



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ECUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD ZACATENCO**

**DISEÑO DE UN MEDIDOR
DE
RADIACIÓN ULTRAVIOLETA
UTILIZANDO EL FOTODIODO EPD-440-0-1.4**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTAN

IRVIN CASTELAN CARRETO

JOSÉ JUAN CISNEROS ORTÍZ

ASESOR:

ING. JOSÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQUEZ

MEXICO D.F. Febrero de 2015



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

TEMA DE TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN
DEBERA (N) DESARROLLAR**

**INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
C. IRVIN CASTELAN CARRETO
C. JOSE JUAN CISNEROS.ORTIZ**

**“DISEÑO DE UN MEDIDOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA UTILIZANDO EL FOTODIODO
EPD-440-0-1.4”**

**DISEÑAR Y CONSTRUIR UN MEDIDOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA UTILIZANDO EL FOTODIODO
EPD-440-0-1.4**

- OBJETIVO GENERAL
- OBJETIVOS PARTICULARES
- JUSTIFICACIÓN
- RESUMEN
- ABSTRACT
- INTRODUCCIÓN
- ÍNDICE CAPITULADO
- ÍNDICE: TABLAS Y FIGURAS
- HISTORIA Y CONTEXTO DE LA RADIACIÓN UV
- DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS, MEDICIONES Y DETECTORES ÓPTICOS
- DESARROLLO DEL MEDIDOR DE RADIACIÓN UV
- VIABILIDAD ECONÓMICA
- CONCLUSIONES
- GLOSARIO
- ACRÓNIMOS
- BIBLIOGRAFÍA
- ANEXOS

MÉXICO D.F. A 01 DE SEPTIEMBRE DE 2015.

A S E S O R E S



ING. JOSÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQUEZ



ING. PATRICIA LORENA RAMIREZ RANGEL
JEFÉ DEL DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

INDICE

Objetivo General. -----	I
Objetivos particulares. -----	II
Justificación. -----	III
Resumen. -----	IV
Abstract. -----	V
Introducción. -----	VI
Índice capitulado. -----	VII
Índice: tablas y figuras. -----	VIII
Capítulo 1. Historia y contexto de la radiación UV.....	11
1.1 Antecedentes históricos.....	11
1.2 Clasificación de la radiación UV.....	12
1.3 Aplicaciones de la Radiación UV	13
1.4 Dispositivos radiométricos.....	14
1.5 Efectos de la radiación en el ser humano y el medio ambiente en general.....	17
Capítulo 2. Descripción de conceptos, mediciones y detectores ópticos.....	20
2.1.1 Teoría del efecto foto eléctrico.....	20
2.1.2 Efecto fotoeléctrico en semiconductores.....	24
2.2 Radiometría y fotometría.....	26
2.2.1 Conceptos Básicos.....	26
2.2.2 Unidades Radiométricas y fotométricas estándar.....	28
2.2.3 Factores de conversión.....	31
2.3 Descripción y tipos de Detectores Ópticos.....	32
2.3.1 Clasificación y principio de operación.....	32
2.3.2 Definiciones y conceptos.....	33
2.3.3 Fotodetectores.....	35
2.3.4 Definiciones y conceptos.....	36
2.4 Materiales y metodología para el desarrollo del medidor UV.....	37
2.4.1 Selección de sensor UV	37
2.4.2 Sensor fotodiodo EPD-440-0-1.4.....	38
2.4.3 Selección de amplificador operacional.....	40
2.4.4 Amplificador operacional OPA 380.....	40
2.4.5 Microcontrolador PIC 18F4550.....	41
2.4.6 Display LCD 16X2.....	42
2.4.7 Teclado matricial 4x4.....	42
2.5 La radiación Ultravioleta. Su efecto dañino y consecuencias para la salud humana.....	43
2.5.1 Agentes dañinos al DNA.....	43
2.5.2 Efectos sobre la piel.....	45
2.5.3 Enfermedades comunes s causa de los rayos UV.....	45

Capítulo 3. Desarrollo del medidor de radiación UV.....	46
3.1 Diagrama a bloques del prototipo	46
3.1.1 Análisis teórico para el desarrollo del prototipo	46
3.1.2 Simulación y diseño de las partes implementadas.....	57
3.1.3 Diseño y montaje del circuito impreso.....	65
3.1.4 Estructura y programación.....	66
3.1.5 Pruebas de funcionamiento del prototipo.....	71
3.2 Calibración.....	72
3.2.1 Normatividad.....	77
Capítulo 4. Viabilidad económica.....	78
4.1 Información de mercado.....	78
4.2 Mercado de consumo.....	80
4.3 Análisis de costos de producción (prototipo).....	83
Conclusiones.....	84
Glosario.....	85
Acronimos.....	86
Bibliografía.....	88
Anexos.....	89

Objetivo General:

Diseñar y construir un medidor de radiación Ultravioleta utilizando el fotodiodo EPD-440-0-1.4

Objetivos Particulares:

- ▶ **Usarlo como equipo de calibración.**
- ▶ **Buscar difusión como medio de prevención de la radiación solar.**
- ▶ **Implementarlo en aplicaciones para equipo de tratamiento médico.**

Justificación.

Se requiere de un aparato UV confiable y económico para medir la cantidad de radiación que incide en las personas, con el propósito de prevenir daños causados en ojos, piel y ADN. Útil como instrumento para la calibración de aparatos médicos.

Resumen.

Con el fin de obtener información acerca de la medición de radiación UV se realizó una consulta en páginas web y libros. Para poder tener un enfoque claro de lo necesario para que esta tesis se pueda desarrollar, una vez ubicado los libros y sitios web la información encontrada se estudió y se complementó con aportación del asesor técnico.

Capítulo 1: se encuentra información acerca las primeras mediciones de la radiación ultra violeta y cuál fue el principio que utilizaron para obtener una medición de esta, se mencionan también las aplicaciones y usos que se le da a la radiación y se mencionan los principales dispositivos existentes en la actualidad para efectuar la medición de esta.

Capítulo 2: mencionamos las bases que se utilizan para que un dispositivo pueda realizar la medición de la radiación ultravioleta, todas los elementos que se involucran en el manejo de la radiación, los parámetros de la radiación UV y las unidades, así como estándares que se contemplan en el Centro Nacional de Metrología para manejar los estándares en cuanto a parámetros de medición que se tienen estipulados para los medidores de este tipo.

Se explican los tipos detectores ópticos que existen y cuál es el principio en el que se basan, los conceptos que se toman en cuenta para la protección Radiológica y se mencionan los problemas causados por la emisión de radiación solar y los daños que causa la exposición prolongada.

Capítulo 3: Se realiza la propuesta del circuito que se utilizará para la tesis, se mencionan los cálculos y los materiales contemplados para la elaboración de la placa y los circuitos empleados.

Se presenta una simulación del circuito y el esquema del circuito en el programa Proteus.

Se muestran imágenes del circuito PCB y del gabinete que se propone para el medidor, se mencionan las aplicaciones que se le darán al prototipo así como los resultados finales de la calibración y que tan exacto es el medidor.

Capítulo 4: Se realiza la cotización final del gasto utilizado para el funcionamiento de este medidor de radiación Ultravioleta, se presenta un diseño del prototipo que se piensa poner en venta y cuáles son las posibilidades de que esto se lleve a cabo se mencionan las propuestas de mejora, así de la visión que se ha obtenido tras el desarrollo de este prototipo.

Abstract:

In order to obtain information about the measurement of UV radiation was performed in consultation web pages and books . To have a clear approach to ensure that this thesis can be developed once the books and websites the information found was studied and supplemented with input from technical advisor located .

Chapter 1: Information about the first measurements of the ultra violet radiation is and what was the principle used to obtain a measure of this , the applications are also mentioned and intended use is given to radiation and the main existing devices mentioned at present to perform this measurement .

Chapter 2: mentioned the bases that are used to make a device to measure ultraviolet radiation, all the elements involved in the management of radiation, UV radiation parameters and units, as well as standards that contemplated in the National Metrology Centre to manage standards for medicon parameters that have stipulated for these gauges .

Optical detectors types exist and what is the principle behind its operation is based are explained , is that the concepts are taken into account are Radiological Protection and discussing the problems currently found is causing the issue solar radiation by the sun and the damage it causes prolonged exposure .

