A través de la historia se ha intentado explicar la naturaleza de la luz, y no es hasta que la electricidad y el magnetismo formaron una sola ciencia denominada electromagnetismo, que se logró obtener una explicación. Mediante las ecuaciones de Maxwell se demuestra que un campo magnético variable en el tiempo se convierte en un generador de campo eléctrico y viceversa. Los campos magnéticos y eléctricos son mutuamente sostenidos y a su vez se conforman en una onda electromagnética la cual viaja en el espacio. Las características de los campos eléctricos y magnéticos pueden ser analizadas independientemente cuando tales campos no varían con el tiempo. Así mismo pueden ser analizadas sin considerar las interacciones entre ellos. Los campos magnéticos y eléctricos dejan de ser independientes cuando varían con el tiempo. Faraday ofrece un planteamiento que explica que un campo magnético variable en el tiempo se convierte en una fuente de campo eléctrico, así como es apreciable en las FEM inducidas en los inductores y en los transformadores.

Ampère explica mediante la ley bajo su mismo nombre, cómo un campo eléctrico que es variable con respecto al tiempo se comporta como una fuente de campo magnético. La interacción mutua entre los campos se resume en las ecuaciones brindadas por Maxwell.[2]

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad [\text{Ecuación 1.1}]$$

Dónde:

$\vec{E}$ : Es el campo eléctrico

$\vec{A}$ : Área de aplicación del campo eléctrico

$q$ : Carga Puntual

$\epsilon_0$ : Permisividad en el vacío [2]

La Ecuación 1.1 es la ley de Gauss que dice que el flujo eléctrico neto a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga eléctrica neta encerrada por la superficie.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad [\text{Ecuación 1.2}]$$

Dónde:

$\vec{B}$ : Es la densidad de campo Magnético

$A$ : Superficie cerrada de aplicación del campo magnético [2]

La Ecuación 1.2 es la ley de Gauss del magnetismo la cual dice que el flujo magnético neto a través de una superficie cerrada es cero.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad [\text{Ecuación 1.3}]$$

Dónde:

$\vec{E}$ : Es el campo eléctrico

$\vec{s}$ : Es el elemento infinitesimal del contorno del campo eléctrico.

$\vec{B}$ : Es la densidad de campo magnético.

$\vec{A}$ : Es una superficie para el campo magnético [2]

La ecuación 1.3 es la ley de Faraday de la inducción la cual describe la creación de un campo eléctrico por un flujo magnético cambiante.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad [\text{Ecuación 1.4}]$$

Dónde:

$\vec{s}$ : Es el elemento infinitesimal del contorno del campo eléctrico.

$\vec{B}$ : Es la densidad de campo magnético.

$\vec{A}$ : Es una superficie para el campo magnético

$\mu_0$ : Permeabilidad magnética en el vacío [2]

$I$ : Corriente

La Ecuación 1.4 es la ley de Ampère-Maxwell, y describe la creación de un campo magnético por un campo eléctrico cambiante y por corriente eléctrica.

Las ecuaciones descritas anteriormente permiten concluir que la relación de la magnitud de campo eléctrico con la magnitud del campo magnético en una onda electromagnética

es igual a la rapidez de la luz. Para entender el resultado de la obtención del valor de la velocidad de la luz, Maxwell demostró que una perturbación electromagnética debe propagarse en el espacio libre con una rapidez igual a la de la luz. La demostración de Maxwell permitió concluir que la naturaleza de las ondas de luz era electromagnética. [2]

Las ondas electromagnéticas cubren un espectro grande de longitud de onda y frecuencia. Las ondas de Radio, la luz visible, la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta, los rayos X, gamma son incluidas en el espectro electromagnético. En la Figura 1.1 se puede apreciar las distintas longitudes de onda para cada onda electromagnética.

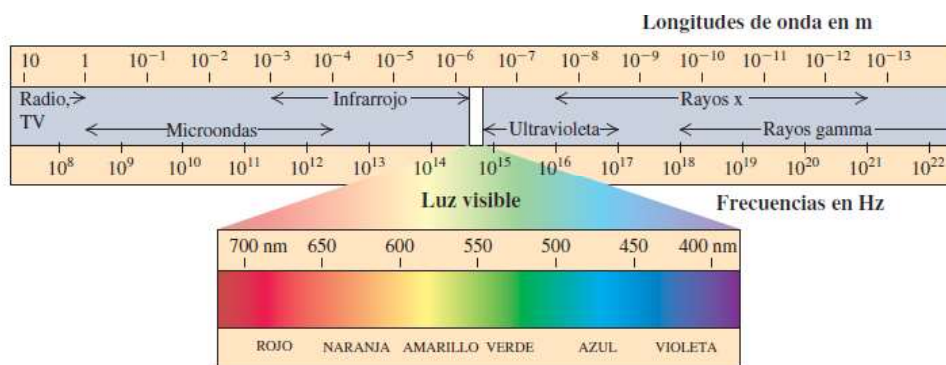


Figura 1.1 Espectro Electromagnético.

Fuente [2]

El modelo ondulatorio y las teorías clásicas de electricidad y magnetismo permitían explicar la mayoría de las propiedades de la luz, pero existían ciertos experimentos consecutivos que no podían ser explicados. El efecto fotoeléctrico; siendo el suceso donde se incide luz sobre una superficie metálica y se expulsan electrones de la superficie, fue uno de los efectos que parecía no tener explicación. Algunos experimentos demostraron que la energía cinética de un electrón expulsado es independiente de la intensidad de la luz, lo cual contradecía al modelo de onda.[2]

En 1887 Heinrich Hertz produjo y detectó ondas electromagnéticas a través de la brecha en una chispa de un circuito sintonizado para generar ondas y otro circuito similar para detectarlas. Él notó accidentalmente que cuando la luz de la brecha generadora se encontraba blindada de la brecha receptora, la brecha receptora debía hacerse más pequeña para que la chispa saltara la brecha. La luz de cualquier chispa que caía en los terminales de la brecha facilitaba el paso de la chispa.[4]

En 1900 P. Lenard descubre que partículas negativas eran emitidas de una superficie limpia cuando se exponía a la luz. El experimento de Lenard le permitió desviar tales partículas negativas a través de un campo magnético y encontró que tales partículas tenían una proporción de carga-masa de igual magnitud a las que midió Thomson en los rayos catódicos: por ende las partículas emitidas eran electrones.[4]

Einstein propone una explicación en 1905 donde aplicó un modelo de acuerdo con el concepto de cuantización de Max Planck en 1900. El modelo de cuantización explica como la energía de una onda luminosa se encuentra presente en partículas que se denominan fotones, por ende se dice que la energía se encuentra cuantizada.[2,3]

La explicación de Einstein con respecto al efecto fotoeléctrico dice que la energía de los fotones es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética. Es decir el efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones cuando un haz de luz choca contra su superficie. Para que un electrón pueda escapar de la superficie, éste debe absorber energía suficiente de la radiación incidente para superar la atracción de los iones positivos del material de la superficie. [4]

## **1.2. Propiedades de la luz**

La luz debe ser considerada con doble naturaleza; en algunos casos muestra características de una onda y en otras de una partícula. Por lo tanto existen propiedades de la luz que demuestran ambas de sus propiedades.

### **1.2.1. La rapidez de la Luz**

Se conoce que la luz se desplaza con una rapidez de:  $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ , el valor descrito fue exitosamente descubierto por el físico francés Armand H. L. Fizeau (1819-1896). En donde el procedimiento básico para obtener el valor fue medir el intervalo de tiempo total durante el cual la luz viaja a través de un punto inicial hasta un espejo distante y luego de regreso. Se estableció  $d$  como la distancia entre la fuente de luz y el espejo,  $\Delta t$  como el tiempo del viaje de ida y vuelta; entonces la rapidez de la luz se obtendría de:  $c = 2d/\Delta t$ . El experimento permitió concluir la rapidez de la luz con un valor de:  $c = 3.10 \times 10^8 \text{ m/s}$ , luego a través de mediciones más exactas, se llegó a un valor más preciso de  $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ . [3]

### 1.2.2. La Reflexión

La reflexión es un fenómeno que se produce cuando un rayo de luz que se encuentra desplazándose en un medio choca con la frontera de otro medio, entonces parte de la luz que incide se *refleja*.

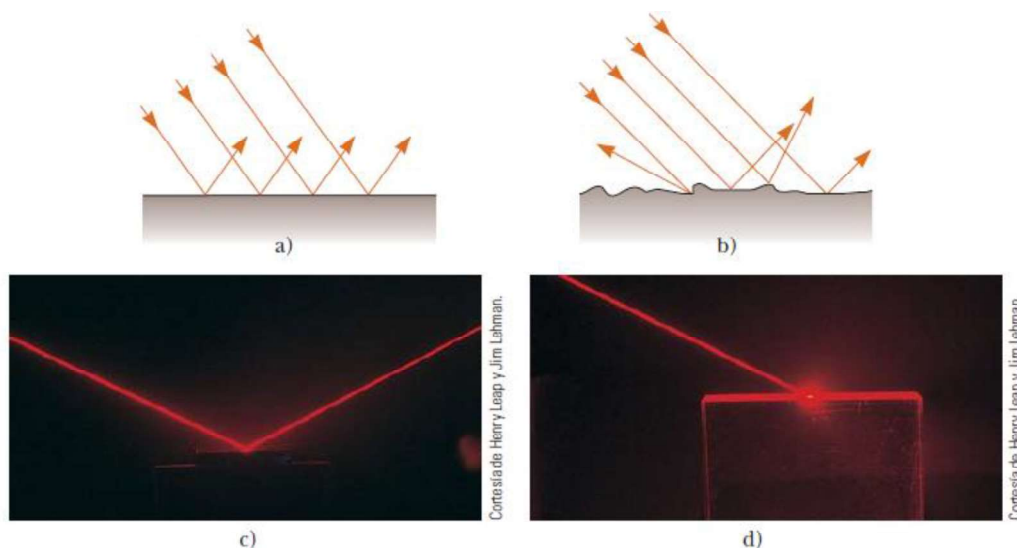


Figura 1.2 Representación en esquema de a) y c) Reflexión Especular, y b) y d) Reflexión Difusa. Fuente [3]

Se conoce que la dirección de un rayo reflejado está en el plano perpendicular a la superficie reflectora que contiene el rayo que incide. Cuando la reflexión de luz ocurre en una superficie lisa se denomina reflexión especular, en ésta reflexión los rayos reflejados son paralelos entre sí. Cuando la reflexión de luz ocurre en una superficie rugosa se denomina reflexión difusa, se puede notar que en ésta reflexión la superficie refleja los rayos en varias direcciones.[3]

### 1.2.3. La Refracción

El fenómeno de la refracción puede ser apreciado cuando un rayo de luz que atraviesa un medio transparente encuentra una frontera que dirige hacia otro medio de similares características, parte de la energía es reflejada y otra parte penetra al segundo medio.

El rayo de luz que penetra se dobla en la frontera y el fenómeno se denomina refracción. Entonces el rayo incidente, el rayo reflejado y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano. El ángulo de refracción depende de las propiedades de los dos medios.[3]

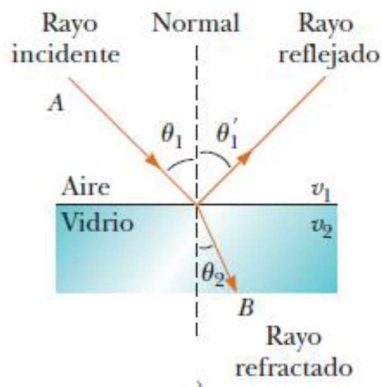


Figura 1.3 *Esquema de un rayo de luz que incide de forma oblicua en una interfase aire-vidrio.*  
Fuente [3]

Cuando la luz se mueve de un material en el que su rapidez es alta a un material en el que su rapidez es menor, el ángulo de refracción  $\theta_2$  es menor que el ángulo de incidencia  $\theta_1$ , y el rayo se dobla hacia la normal.[3]

$$\frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad \text{[Ecuación 1.5.]}$$

Dónde:

$\theta_x$ : ángulo de refracción

$v_x$ : Velocidad de la luz a través de un material traslucido.

[3]

### 1.3. El Efecto Fotoeléctrico

Se describe el efecto fotoeléctrico como la emisión de electrones cuando la luz choca contra una superficie. Para que suceda la emisión de electrones, éstos deben absorber suficiente energía de la radiación incidente para superar la atracción de los iones positivos del material de la superficie. La atracción produce una barrera de energía potencial, que confina a los electrones al interior del material. [2]

### 1.3.1. Frecuencia de Umbral y Potencial de Frenado

La cantidad mínima de energía que debe ganar un electrón para escapar de una superficie específica se denomina como *Función de Trabajo*, y se representa con ( $\phi$ ). En la figura 4 se puede apreciar una explicación más moderna del experimento de P. Lenard. Dos electrodos conductores, ánodo y cátodo se encuentran dentro de un tubo al vacío. La batería forma un campo eléctrico la cual posee una dirección desde el ánodo hasta el cátodo. La luz (flechas magenta) que llega a la superficie del cátodo crea una corriente en el circuito externo, la cual es medida por un galvanómetro. La corriente medida se denominó *fotocorriente*, la cual fue estudiada para conocer su variación con respecto al voltaje, la frecuencia y la intensidad de la luz. Para reducir al mínimo los choques de los electrones con las moléculas de gas se necesitó un alto vacío, generalmente a presiones residuales de  $0.01 \text{ Pa}$  ( $10^{-7} \text{ atm}$ ) o menores

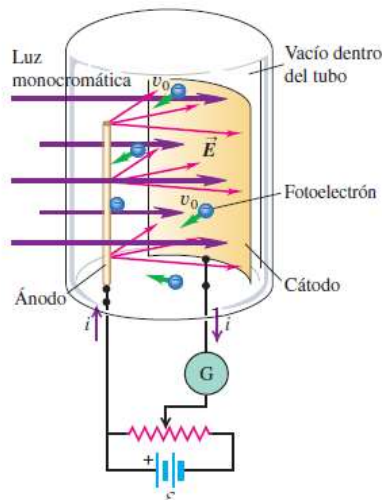


Figura 1.4 *La luz hace que el cátodo emita electrones que son impulsados por el campo eléctrico hacia el ánodo.*

*Fuente [2]*

Uno de los resultados obtenidos mediante el experimento de Lenard fue que cuando sobre el cátodo incidía luz monocromática, no se emitían fotoelectrones, a menos que la frecuencia de la luz fuera mayor que cierto valor mínimo llamado *Frecuencia de Umbral*. Esta frecuencia mínima depende del material del cátodo. Para la mayoría de los metales, la frecuencia de umbral está en el ultravioleta.

Cuando la frecuencia es mayor que la frecuencia de umbral, algunos electrones son emitidos del cátodo, con velocidades iniciales considerables. Si la magnitud del campo no es muy grande, los electrones emitidos con energía máxima seguirán llegando al ánodo, y todavía producirán una corriente. Se puede determinar la energía cinética máxima de los electrones emitidos, haciendo que el potencial del ánodo, relativo al cátodo,  $V_{AC}$ , sea justo lo suficientemente negativo para que se detenga la corriente. Eso sucede cuando  $V_{AC} = -V_0$ , donde  $V_0$  es lo que se denomina como *Potencial de frenado*. Conforme un electrón se mueve del cátodo al ánodo, el potencial disminuye en  $V_0$  y se efectúa un trabajo negativo  $-eV_0$  sobre el electrón; el electrón con mayor energía sale del cátodo con una energía cinética descrita por la ecuación 1.6, y tiene energía cinética cero en el ánodo.[2]

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} m v_{m\acute{a}x}^2 ,$$

*Ecuación 1.6*

*Energía Cinética máxima del electrón.*

*Dónde:*

$K_{m\acute{a}x}$ : *Energía Cinética de un electrón*

$m$ : *Masa del electrón.*

$v_{m\acute{a}x}$ : *Velocidad máxima del electrón*

[2]

Cuando se aplica el teorema trabajo-energía se obtiene:

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = eV_0 ,$$

*Dónde:*

$e$ : *Carga del electrón*

$V_0$ . *Voltaje de frenado de un electrón*

Así, al medir el potencial de frenado  $V_0$  se puede determinar la energía cinética máxima con la que los electrones salen del cátodo.



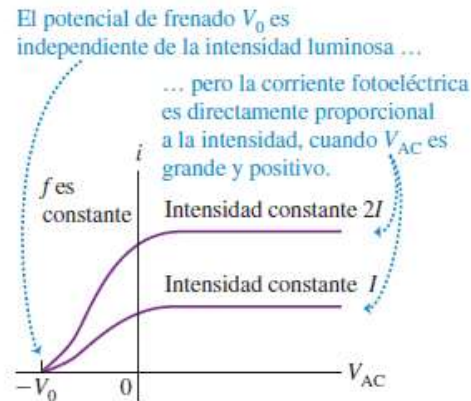


Figura 1.5 Corriente fotoeléctrica ( $i$ ) para una frecuencia constante ( $f$ ) de luz, en función del potencial  $V_{AC}$  del ánodo con respecto al cátodo.