Chapter 3: The proposed circuit to be used for the thesis is done , calculations and materials contemplated for the development of plaque and circuits used are mentioned.

A simulation of the circuit and the circuit diagram is presented in the program Proteus.

Images on PCB circuit and cabinet proposed for the meter displays , applications will be given to the prototype and the final results of the calibration and accurate is the meter mentioned.

Chapter 4: the final quote of expenditure used for the operation of this meter Ultraviolet radiation is performed , a design prototype there are up for sale and what are the chances of this takes place are presented proposals mentioned improvement and the vision that was obtained after the development of this prototype.

Introducción:

La radiación que emite el sol comprende una amplia gama de longitudes de onda que van desde los rayos gamma hasta las ondas de ultra alta frecuencia.

La región UV del espectro de radiación electromagnética se puede subdividir en:

UV-A.- (320 a los 400 nm). Es la más cercana al espectro visible y no es absorbida por el ozono.

UV-B.- (280 a los 320 nm). Es absorbida casi totalmente por el ozono, aunque algunos rayos de este tipo llegan a la superficie de la Tierra. Es un tipo de radiación dañina, especialmente para el ADN. Provoca melanoma y otros tipos de cáncer de piel. También puede estar relacionada, aunque esto no es tan seguro, con daños en algunos materiales, cosechas y formas de vida marina.

UV-C.- (menores de 280 nm). Este tipo de radiación es extremadamente peligroso, pero es absorbido completamente por el ozono y el oxígeno.

Puesto que la radiación ionizante en general no es perceptible por los sentidos, es necesario valerse de instrumentos apropiados para detectar su presencia. Asimismo, interesan su intensidad, su energía, o cualquier otra propiedad que ayude a evaluar sus efectos. Cada clase de detector es sensible a cierto tipo de radiación y a cierto intervalo de energía. Así pues, es de primordial importancia seleccionar el detector adecuado a la radiación que se desea medir.

El diseño de los detectores está basado en el conocimiento de la radiación UV.

Las radiaciones depositan energía en los materiales, principalmente a través de la ionización y excitación de sus átomos, además, puede haber emisión de luz, cambio de temperatura, o efectos químicos, todo lo cual puede ser un indicador de la presencia de radiación.

El proyecto presentado utiliza el fotodiodo EPD-440-0-1.4 el cual aporta ventajas económicas, rango de operación y facilita su manipulación para el medidor.

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	PÁGINA
Figura
Figura (1). Johann Wilhelm Ritter.....	11
Figura (2). Espectro de radiación solar UV.....	12
Figura (3). Cámara de ionización.....	15
Figura (4). Electrómetro moderno (PTW).....	15
Figura (5). Detección directa de la radiación.....	15
Figura (6). Detección indirecta de la radiación.....	15
Figura (7). Tubo fotomultiplicador de emisión de electrones.....	16
Figura (8). Elemento multiplicador de microcanal.....	17
Figura (9). Experimento del efecto fotoeléctrico.....	20
Figura (10). Corriente vs. Voltaje en el aparato.....	20
Figura (11). Diagrama de bandas de un semiconductor.....	24
Figura (12). (a) Absorción. (b) Emisión espontánea. (c) Emisión estimulada.....	24
Figura (13). Radiancia espectral.....	27
Figura (14). Irradiancia por unidad de área incidente en un punto de una superficie.....	28
Figura (15). Representación de la Radiancia.....	29
Figura (16). foto-tubos, basados en tubos de vacío.....	31
Figura (17). Relación corriente-voltaje del fotodiodo.....	34
Figura (18). Estructura común de un fotodiodo p-i-n.....	34
Figura (19). Estructura común de un fotodiodo Schottky.....	35
Figura (20). Fotodetector EPD-440-0-1.4.....	37
Figura (21). Elemento final de sensor con cubierta de protección.....	38
Figura (22). Dispositivo operacional OPA380.....	40
Figura (23). Representación de un display 16x2.....	41
Figura (24). Representación del teclado matricial 4x4 implementado en medidor de UV.....	42
Figura (25). Carcinoma Espinocelular.....	45
Figura (26). Carcinoma basocelular.....	45
Figura (27). Diagrama a bloques de las partes principales del medidor de radiación.....	46
Figura (28). Grafica de la Responsividad dada en A/W, del sensor fotodiodo.....	47
Figura (29). a) Modo fotovoltaico b) Modo fotoconductivo.....	47
Figura (30). Punto de operación del fotodiodo intersección entre la línea de carga y la curva.....	49
Figura (31). Circuito amplificador FET de alta impedancia con fotodiodo.....	50
Figura (32). Circuito amplificador implementando un transistor BJT.....	51
Figura (33). Representación simbólica del amplificador de transimpedancia.....	54
Figura (34). Representación de Realimentación para un amplificador de transimpedancia.....	55
Figura (35). Representación de un amplificador de transimpedancia realimentado.....	55
Figura (36). Configuración típica del amplificador de transimpedancia.....	59
Figura (37). Diagrama esquemático de las partes principales del medidor de radiación.....	63
Figura (38). Representación esquemática del circuito implementado como amplificador de transimpedancia.....	64

Figura (39). Representación esquemática del circuito implementado como amplificador de transimpedancia y sistema con microcontrolador PIC18F4550 y despliegue de datos.....	64
Figura (40). Representación en PCB del circuito implementado como amplificador de transimpedancia y fuente de alimentación.....	65
Figura (41). Representación en PCB del circuito implementado como Microcontrolador con los buses de acceso a los puertos del microcontrolador.....	65
Figura (42). Gabinete soporte circuitos.....	71
Figura (43). Gabinete sorte display.....	71
Figura (44). Ensamble final del instrumento.....	72
Figura (45). Grafica de la respuesta del medidor de radiación (linealidad).....	75
Figura (46). Grafica de la respuesta del medidor de radiación (Medición saturada).....	76
Figura (47,48).Equipo módulo de led con acoplamiento para fibra y de más equipo.....	76
Figura (49). Interfaz gráfica para manipular el módulo de acoplamiento leds con fibra óptica	77
Figura (50). Sensor PLC UV/VIS.....	78
Figura (51). Sensor PLC UV/VIS.....	79
Figura (52). Características del sensor. SU-100.....	79
Figura (53). Medidor de Radiación PCE-UV34.....	80
Figura (54). Radiómetro TMP-UV-340B.....	81
Figura (55). Radiómetro UV Magnaflux.....	81
Figura (56). Medidor de Radiación Ultravioleta MED-UV-01.....	82
Figura (57). Radiómetro Eppley.....	83
Tabla	
Tabla (1.1) Tipos de radiación UV.....	13
Tabla (1.2) Características de los fotodetectores.....	16
Tabla (1.3). Índice a través de la exposición a la radiación UV en un tiempo determinado.....	18
Tabla (1.4) Índice de radiación UV (identificación por color).....	18
Tabla (1.5). Magnitudes radiométricas estándar.....	27
Tabla (1.6). Magnitudes fotométricas estándar.....	30
Tabla (1.7). Radiometría y fotometría.....	30
Tabla (1.8). Factores de conversión entre unidades Radiométricas y Fotométricas.....	31
Tabla (1.9). Factores de que influyen en la selección del sensor fotodiodo.....	38
Tabla (2.0). Tabla de datos de la respuesta del fotodiodo en función de la longitud de onda.....	58
Tabla (2.1) Datos técnicos de calibración a través de una Termopila en un módulo de acople con led y fibra óptica.....	73
Tabla (2.2) Muestras de las primeras mediciones tomadas con el medidor.....	74
Tabla (2.3) Muestras de las mediciones tomadas con el medidor ya calibrado.....	75
Tabla (2.4). Tabla de datos de los costos que se produjeron por el material requerido para el prototipo.....	83

Capítulo 1. Historia y contexto de la radiación UV.

En este capítulo se hace referencia a las características más importantes de la radiación UV, en las cuales se basan las ideas más generales que engloban sus antecedentes históricos, ¿Quién la descubrió?, ¿Por qué?, etc. Usos y aplicaciones en la industria, medicina, alimentos, etc. Medición del índice UV, Instrumentos de medición en general y efectos en el ser humano [Referencia 1].