Fuente [2]

La figura 1.5 es una demostración de las gráficas de fotocorriente en función de la diferencia de potencial  $V_{AC}$  para luz de frecuencia constante y dos intensidades distintas. Cuando  $V_{AC}$  es suficientemente grande y positivo, las curvas se nivelan, lo cual demuestra que todos los electrones emitidos llegan al ánodo. Se muestra la diferencia de potencial inverso,  $-V_0$ , necesaria para reducir la corriente a cero.

Si aumenta la intensidad de la luz, manteniendo igual su frecuencia, la corriente se nivela en un mayor valor, lo que demuestra que se emiten más electrones por unidad de tiempo. Sin embargo, se encuentra que el potencial de frenado  $V_0$  es igual.

### 1.3.2. Explicación sobre el Fotón

Cuando aumenta la intensidad, los electrones deberían aumentar más su energía e incrementar el potencial de frenado  $V_0$ . Pero se concluyó que  $V_0$  no dependía de la intensidad. De la misma manera no se puede explicar por medio de la física clásica la existencia de una frecuencia de umbral. Se conoce que la intensidad de una onda electromagnética como la luz no depende de la frecuencia, así que un electrón debería adquirir la energía de escape que necesita a partir de la luz de cualquier frecuencia. En consecuencia no debería haber una frecuencia de umbral  $f_0$ .

En 1905 Albert Einstein asume mediante su explicación del efecto fotoeléctrico que la radiación debida a un rayo de luz consistía en pequeños paquetes de cuantos de

energía, tal como propone Planck en su teoría, la cual, además, es proporcional a la frecuencia de radiación.

Einstein determinó la magnitud de los cuantos de energía como  $h \cdot f$ , donde  $h$  es la constante universal de Planck y  $f$  es la frecuencia de radiación. Los electrones emitidos de la placa pierden energía, y ésta pérdida se refiere a la función de trabajo ( $\phi$ ). Un fotón que llega a la superficie es absorbido por un electrón. Tal transferencia de Energía es un proceso total, a diferencia de la transferencia continua de energía de la teoría clásica; es decir, el electrón obtiene toda la energía del fotón o no obtiene nada. Si la energía es mayor que la función de trabajo, el electrón puede escapar de la superficie. Cuando es mayor la intensidad a determinada frecuencia equivale a una cantidad proporcionalmente mayor de fotones que se absorben por segundo y, en consecuencia, resulta una cantidad proporcionalmente mayor de electrones emitidos por segundo y la corriente es proporcionalmente mayor. [3]

Si  $\phi$  es la energía mínima necesaria para quitar un electrón de la superficie, se aplica la conservación de la energía para determinar la energía cinética máxima  $K_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} m v_{m\acute{a}x}^2$ , en donde también para un electrón emitido es la energía  $hf$  adquirida por un fotón menos la función de trabajo.

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} m v_{m\acute{a}x}^2 = hf - \phi \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Energía Cinética máxima del electrón, comparada con la energía de un fotón.

*Dónde:*

*h: Es la constante de Planck*

*f: Frecuencia de la luz incidente*

*$\phi$ : Función de trabajo de trabajo del metal*

[2]

$$eV_0 = hf - \phi \quad \text{Ecuación 1.8}$$

El efecto Fotoeléctrico [2]

Se puede medir el potencial de frenado  $V_0$  para cada uno de los valores de frecuencia  $f$ , con un material de cátodo dado.

### 1.3.3. Comportamiento Experimental del Efecto Fotoeléctrico

La explicación del efecto fotoeléctrico en un principio fue llevada a cabo a través de la teoría clásica de ondas, las cuales no permitían interpretar correctamente los resultados obtenidos por medio de experimentos. Se puede apreciar en la Tabla 1.1, las diferentes predicciones realizadas según la teoría clásica de ondas y los resultados experimentales.

Tabla 1.1. Comparación de resultados experimentales con su explicación de la teoría clásica de ondas.

Predicciones	Resultados Experimentales
<p><b><i>La energía cinética máxima de los electrones emitidos debe ser proporcional a la intensidad de la radiación.</i></b></p> <p>Si se incrementa la intensidad de la fuente de luz se incrementa también el campo eléctrico de la onda, lo cual incrementa también la fuerza del electrón y su energía cinética cuando eventualmente sale de la superficie.</p>	<p><b><i>Para un valor de longitud de onda o frecuencia de la fuente de luz, la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos es totalmente independiente de la intensidad de la fuente de luz.</i></b></p>
<p><b><i>El efecto fotoeléctrico debe ocurrir para luz de cualquier intensidad o longitud de onda.</i></b></p>	<p><b><i>El efecto fotoeléctrico no ocurre de ninguna manera si la frecuencia de la fuente de luz se encuentra debajo de un valor específico.</i></b></p>
<p><b><i>Los primeros electrones deben ser emitidos después de un corto periodo medido en segundos luego que la radiación empieza a chocar con la superficie.</i></b></p> <p>Si un electrón absorbe energía directamente de la onda, la cantidad de energía entregada al electrón es determinada por la cantidad de energía radiante que incide en la superficie.</p>	<p><b><i>Los primeros fotoelectrones que son emitidos son virtualmente instantáneos después que la fuente de luz se enciende.</i></b></p>

Fuente [13]

## 2. METODOLOGÍA

El desarrollo de un equipo a nivel de prototipo necesita un enfoque en donde intervengan varios conocimientos específicos; mecánicos estructurales, electrónica y control, y electricidad. El prototipo a ser diseñado y construido tiene cuatro componentes diferenciadas de acuerdo a la función que proveen en el prototipo; el fototubo, la fuente de luz, el circuito de control y adquisición de datos, y la estructura mecánica del equipo.

**El fototubo.** Es el componente que servirá como un sensor fotométrico para lograr la medición de la fotocorriente.

**La fuente de luz.** Se refiere al componente que permitirá emitir las distintas longitudes de onda de luz al fototubo.

**Circuito de control y adquisición de datos.** Es el componente que controlará la intensidad de la fuente de luz así como las longitudes de onda del mismo y que además permitirá medir los parámetros específicos de la fotocorriente y el voltaje de frenado.

**Estructura mecánica del equipo.** Se refiere a la estructura que contendrá los tres componentes antes mencionados, que además permita un aislamiento aceptable (que no afecte el resultado que mide el fototubo) de fuentes externas.

### 2.1. Parámetros de diseño y estudio de alternativas

#### 2.1.1. Parámetros de Diseño

El prototipo a ser diseñado debe cumplir con parámetros específicos para que se logre obtener el resultado esperado.

Cada parámetro específico se encuentra en la ecuación del efecto fotoeléctrico de Einstein [Ecuación 1.8] la cual posee 5 valores y son detallados en la tabla 2.1

Tabla 2.1 *Significado de cada variable de la ecuación del efecto fotoeléctrico de Einstein [2]*

SIMBOLO	REPRESENTACIÓN	VALOR	MAGNITUD
$e$	Carga del electrón	$1.6022 \times 10^{-19} C$	C
$V_0$	Voltaje de Frenado		V
$h$	Constante de Planck	$6.626 \times 10^{-34} J * s$	J*s
$f$	Frecuencia de la Luz monocromática emitida		$s^{-1}$
$\phi$	Función de trabajo		J

La carga del electrón es un valor constante universal medido en Coulomb [C], que es obtenido a través de referencias bibliográficas

El voltaje de Frenado es un valor medido en Voltios [V], que se obtiene al medir a través de instrumentación electrónica el voltaje entre el ánodo y cátodo del fototubo.

La constante de Planck es un valor que es obtenido a través de referencias bibliográficas.

La frecuencia de luz monocromática debe provenir de una fuente de luz que permita variar la intensidad y la frecuencia. La fuente de luz debe proveer valores específicos de la frecuencia de la luz y la intensidad de la misma debe ser manipulable a través de un controlador. La frecuencia de la Luz debe variar entre 300 nm y 940 nm de tal manera que pueda ser observable y cuantificable la variación de frecuencias e intensidades.

En la Tabla 2.2 se puede apreciar las longitudes de onda debidamente especificadas debido a su disposición en el mercado. Cada Anexo que se especifica en la Tabla 2.2 pertenece a la descripción de una fuente de luz proveniente de Leds. La selección de cada longitud de onda pertenece al espectro electromagnético en el cual se analizarán para obtener los valores esperados especificados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.2 *Designación de longitudes de onda para cada sección del espectro electromagnético*

<b>Longitud de Onda [nm]</b>	<b>Origen de Especificación</b>	<b>Sección del Espectro Electromagnético</b>
875	ANEXO 9	Infrarrojo
630	ANEXO 7	Rojo
525	ANEXO 7	Verde
470	ANEXO 7	Azul
425	ANEXO 8	Ultravioleta

Fuente:[ Datos de Especificación Led]

La función de Trabajo es un valor adimensional que se obtiene a través de las propiedades físicas del metal, es un valor característico de cada metal. A través de la

tabla 2.3, se puede apreciar los distintos valores de función de trabajo disponibles en la bibliografía seleccionada.

Tabla 2.3 *Función de trabajo de algunos metales.*

Work function (eV)					
Monovalent metals	F-P	M	Polyvalent metals	F-P	M
Li	2.38	2.90	Al	4.25	4.28
Na	2.35	2.75	Pb	4.00	4.25
K	2.22	2.30	Ca	2.80	2.87
Rb	2.16	2.16	Sr	2.35	2.59
Cs	1.81	2.14	Ba	2.49	2.70
			Zn	4.24	4.33
			Mg	3.64	3.66

*Fuente [9]*

## 2.1.2. Estudio de Alternativas

### 2.1.2.1. Fuente de luz

Los elementos que pertenezcan a la fuente de luz deben cumplir con los requerimientos para el funcionamiento del experimento del efecto fotoeléctrico. Para lo cual las alternativas de las distintas fuentes de luz disponibles en el mercado se encuentran enlistadas a continuación:

1. LEDs
2. Lámpara Fluorescente
3. Lámpara incandescente de vacío
4. Lámpara incandescente halógena
5. Lámpara Dicroica

Debido a la existencia en el mercado de las distintas alternativas expuestas se debe utilizar un método de ponderación para la selección de la alternativa más adecuada para el equipo.

### 2.1.2.2. Fototubos

Los fototubos son dispositivos que a través de avances tecnológicos fueron reemplazados paulatinamente. La compañía que se encargaba de la fabricación y comercialización de los mismos es RCA (Radio Corporation of América), la cual aún a pesar que dejó de existir y por ende fabricar dispositivos fotosensibles, existen varios productos aún disponibles en el mercado internacional. La RCA en su catálogo de productos para aplicaciones ópticas (Anexo 2) provee dos tipos de fototubos, de vacío y con relleno de gas.

Debido a la aplicación para el equipo a construirse se escogerá un fototubo al vacío. A continuación:

Tabla 2.4 *Equipos del tipo fototubos al vacío disponibles en el catálogo de RCA*

<b>Tipo</b>	<b>Detalle</b>
1P39	Base no higroscópica, usado en medición de luz y aplicación en relés
1P42	Pequeño, para aplicaciones de espacio limitado
917-919	Usado en medición de luz, de baja fuga
922	tipo Cartucho, para aplicaciones de relés
925	Tipo Bombilla pequeña, para aplicaciones de relés.
926	Tipo Cartucho, para aplicaciones de colorimetría.
929	Usado en medición de luz, y aplicaciones de relés.
934	Usado en equipos de sonido y facsímiles.
935	Usado en aplicaciones de mediciones ultravioletas
5652	Tipo compuesto ánodo-cátodo con capacitancia balanceada.
5653	Para aplicaciones de relés.
6570	Para aplicaciones industriales críticas, microfónías.
7043	Tipo no direccionales, para reproducción de sonido.

[Fuente:16]

La tabla 2.4 posee la información de todos los fototubos disponibles para la adquisición. La selección del fototubo debe recurrir a un proceso de valoración de acuerdo a la función específica que debe cumplir el dispositivo en el equipo.

### 2.1.2.3. Estructura y armazón del equipo

Las distintas opciones para realizar un análisis de alternativas en cuanto a la selección de una estructura así como de un armazón adecuado dependen enteramente de la disposición de cada elemento seleccionado, así como también de su funcionamiento. Es

decir, el proceso de elaboración de la estructura es la etapa final del proceso de construcción del equipo. Las alternativas solo pueden ser analizadas tomando en cuenta las características propias de los elementos del equipo que ya fueran seleccionadas.

## 2.2. Selección de un fototubo adecuado para el equipo de laboratorio

### 2.2.1. Fotelectricidad

Los efectos eléctricos de la luz suelen ser clasificados como foto emisivos, fotovoltaicos y foto conductivos. El efecto foto conductivo puede ser apreciado en celdas de sulfato de Cadmio, en donde la resistencia eléctrica de la misma cambia de acuerdo a la cantidad de luz visible. El efecto fotovoltaico puede ser apreciado en celdas solares que producen una diferencia de potencial eléctrico cuando son iluminadas.

El efecto foto emisivo o también denominado el efecto fotoeléctrico, es la emisión de electrones libres de superficies metálicas iluminadas por luz. Los electrones de valencia en metales son libres de moverse, pero su libertad se encuentra reducida al volumen del metal mediante el pozo potencial producido por los núcleos iónicos positivos. El pozo potencial puede ser apreciado en la figura 6, en la sección derecha del diagrama de la energía del electrón versus la distancia.

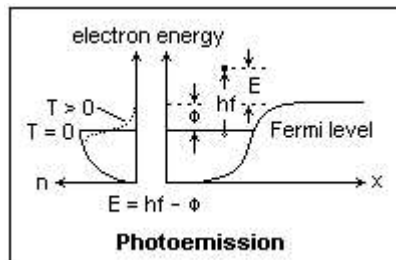


Figura 2.1 Diagrama de la energía del electrón versus la distancia.

[Fuente: 17]

El pozo potencial es muy profundo, de tal manera que es sorprendente que los electrones sean persuadidos bajo alguna circunstancia. Es importante recalcar el diagrama mostrado sección izquierda de la figura 2.1, ya que representa el número de electrones disponibles en los estados respectivos. Existen estados en bajas energías y en altas energías.

La luz puede ser absorbida por uno de los electrones en la superficie del metal. Si la frecuencia de la luz es  $f$ , la energía se transfiere en múltiplos de  $hf$ , donde  $h$  es la constante de Planck. La fotelectricidad permitió la explicación de tal fenómeno; en



donde si un electrón absorbe energía  $hf$  de la luz, y requiere energía ( $\Phi$ ) para escapar, sobra la energía cinética descrita en la ecuación 1.8.

La ecuación de Einstein muestra que existe una frecuencia mínima de luz que puede emitir un fotoelectrón. En términos de la longitud de onda, el límite es:  $\lambda = 1240/\Phi$  nm. Donde  $\Phi$  está dado en electronvoltios. El número de fotoelectrones o la fotocorriente es proporcional a la intensidad de la luz. La fotoemisión es un proceso que se lleva a cabo en la superficie y por ende es afectado por la naturaleza de la misma. La mayoría de luz que incide sobre un metal es reflejada, y otra parte es absorbida como calor, haciendo que la fotoemisión sea un proceso raro. La eficiencia cuántica de un fotocátodo es el número de fotoelectrones por fotón incidente, la misma puede ser medida tanto en longitudes de onda cortas y en longitudes de onda largas. En longitudes de onda corta, los fotones penetran antes de ser absorbidos de tal manera que existe una pequeña probabilidad de que escape un electrón.

Para que se aproveche el límite de la sensibilidad del ojo humano en 550 nm la función del trabajo del cátodo debe ser menor de 2.2 eV, y para aprovechar el espectro completo de luz visible la función de trabajo debe ser de 1.8 eV. Solamente metales alcalinos Na, K, Cs y Rb tienen funciones de trabajo tan bajas. El Na y K son muy difíciles de trabajar por ende se utiliza Cs y Rb.

Todos los fotodetectores muestran una corriente oscura, la cual es una corriente pequeña en la ausencia de luz. Cuando se utilizan fotocátodos de funciones de trabajo bajas, particularmente del cátodo S-1, la emisión termoiónica a temperatura ambiente puede ser suficiente para ocasionar una notable corriente oscura. La corriente oscura puede ser reducida mediante enfriamiento.

### **2.2.2. Fototubos**

Un fototubo consiste de un fotocátodo de un área grande, en forma de cilindro, con un alambre como ánodo en el eje, contenidos en un recipiente de vidrio. El ánodo se construye como positivo con respecto al cátodo para recolectar los electrones emitidos. En un fototubo al vacío, el recipiente es drenado a un alto vacío de tal manera que los electrones no colisionen y la fotocorriente se sature a un voltaje bajo. En un fototubo de gas, Ne o Ar a bajas presiones suele ser introducido para amplificar la fotocorriente. La fotocorriente inicialmente se satura como si se tratase de un fototubo al vacío, pero por encima de los 20V comienza a incrementar. El primer uso comercial que se dio para el

uso de fototubos fue en la reproducción de sonido en películas cinematográficas. El sonido era grabado como una pista de sonido de densidad variable que era naturalmente sincronizada con las imágenes. Mientras la película avanzaba en su proyección el sonido debía ser sincronizado para empatar las escenas. Además de muchos otros usos como en alarmas, puertas automáticas y producción en línea.