1.1 Antecedentes históricos.

Se denomina radiación ultravioleta o UV a la radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400nm (y los 250nm (, su nombre se debe a que su rango empieza desde longitudes de onda más cortas a lo que los humanos identificamos como el color violeta.

El descubrimiento de la radiación ultravioleta está asociado a la experimentación del descubrimiento de las sales de plata al ser expuestas a la luz solar.

En 1801 el físico alemán Johann Wilhelm Ritter descubrió que los rayos invisibles situados justo detrás del extremo violeta del espectro visible eran especialmente efectivos oscureciendo el papel impregnado con cloruro de plata.

Denomino a estos rayos “rayos desoxidantes” para enfatizar su reactividad química y para distinguirlos de los rayos calóricos que se encontraban al otro lado del espectro visible.



Figura (1). Johann Wilhelm Ritter.

A finales del siglo XIX se tenía la evidencia de que la luz del sol poseía efectos bactericidas.

Los trabajos de Ward demostraron que el máximo de la acción bactericida se encuentra en la franja ultravioleta del espectro solar. Hasta entonces sólo podía emplearse la fuente natural de UV que proporciona el sol.

El físico Finsen, utilizando un aparato dispositivo de producción artificial de UV, basado en arco de carbón, trató numerosas afecciones de tuberculosis cutánea, lo que le valió la concesión del premio Nobel de Medicina en 1903.

En 1992, tres científicos de la oficina de Medio Ambiente de Canadá desarrollaron el índice UV, convirtiendo a Canadá en el primer país del mundo que transmitió las previsiones para el día siguiente de los niveles de UV. En un principio, los métodos de cálculo y presentación de informes del índice UV cambiaban de país a país.

Hoy en día, un índice UV en todo el mundo, se encuentra estandarizado por la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés, World Health Organization), este nuevo índice UV ha sustituido a los métodos regionales que eran incompatibles entre sí.

El índice UV internacional no sólo especifica un método de cálculo uniforme, sino también los colores estándar y gráficos para medios impresos.

1.2 Clasificación de la radiación UV.

La radiación que recibe la tierra proviene del Sol, esta radiación comprende una gama continua y muy extensa de longitudes de onda que van desde los rayos gamma a las ondas de radio, pasando por los rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas. [Referencia 2]

La radiación ultravioleta (UV) cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400 nm y los 100 nm tiene una longitud de onda más corta que la luz visible. (Figura 2).

La radiación de longitud de onda entre 100 y 300 nm se conoce como ultravioleta lejano o de vacío. Comúnmente proviene del Sol o de lámparas de descarga gaseosa. El oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera absorben la radiación ultravioleta lejana proveniente del Sol, transformando su energía en reacciones fotoquímicas e impidiendo, en consecuencia, que llegue a la superficie terrestre, donde imposibilitaría la existencia de la vida.



Figura (2).Espectro de radiación solar UV.

Los rayos solares, conocidos también como rayos ultravioletas (UV) son invisibles al ojo humano y se clasifican de acuerdo a su longitud de onda, que es medida en nanómetros (nm).

Cabe destacar que entre más corta es longitud de la onda, más intensa es la energía de los rayos solares.

Este espectro se puede subdividir en tres zonas (Tabla 1.1).

Según su longitud de onda se distinguen varios subtipos de rayos ultravioleta.

Nombre	Abreviación	Longitud de onda (nm)	Energía por fotón (eV)
Onda larga	UVA	400 – 320	3,10 – 3,87
Onda media	UVB	320 – 290	3,87 – 4,43
Onda corta	UVC	290 – 200	4,43 – 6,20

Tabla (1.1) Tipos de radiación UV.

La radiación tipo UV-A; que comprenden la radiación solar menos nociva. La longitud de esta onda se encuentra entre los 320 y 400 nm y la mayoría de estos rayos llega a la superficie terrestre.

La radiación tipo UV-B, o los rayos de onda media; la longitud de esta onda se encuentra entre 290 y 320 nm., ésta energía en gran parte es absorbida por la capa de ozono, pero sin embargo un porcentaje llega a la superficie terrestre.

Y la radiación tipo UV-C; cuya longitud de onda oscila entre los 200 y 290 nm. Estos rayos son absorbidos por la capa de ozono antes de llegar a la tierra y son potencialmente peligrosos para los seres humanos.

Dicho de una manera específica, cuando la luz solar atraviesa la atmósfera, el ozono, el vapor de agua, el oxígeno y el dióxido de carbono absorben toda la radiación UVC y aproximadamente el 70% de la radiación UVB. [Referencia 2]

La atmósfera absorbe la radiación UVA en menor medida, entonces, se puede decir que la radiación UV que alcanza la superficie terrestre se compone en su mayor parte de rayos UVA, con una pequeña porción de rayos UVB.

1.3 Aplicaciones de la Radiación UV.

Unas de las aplicaciones de los rayos ultravioleta es para la esterilización, el control de plagas, en el área de la investigación de la Química analítica. [Referencia 2]

Otras de las aplicaciones que influyen de manera continua en nuestro entorno son las siguientes.

- Desinfección de agua: con esta tecnología se puede tratar el agua de un pequeño acuario, producir agua potable para consumo humano o dar el tratamiento final a una instalación de depuración de aguas residuales.

Los sistemas de tratamiento y desinfección de Agua mediante luz Ultra Violeta (UV), garantizan la eliminación de entre el 99.9% y el 99.99 de agentes patógenos.

Para lograr este grado de efectividad casi absoluta mediante este procedimiento físico, es totalmente imprescindible que los procesos previos del agua eliminen de forma casi total cualquier turbiedad de la misma, ya que la Luz Ultravioleta debe poder atravesar perfectamente el flujo de agua a tratar.

- Desinfección de aire: la luz ultravioleta permite eliminar cualquier organismo patógeno de una corriente de aire.
- Desinfección de superficies: aplicada sobre la superficie de un objeto se eliminan los microorganismos que hayan en ella.
- Curado/secado de lacas, barnices y adhesivos: Este uso está bastante extendido en la industria del mueble por la alta velocidad de curado que se obtiene. En estos casos el barniz o el adhesivo que se emplean son especiales para esta aplicación.
- Fotoquímica: la obtención de algunos productos químicos, los reactivos se exponen a la acción de la radiación ultravioleta.
- Fotoluminiscencia: se provoca la luminiscencia de algún producto para distinguirlo de su entorno, estas aplicaciones van desde tubos de luz negra, hasta los conocidos detectores de billetes falsos.

1.4 Dispositivos radiométricos.

Llamaremos detector “activo” a aquel que necesita un sistema electrónico de lectura en funcionamiento, mientras es irradiado para obtener la señal. [Referencia 3]

Consideremos detector “pasivo” a aquel que puede ser utilizado sin necesidad de registro electrónico durante el proceso de irradiación.

Podemos hacer una clasificación los detectores dependiendo de si la señal que ofrecen es el resultado de integrar los defectos de múltiples interacciones individuales (“integradores”) o bien en detectores que funcionan en base a las interacciones de una sola partícula individual (“contadores”).

Las siguientes figuras muestran un ejemplo de equipos radiométricos en este caso la figura (3), muestra una cámara de ionización con paredes de plástico conductor, mientras que la figura (4), representa un tipo de electrómetro moderno.

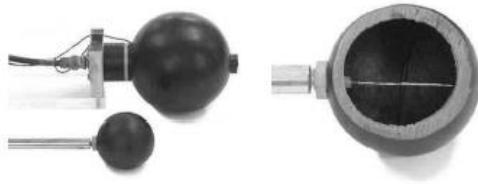


Figura (3). Cámara de ionización.



Figura (4). Electrómetro moderno (PTW).

Integradores, (activos): cámara ionización de aire, cámara ionización de líquido, cámara de diamante, diodo, matriz activa radiográfica digital, calorímetro.

Integradores, (pasivos): placa radiográfica, placa radiocrómica, dosímetro TLD, transistores FET, fosforo foto estimulante, dosímetro Fricke.

Podemos hacer una nueva clasificación de los detectores dependiendo de si la señal se detecta en modo “directo” (figura 5) a través de la ionización en el medio material, o bien se detecta “indirectamente” (figura 6) primero se produce luz que ha de ser posteriormente convertida en señal eléctrica.

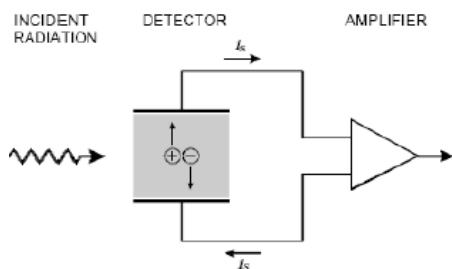


Figura (5). Detección directa de la radiación.

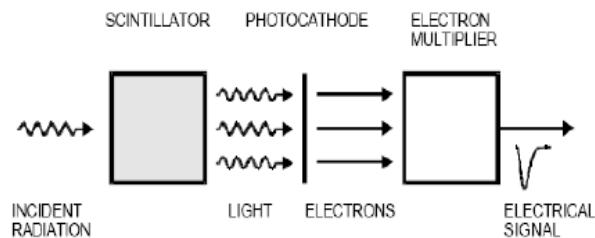


Figura (6). Detección indirecta de la radiación.

En los detectores directos se excitan estados excitados ópticos (se produce ionización), se emite luz.

En el caso de la detección indirecta necesitamos un elemento convertidor de la señal eléctrica.

Los actuales fotosensores representan una amplia gama de dispositivos:

A continuación se muestra una tabla representativa de las características de los dispositivos fotodetectores más comúnmente usados.

Tipo	λ (long. de onda) (nm)	Ganancia	Reinicio de tiempo (ns)	Area (mm ²)	HV (V)	Precio (USD)
PMT	115 – 1100	$10^3 – 10^7$	0.7 – 10	$10^2 – 10^5$	500 – 3000	100 – 5000
MCP	100 – 650	$10^3 – 10^7$	0.15 – 0.3	$10^2 – 10^4$	500 – 3500	10 – 6000
HPD	115 – 850	$10^3 – 10^4$	7	$10^2 – 10^5$	2×10^4	~600
GPM	115 – 500	$10^3 – 10^6$	$0(0.1)$	$0(10)$	300 – 2000	$0(10)$
APD	300 – 1700	$10^1 – 10^8$	$0(1)$	$10 – 10^3$	400 – 1400	$0(100)$
SiPM	400 – 550	$10^5 – 10^6$	~1	$0(10^6)$	30 – 60	$0(10)$
VLPC	500 – 600	5×10^4	~10	$0(10^4)$	~7	~7

Tabla (1.2) Características de los fotódetectores.

PMT: Fotomultiplicador.

GPM: Fotomultiplicador de Gas.

MCP: Micro canal de placas.

APD: Fotodiodo de avalancha.

HPD: Fotodetector híbrido.

SiPM: Fotomultiplicador de silicón.

VLPC: Contador de fotón y de luz visible. HV: Voltajes de funcionamiento.

Otro elemento de detección es el tubo fotomultiplicador es el más antiguo de los fotosensores utilizados.

Se basan en la emisión de electrones por un photocátodo (normalmente con un metal alcalino) y su posterior multiplicación por colisiones y aceleraciones sucesivas (dinodos).

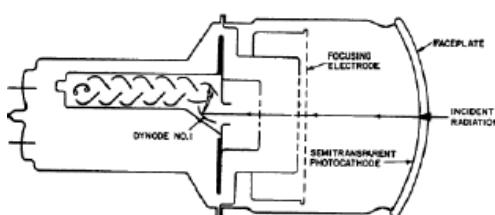


Figura (7).Tubo fotomultiplicador de emisión de electrones.

El material del photocátodo determina la sensibilidad primaria del sensor en términos de la eficiencia de extracción del fotoelectrón. El electrón tiene que ser capaz de escapar del material del photocátodo.

La eficiencia cuántica estándar de un fotomultiplicador es del 20 al 30%.

Así mismo otro de los aditamentos que podemos mencionar son los conformados por placas de microcanal (microchannel plates) son otra técnica estándar en la multiplicación de los electrones en sensores ópticos. Son usadas en fluoroscopía o en aplicaciones que necesitan alta sensibilidad y alta resolución espacial.

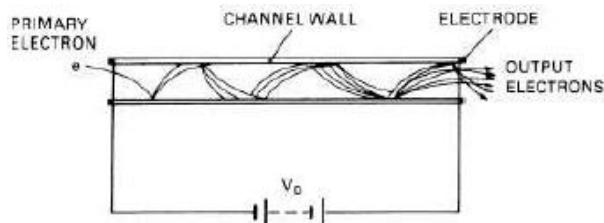


Figura (8). Elemento multiplicador de microcanal.

Están normalmente formados por un emisor secundario de electrones aplicado en las paredes capilares de cristal.

Entre las caras de la placa microcanal se establece un potencial que acelera los electrones en los capilares. Los canales pueden tener diámetros de 10 micras mientras que las placas multicanal pueden tener espesores de cientos de micras y diámetros en cm.

1.5 Efectos de la radiación en el ser humano y el medio ambiente en general.

La mayor parte de la radiación ultravioleta que llega a la Tierra lo hace en las formas UV-C, UV-B y UV-A; principalmente en esta última, a causa de la absorción por parte de la atmósfera terrestre. [Referencia 4]

Estos rangos están relacionados con el daño que producen en el ser humano.

La radiación UV-C (la más perjudicial para la vida) no llega a la tierra al ser absorbida por el oxígeno y el ozono de la atmósfera; la radiación UV-B es parcialmente absorbida por el ozono y solo llega a la superficie de la tierra en un porcentaje mínimo, pese a lo que puede producir daños en la piel.

Entre los daños que los rayos ultravioleta pueden provocar se incluyen el cáncer de piel, el envejecimiento de ésta, irritación, arrugas, manchas o pérdidas de elasticidad, así como afecciones a nivel ocular.

En la actualidad se han presentado casos de esta índole en las personas de la sociedad común, lo cual tuvo lugar al desencadenamiento de los estudios de la radiación ultravioleta la cual causa daño en general a personas con una exposición prolongada a los rayos ultravioleta provenientes del sol que cuentan con un alto índice UV.

El índice ultravioleta a groso modo es un indicador de la intensidad de radiación ultravioleta (UV) proveniente del Sol en la superficie terrestre. El índice UV también señala la capacidad de la radiación UV solar de producir lesiones en la piel.

Nivel de radiación ultravioleta	IUV	Según el tipo de piel, el tiempo máximo de exposición en minutos sin protección es:					
		Muy clara	Clara	Morena clara	Morena oscura	Oscura	Muy oscura
Baja	0	Indefinido	Indefinido	Indefinido	Indefinido	Indefinido	Indefinido
	1	112	140	175	219	274	342
	2	56	70	88	109	137	171
Moderada	3	37	47	58	73	91	144
	4	28	35	44	55	68	86
	5	22	28	35	44	55	68
Alta	6	19	23	29	37	47	57
	7	16	20	25	31	39	49
	8	14	18	22	27	34	42
Muy Alta	9	12	16	19	24	30	38
	10	11	14	18	22	27	34
	11	10	13	16	20	25	31
Extremadamente Alta	12	9	12	15	18	23	29
	13	9	11	14	17	21	26
	14	8	10	13	16	20	24
	15	8	9	12	15	18	23

Tabla (1.3). Índice a través de la exposición a la radiación UV en un tiempo determinado.

Ya que el índice y su representación se modificaban dependiendo del lugar, la Organización Mundial de la Salud junto con la Organización Meteorológica Mundial, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Comisión Internacional contra la radiación no Ionizante publican un sistema estándar de medición del índice UV y una forma presentarlo al público incluyendo un código de colores asociado [Referencia 6].

Color	Riesgo	Índice UV
Verde	Bajo	< 2
Amarillo	Moderado	3-5
Naranja	Alto	6-7
Rojo	Muy alto	8-10
Violeta	Extremadamente alto.	>11

Tabla (1.4) Índice de radiación UV (identificación por color).

Se considera desde siempre que la radiación ultravioleta ha jugado un papel fundamental desde el origen de la vida en nuestro planeta.

Sus efectos varían dependiendo de la sensibilidad de cada especie.