En 1950 la compañía RCA producía 137 tipos diferentes de dispositivos fotosensibles y tubos de rayos catódicos. RCA incluso fabricó celdas Cds fotoresistivas de alta sensibilidad.

El fundamento de los fototubos puede ser apreciado en la Figura 2.2. Las conexiones mostradas son aplicables a todos los fototubos con bases de 8 y 4 pines. La flecha muestra la dirección de la luz que debe ser incidida.

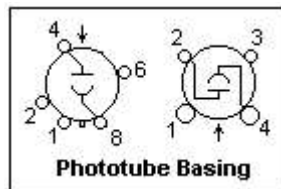


Figura 2.2 Fundamentos de un fototubo.

[Fuente:17]

Los fotocátodos de estos tubos tienen un área proyectada de 5/8" de ancho, 13/16" de Alto, Centrada 1-5/8" por encima de la asentadura de la base. El fototubo 1p39/929 posee un cátodo S-4 con una sensibilidad máxima en 400 nm, y está diseñado para fotometría. El voltaje máximo del ánodo es 250 V y la fotocorriente máxima es 5  $\mu$ A. La temperatura ambiente máxima es de 75°C. La sensibilidad absoluta está en 0.045  $\mu$ A/ $\mu$ W. La corriente oscura es 12.5 nA.

El fototubo 1P40/930 tiene un cátodo s-1 con una sensibilidad máxima de 800 nm y se encuentra diseñado para reproducción de sonido y relés. El máximo voltaje de ánodo es 90V, la fotocorriente máxima es 3  $\mu$ A, la temperatura ambiente máxima es 100°C. La sensibilidad absoluta es 0.012  $\mu$ A/ $\mu$ W como máximo. El factor de amplificación máxima por gas es 10, y la corriente oscura es 100 nA. Los voltajes y especificaciones son más que nada típicos de todos los fototubos de gas o al vacío.

El vidrio utilizado para el recubrimiento de los fototubos es vidrio común. Tal vidrio es transparente para el rango de 300 nm a 3000 nm, que incluye la mayoría de las longitudes de onda para los cuales los fotocátodos son sensibles.

### **2.2.3. Selección del Fototubo**

El proceso de selección del fototubo depende primordialmente del uso destinado originalmente al dispositivo foto sensible. La Tabla 2.4 siendo la extracción del catálogo de productos de RCA, permite filtrar las opciones posibles de acuerdo a la utilidad del fototubo en el equipo que se quiere construir.

El uso requerido en el equipo, se encuentra enfocado en:

- La medición de luz
- Aplicabilidad a circuitos eléctricos

En función a tales parámetros los dispositivos seleccionados son; los fototubos 1P39 y 929. El fototubo 1P39 ofrece una protección extra ya que posee una base que permite proteger el fototubo de humedad.

## **2.3. Diseño, cálculo y selección de los componentes de la fuente de luz**

### **2.3.1. Diseño de la fuente de luz**

Los parámetros principales que debe cumplir la fuente de luz son la variación de la frecuencia y la intensidad de la luz. Para lo cual se deben tomar en cuenta las siguientes condiciones:

1. Alcanzar los valores específicos de longitud de onda detallados en la Tabla 2.2
2. Permitir la maniobrabilidad de las intensidades de la fuente para cada longitud de onda detallada.
3. Proveer la cantidad adecuada de lúmenes para el área de exposición del cátodo del fototubo seleccionado.
4. Poseer ergonomía con respecto a la proporción de tamaño del fototubo
5. Permitir visibilidad directa con respecto al cambio de longitudes de onda de cada color correspondiente que pertenezca a la franja del espectro de luz visible

### 2.3.2. Parámetros específicos para una fuente de luz visible

La asignación de fuentes de luz con respecto a la cantidad y calidad de luz no es tan sencilla como la medición única de la distribución espectral de energía de las fuentes de luz. Se deben tomar en cuenta características fotométricas tales como: *el flujo luminoso, la eficacia luminosa, la iluminancia y el índice de exposición de color.* [8]

#### 2.3.2.1. Flujo Luminoso

La cantidad de luz o radiación de una fuente de luz puede ser medible con un espectrofotómetro resultando en la distribución espectral de energía de la fuente de luz, es decir la energía irradiada por la fuente de luz dependiendo de su longitud de onda.

La distribución de la energía espectral debe ser tomada en cuenta en conjunto con la curva de sensibilidad fototópica del ojo humano para obtener la medida del flujo luminoso. El flujo luminoso es la cantidad de energía por unidad de tiempo ( $dQ/dt$ ) irradiada por una fuente de luz de longitudes de onda visibles ponderada con la sensibilidad del ojo humano.

El flujo luminoso  $\phi_V$  se obtiene mediante la ponderación de la distribución espectral  $\phi_{(\lambda)}$  con la curva normalizada de la respuesta fototópica  $V_{(\lambda)}$  y el factor constante  $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$  [8]

$$\phi_V = K_m \int \phi_{(\lambda)} V_{(\lambda)} d\lambda \quad \text{Ecuación 2.1, Flujo Luminoso}$$

Dónde:

$\phi_{(\lambda)}$ : Flujo Luminoso

$V_{(\lambda)}$  Respuesta fototópica

$K_m$ : factor constante de valor  $683 \text{ lm W}^{-1}$

[8]

#### 2.3.2.2. Eficacia Luminosa

La eficacia luminosa no es más que la relación del flujo luminoso con la entrada de alimentación eléctrica. Se mide en  $[\text{lm W}^{-1}]$ , y su símbolo es  $\eta$ . [8]

### 2.3.2.3. Iluminancia

La iluminancia o iluminación (lux) mide el brillo de una superficie iluminada. Un Lux es  $1 \text{ lm} * \text{m}^{-2}$ . La diferencia entre lux y lumen está en que el lux toma en cuenta el área en donde el flujo luminoso se esparce. Así que no solamente depende de la fuente de luz sino también de la posición (distancia) de la superficie iluminada.[8]

### 2.3.2.4. Cálculo del valor de iluminancia de varias fuentes de luz

Para obtener el valor de la iluminancia específico para el uso que se pretende dar a las diferentes fuentes de luz se debe determinar el área de la superficie que se requiere iluminar. El área en éste caso particular es el área del cátodo del fototubo seleccionado, la cual se puede apreciar debido a la hoja de datos del fototubo.

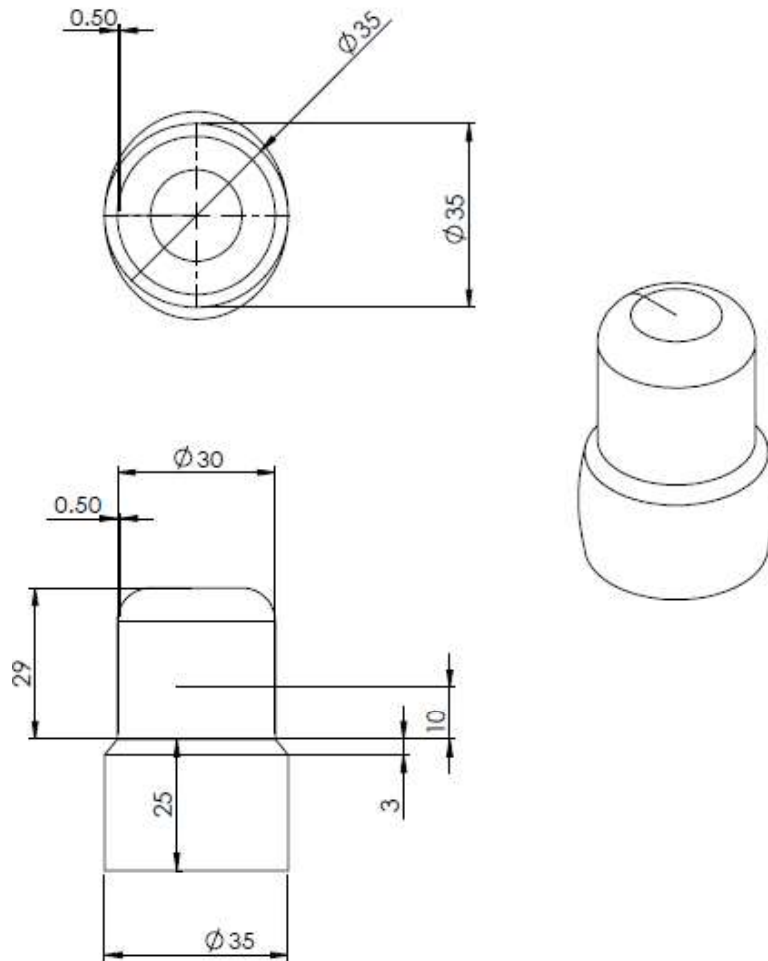


Figura 2.3 Dimensiones del Fototubo del equipo [Fuente: 15]

El área de exposición es  $5.11 \text{ cm}^2$ . Por ende se obtienen las relaciones para cada valor de lúmenes de las distintas fuentes de luz, mediante la relación flujo luminoso/ Área de exposición

### 2.3.2.5. Índice de Exposición de Color

El índice de exposición de color mide la habilidad de una fuente de luz para mostrar con precisión un color comparado con un estándar de iluminación. El IEC es una escala de 0 a 100 en donde se califica a una fuente de luz comparando ocho diferentes colores observados debajo de la fuente de luz en contra de la apariencia de esos ocho colores con el estándar de iluminación. Estos ocho colores son definidos por la Comisión Internacional en Iluminación (CIE). Mientras más alto el valor de IEC, mejor es la calidad del color. [8]

### 2.3.3. Alternativas para la fuente de luz

El experimento que permite determinar el efecto fotoeléctrico considera una fuente de luz que pueda cumplir con: las longitudes de onda específicas expuestas en la Tabla 3, las condiciones expuestas en la sección 2.2.1 y los parámetros para una fuente de luz visible.

Para lo cual se proponen alternativas disponibles en el mercado para la construcción de la misma.

#### 2.3.3.1. Ponderación de alternativas para la selección de la fuente de luz

A través del método ordinal corregido de criterios ponderados [6] se procede a estimar numéricamente el peso de cada criterio lo cual brindará resultados globales realmente significativos. El método se basa en unas tablas donde cada criterio se confronta con los restantes criterios y se asignan los valores expuestos en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 *Valores para cada criterio de ponderación*

Valor	Asignación
1	Si el criterio de las filas es superior (o mejor;>) que el de las columnas
0.5	Si el criterio de las filas es equivalente (=) al de las columnas
0	Si el criterio de las filas es inferior (o peor;<) que el de las columnas

[Fuente:Propia]

Luego, en cada criterio, se suman los valores asignados en relación a los restantes criterios al que se le añade una unidad; después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio. La evaluación final para cada criterio resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

Para lograr filtrar las distintas opciones existentes en el mercado de fuentes de luz, se ha recopilado información específica sobre el producto en mención. En la Tabla 6 se puede apreciar las distintas características fotométricas principales de las fuentes de luz disponibles en el mercado. De mismo modo en la Tabla 6 se puede apreciar las características físicas y requerimientos específicos.

Tabla 2.6 *Características fotométricas de fuentes de luz disponibles en el mercado*

Fuentes de Luz	Iluminancia [ <i>Mlux</i> ]	Índice de Exposición de Color	Eficacia Luminosa [ <i>lm * W<sup>-1</sup></i> ]	Flujo Luminoso [ <i>lm</i> ]
LEDs (5050)	2.11	80	75	1080
Lámpara Fluorescente	5.57	65	79	2850
Lámpara incandescente de vacío	1.42	100	12	730
Lámpara incandescente halógena	2.44	100	13	1250
Lámpara Dicroica	2.93	70	58	1500

[Fuente: 8]

Tabla 2.7 *Características de Mercado de fuentes de luz disponibles.*

Fuentes de Luz	Volumen [ <i>cm<sup>3</sup></i> ]	Costo [USD]	Existencia en colores requeridos	Dimensiones [cm]
LEDs (Tiras led tipo 5050, Leds por unidad)	0.0528	0.15	SI	0.48*0.5*0.22
Lámpara Fluorescente	67260	13	SI	590*38*3
Lámpara incandescente	300	5	SI	6*10*5
Lámpara incandescente halógena	2250	20	NO	15*10*15
Lámpara Dicroica	192	5	NO	6*8*4

[Fuente: 8]

Se procede a asignar las distintas opciones anteriormente descritas para la fuente de luz, en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 *Asignación de las soluciones posibles*

Solución	Asignación
A	LEDs (Tiras led tipo 5050, Leds por unidad)
B	Lámpara Fluorescente
C	Lámpara incandescente de vacío
D	Lámpara incandescente halógena
E	Lámpara Dicroica

Para lo cual se han asignado los criterios de valoración más determinantes descritos en la Tabla 2.8.

Tabla 2.9 *Criterios de Valoración*

Criterio	Asignación
Existencia en colores requeridos	Alcanzar los valores específicos de longitud de onda
Índice de Exposición de color	Permitir la maniobrabilidad de las intensidades de la fuente para cada longitud de onda detallada
Eficacia Luminosa	Proveer la cantidad adecuada de Lúmenes para el área de exposición del cátodo del fototubo seleccionado
Volumen	Poseer ergonomía con respecto a la proporción de tamaño del fototubo
Precio	Precio moderado en relación a utilidad/precio

A partir de los datos expuestos se procede a ponderar cada criterio.



Tabla 2.10 *Evaluación del peso específico de cada criterio*

<i>Existencia en colores &gt; Volumen &gt; Eficacia Luminosa = Índice de Exposición de color &gt; Precio</i>							
	Existencia en colores	Índice de Exposición de color	Eficacia Luminosa	Volumen	Precio	$\Sigma + 1$	Ponder.
Existencia en colores		1	1	1	1	5	0.34
Índice de Exposición de color	0		0	0	1	2	0.14
Eficacia Luminosa	0	0.5		0	1	2.5	0.17
Volumen	0	1	1		1	4	0.28
Precio	0	0	0	0		1	0.07
					<i>suma</i>	14.5	1

Evaluación de los pesos específicos de las distintas soluciones para cada criterio:

Tabla 2.11 *Evaluación del peso específico del criterio **Existencia de colores***

<i>A=B&gt;C&gt;D=E</i>							
Existencia en Colores	A	B	C	D	E	$\Sigma + 1$	Ponder.
A		0.5	0.5	1	1	4	0.27
B	0.5		0.5	1	1	4	0.27
C	0.5	0.5		1	1	4	0.27
D	0	0	0		0.5	1.5	0.10
E	0	0	0	0.5		1.5	0.10
					<i>suma</i>	15	1

Tabla 2.12 *Evaluación del peso específico del criterio **Índice de Exposición de color***

<i>C=D&gt;A&gt;E&gt;B</i>							
Existencia en Colores	A	B	C	D	E	$\Sigma + 1$	Ponder.
A		1	0	0	1	3	0.20
B	0		0	0	0	1	0.07
C	1	1		0.5	1	4.5	0.30
D	1	1	0.5		1	4.5	0.30
E	0	1	0	0		2	0.13
					<i>suma</i>	15	1

Tabla 2.13 *Evaluación del peso específico del criterio Eficacia Luminosa*

<i>B&gt;A&gt;E&gt;D&gt;C</i>							
Existencia en Colores	A	B	C	D	E	$\Sigma + 1$	Ponder.
A		0	1	1	1	4	0.27
B	1		1	1	1	5	0.33
C	0	0		0	0	1	0.07
D	0	0	1		0	2	0.13
E	0	0	1	1		3	0.20
<i>suma</i>						<i>15</i>	<i>1</i>

Tabla 2.14 *Evaluación del peso específico del criterio Volumen*

<i>A&gt;E&gt;C&gt;D&gt;B</i>							
Existencia en Colores	A	B	C	D	E	$\Sigma + 1$	Ponder.
A		1	1	1	1	5	0.33
B	0		0	0	0	1	0.07
C	0	1		1	0	3	0.20
D	0	1	0		0	2	0.13
E	0	1	1	1		4	0.27
<i>suma</i>						<i>15</i>	<i>1</i>

Tabla 2.15 *Evaluación del peso específico del criterio Precio*

<i>A&gt;C=E&gt;B&gt;D</i>							
Existencia en Colores	A	B	C	D	E	$\Sigma + 1$	Ponder.
A		1	1	1	1	5	0.33
B	0		0	1	0	2	0.13
C	0	1		1	0.5	3.5	0.23
D	0	0	0		0	1	0.07
E	0	1	0.5	1		3.5	0.23
<i>suma</i>						<i>15</i>	<i>1</i>

Tabla 2.16 *Tabla de conclusiones*

Solución	Existencia en colores	Índice de Exposición de color	Eficacia Luminosa	Volumen	Precio	$\Sigma$	Prioridad
A	0.09	0.03	0.05	0.09	0.02	0.28	1
B	0.09	0.01	0.06	0.02	0.01	0.19	3
C	0.09	0.04	0.01	0.06	0.02	0.22	2
D	0.03	0.04	0.02	0.04	0.00	0.14	5
E	0.03	0.02	0.03	0.07	0.02	0.18	4

La tabla 2.16 permite tomar la decisión de adquirir Leds la cual es la solución A. Se tomaron en cuenta todos los parámetros de diseño respectivos con su ponderación adecuada para la utilización en el equipo.