La radiación ultravioleta puede inhibir la fotosíntesis en muchas algas (induciendo simultáneamente una disminución de la cantidad de pigmentos fotosintéticos en las células), teniendo gran incidencia en la velocidad de crecimiento de los organismos, provoca alteraciones en las moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN), daña las

membranas celulares y, afecta la capacidad de locomoción u orientación en los organismos planctónicos que poseen un flagelo transversal y otro longitudinal.

En general, los rayos ultravioletas B que ingresan a la atmósfera por el adelgazamiento de la capa de ozono, son capaces de entorpecer la fotosíntesis y el desarrollo de las algas microscópicas del mar (fitoplancton), dado que la mayoría de los organismos en ecosistemas acuáticos, como estos, viven en la zona eufórica iluminada cerca de la superficie del agua en donde están expuestos a la radiación ultravioleta B. [Referencia 6]

Estas algas son las que producen la mayor parte de oxígeno que respiramos y constituye el primer eslabón de la cadena alimenticia que, pasando por los peces, termina en el hombre y además contribuyen a remover el CO₂ de la atmósfera lo que evita el calentamiento global del planeta.

Otra de las consecuencias más importantes de este tipo de radiación es que provoca la disminución de los rendimientos en las cosechas de alimentos tales como del maíz, soya, arroz y trigo, etc.

Capítulo 2. Descripción de conceptos, mediciones y detectores ópticos.

En este capítulo se hace referencia al análisis de la radiación ultravioleta de una manera muy detallada, implementando formulas basadas en teoría y experimentación, se incluyen los conceptos básicos para las mediciones y los estándares, algunas aplicaciones, factores que involucran la conversión entre unidades radiométricas, se aborda en específico el tema de los detectores ópticos y su funcionamiento, cálculos característicos y conceptos importantes; y también se mencionan los efectos de la radiación en la salud humana.

2.1.1 Teoría del efecto fotoeléctrico.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por Heinrich Hertz en 1887, cuando observó que una descarga eléctrica entre dos electrodos se produce más fácilmente si sobre uno de ellos incide luz ultravioleta. [Referencia 7]

Poco después, los trabajos de Wilhelm Hallwachs (1888), J.J. Thomson (1899) y Philipp L.A. Lenard (1900) demostraron que la luz ultravioleta facilita la descarga porque provoca la emisión de electrones desde la superficie del cátodo y determinaron las características de dicha emisión.

La figura (10) muestra la corriente fotoeléctrica como función de la diferencia de potencial entre cátodo y ánodo.

Se observa que para V (potencial) suficiente mente grande, i (corriente) alcanza un valor límite, o de saturación, para el cual todos los electrones emitidos por el cátodo son colectados por el ánodo.

La corriente de saturación es proporcional a la intensidad del haz de luz que incide sobre el cátodo.

Si V se hace negativo, la corriente no cae de inmediato a cero, lo que sugiere que los electrones son emitidos con cierta energía cinética, de modo que algunos alcanzan el otro electrodo a pesar que el campo eléctrico se opone a su movimiento. Sin embargo para cierto valor negativo V_0 , llamado potencial de frenado, la corriente fotoeléctrica se anula.

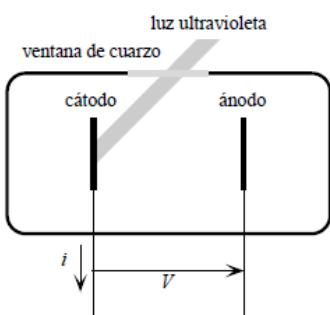


Figura (9).Experimento del efecto fotoeléctrico.

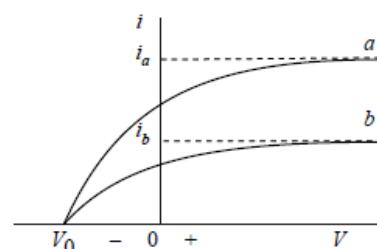


Figura (10).Corriente vs. Voltaje en el aparato.

La energía cinética máxima de los fotoelectrones se describe entonces por la siguiente ecuación:

$$K_{max} = eV_0 \quad (1.1.1)$$

La cual es independiente de la intensidad de la luz.

El comportamiento del potencial de frenado V_0 como función de la frecuencia v de la luz fue estudiado a detalle con lo cual se obtuvo un gráfico lineal donde se observa una frecuencia de corte V_0 bien definida, que depende del material del cátodo, por debajo de la cual no hay efecto fotoeléctrico.

Hay tres aspectos fundamentales del efecto fotoeléctrico que no se pueden explicar en términos de la teoría ondulatoria clásica de la luz:

- Según la teoría ondulatoria, la intensidad del haz luminoso es proporcional al cuadrado de la amplitud E del campo eléctrico oscilante de la onda. Como la fuerza sobre el electrón es eE , la energía cinética de los fotoelectrones debería aumentar con la intensidad del haz, pero el experimento muestra que K_{max} es independiente de la intensidad del haz; esto fue probado sobre un rango de intensidades de 10^7 .
- Según la teoría ondulatoria el efecto fotoeléctrico debería ocurrir para cualquier frecuencia, con tal que el haz tenga suficiente intensidad como para suministrar la energía necesaria para emitir los fotoelectrones. Pero el experimento muestra que para cada superficie hay una frecuencia de corte V_0 , por debajo de la cual no hay efecto fotoeléctrico, sin que importe cuán intenso sea el haz de luz.
- Si la intensidad de la luz es baja, cabría esperar que exista un tiempo de retraso fácilmente medible, entre el instante en que la luz comienza a incidir sobre el cátodo y el momento en que es emitido el fotoelectrón, pues durante ese intervalo el electrón irá absorbiendo la energía del haz hasta acumular la que necesita para escapar. Sin embargo nunca se observó tal retraso. Por otra parte, en la teoría clásica, la energía luminosa está uniformemente distribuida sobre el frente de onda.

En base a estos postulados, es necesario abordar una manera un poco diferente de analizar el efecto fotoeléctrico, que mejor a través de la teoría cuántica de Albert Einstein. [Referencia 7]

El argumento de Einstein se apoyaba en que los experimentos de interferencia y difracción de la luz, sobre los cuales se basa la teoría ondulatoria, se efectúan en situaciones en que el número de fotones es muy grande.

Einstein no se preocupó de la propagación de la radiación, sino de cómo es emitida y absorbida.

Pensó que si la energía contenida en las ondas electromagnéticas de frecuencia ν (*frecuencia de la onda*) sólo puede ser un múltiplo entero de $h\nu$ donde ($h = 6.62606896 \times 10^{-34} \frac{J}{s}$, *constante de planck*), entonces en el proceso de emisión se producen *cuantos* de energía electromagnética, cada uno de los cuales lleva una energía $h\nu$.

Einstein supuso que esos cuantos están localizados inicialmente en una pequeña región del espacio, y que se mantienen localizados mientras se alejan de la fuente con la velocidad c . Supuso además que la energía de cada paquete o fotón (E) está relacionada con su frecuencia de acuerdo con la ecuación:

$$E = h\nu \quad (1.1.2)$$

En el efecto fotoeléctrico cada fotón es completamente absorbido por un electrón. Cuando un electrón es emitido por el photocátodo, su energía cinética es entonces:

$$K = h\nu - w \quad (1.1.3)$$

En donde $h\nu$ es la energía del fotón absorbido y w es el trabajo necesario para extraer el electrón del metal.

Este trabajo toma en cuenta el efecto de los campos eléctricos atractivos debidos a los átomos de la superficie y las pérdidas de energía cinética del electrón, causadas por las colisiones que sufre hasta que sale de la superficie.

Algunos electrones están ligados más fuertemente que otros, o soportan más colisiones en el trayecto. Por lo tanto es lógico suponer que hay una energía cinética máxima con la cual un fotoelectrón puede ser emitido, que se tiene cuando la energía de unión del electrón es la mínima posible y cuando éste no pierde energía cinética por colisiones. Esta energía cinética máxima es:

$$K_{max} = K_{max}(\nu) = h\nu - w_0 \quad (1.1.4)$$

En donde w_0 , que se denomina la función trabajo, es la energía mínima necesaria para extraer un electrón del metal y es una propiedad del metal del cátodo.