### 2.3.4. Diseño de la Luminaria

*Una luminaria es una unidad de luz que se destina a albergar una o varias lámparas, generalmente que aseguren el correcto funcionamiento de una fuente de luz. De tal modo que por definición una luminaria es un dispositivo que distribuye, filtra o transforma la luz emitida por una o más lámparas, los que incluyen todos los componentes necesarios para fijarlos y protegerlos y, donde se correspondan los equipos auxiliares, así como los medios necesarios para la conexión eléctrica de iluminación. (CIE, 1986).*

Con tal motivo de lograr los objetivos mencionados por definición, una luminaria debe proveer las siguientes funciones.

1. Distribuir adecuadamente la luz en el espacio requerido
2. Evitar toda causa de molestia provocada por deslumbramiento o brillo excesivo.
3. Satisfacer las necesidades estéticas y de ambientación del espacio al que están destinadas.
4. Optimizar el rendimiento energético, aprovechando la mayor cantidad de flujo luminoso entregado por la fuente luminosa.

### **2.3.4.1. Determinación de parámetros de diseño de la luminaria**

#### **Distribución adecuada de la luz**

Para distribuir adecuadamente la luz se debe tomar en cuenta el objetivo de la misma. Es decir que pueda cubrir por completo la superficie objetivo, en éste caso particular se refiere a la superficie del fotocátodo. La medida de la superficie del fotocátodo es de  $5.11 \text{ cm}^2$ .

En la sección anterior se logró establecer que se utilizará LEDs como fuente de luz de la luminaria. Por ende los Leds deberán ser distribuidos en una superficie de tal manera que iluminen por completo la superficie objetivo.

#### **Control de deslumbramiento**

Se puede realizar un control de deslumbramiento mediante el uso de un reflector que permita direccionar la luz emitida hacia el objetivo, y que a su vez restrinja la salida de luz hacia el operario.

#### **Ambientación de espacio**

Para lograr una correcta ambientación de espacio se toma en cuenta la ley inversa de cuadrados la cual permite obtener la perdida de intensidad de luz de acuerdo a la distancia de la fuente de la luz con respecto a su superficie objetivo.

Se utiliza la fórmula descrita a continuación:

$$I = 1/d^2$$

Dónde:

I= Intensidad Luminosa

d= Distancia entre la fuente y la superficie objetivo

[2]

La intensidad luminosa se obtiene a través del cálculo de luxes, que se revisó en la sección 2.3.2.3.

Tabla 2.17 *Valores de Intensidad luminosa con respecto a la distancia.*

<b>Intensidad Luminosa (lux)</b>	<b>Distancia [m]</b>	<b>Intensidad Perdida (lux)</b>	<b>Intensidad Restante (lux)</b>	<b>Intensidad perdida</b>
25816.10499	0.05	64.5402625	25751.5647	0.25%
25816.10499	0.075	145.215591	25670.8894	0.56%
25816.10499	0.1	258.16105	25557.9439	1.00%
25816.10499	0.125	403.376641	25412.7284	1.56%
25816.10499	0.15	580.862362	25235.2426	2.25%
25816.10499	0.175	790.618215	25025.4868	3.06%
25816.10499	0.2	1032.6442	24783.4608	4.00%
25816.10499	0.225	1306.94032	24509.1647	5.06%
25816.10499	0.25	1613.50656	24202.5984	6.25%
25816.10499	0.275	1952.34294	23863.7621	7.56%
25816.10499	0.3	2323.44945	23492.6555	9.00%
25816.10499	0.325	2726.82609	23089.2789	10.56%

[Fuente: 14]

De ésta manera se puede calcular, tal como se aprecia en la tabla 2.17, los valores respectivos para escoger una distancia específica en donde no se pierda intensidad luminosa pero conserve un espaciamiento adecuado para otorgar ergonomía al equipo.

De acuerdo a la tabla anteriormente expuesta se toma la decisión de colocar la fuente de luz con respecto al fototubo a 10 centímetros de distancia entre si. La razón se debe al porcentaje de perdida de la intensidad luminosa la cual es del 1%. [14]

### **Optimización de rendimiento energético**

La optimización en cuanto al rendimiento energético es un parámetro incluyente en los propios Leds. Es decir actualmente los LEDS son la fuente de luz más eficiente en comparación con otras fuentes de luz. [22]

En el ámbito del diseño de la luminaria se colocará un recubrimiento reflectivo en el interior de las carcasas.

### 2.3.4.2. Aplicación de parámetros en el diseño de la luminaria

Una vez determinados los parámetros específicos para el diseño de la luminaria se construye un boceto en un software de simulación para proceder a la construcción de la misma.

Además que en el Anexo 1, se pueden apreciar las medidas con respecto a los otros componentes llevadas a cabo para garantizar y satisfacer el espaciamiento de la luminaria con respecto a los otros componentes.

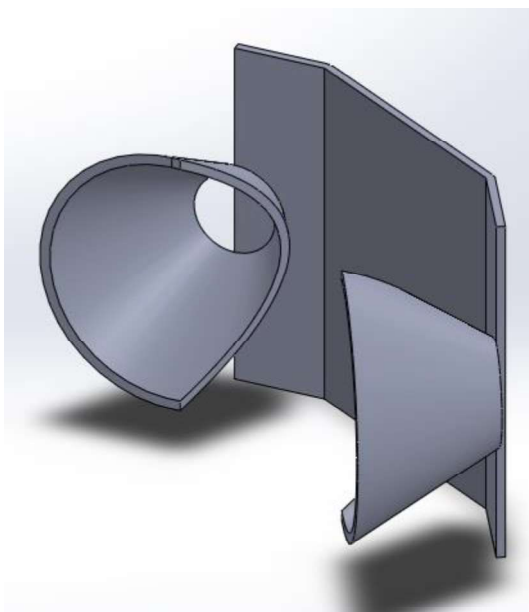


Figura 2.4 Modelo diseñado a base de un software CAD

[Fuente: Propia]

### 2.3.5. Construcción de la Luminaria

La construcción de la fuente de luz parte de un diseño que toma en cuenta los parámetros especificados en la Sección 2.3.4. En el proceso de construcción los materiales deben ser seleccionados de manera que cumplan o ayuden en el cumplimiento de los objetivos de la luminaria. Los materiales de una luminaria se distinguen por la función que cumplen: ya sea ésta; mecánica, eléctrica u óptica. Los materiales comúnmente usados en artefactos de iluminación son aquellos con mejor accesibilidad y buenas propiedades ópticas. Por ejemplo:

- Hierro en forma de chapas lisas o perforadas, plegadas y soldadas

- Aluminio en forma de perfiles o chapas plegadas o láminas
- Plásticos moldeados, extruidos o soplados
- Vidrios planos o en forma de lentes
- Fibras ópticas, para canalizaciones de haces de luz

El aluminio es un material sumamente versátil que permite la formación de varias configuraciones de estructuras, armaduras o corazas, que además es generalmente utilizado en aplicaciones de iluminación. Por ende, debido a su maleabilidad y facilidad de obtención se elige el aluminio como material para alojamiento de la fuente de luz.

La luminaria se construye de manera que cumpla con el diseño propuesto a través del software SolidWorks a través de una licencia estudiantil, en donde se acople la fuente de luz seleccionada. En el anexo 3 se puede visualizar el plano de taller de la estructura que se utilizará para alojar los LEDs.



Figura 2.5 Construcción de Luminaria

[Fuente: Propia]

### 2.3.6. Sistema de control de la fuente de luz

#### 2.3.6.1. Diseño del sistema de Control

La fuente de luz debe poseer un sistema que permita variar las longitudes de onda así como la intensidad de cada una de las mismas. A través del uso del sistema de Prototipado electrónico Arduino, se realiza un diseño adecuado para el control electrónico de la fuente de luz.

El control de cada led debe ser ejecutado a través de potenciómetros que permitan la variación de la intensidad de cada LED. Se debe utilizar un transistor, que permita amplificar la señal que brinda la placa ARDUINO hacia los LEDS a través de la variación de la magnitud de resistencia en los potenciómetros. El transistor que cumple con las características de amplificación y alimentación de voltaje es el BC547B, el cuál deberá ser utilizado para cada potenciómetro.

Se brinda a continuación el circuito electrónico propuesto para el control de LEDS.

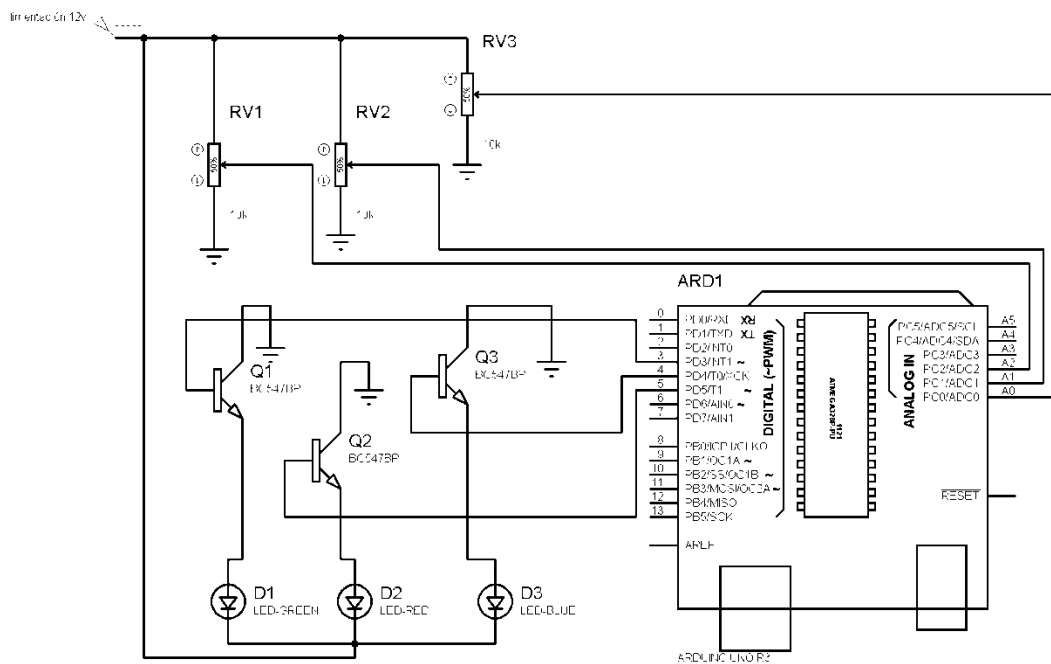


Figura 2.6 Circuito Electrónico para el control de LEDS

[Fuente: Propia]

Existe software de diseño que permite simular circuitos electrónicos simples y complejos, que incluyan la placa Arduino. El Software con Licencia Estudiantil Autodesk 123D Circuits, permite realizar simulaciones con la placa Arduino así mismo con varios implementos electrónicos. El software permite realizar un boceto del circuito de control requerido para el funcionamiento de la fuente de luz.



En la Figura 2.7 se visualiza el circuito en el software de simulación. A través de pruebas en el software se comprobó la eficacia del circuito en cuanto a la manipulación de las longitudes de onda respectivas. El código de programación perteneciente a la placa Arduino puede ser visualizada en el Anexo 4.

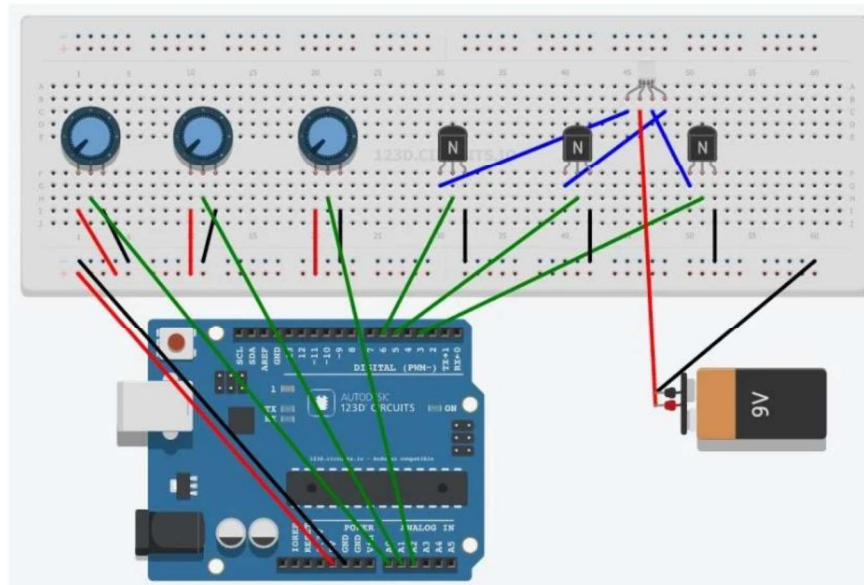


Figura 2.7 Modelo del circuito para controlar la fuente de luz.

[Fuente: Propia]

### 2.3.6.2. Construcción del circuito de control

La construcción del circuito de control tiene como base la simulación realizada anteriormente. Por lo cual se procede a obtener los dispositivos electrónicos dispuestos por la simulación. El circuito fue sometido a pruebas de funcionamiento y adecuaciones más apropiadas para la protección de cada dispositivo electrónico. La protoboard fue reemplazada por un Arduino Shield, el cual es un dispositivo que encaja en la parte superior de la placa Arduino y tiene la funcionalidad de proveer mayor número de pines para la conexión de varios dispositivos electrónicos. En la Figura 2.8 se puede apreciar un Arduino Shield.

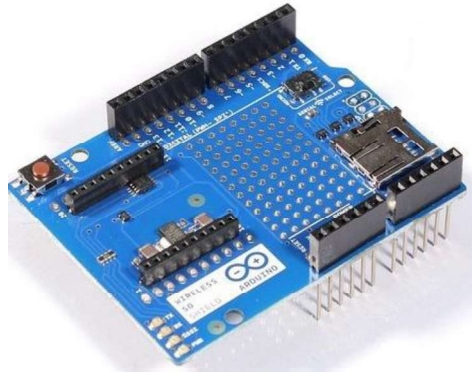


Figura 2.8 Placa electrónica tipo Shield para utilizar en Módulos Arduino [Fuente:18]

El ensamblaje final del circuito de control puede ser visualizado en la Figura 2.9. Se puede apreciar que por cuestiones de funcionalidad en el equipo, todo el cableado fue recubierto con alambre termo-encogible negro.

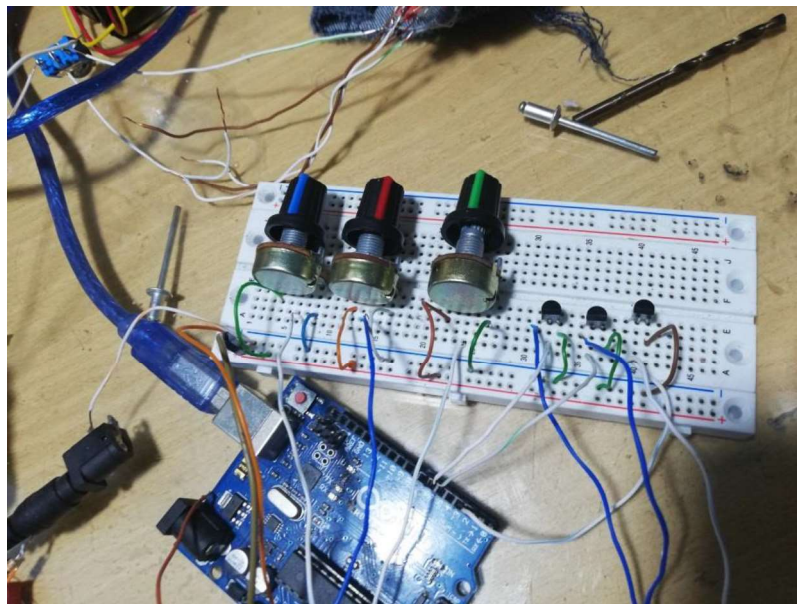


Figura 2.9 Ensamblaje final del circuito de control.

[Fuente: Propia]

#### **2.4. Implementación de la alimentación eléctrica del equipo**

Los componentes construidos y ensamblados hasta el momento tienen un requerimiento de potencia eléctrica. Se exige un diseño específico de la fuente de alimentación de

poder para todo el sistema, que permita distribuir correctamente los requerimientos de energía eléctrica de cada componente.