Veremos ahora que las hipótesis de Einstein explican satisfactoriamente el efecto fotoeléctrico, lo que no se logra en cambio con la teoría ondulatoria clásica.

- El primer hecho, que K_{max} es independiente de la intensidad de la luz, es consecuencia de la ecuación (1.1.4). De acuerdo con la teoría de Einstein, la intensidad de la luz es proporcional al número de fotones que llegan a la superficie (por unidad de tiempo y de área), por lo tanto la corriente fotoeléctrica es proporcional a la intensidad, pero cada proceso individual de

emisión es independiente de la intensidad y sólo depende de la frecuencia de la radiación. [Referencia 7]

- La existencia de una frecuencia de corte, es también una consecuencia de la ecuación (1.1.4). En efecto, para cada metal, existe una frecuencia V_0 tal que:

$$h\nu_0 = w_0 \quad (1.1.5)$$

y para esa frecuencia $K_{max}(\nu_0) = 0$. En otras palabras, un fotón de la frecuencia ν_0 tiene justamente la energía suficiente para extraer un fotoelectrón, sin que le sobre nada que pueda aparecer como energía cinética del electrón. Si $\nu < \nu_0$, los fotones no tienen energía suficiente para extraer fotoelectrones y no hay efecto fotoeléctrico, por grande que sea la intensidad (o sea el flujo de fotones) del haz de luz.

- La ausencia del tiempo de retraso también se explica, pues la energía necesaria para que el electrón sea emitido se suministra en paquetes concentrados. Tan pronto la iluminación del photocátodo deja de ser nula, hay por lo menos un fotón, que puede ser absorbido provocando la emisión de un fotoelectrón.

Si sustituimos $K_{max} = eE$ (ecu. (1.1.1)) en la ecuación de Einstein (1.1.4) obtenemos:

$$V_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{w_0}{e} \quad (1.1.6)$$

La teoría predice que el potencial de frenado V_0 es una función lineal de ν , en perfecto acuerdo con los resultados experimentales. La pendiente de la curva experimental permite determinar:

$$\frac{h}{e} = 3.9 \times 10^{-15} V s \quad (1.1.7)$$

Multiplicando esta relación por la carga electrónica se puede determinar h .

Examinando cuidadosamente estos datos se encontró $h = 6.57 \times 10^{-34} Js$ con una precisión del 0.5%, valor que concuerda con el que obtuvo Planck.

Actualmente el concepto de fotón se usa en todo el espectro electromagnético y no sólo en el visible o cerca de él.

La energía de los fotones varía en 18 órdenes de magnitud desde las ondas de VLF ($\nu = 10^4$ Hz) a los fotones más energéticos de los rayos cósmicos ($\nu = 10^{22}$ Hz).

Cabe mencionar que para que un fotón pueda ser absorbido, como ocurre en el efecto fotoeléctrico, es preciso que el electrón esté ligado a un átomo o a un sólido.

Un electrón libre no puede absorber un fotón pues, en tal proceso no se pueden conservar simultáneamente la energía y la cantidad de movimiento (por la misma razón un electrón libre tampoco puede emitir un fotón). [Referencia 7]

Para que el electrón absorba (o emita) un fotón debe intervenir en el proceso una tercera partícula, pues sólo así se pueden conservar tanto la energía como la cantidad de movimiento.

En el modelo de Einstein un fotón de frecuencia ν tiene exactamente la energía $h\nu$, y no múltiplos enteros de $h\nu$. Según el modelo de Einstein, la radiación de la cavidad de un cuerpo negro constituye un “gas de fotones”.

2.1.2 Efecto fotoeléctrico en semiconductores.

En un semiconductor, los electrones se encuentran en dos bandas de energía, como se muestra en la figura (11), llamadas bandas de valencia y conducción, de la interacción de partículas de carga entre estas dos bandas puede resultar la emisión o absorción de radiación electromagnética. [Referencia 7]

Cuando un semiconductor es iluminado, los fotones son absorbidos para crear un par electrón-hueco.

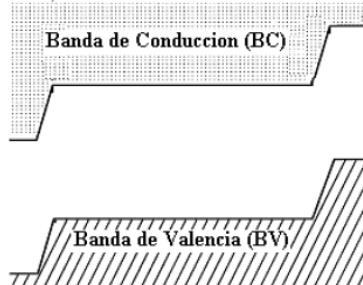


Figura (11). Diagrama de bandas de un semiconductor.

Un par electrón-hueco se genera cuando un electrón pasa de un estado en reposo a un estado de excitación, la interacción entre un fotón y un electrón permite la generación de tres procesos en un semiconductor, los cuales son la absorción, la emisión espontánea y la emisión estimulada de un fotón como se muestra en la figura (12).

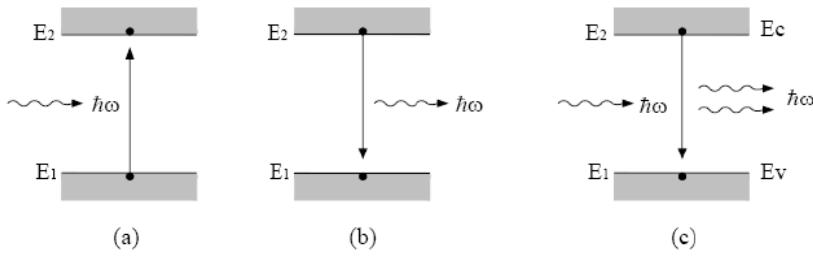


Figura 12). (a) Absorción. (b) Emisión espontánea. (c) Emisión estimulada.

a) Absorción.

Al hacer incidir luz sobre un semiconductor, si la energía incidente es mayor a la energía de la banda prohibida (E_g) del material, el fotón es absorbido y su energía es transferida a un electrón de la banda de valencia, excitándolo hacia la banda de conducción y generando un par electrón hueco, como se observa en la figura 12(a).

Si la energía del fotón es menor que la energía (E_g) del semiconductor, el fotón no es absorbido ya que el material es transparente para longitudes de onda más grandes que:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (1.1.8)$$

Donde λ es la longitud de onda de la luz incidente, h es la constante de Planck, $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ es la velocidad de la luz en el vacío y (E_g) es la energía de la banda prohibida del material semiconductor.

b) Emisión espontánea.

Una vez ocurrida la absorción el estado excitado del átomo es inestable. Después de un corto tiempo y sin ningún estímulo externo, ocurre una transición espontánea de la banda de conducción a la banda de valencia, como se observa en la figura 12(b).

Estas transiciones pueden ser radiativas o no radiativas. Para semiconductores directos las transiciones radiativas son usualmente dominantes, emitiendo fotones con fases y direcciones estadísticamente distribuidas.

La razón de emisión espontánea es proporcional a la densidad de estados y a la probabilidad de ocupación. [Referencia 7]

c) Emisión estimulada.

La emisión estimulada es el proceso inverso a la absorción, cuando un fotón con energía E afecta a un electrón mientras está en su estado excitado (banda de

conducción), el átomo puede ser estimulado a hacer una transición a la banda de valencia, como se muestra en la figura 12un área.

Aquí los fotones son creados viajando con la misma orientación de la fase y dirección de propagación de la onda excitadora.

La radiación estimulada es monocromática debido a que cada fotón tiene precisamente una energía E y es coherente debido a que todos los fotones emitidos están en fase.

Las razones de transición son controladas por la densidad de fotones y las densidades de ocupación de los niveles de energía participantes.

Por otra parte en las uniones p-n en las cuales al absorberse fotones se generan corrientes en inversa proporcionales a los fotones absorbidos.

Sus tiempos de respuesta son rápidos y tienen en general alta eficiencia cuántica

Nota: El fotodiodo de silicio es el más adecuado para la medida de una señal óptica en el visible e infrarrojo cercano. [Referencia 7]

2.2 Radiometría y fotometría.

2.2.1 Conceptos básicos.

La radiometría describe la transferencia de energía (o energía por unidad de tiempo, potencia) desde una fuente a un detector, admitiendo la validez del modelo geométrico de trayectorias y la conservación de la energía a lo largo de un tubo de rayos. [Referencia 8]

En consecuencia los posibles efectos de interferencia y/o difracción no se consideran significativos. Cuando esta transferencia de energía del emisor al detector se normaliza a la respuesta espectral del ojo de un observador humano, se denomina fotometría.

Las magnitudes radiométricas y fotométricas suelen diferenciarse utilizando los subíndices “e” (energía) para las primeras y “v” (visual) para las segundas. Las magnitudes relacionadas con los fotones se caracterizan por el subíndice “q”.

Radiancia espectral.

La magnitud básica a partir de la cual se derivan todas las magnitudes radiométricas es la radiancia espectral (L_e), en la que “se incluyen” los conceptos básicos de “área” y “ángulo sólido” que son necesarios para calcular el flujo radiante que incide en un sistema. [Referencia 4]

La radiancia espectral (L_e) es así la cantidad de flujo radiante (Φ , energía por unidad de tiempo, vatios, W) por unidad de longitud de onda (micras, μm) radiada (emitida)

en un cono por unidad de ángulo sólido (estereorradián, sr) por un fuente cuya área (A_s) se mide en metros.

$$L_e = \frac{\partial^2 \Phi(\lambda)}{\partial A_s \partial \Omega} \frac{W}{m^2 \mu m sr} \quad (1.2.1)$$

De manera análoga, se define la radiancia espectral fotónica L_q , como la radiancia espectral expresada en ($\frac{\text{fotones}}{s - m^2 - \mu m - sr}$).

Las magnitudes (L_e) y L_q son invariantes en cualquier sistema óptico que no tenga absorción o reflexiones, permaneciendo constantes en la propagación de la energía por el sistema.

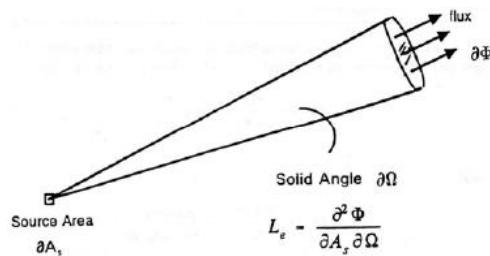


Figura (13). Radiancia espectral.

Magnitud	Símbolo	Unidad	Magnitud en Fotometría
Energía radiante. Flujo radiante ó potencia radiante.	Q_e Φ_e	Joule (J) Watt (W)	Flujo luminoso
Intensidad radiante espectral.	I_e	$W/(m^2 \mu m sr)$	Intensidad luminosa
Emitancia Radiante.	M_e	$W/(m^2 \mu m)$	
Incidencia radiante espectral ó Irradiancia.	E_e	$W/(m^2 \mu m)$	Iluminancia
Radiancia espectral.	L_e	$W/(m^2 \mu m sr)$	Luminancia

Tabla (1.5). Magnitudes radiométricas estándar.

2.2.2 Unidades Radiométricas y fotométricas estándar

Energía radiante, Q : es la cantidad de energía que / incide sobre / se propaga a través / es emitida desde / una superficie de área dada en un periodo de tiempo

dado. En principio se incluyen todas las longitudes de onda contenidas en la radiación. Si es preciso debe indicarse explícitamente el rango de $\Delta\lambda$ considerado.

Energía radiante espectral, Q_λ : es la energía radiante por intervalo unitario de longitud de onda. Se mide en $\frac{J}{nm}$ o $\frac{J}{\mu m}$.

$$Q_\lambda = \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \quad (1.2.2)$$

Flujo (potencia) radiante, Φ_λ : es el flujo de energía radiante por unidad de tiempo. Se mide en vatios ($W, 1W \frac{J}{s}$).

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1.2.3)$$

Cuando la radiación incide en un dispositivo que produce una señal (voltaje, u otra) proporcional a la radiación incidente, la magnitud importante es la “cantidad total de flujo” en vez del flujo por unidad de área, por lo que en estos casos, resulta necesario especificar la extensión espacial del campo de radiación cuyo flujo se está considerando. [Referencia 4]

Flujo (potencia) radiante espectral, Φ_λ : es el flujo de energía radiante por unidad de tiempo y unidad de longitud de onda. Se mide en watts ($\frac{W}{nm}$).

$$\Phi_\lambda = \Phi_\lambda(\lambda) = \frac{\partial Q_\lambda}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \quad (1.2.4)$$

Irradiancia, E : es la cantidad de flujo radiante por unidad de superficie que / incide sobre / atraviesa / emerge / de un punto en la superficie especificada. Deben incluirse todas las direcciones comprendidas en el ángulo sólido hemisférico por encima o por debajo del punto en la superficie. Se mide en ($\frac{W}{m^2}$).

$$E = \frac{\partial \Phi}{\partial S_0} \quad (1.2.4)$$

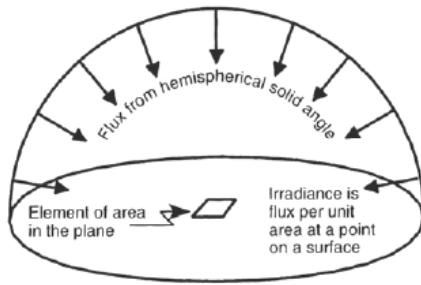


Figura (14). Irradiancia por unidad de área incidente en un punto de una superficie.

Intensidad radiante, I : es la densidad de flujo radiante por unidad de ángulo sólido / incidente en / atravesado por / un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en W/sr.

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} \quad (1.2.5)$$

Intensidad radiante espectral, I_λ : es la densidad de flujo radiante por unidad de longitud de onda / incidente en / atravesado por / un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en $(\frac{W}{sr nm})$.

$$I_\lambda = \frac{dI}{dL} = \frac{d^2Q_\lambda}{d\omega ds} = \frac{d^2\Phi}{d\omega d\lambda} \quad (1.2.6)$$

Radiancia, L : es la densidad de flujo radiante por unidad de área y de ángulo sólido / incidente en / atravesando / emitido por / un elemento de superficie centrado en un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en $(\frac{W}{m^2 sr})$. Su ecuación característica es:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds} = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds_0 \cos\theta} \quad (1.2.7)$$

donde $ds = ds_0 \cos\theta$ es una magnitud denominada “área proyectada” que es el área de la proyección de la superficie elemental ds_0 (de la superficie que contiene al punto) sobre un plano perpendicular a dirección de propagación.

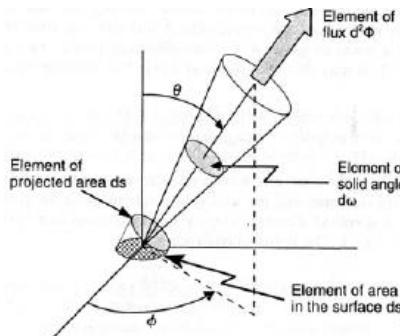


Figura (15). Representación de la Radiancia.

El conjunto estándar de magnitudes fotométricas es el siguiente:

Magnitud	Símbolo	Unidades del SI y MKS	Unidades de Sistema Ingles.
Energía Luminosa.	Q_v	Talbot (T)	Talbot (T)
Flujo Luminoso.	Φ_v	Lumen (lm)	Lumen (lm)
Intensidad Luminosa	I_v	Candela (cd)	Candela (cd)
Emitancia Luminosa.	M_v	lumen/(sr)	lumen/(sr)
Incidencia Luminosa ó Iluminancia.	E_v	Lux (lx) = lumen/(m ²)	Footcandele (fc) lumen/ft ²
Esterancia Luminosa	L_v	Lux (lx) = lumen/(m ²)	Footcandele (fc) lumen/ft ²
		Nit = lumen/(m ² sr)	Candela/ft ²

Tabla (1.6). Magnitudes fotométricas estándar.

Equivalencia entre las magnitudes básicas en radiometría y fotometría.