A continuación en la Tabla 2.18 se especifican los distintos componentes así como el requerimiento de energía eléctrica que necesitan para funcionar correctamente.

Tabla 2.18 *Componentes del equipo del efecto fotoeléctrico con sus requerimientos energéticos.*

Componente	Requerimiento eléctrico	Tipo de fuente	Transformadores de 120v en existencia
Fuente de luz	12 v	DC	SI
Controladora de Luz	5 v	DC	SI
Circuito del fototubo	12 v	DC	SI

[Fuente: Propia]

La Tabla 2.18 permite decidir sobre las 3 tomas de energía eléctrica que requiere el equipo por lo tanto se acopla un multicontacto que ofrece 8 tomas de corriente. Cada toma de energía eléctrica será satisfecha a través del multicontacto adquirido.

## 2.5. Diseño y construcción de la estructura del equipo

El diseño de la estructura del equipo debe cumplir características específicas que permitan el correcto uso y cumplir con el objetivo de la construcción del mismo.

La estructura del equipo debe cumplir las siguientes funciones:

1. Proveer de resguardo a todos los componentes del equipo de contaminantes externos como polvo, insectos o material particulado.
2. Funcionar como barrera que permita la contención de la luz generada por la fuente y que además aisle al equipo de cualquier fuente de luz proveniente del ambiente exterior.
3. Permitir la visualización del cambio de longitudes de onda de la fuente de luz
4. Proveer un amplio rango de visualización del experimento a los usuarios.
5. Permitir un fácil traslado del equipo, en caso de ser necesario.

### 2.5.1. Diseño de la estructura

La estructura para el prototipo debe diseñarse a partir de la base del equipo en donde se han dispuesto todos los componentes previamente diseñados y construidos.

Debe agregarse que debido a que el equipo debe ser utilizado con fines didácticos y de educación debe disponer de una compuerta transparente que permita la visualización del efecto fotoeléctrico y los componentes del equipo. La compuerta será construida con material de acrílico debido a sus propiedades estructurales.

El espacio necesario que ocupa la estructura se encuentra ligado a los componentes que contendrá. Los cuales son: El fototubo, la fuente de luz, el circuito eléctrico, y los controladores electrónicos.

En la Figura 2.10 se pueden apreciar los componentes y su disposición en un plano superior, y en la Tabla 2.19, se aprecia el requerimiento de espacio de cada componente los cuales son: el espacio del fototubo para restringir la entrada de luz externa a la fuente principal de luz, el espacio necesario para los controladores electrónicos y el arreglo entre la fuente de luz y el fototubo.

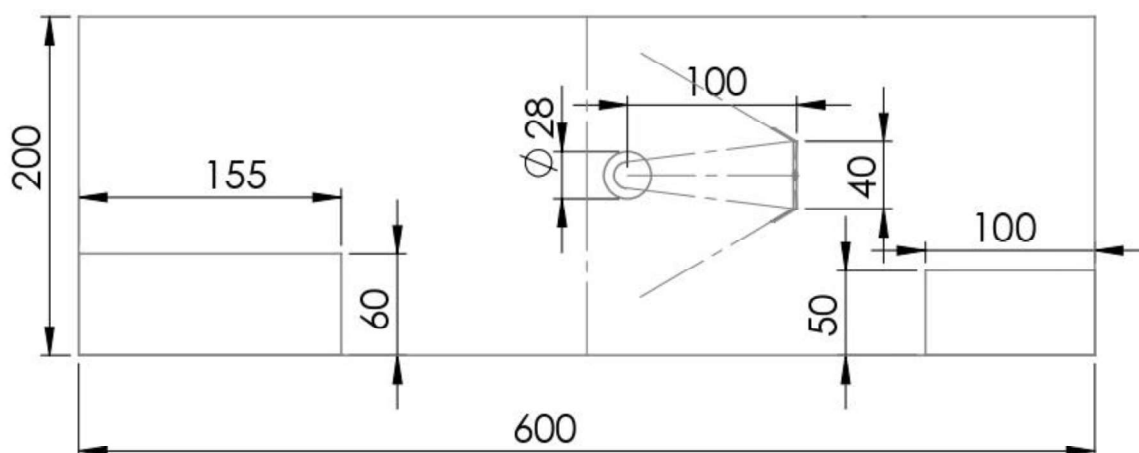


Figura 2.10 Componentes del equipo del efecto fotoeléctrico.

[Fuente: Propia]

Tabla 2.19 *Espacios requeridos por cada componente.*

<b>Causa</b>	<b>Espacio requerido</b>
Restringir la entrada de luz externa	0.2 m <sup>2</sup>
Espacio necesario para los controladores electrónicos	0.5 m <sup>2</sup>
Arreglo entre la fuente de luz y el fototubo.	0.1 m

[Fuente: Propia]

A partir de la base en donde se encuentran los componentes previamente señalados en la Tabla 2.19, se construyen 4 soportes verticales, dos serán para soportar la sección superior y otros dos serán para soportar el peso de la tapa de acrílico.

El perfil tomado en cuenta para la construcción de la estructura es un perfil de aluminio de ángulo igual, y se debe a que la estructura debe cumplir con la función de acople con el armazón. El conjunto de perfiles que permiten un acople sencillo a un armazón, son los perfiles de ángulo igual. El diseño de la estructura de acuerdo con el perfil seleccionado se muestra en la Figura 2.11. El plano de taller de la estructura se lo puede visualizar en el Anexo 3.

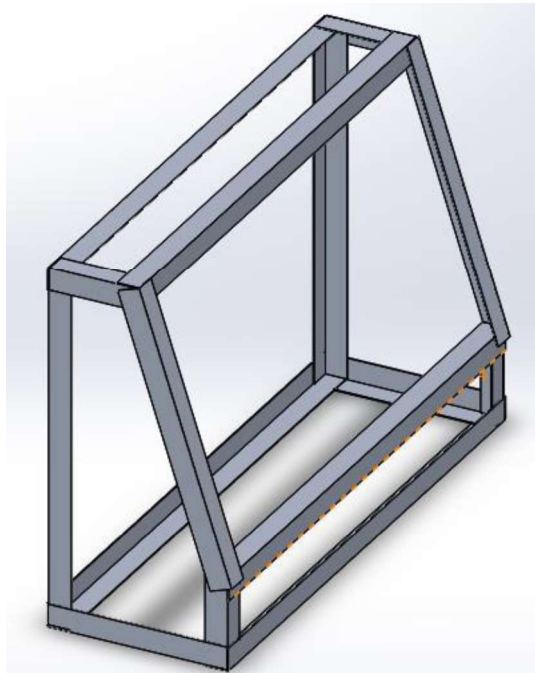


Figura 2.11 Diseño de la estructura tomando en cuenta las consideraciones de la Tabla 2.19 y Figura 2.10

[Fuente: Propia]

### 2.5.1.1. Cálculos estructurales

Se requieren valores específicos de cada componente para obtener las cargas mínimas y cargas máximas que actuarán sobre el equipo. A continuación se enlistan los componentes del equipo, así como consideraciones extras, con su peso respectivo.

1. Luminaria: 0.456 kg
2. Fototubo: 0.255 kg
3. Circuito de control y adquisición de datos: 0.136 kg
4. Base de madera: 0.215 kg
5. Acrílico: 0.108 kg
6. Peso Propio del equipo: 2.24 kg

Las cargas previamente indicadas proveen un total de una fuerza vertical sobre el equipo, el cual se obtiene mediante la suma de los valores. El total es de: 3.41kg

### 2.5.1.2. Cálculo de Esfuerzos

Se realizan los cálculos de esfuerzos que actúan en la estructura de sostén en la base del prototipo. Por ende el análisis se realiza cuando actúa sobre la estructura el máximo esfuerzo previsto.

Se construirá 4 soportes verticales que estarán sometidos a una cuarta parte del peso total del acrílico y la sección superior del equipo. Si se realiza un análisis en el momento donde actúa el máximo esfuerzo previsto, se obtiene el diagrama de la figura

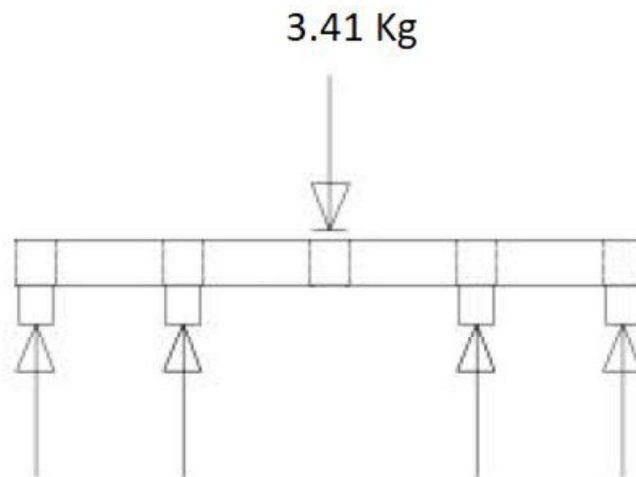


Figura 2.12 Diagrama de fuerzas de la estructura

[Fuente: Propia]

Si se considera que cada apoyo es simple, se obtiene el momento máximo el cual está relacionado con la ecuación 2.1.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Dónde:

$\sigma$ : Esfuerzo [kgf/cm<sup>2</sup>]

$M$ : Momento flector [kgf.cm]

$c$ : Distancia desde el centro de la sección transversal hasta el extremo [m]

$I$ : Inercia [mm<sup>4</sup>]

Se conoce además que las vigas de los soportes tienen una sección transversal de 59.62 mm<sup>2</sup> y espesor de 1.6 mm, lo cual permite obtener:

$c = 12.74$  [mm]

$I = 3856.53$  [mm<sup>4</sup>]

En donde se reemplaza en los datos anteriores para obtener el resultado de:

$$\sigma = 7.59 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

Se utiliza como material para la viga Aluminio CEDAL 1003, con límite fluencia 1121.69  $\left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right]$ , en donde se calcula el factor de seguridad a través de la ecuación 2.2.

$$n = \frac{S}{\sigma} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde:

$n$ : Factor de Seguridad

$S$ : Límite de Fluencia [kgf/cm<sup>2</sup>]

$\sigma$ : Esfuerzo [kgf/cm<sup>2</sup>]

Se reemplaza los valores antes obtenidos y se resuelve para un factor de Seguridad de:

$n = 147.78$ .

### **2.5.1.3. Adaptación del Armazón**

El armazón del equipo debe cumplir específicamente con las funciones de: contención segura de todos los componentes del equipo, limitar el ingreso de luz no deseada al fotocátodo. El armazón debe encajar en el interior de los perfiles de lados iguales de manera que coincida con la forma creada por la estructura.

Tecnologías actuales de corte por láser permiten obtener formas complicadas con acabados superficiales muy buenos. El material utilizado en su mayoría para corte por láser es MDF. El MDF (Tablero de fibras de densidad media) es un material ligero, fácilmente maquinable y accesible. Por ende se elige MDF como material para proceder a obtener las piezas del armazón. Se puede encontrar las medidas de cada sección del armazón en el Anexo 6.

### **2.5.1.4. Selección del tipo de Unión**

El proceso de la selección del tipo de unión empieza con la consideración del tipo de carga a la que se someterá la estructura y del tamaño y de las distancias de los orificios. Además se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos para una correcta sujeción.

1. Utilizar la alternativa menos costosa, por ende utilizar menos elementos de sujeción.
2. El ensamble de la pieza se debe lograr con una cantidad mínima de tales elementos de sujeción.
3. El ajuste que se use para las piezas debe ser lo más holgado posible, debido a los costos y para facilitar el proceso de ensamblado.
4. En cuanto sea posible no utilizar elementos de sujeción de tamaño estándar.
5. Los orificios deben estar alejados de las orillas o las esquinas, para evitar el rasgado de material al someterlo a fuerzas externas. [Fuente: 19]

Debido a la utilización de perfiles de aluminio es recomendable el uso de remaches. Los remaches son el método más común de unión mecánica permanente o semipermanente, en la construcción y ensamble de estructuras de aluminio. La instalación de un remache consta de dos pasos. Se coloca el remache en el orificio y luego se deforma el extremo del cuerpo del remache por recaleado o batido. El proceso de remachado puede hacerse a temperatura ambiente o elevada. [19]



## 2.6. Construcción y Montaje del Equipo

### 2.6.1. Introducción

Finalizado el proceso de estudio, diseño y selección de cada componente y conjunto de componentes que conforman la máquina, se procede a ensamblar y juntar en un taller mecánico.

### 2.6.2. Requerimientos

Para la construcción y montaje de cada componente que forman el equipo del efecto fotoeléctrico así como la estructura se requiere de un taller mecánico, el cual debe cumplir con lo que se dicta a continuación:

1. Materia prima de cada componente
2. Personal capacitado
3. Máquinas, maquinaria y herramientas

### 2.6.3. Materiales

Toda la materia prima a utilizar en la construcción del equipo se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla 2.20 *Materia Prima.*

Denominación	Cantidad
Plancha MDF 600x600x3.5	1
Perfil en L INEN 2250:2015 25.40X25.40X1.20 (5m)	1
Plancha Acrílico 340x580x4	1
Remaches popp 4mm	20
Perno Hexagonal 3/4'' x 3/8''	5
Anillo con Empaque de caucho N14	5
Cable UTP (1m)	10
Pintura Spray Negro Matte	1
Silicón en Barra	10
Arduino Uno	1
Potenciómetros (5K, 10K, 100k)	5
Tubo termoencogible negro d=4mm (1m)	5
Protector de Potenciometro	4

#### 2.6.4. Mano de Obra

El proceso de montaje y construcción del equipo del efecto fotoeléctrico requiere solamente del jefe de proyecto y un obrero.

#### 2.6.5. Maquinaria, equipos y herramientas

La construcción del equipo requiere varios instrumentos, los cuales se encuentran especificados en la siguiente tabla.

Tabla 2.21 *Maquinaria, equipos y herramientas utilizadas.*

Tipo	Elemento	Código	Cantidad
EQUIPOS	Taladro de Mano	E1	1
	Equipo de seguridad	E2	1
	Equipo de Pintura	E3	1
	Cortadora Laser	E4	1
HERRAMIENTAS	Sierra	H1	1
	Lima	H2	1
	Herramientas Varias	H3	5
	Remachadora	H4	1
	Pistola Silicona Caliente	H5	1
	Cautín	H6	1
INSTRUMENTOS	Flexómetro	I1	1
	Calibrador	I2	1
	Regla metálica	I3	1
	Escuadra	I4	1
	Multímetro	I5	2

[Fuente: Propia]

#### 2.6.6. Proceso Constructivo

El proceso que lleva a cabo la obtención del equipo se debe diferenciar dos etapas las cuales son: Construcción y Montaje.







### 2.6.7. Construcción

El taller mecánico debe ser aprovechado de tal manera que se aproveche en gran manera el número de actividades que se van a realizar. Por ende deben de seguirse pasos cronológicamente como se indica a continuación:

1. Se establecen procesos, materiales y medidas específicas.
2. Se cotizan y se adquieren los materiales y equipos
3. Se acondiciona el espacio, las herramientas, equipos
4. Se prepara el material para su posterior maquinado
5. Se ejecutan los procesos de maquinado
6. Se posiciona, acopla y fijan todos los elementos estructurales
7. Se verifican las medidas y dimensiones

Los diagramas de flujo permiten visualizar de mejor manera la secuencia de ejecución en la fabricación de equipos o elementos. A partir de los pasos antes expuestos se procede a realizar un diagrama de flujo. Por ende se utiliza una simbología, la cual se encuentra descrita a continuación.

Tabla 2.22 *Simbología para diagrama de flujo.*

Actividad	Símbolo
Inicio de proceso	
Operación	
Inspección	
Transporte	
Retraso o demora	
Fin del proceso	

[Fuente: 19]

En el diagrama de flujo se procede a utilizar códigos que ayuden a la interpretación de cada operación, tal como se especifica a continuación.

Tabla 2.23 *Simbología de Operaciones para diagrama de flujo.*

Operación	Código
Medición	O1
Corte a Laser	O2
Taladrado	O3
Corte a disco	O4
Limado	O5
Remachado	O6
Ensamble	O7
Pegado	O8
Pintado	O9
Inspección	INS1
Traslado	A1
Almacenamiento	A2

[Fuente: Propia]

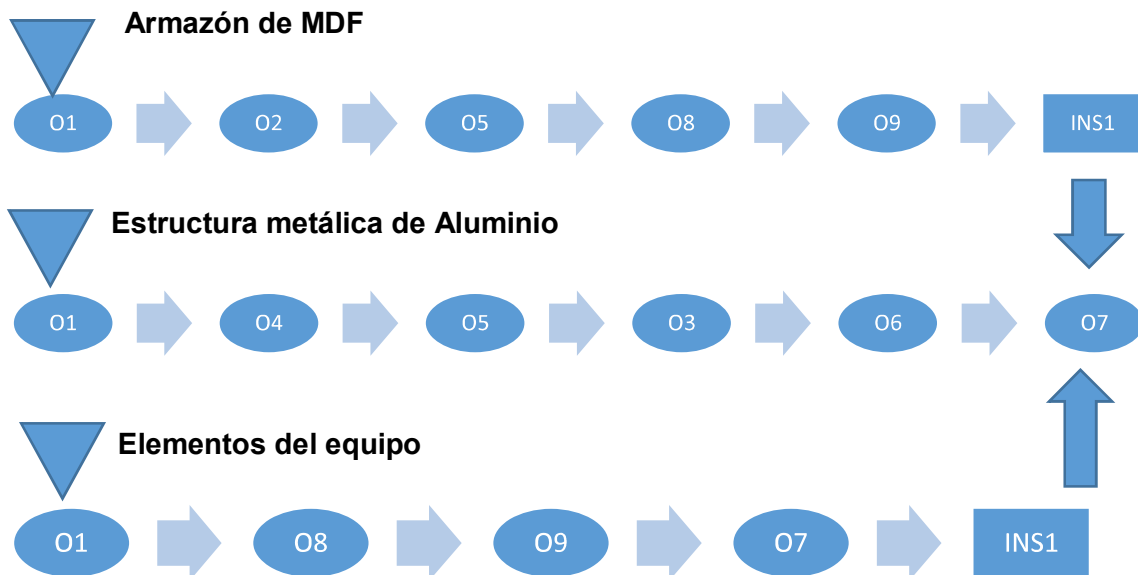


Figura 2.13 *Diagrama de Flujo del proceso de construcción.*

[Fuente: Propia]

### 2.6.8. Montaje

El montaje del equipo obedece a la distribución de cada dispositivo que se encuentra en la Figura 2.13. Cada dispositivo debe ser adherido a la base del armazón previamente construido de tal manera que la disposición coincida con la Figura 2.10. Cada parte del equipo procede a ser adherida mediante el uso de un pegamento tipo resina, para prevalecer la integridad del material del equipo. En la siguiente figura se puede apreciar el equipo completo con el montaje realizado en el armazón y en la estructura.



Figura 2.14 Montaje del equipo.

[Fuente: Propia]



Figura 2.15 Montaje de la fuente de luz con el fototubo.

[Fuente: Propia]

## **2.7. Protocolo de pruebas**

El protocolo de pruebas a desarrollar es una serie de instrucciones que serán aplicadas específicamente para la comprobación del funcionamiento de cada componente del equipo del efecto fotoeléctrico. El equipo permite la medición de la fotocorriente y el voltaje de frenado para cada longitud de onda en varias intensidades, entonces el protocolo de pruebas será enfocado a cada etapa del proceso de obtención de las variables especificadas en la sección 2.1.1. A continuación se enlista el proceso para realizar el protocolo de pruebas de cada etapa.

### **Etapa de Encendido**

1. Verificación del switch de encendido en la regleta eléctrica, debe estar en la posición de OFF y al encenderse en la posición de RESET, el LED debe prenderse.
2. Verificación del encendido de la placa Arduino y el voltímetro para el voltaje de frenado, en el momento de encender la regleta eléctrica.

### **Etapa de Selección de Luz**

1. Se verifica que los tres diales de las distintas longitudes de onda (rojo, verde, azul) se enciendan el momento que se opere el dial de cada uno. Además que se enciendan de manera progresiva, es decir, de menor intensidad luminosa a mayor intensidad luminosa.
2. Se verifica que el switch para la luz infrarroja y ultravioleta, encienda el momento en que se selecciona cualquiera de las dos luces.

### **Etapa de medición**

1. Se verifica que el multímetro para la fotocorriente brinde una medida para cada longitud de onda que brinda el componente de la fuente de luz del equipo.
2. Se verifica que: cuando se tenga una medida de fotocorriente, la misma podrá ser variada mediante la operación del dial de voltaje de frenado.
3. Se verifica que efectivamente la fotocorriente alcance un valor nulo, en una medida del voltaje de frenado específica para cada longitud de onda.

En las siguientes figuras se aprecia el protocolo de pruebas que se realizó para el funcionamiento del componente de la fuente de luz en donde se evaluaron las intensidades de la fuente de luz para cada longitud de onda especificada en el diseño.



*Figura 2.16 Prueba de Funcionamiento de Luz infrarroja.*

*[Fuente: Propia]*



*Figura 2.17 Prueba de Funcionamiento de Luz Verde, en sus tres intensidades [Fuente: Propia]*



*Figura 2.18 Prueba de Funcionamiento de Luz Azul, en sus tres intensidades [Fuente: Propia]*



*Figura 2.19 Prueba de Funcionamiento de Luz Roja, en sus tres intensidades [Fuente: Propia]*



*Figura 2.20 Prueba de Funcionamiento de Luz Ultravioleta.*

*[Fuente: Propia]*

## **2.8. Costos**

El análisis de costos es un parámetro importante en la implementación y desarrollo del proyecto, tanto así que puede llegar a determinar la factibilidad de su construcción e implementación.

### **2.8.1. Costos Directos**

Los costos directos comprenden todo lo que se refiere a:

1. Materiales, herramientas, insumos, instrumentos y equipos
2. Costos para fabricado, maquinado y montaje
3. Costos de diseño



### 2.8.2. Costos de Materiales, herramientas, y equipos

Los rubros especificados en las siguientes tablas permiten el análisis económico al final de ésta sección.

Tabla 2.24 *Valores de Materiales y herramientas.*

Material	Proveedor	Costo Unitario (USD)	Cantidad	Costo Total (USD)
Plancha MDF	Sais 3d	25	1	25
Fotocátodo	Tubestore	50	1	50
Perfil en L	Cedal	7.17	1	7.17
Plancha Acrílico	Sais 3d	19	1	19
Remaches popp	Kiwi	0.02	50	1
Perno Hexagonal	Kiwi	0.25	5	1.25
Anillo con Empaque de caucho N14	Kiwi	0.25	5	1.25
Cable UTP (1m)	Import Com	0.5	10	5
Pintura Spray Negro Matte	Kiwi	1.78	1	1.78
Silicón en Barra	Kiwi	0.15	10	1.5
Arduino Uno	All.uc	7.5	1	7.5
Potenciómetros (5K, 10K, 100k)	All.uc	0.6	5	3
Tubo termoencogible negro d=4mm (1m)	All.uc	0.35	5	1.75
Protector de Potenciómetro	All.uc	0.25	4	1
Tiras Led	All.uc	20	1	20
SUBTOTAL				146.2

(Fuente: [Propia])

### 2.8.3. Costos de Fabricación, Maquinado y Montaje

Los costos de maquinado incluyen el costo de mano de obra y el alquiler de las máquinas.

Tabla 2.25 *Valores de fabricación y montaje.*

<b>Maquinado</b>	<b>Máquina (USD/hora)</b>	<b>Operario (USD/hora)</b>	<b>Horas (h)</b>	<b>Costo Total (USD)</b>
Cortado	5	5	2	20
Limado	5	5	1	10
Taladrado	6	4	2	20
Montaje	3	6	10	90
Pintura	3	5	2	16
Remachado	4	4	2	16
<b>SUBTOTAL</b>				172

[Fuente: Propia]

#### 2.8.4. Costos de Diseño

El costo se toma en cuenta en un tiempo de trabajo de aproximadamente un mes.

Tabla 2.26 *Valores de Diseño*

<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
Implementos e impresiones	200
Honorarios profesionales Costo hora/hombre= \$5	800
<b>SUBTOTAL</b>	1000

[Fuente: Propia]

#### 2.8.5. Total Costos Directos

Los costos directos totales son obtenidos a través de la suma de los costos de las tablas 2.24, 2.25 y 2.26.

Tabla 2.27 *Valores totales.*

<b>Descripción</b>	<b>Costo (USD)</b>
Costos de Diseño	1000
Costos de Fabricación, maquinado y montaje	172
Costos de Materiales, herramientas, insumos, instrumentos y equipos	146.2
<b>TOTAL</b>	1318.2

## 2.9. Costos Indirectos

Los Costos indirectos comprenden los servicios no recuperables que se refieran a la preparación y elaboración del proyecto, los cuales son: materiales consumibles y transporte.

### 2.9.1. Materiales Consumibles

En la siguiente tabla se aprecian todos los valores de materiales consumibles.

Tabla 2.28 *Valores de materiales consumibles*

<b>Material</b>	<b>Costo Unitario (USD)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total (USD)</b>
Silicon en Barra	0.2	20	4
Disco de Cortar	1.5	1	1.5
Guaype	0.2	10	2
Lija Par metal Grado 100	0.85	5	4.25
Pintura Matte Negra	2	2	4
Estaño para soldar	4.5	1	4.5
TOTAL			20.25

(Fuente: [Propia])

### 2.9.2. Transporte

El costo de transporte se ha estimado en un valor de USD \$100.

### 2.9.3. Total Costos Indirectos

En la siguiente tabla se consideran los valores que representan los costos indirectos.

Tabla 2.29 *Valores totales.*

<b>Rubro</b>	<b>Costo USD</b>
Materiales Consumibles	20.25
Transporte	100
Total	120.25

(Fuente: [Propia])

## 2.10. Costo Total de la Máquina

La tabla siguiente permite obtener el costo total de la máquina.

Tabla 2.30 *Valores de costo total.*

<b>Rubro</b>	<b>Costo USD</b>
Costos Indirectos	\$ 1318.2
Costos Directos	\$120.25
Total	\$ 1438.45

*(Fuente: [Propia])*

### **3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **3.1. Procedimiento experimental**

El proceso para obtener los datos requeridos a partir de los componentes construidos debe empezarse por definir un orden cronológico de operación del equipo. A continuación se muestra la enumeración de cada procedimiento a realizar en el equipo y de ésta manera tomar las medidas necesarias para evaluar los datos.

1. Seleccionar la longitud de onda para evaluar
2. Encender el dial para operar la longitud de onda seleccionada a través de la fuente de luz
3. Verificar que exista fotocorriente en el multímetro digital
4. Utilizar el dial del voltaje de frenado para aumentar la magnitud de la polaridad sobre el fotocátodo, de tal manera que se detenga el paso de electrones (la medida de la fotocorriente en el multímetro debe ser igual a cero) entre cátodo y ánodo.
5. Registrar el valor de voltaje que brinda el voltímetro.
6. Repetir 20 veces para cada longitud de onda
7. Tabular los datos y reemplazar en la ecuación del efecto fotoeléctrico.

Luego de terminar el procedimiento experimental se procede a realizar un análisis de datos, ya que el parámetro que permitirá evaluar el experimento es la exactitud con respecto al valor de la constante de Planck.

#### **3.2. Recopilación y Análisis de datos**

El equipo del efecto fotoeléctrico permite tomar mediciones a través de un voltímetro instalado en la cubierta frontal. A su vez posee también un dial que permite variar la intensidad de voltaje. Se dispone de una conexión externa hacia un Amperímetro de alta sensibilidad (0.01 uA) para detectar la fotocorriente y de esta manera determinar el voltaje de frenado. Se puede visualizar tal configuración en la Figura 3.1.



*Figura 3.1 Configuración del Voltímetro para medición.  
(Fuente: Propia)*

La medición que se obtiene procede del voltaje de frenado necesario para que los electrones detengan su movimiento y no lleguen al ánodo desde el fotocátodo. Los voltajes de frenado son obtenidos el momento que no existe fotocorriente, es decir; existe un segundo multímetro que permite medir la fotocorriente en el orden de los microamperios. En el momento que no exista medida de corriente se traduce como el alto al movimiento de electrones entre cátodo y ánodo en el fototubo.

### **3.3. Análisis de Datos**

Los datos obtenidos a través del procedimiento experimental establecido en la sección 3.2 permiten evaluar el cumplimiento de la ecuación del efecto fotoeléctrico de Einstein. Se toman en cuenta los parámetros seleccionados para cada elemento de la ecuación como se ve en la Tabla 3.1.

Además que en el ANEXO 10 se puede visualizar todos los datos obtenidos a partir de las longitudes de onda especificadas.

Tabla 3.1 Valores de parámetros de la ecuación del efecto fotoeléctrico.

SIMBOLO	REPRESENTACIÓN	VALOR	MAGNITUD
$e$	Carga del electrón	$1.6022 \times 10^{-19} C$	C
$V_0$	Voltaje de Frenado		V
$h$	Constante de Planck	$6.626 \times 10^{-34} J * s$	J*s
$f$	Frecuencia de la Luz monocromática emitida		$s^{-1}$
$\phi$	Función de trabajo	3.3646 e-19 J	J

(Fuente: [9][12])

Se tabulan los datos obtenidos para cada parámetro de la ecuación del efecto fotoeléctrico, en la Tabla 3.2. En donde la **frecuencia de la luz**, se tabula en Hertz [Hz], el **Voltaje de Frenado**, el cual es tabulado a través de un promedio de los valores tomados que se visualizan en el ANEXO 10, se registra en Voltios [V], la **carga del electrón**, que se mide en Coulombs [C], siendo un valor constante, la **función de trabajo del metal**, el cual es un valor propio del metal del fotocátodo seleccionado que además se mide en Joules [J], y por último, la **constante de Planck**, que viene siendo el valor que se utilizará para comparar los resultados experimentales.

Tabla 3.2 Valores de parámetros de la ecuación del efecto fotoeléctrico.

Frecuencia de Luz [Hz]	Voltaje Frenado [V]	Carga del electrón [C]	Función de Trabajo [J]	Constante de Planck [J/s]
7.05882E+14	1.01	1.6022E-19	3.3642E-19	6.626E-34
6.38298E+14	0.75	1.6022E-19	3.3642E-19	6.626E-34
5.71429E+14	0.63	1.6022E-19	3.3642E-19	6.626E-34
4.7619E+14	0.54	1.6022E-19	3.3642E-19	6.626E-34
3.42857E+14	0.21	1.6022E-19	3.3642E-19	6.626E-34

(Fuente: [propia])

Los datos tabulados pueden ser graficados de tal manera que se obtenga un gráfico en donde se pueda obtener una línea de tendencia.

En la Figura 3.2 se aprecia un gráfico sobre el voltaje frenado en función de la frecuencia respectiva.

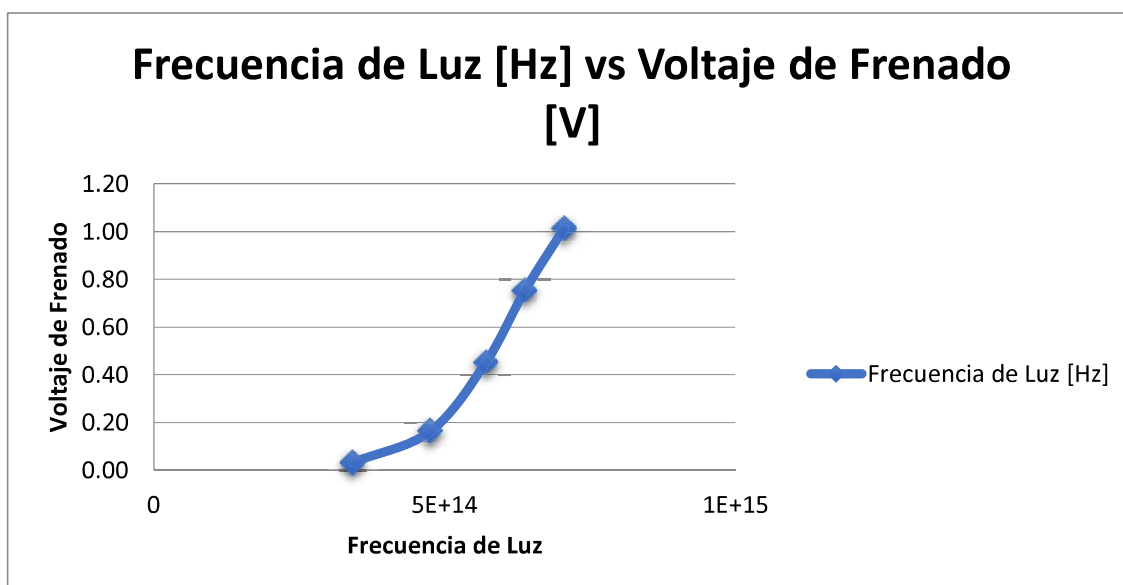


Figura 3.2 Configuración del Voltímetro para medición.

(Fuente: Propia)

La ecuación para la línea de tendencia que se produce obedece a la fórmula:

$$V_0 = \frac{h}{e}f - \phi/e$$

En donde se pueden establecer los valores medidos y calculados, para la constante de Planck y para el voltaje de frenado. Los valores obtenidos se pueden apreciar en la Tabla 3.3. Se ha calculado también el error relativo correspondiente a cada valor medido.

Tabla 3.3 Valores calculados y medidos de parámetros de la ecuación del efecto fotoeléctrico.

Voltaje Frenado Medido [V]	Voltaje según ecuación del efecto Fotoeléctrico	Constante de Planck Tabulada [J/s]	Constante de Planck Calculada [J/s]	Error relativo	%
1.0145	1.0194	6.626E-34	6.6147E-34	0.00169858	0.17%
0.7535	0.7399	6.626E-34	6.66E-34	0.00512985	0.51%
0.453	0.4634	6.626E-34	6.5968E-34	0.00440778	0.44%
0.1635	0.0695	6.626E-34	6.9421E-34	0.04770531	4.77%
0.0325	-0.4818	6.626E-34	9.0296E-34	0.3627566	36.28%

(Fuente: [propia])



### 3.4. Errores de Medición

La medición de errores son calculados mediante un análisis estadístico sobre la cantidad de datos recogidos con respecto a la media de todos los datos. Los errores obtenidos en cuanto a la medición del parámetro de voltaje de frenado se observan tabulados en la Tabla 3.3.

El orden para el cálculo realizado parte primeramente por la obtención de la varianza:

$$S = \frac{\sum(x_i - \bar{x})}{n-1} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

*Dónde:*

S: Varianza

Xi: Valores singulares

X: Valor Promedio

N: Número total de valores [7]

Luego se obtiene la Desviación Estándar para por último obtener el error estadístico.

$$e = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

*Dónde:*

*e=Error estadístico*

*Sx= Varianza*

*n=Número de valores tomados en cuenta [7]*

Con los datos obtenidos en la Tabla 3.3 y con la aplicación de la Ecuación 3.1 se obtiene el error estadístico para cada longitud de onda, se tabulan éstos valores en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 *Valores pertenecientes al error estadístico del parámetro de voltaje de frenado (Fuente: [propia])*

Promedio de Voltaje Medido (V)	Varianza	Desviación Estándar	Error Estadístico	%
1.01	0.00033475	0.018296	0.00409	0.41%
0.75	0.00015275	0.012359	0.00276	0.28%
0.45	0.002191	0.046808	0.01046	1.05%
0.16	0.00028275	0.016815	0.00375	0.38%
0.03	0.00374875	0.061227	0.01369	1.37%

### 3.5. Discusión de Resultados

Los datos obtenidos de la constante de Planck en la Tabla 3.3, permiten apreciar la diferencia entre el valor real y el valor medido. Tal cual para comparación los valores de los voltajes de frenado para cada frecuencia de luz fueron calculados, de ésta manera se puede contrastar la lejanía de los valores medidos y calculados.

La medida del error se encuentra en un rango aceptable para la determinación de la constante de Planck.

Uno de los datos que llama la atención es el error obtenido en la frecuencia de luz en el rango de infrarrojo, ya que es un error relativamente alto, tomando en cuenta los demás valores. El error se debe a la explicación que en la sección 2.2.2 se detalla, el fotocátodo seleccionado tiene una sensibilidad máxima de 800nm, y la luz utilizada infrarroja es de 875 nm, por ende la luz detectada sobrepasa la sensibilidad del equipo. Lo cual es un resultado esperado ya que cumple con las especificaciones deseadas para la detección de luz en el rango propuesto.

Tomando en cuenta la sensibilidad del fototubo, se puede apreciar que los datos de voltaje medidos son precisos, ya que la obtención de la constante de Planck y su posterior comparación arrojan datos específicos que no se alejan del valor exacto.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES**

La definición correcta del fenómeno físico del efecto fotoeléctrico a través de la ecuación desarrollada por Einstein, permitió elaborar un modelo físico didáctico que permitió corroborar y comprobar el modelo matemático establecido. De tal manera que brinda un soporte académico en la introducción a la mecánica cuántica en cursos de pregrado a nivel Universitario.

El proceso de selección y evaluación de alternativas para la construcción de cada elemento del equipo permite utilizar un amplio espectro de conocimientos adquiridos durante el proceso de formación académica.

El diseño de la luminaria empezó del análisis de la necesidad de iluminancia para lograr la variación de las longitudes onda en el rango requerido. A su vez se logró la construcción del diseño de la luminaria propuesta debido a la disponibilidad y accesibilidad del tipo de fuente de luz seleccionada, que en éste caso fueron LEDs.

El experimento del efecto fotoeléctrico depende en gran manera del metal que se utilice para el análisis de la variable de la función de trabajo, por ende para la construcción del equipo se tomó en cuenta fototubos disponibles en el mercado que posean un valor bajo de función de trabajo. Los fototubos disponibles en el mercado pasaron por un proceso de selección para utilizar el adecuado para su uso específico en el equipo del efecto Fotoeléctrico.

La construcción de la estructura del equipo dependió del requerimiento de aislamiento lumínico para que la medición del efecto fotoeléctrico corresponda a los valores mas cercanos que correspondan a la teoría.

Los resultados evaluados permitieron determinar el objetivo planteado al inicio de la investigación el cual era determinar la constante de Planck. Lo cual mediante el análisis de datos pudo ser comprobada y determinada con un valor respectivo de error relativo que corresponde a la apreciación de los equipos de medida utilizados para su determinación.

## **4.2. RECOMENDACIONES**

Se recomienda ubicar el equipo en un lugar con muy baja humedad debido a la presencia de varios elementos que pueden llegar a deteriorarse con el tiempo. El MDF siendo la armadura del equipo es un material muy delicado cuando se enfrenta a ambientes húmedos, comprometiendo su integridad física.

Se recomienda operar el equipo con la menor cantidad de fuentes de luz externas al mismo. De tal manera que se evite contaminar la señal que recibe el fotocátodo y así experimentar con los datos respectivos de la fuente de luz diseñada.

Se recomienda el uso cauteloso y precavido del equipo, debido a los frágiles componentes que posee, ya que puede ocasionar daños irreparables en el funcionamiento correcto del mismo. Una variación alta de voltaje o corriente en cualquiera de los dos circuitos: de control de luz o del fotocátodo, puede provocar daños a los circuitos integrados del arduino.

Se recomienda que el equipo pueda ser utilizado en casas abiertas en especial para estudiantes de nivel de secundaria, de tal manera que el concepto de la mecánica cuántica sea algo más fácil de comprender a través del equipo.

## Referencias Bibliográficas

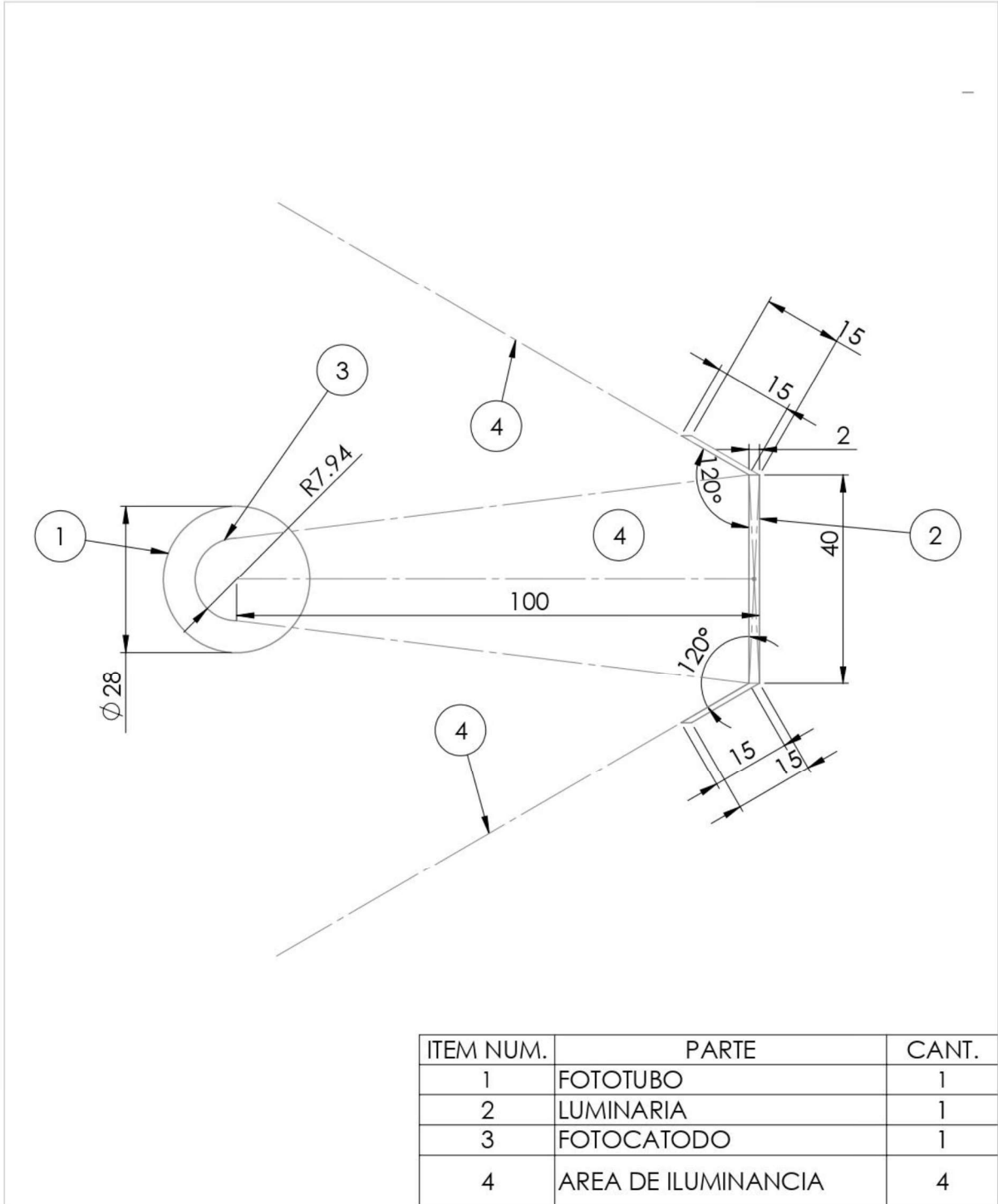
- [1] Melissinos, A. (1966) *Experimentos en la Física Moderna*, New York, EEUU.
- [2] Young, H. & Freedman, R. (2009). *Física Universitaria, con Física Moderna*, Volumen 2, 12va Edición, Pearson Education, México
- [3] Serway, R. *Física para ciencias e ingeniería*. 7ma Edición, México D.F. México.
- [4] Tipler, P. & Llewellyn, R. (2008) *Modern Physics*. 5ta Edición, New York, EEUU
- [5] Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Monterrey: Mc Grawhill.
- [6] Riba, C. (2002). *Diseño Concurrente*. Barcelona: Ediciones UPC.
- [7] Bevington y Robinson, (2003). *Reducción de Información y análisis de Error para las ciencias físicas*, (Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences) - 3rd Edition, McGraw-Hill,
- [8]Flesch, P ( ) Light and Light Sources: High-Intensity Discharge Lamps
- [9] Kiejna A. (1996) *Metal Surface Electron Physics*. 1era Edición, Gran Bretaña, Oxford.
- [10] Lulu, L. (2007) Determination of Planck's Constant Using the Photoelectric Effect, MIT, *Artículo Científico*.
- [11] Wieman, E. McKagan, W. Perkins, K. (2009). Una investigación acerca de la enseñanza del efecto fotoeléctrico. (A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect), *American Journal of Physics* 77, 87
- [12] Smith, C & Diaz, L. (2005) Investigación del efecto fotoeléctrico usando LEDs y un espectroscopio Modular (Investigating the Photoelectric Effect using LEDs and a Modular Spectroscope), *Journal of chemical Education*, EEUU.
- [13] Krane, K (2012). *Modern Physics*. USA, Oregon.
- [14] Taylor, A (2000). *Illumination Fundamentals*. USA,

- [15] Kraftmakher, Y. (2006) Experimento del efecto fotoeléctrico con control computacional y adquisición de información.( Photoelectric effect experiment with computer control and data acquisition) *American Journal of Physics* 74, 941;
- [16] Radio Corporation of America, (1960) *RCA Photosensitive devices and cathode-rays tubes*
- [17] O'Leary, A. (1946) Dos Experimentos fundamentales para demostrar el efecto fotoeléctrico y medir la constante de Planck (Two Elementary Experiments to Demonstrate the Photoelectric Law and Measure the Planck Constant), *American Journal of Physics* 14, 245.
- [18] Millahual, C. (2009) *Arduino - De Cero a Experto: Proyectos Prácticos - Electrónica.*
- [19] Kalpakjian, J. (2002) *Manufactura, ingeniería y tecnología.* México, México D.F.
- [20] <http://www.cedal.com.ec/uploads/product/14-cedal-tubos-cuadrados.pdf>
- [21] <http://immaka.com.ec/acrilico/>
- [22] Moncef, K. (2012) *Weatherization and Energy Efficiency Improvement for Existing Homes, USA*

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

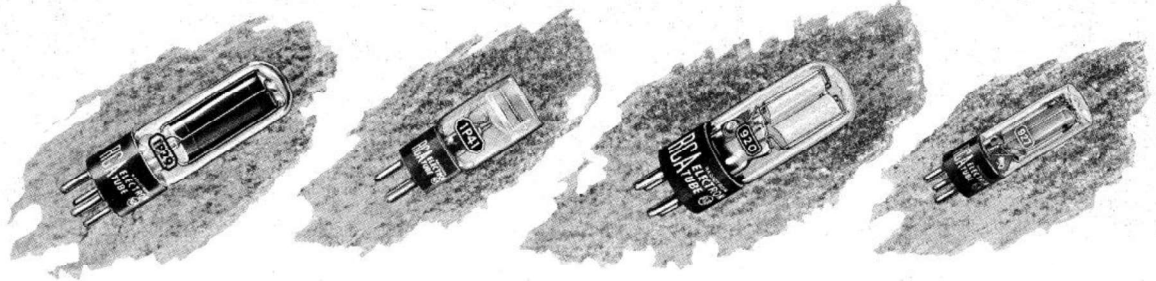
Medidas tomadas en cuenta para el diseño de la luminaria.





## **ANEXO 2**

### **Catálogo de Fototubos disponibles en el mercado de la compañía RCA**



## SINGLE- AND TWIN-UNIT TYPES—Gas Types

RCA Type	Description	Outline, Basing Diagram	Spectral Response*	Wave-length of Max. Spectral Response angstroms	Maximum Ratings*				Characteristics						
					Anode Supply Voltage dc or peak ac volts	Average Cathode Current Density <sup>†</sup> $\mu\text{A}/\text{sq. in.}$	Average Cathode Current <sup>‡</sup> $\mu\text{A}$	Ambient Temperature $^{\circ}\text{C}$	Anode Supply Voltage dc volts	Radiant $\mu\text{A}/\mu\text{Watt}$	Sensitivity			Max. Gas Amplification Factor	Max. Anode Dark Current at 25 $^{\circ}\text{C}$ $\mu\text{A}$
											Luminous <sup>§</sup> $\mu\text{A}/\text{lumen}$				
0 cps	5000 cps	10000 cps													
1P29	For colorimetric applications.	23	S-3	4200	100	25 <sup>†</sup>	5 <sup>†</sup>	100	90	0.011	40	35	31	9.0	0.1
1P37	For sound reproduction from a dye image sound track.	23	S-4	4000	100	25 <sup>†</sup>	5 <sup>†</sup>	75	90	0.13	135	124	108	5.5	0.05
1P40	Similar to 930 except has non-hygroscopic base.●●	11	S-1	8000	90	30 <sup>Δ</sup>	3 <sup>Δ</sup>	100	90	0.013	135	111	101	10.0	0.005
1P41	End type (head-on operation). For relay applications.	5	S-1	8000	90	20 <sup>Δ</sup>	1.5 <sup>Δ</sup>	100	90	0.0084	90	77	67	8.5	0.1
868	For sound reproduction.	23	S-1	8000	100	25 <sup>†</sup>	5 <sup>†</sup>	100	90	0.0084	90	77	67	8.0	0.1
918	For sound reproduction.	23	S-1	8000	90	25 <sup>Δ</sup>	5 <sup>Δ</sup>	100	90	0.014	150	120	105	10.5	0.1
920	Twin type. For push pull sound reproduction from a double sound track.✦	22	S-1	8000	90	15 <sup>Δ</sup>	2 <sup>Δ</sup>	100	90	0.0094	100	85	74	9.0	0.1
921	Cartridge type. For relay applications.	34	S-1	8000	90	30 <sup>Δ</sup>	3 <sup>Δ</sup>	100	90	0.013	135	119	108	10.0	0.01
923	For renewal use. In new equipment design, use 1P40 or 930.	21	S-1	8000	90	30 <sup>Δ</sup>	3 <sup>Δ</sup>	100	90	0.013	135	111	101	10.0	0.1
927	For 16-mm sound equipment.	6	S-1	8000	90	30 <sup>Δ</sup>	2 <sup>Δ</sup>	100	90	0.012	125	110	100	10.0	0.1
928	Non-directional type. For relay applications.	17	S-1	8000	90	30 <sup>Δ</sup>	3 <sup>Δ</sup>	100	90	0.0061	65	56	50	10.0	0.1
930	For sound reproduction and relay applications.	11	S-1	8000	90	30 <sup>Δ</sup>	3 <sup>Δ</sup>	100	90	0.013	135	111	101	10.0	0.1
5581	For sound reproduction involving a dye-image sound track in conjunction with an incandescent light source.✦	11	S-4	4000	100	30 <sup>†</sup>	3 <sup>†</sup>	75	90	0.13	135	124	108	5.5	0.05
5582		33	S-4	4000	100	20 <sup>†</sup>	2 <sup>†</sup>	75	90	0.12	120	110	96	5.5	0.05
5583		6	S-4	4000	100	20 <sup>†</sup>	2 <sup>†</sup>	75	90	0.13	135	124	108	5.5	0.05
5584		22	S-4	4000	100	10 <sup>†</sup>	2 <sup>†</sup>	75	90	0.12	120	110	96	5.5	0.05
6405/ 1640	For industrial applications critical as to microphonics and sensitivity gradient.	29	S-1	8000	90	25 <sup>Δ</sup>	5 <sup>Δ</sup>	100	50	0.0033	35	30	26	2.5	0.1
6953	Unobstructed cathode area. For sound reproduction.	15	S-1	8000	90	30 <sup>Δ</sup>	3 <sup>Δ</sup>	100	90	0.019	200	165	150	10.0	0.1

◆ For Dimensional Outlines and Basing Diagrams, see pages 10 to 15.

\* For Spectral Sensitivity Curves, see page 18.

† Absolute values.

● Averaged over any interval of 30 seconds maximum.

□ At wavelength of maximum spectral response for each type.

‡ On basis of tungsten-filament light source operated at 2870 $^{\circ}\text{K}$ , dc anode supply voltage as indicated, and a 1-megohm load resistor.

§ May be doubled when anode supply voltage is limited to 80 volts.

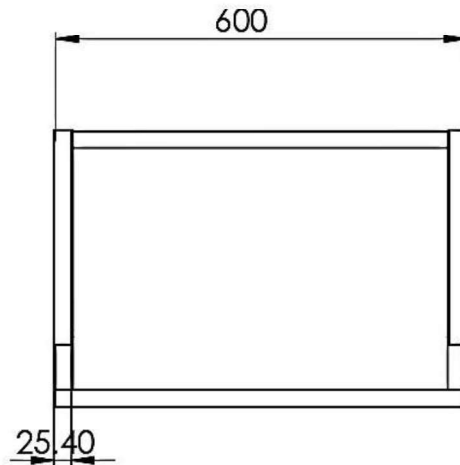
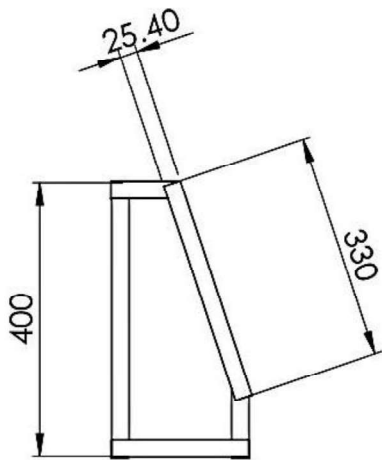
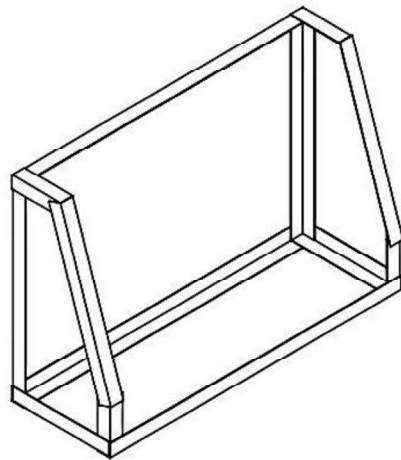
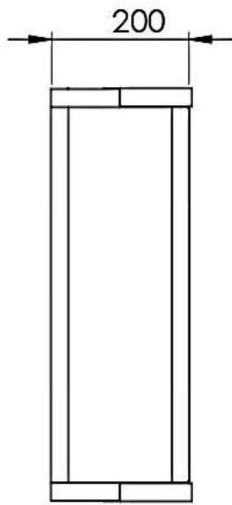
●● For applications critical as to leakage under high-humidity conditions.

Δ May be doubled when anode supply voltage is limited to 70 volts.

✦ Values shown for this type are for each unit.

### **ANEXO 3**

**Plano de la estructura del equipo.**



Trat. Térmico	NO	E.P.N	FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA	
Recubrimiento:	NO			
MATERIAL	ALUMINIO	Escala:	Dib. QUINAPALLO EDISON	
			Dis. QUINAPALLO EDISON	
			Rev	
ESTRUCTURA DE EQUIPO	Tol. Gral.	TESIS	Fecha:	10/10/2019

## ANEXO 4

### Código de Programación para la fuente de luz

```
int const rPotPin = A5;
int const gPotPin = A4;
int const bPotPin = A2;
int const rOutPin = 3;
int const gOutPin = 5;
int const bOutPin = 6;
int rVal;
int gVal;
int bVal;
void setup()
{
  pinMode(rOutPin, OUTPUT);
  pinMode(gOutPin, OUTPUT);
  pinMode(bOutPin, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
}
void loop()
{
  rVal = analogRead(rPotPin) / 4;
  gVal = analogRead(gPotPin) / 4;
  bVal = analogRead(bPotPin) / 4;
  analogWrite(rOutPin, rVal);
  analogWrite(gOutPin, gVal);
  analogWrite(bOutPin, bVal);
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(9, HIGH);
  digitalWrite(10, HIGH);
  digitalWrite(11, HIGH);
  digitalWrite(12, HIGH);
  digitalWrite(13, HIGH);
}
```

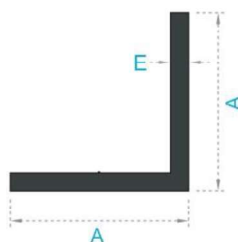
## ANEXO 5

### Catálogo de Perfilera de aluminio de la compañía CEDAL.



PERFILERIA  
DE ALUMINIO

ÁNGULOS  
LADOS IGUALES



REFERENCIA	Lado (A)		Espesor (E)	Peso
	Milímetros	Pulgadas	mm	Kg/m
1003	25.40	1	1.20	0.213
1182	25.40	1	1.10	0.138
1355	12.70	1/2	1.10	0.072
1444	31.75	1 1/4	3.18	0.520
1554	28.00	1 7/64	6.00	0.807
1715	25.40	1	3.00	0.389
1779	19.00	3/4	1.10	0.110

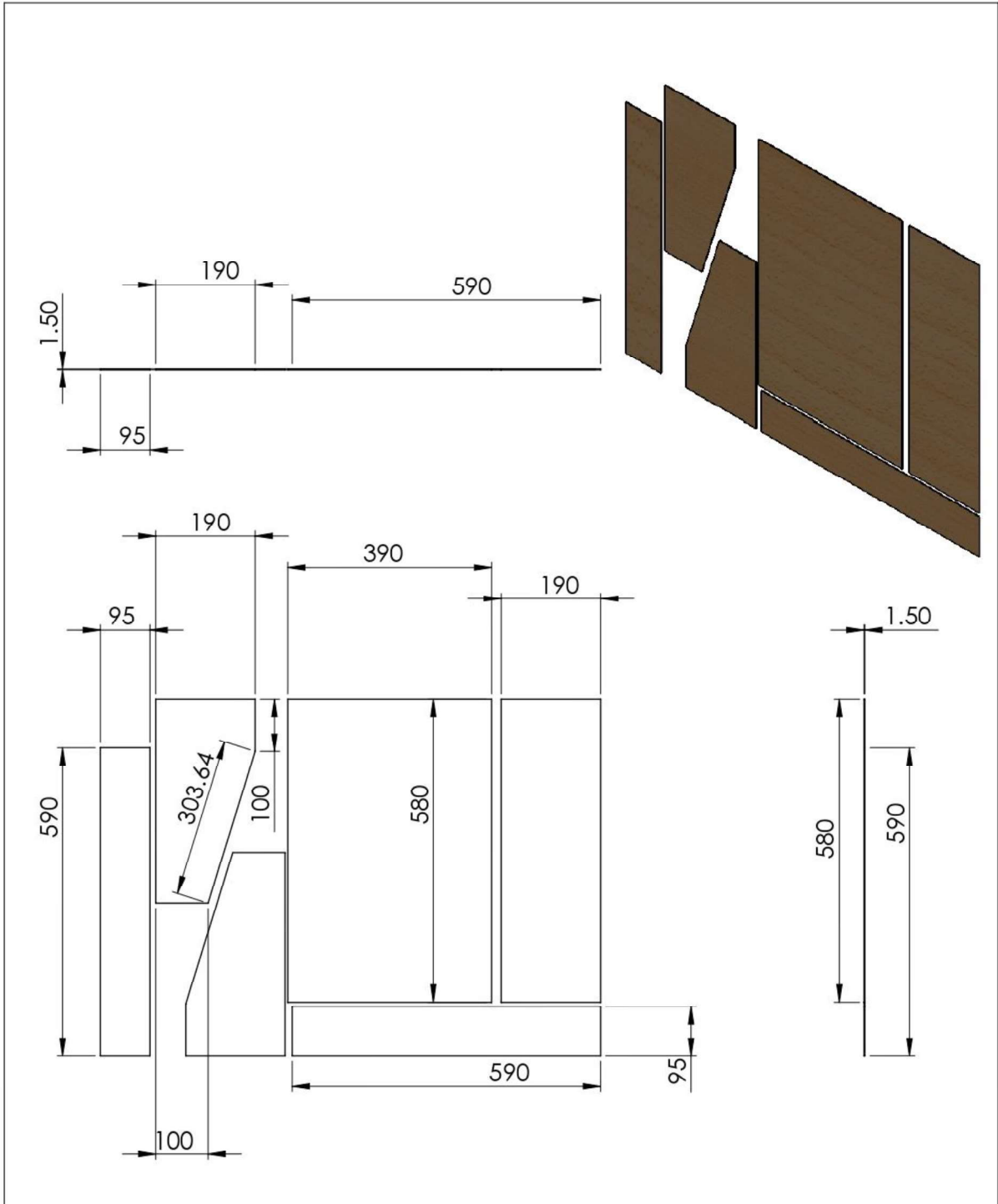


CORPORACION ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A.

ÁNGULOS IGUALES

## **ANEXO 6**

**Plano del armazón de la estructura del equipo.**



Trat. Térmico	NO	E.P.N	FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
Recubrimiento:	NO		
MATERIAL	MDF	Escala:	Dib. QUINAPALLO EDISON
		<b>1:10</b>	Dis. QUINAPALLO EDISON
			Rev
ARMAZÓN DE ESTRUCTURA	Tol. Gral.		Fecha: 10/10/2019



## ANEXO 7

### Fragmento de datasheet de cinta rgb led.



**SMD**

#### FYLS – 5050RGB

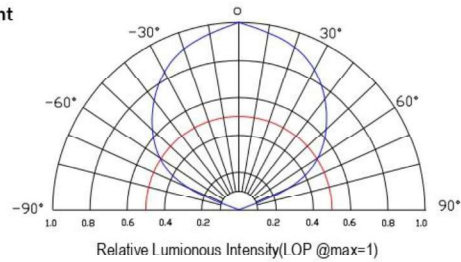
Radiation pattern.

##### Features:

- Compatible with automatic placement equipment
- Compatible with reflow solder process.

##### Applications:

- Automotive-Telecommunication
- Indicators
- LCD Back-lights
- Illuminations



##### Descriptions:

- Dice material: InGaN.
- Emitting Color: White
- Lens Color: Yellow Diffused.

#### Absolute maximum ratings(Ta=25 °c)

Parameter	MAX.	Unit
Power Dissipation	R	55
	G	75
	B	75
Peak Forward Current (1/10 Duty Cycle, 0.1ms Pulse)	100	mA
Continuous Forward Current	300	mA
Derating Linear From 25°C	0.4	mA/°C
Operating Temperature Range	-30°C to +80°C	
Storage Temperature Range	-40°C to +100°C	
Lead Soldering Temperature[4mm(.157") From Body]	260°C for 5 Seconds	

#### Electrical and optical characteristics(Ta=25 °c)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Condition
Luminous Intensity	IV	–	R: 600 G: 1300 B: 400	–	mcd	IF=20mA
Viewing Angle	2θ1/2	–	120	–	Deg	
Wavelength	λd	R:620		R:630	nm	
		G:520		G:525		
		B:465		B:470		
Forward Voltage	VF	3.0	R: 2.2 G: 3.2 B: 3.2	-	V	
Reverse Current	IR			5	μA	VR=5V

## ANEXO 8

### Fragmento de datasheet de leds singulares ultravioleta.

#### Absolute Maximum Ratings at Ta=25°C

Parameters	Symbol	Max.	Unit
Power Dissipation	PD	80	mW
Peak Forward Current (1/10 Duty Cycle, 0.1ms Pulse Width)	IFP	50	mA
Forward Current	IF	20	mA
Reverse Voltage	VR	5	V
Electrostatic Discharge (HBM)	ESD	400	V
Operating Temperature Range	Topr	-30°C to +80°C	
Storage Temperature Range	Tstg	-40°C to +100°C	
Lead Soldering Temperature [4mm (.157") From Body]	Tsld	260°C for 5 Seconds	

#### Electrical Optical Characteristics at Ta=25°C

Parameters	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Condition
Luminous Intensity *	IV	270	350	---	mcd	IF=15mA (Note 1)
Viewing Angle *	2θ <sub>1/2</sub>	---	15	---	Deg	IF=15mA (Note 2)
Peak Emission Wavelength	λ <sub>p</sub>	---	395	---	nm	IF=15mA
Dominant Wavelength	λ <sub>d</sub>	---	425	---	nm	IF=15mA (Note 3)
Spectral Line Half-Width	Δλ	---	15	---	nm	I <sub>F</sub> =15mA
Forward Voltage	VF	2.80	3.40	4.00	V	IF=15mA
Reverse Current	IR	---	---	10	μA	V <sub>R</sub> =5V

#### Notes:

1. Luminous Intensity Measurement allowance is ± 10%.
2. θ<sub>1/2</sub> is the off-axis angle at which the luminous intensity is half the axial luminous intensity.
3. The dominant wavelength (λ<sub>d</sub>) is derived from the CIE chromaticity diagram and represents the single wavelength which defines the color of the device.

## ANEXO 9

### Fragmento de datasheet de leds singulares infrarrojos

DATASHEET 5.0mm Infrared LED SIR333-A	<b>EVERLIGHT</b>
---	------------------

#### Electro-Optical Characteristics (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Condition
Radiant Intensity	$I_e$	7.8	20	---	mW/sr	$I_F=20mA$
		----	90	----		$I_F=100mA$ Pulse Width $\leq 100\mu s$ , Duty $\leq 1\%$
Peak Wavelength	$\lambda_p$	----	875	----	nm	$I_F=20mA$
Spectral Bandwidth	$\Delta\lambda$	----	80	----	nm	$I_F=20mA$
Forward Voltage	VF	----	1.3	1.65	V	$I_F=20mA$
		----	1.4	1.8		$I_F=100mA$ Pulse Width $\leq 100\mu s$ , Duty $\leq 1\%$
Reverse Current	$I_R$	----	----	10	$\mu A$	$V_R=5V$
View Angle	2 $\theta$ 1/2	----	20	----	deg	$I_F=20mA$

#### Rank

Condition:  $I_F=20mA$

Unit: mW/sr

Bin number	M	N	P	Q	R
Min	7.8	11	15	21	30
Max	12.5	17.6	24	34	48

Note:

\*Measurement Uncertainty of Forward Voltage:  $\pm 0.1V$

\*Measurement Uncertainty of Luminous Intensity:  $\pm 10\%$

\*Measurement Uncertainty of Dominant Wavelength  $\pm 1.0nm$

**ANEXO 10**  
**DATOS DE VOLTAJE DE FRENADO PARA CADA LONGITUD DE**  
**ONDA ESTABLECIDA**

Longitud de onda	Voltaje de Frenado																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Promedio (V)
425	1.01	0.99	1.05	1.01	1.01	1.04	1.02	1.03	1.01	0.98	1.03	1.02	1.03	1.01	0.99	1.01	1.02	0.98	1.03	1.02	1.01
470	0.77	0.75	0.74	0.75	0.77	0.76	0.74	0.77	0.75	0.74	0.75	0.74	0.74	0.77	0.76	0.74	0.77	0.77	0.74	0.75	0.75
525	0.63	0.61	0.64	0.62	0.61	0.64	0.62	0.64	0.63	0.62	0.62	0.61	0.61	0.62	0.63	0.63	0.64	0.62	0.64	0.64	0.63
630	0.52	0.54	0.55	0.52	0.54	0.52	0.55	0.54	0.52	0.52	0.55	0.54	0.55	0.55	0.52	0.54	0.54	0.55	0.52	0.52	0.54
875	0.21	0.22	0.22	0.21	0.2	0.21	0.21	0.2	0.22	0.21	0.2	0.2	0.2	0.22	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21