Magnitud	Símbolo	Unidad	Unidades Fotométrica	Símbolo	Unidad
Flujo Radiante	Φ_e	W	Flujo Luminoso.	Φ_v	Lumen (lm)
Intensidad Radiante	I_e	W/sr	Intensidad Luminosa	I_v	Candela(cd) lumen/(sr)
Irradiancia	E_e	W/m ²	Iluminancia	E_v	Lux (lx) = lumen/(m ²)
Radiancia	L_e	W/m ² sr	Luminancia	L_v	Nit=lumen/(m ² sr)

Tabla (1.7). Radiometría y fotometría

2.2.3 Factores de conversión.

SI to IP Conversion Factors for Radiometry and Photometry

Quantity	Units	Symbol	Conversion Equation
Radiant flux	British thermal unit per hour	Btu/h	$1 \text{ Btu/h} = 0.2928 \text{ W}$
	Watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
	Erg per sec	erg/s	$1 \text{ erg/s} = 10^{-7} \text{ J/s} = 10^{-7} \text{ W}$
Radiant intensity	Btu per hour and per steradian	$\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$1 \text{ Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} = 0.2928 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$
	Watt per steradian	W/sr	$1 \text{ W/sr} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
	Btu per hour and per square foot	$\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2}$	$1 \text{ Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2} = 3.1503 \text{ W/m}^2$
Irradiance	Watt per square foot	W/ft ²	$1 \text{ W/ft}^2 = 10.76 \text{ W/m}^2$
	Btu per hour and per square foot and per steradian	$\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$1 \text{ Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 3.1503 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
	Watt per square foot and per steradian	$\text{W} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$1 \text{ W} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 10.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
Radiance	Lumen	lm	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$
	candela	cd	$1 \text{ cd} = 1 \text{ lm}$
Luminous flux	Lumen per square foot	lm/ft ²	$1 \text{ lm/ft}^2 = 10.76 \text{ lm/m}^2 = 10.76 \text{ lx}$
	Foot candle	fc = lm/ft ²	$1 \text{ fc} = 10.76 \text{ lux}$
	candela per sq. foot	cd/ft ²	$1 \text{ cd/ft}^2 = 10.76 \text{ cd/m}^2$
Luminance	Foot Lambert*	fl = fc/(π sr)	$1 \text{ fl} = 10.76 \text{ lx}/(\pi \text{ sr}) = 1/\pi \text{ lm/ft}^2 = 3.425 \text{ cd/m}^2$

Tabla (1.8). Factores de conversión entre unidades Radiométricas y Fotométricas.

Para nuestro propósito solo tomaremos las cuatro cantidades fundamentales en radiometría que son centrales tanto en radiometría como en fotometría.
[Referencia 7]

Se presentan junto con sus símbolos y unidades en el (SI).

- Flujo radiante Φ en Watts,
- Irradiancia E , en watts/m²,
- Intensidad radiante I , en watts/sr,
- Radiancia L , in watts/(sr m²).

El flujo radiante frecuentemente se llama potencia radiante.

Las cuatro cantidades fotométricas que corresponden a las cantidades radiométricas anteriores son:

- Flujo luminoso,
- Iluminancia,
- Intensidad luminosa
- Luminancia

2.3 Descripción y tipos de detectores Ópticos.

2.3.1 Clasificación y principio de operación.

Existen dos tipos de fotodetectores que son de uso común: [Referencia 3]

- Detectores térmicos: convierten la energía de los fotones (luminosa) en calor. No son muy eficientes y son relativamente lentos por el tiempo requerido para cambiar su temperatura (por estas características no son adecuados para muchas aplicaciones).
- Detectores fotoeléctricos: algunos materiales absorben fotones y se obtienen transiciones electrónicas hacia niveles energéticos altos generándose portadores de carga. Bajo el efecto de un campo eléctrico, estos portadores se desplazan y producen una corriente eléctrica que puede medirse.

Los detectores fotoeléctricos pueden funcionar basándose en distintos fotoefectos que pueden clasificarse como efectos internos o externos. Si un fotón con la energía suficiente ilumina la superficie del material, los electrones pueden sobrepasar la barrera potencial de la superficie y ser liberados en el vacío como electrones libres (emisión de un foto-electrón).

Este efecto se presenta en metales como el Cesio (Cs), aunque los detectores basados en metales puros funcionan únicamente para las regiones visible y UV del espectro electromagnético. Los materiales semiconductores pueden también presentar este efecto y se han podido adaptar para funcionar en las regiones visible, UV y NIR

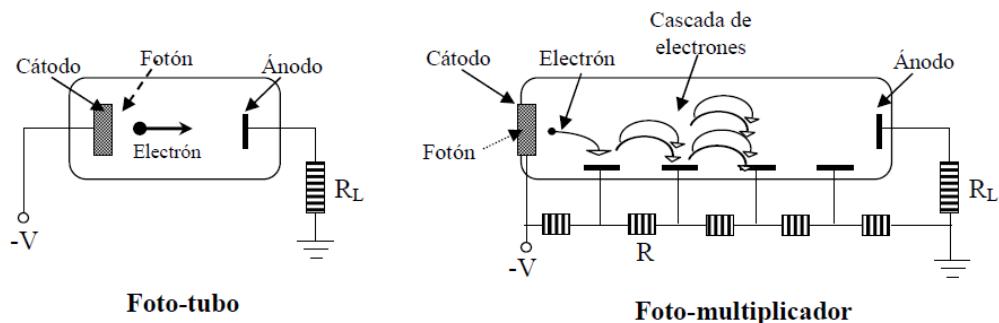


Figura (16). Foto-tubos, basados en tubos de vacío.

Ejemplos de este tipo de detectores son los fototubos, basados en tubos de vacío, en los que los electrones son emitidos de la superficie de un material foto-emisor

(cátodo) y viajan a un electrodo que se mantiene a un potencial eléctrico más alto (ánodo). [Referencia 3]

- Fotodiodos: juntura p-n en la que los fotones absorbidos en la región de vaciamiento generan electrones y huecos que al estar expuestos a un campo eléctrico fluyen en direcciones opuestas produciendo una corriente eléctrica.
- Fotodiodos de avalancha (APD): incorporan mecanismos de amplificación internos con los que la señal puede ser detectada en forma de corriente más fácilmente; el proceso de amplificación se logra al aumentar el campo eléctrico aplicado en la región de vaciamiento de tal manera que los electrones y huecos generados adquieran suficiente energía para liberar más electrones y huecos dentro de dicha región.
- Detectores con ganancia: utilizan tres procesos básicos en funcionamiento: (a) generación de portadores libres al absorber fotones, (b) transporte de portadores inducido por el campo eléctrico aplicado y (c) amplificación generada al liberarse más portadores de carga.

2.3.2 Definiciones y conceptos.

Fotoconductividad: es un incremento en la conductividad eléctrica del material cuando este interactúa con un fotón, siendo así el efecto interno más importante.

Eficiencia cuántica:

$$\eta = (1 - R)\zeta\{1 - e^{(-\alpha d)}\} \quad (1.2.8)$$

Donde (1-R) efecto de reflexión en la superficie del dispositivo (coeficiente de reflectividad R). Puede reducirse utilizando recubrimientos anti reflejantes.

Z es la fracción de pares electrón-hueco que contribuyen a la corriente eléctrica generada por los fotones. Esta fracción es la que no se recombinan en la superficie, y puede aumentarse durante el proceso de fabricación del dispositivo.

El último factor representa la fracción de fotones que son absorbidos por el material. El dispositivo debe tener una profundidad (d) lo suficientemente grande para maximizar este factor en el cual (α) es el coeficiente de absorción del material.

La eficiencia cuántica depende de la longitud de onda principalmente por la dependencia del coeficiente de absorción α con este parámetro. [Referencia 7]

Sensibilidad (responsividad):

$$R = \eta \frac{\lambda_0}{1.24} \left(\frac{A}{W} \right) \quad (1.2.9)$$

Relaciona la corriente eléctrica que fluye en el dispositivo con la potencia óptica incidente (P).

$$\Re P = \eta \left(\frac{\lambda_0}{1.24} \right) P = \eta e \phi \quad (1.3.1)$$

La respuesta aumenta con la longitud de onda porque los detectores fotoeléctricos responden al flujo de fotones en lugar de a la potencia óptica. Esto implica que al aumentar la longitud de onda (λ_0), la potencia óptica está distribuida entre más fotones con lo que se producen más electrones en el dispositivo.

Esta dependencia está delimitada por la eficiencia cuántica que es dependiente de la longitud de onda.

La respuesta puede degradarse si se aplica demasiada potencia óptica al dispositivo (saturación del detector), lo que limita el rango lineal dinámico del detector.

Tiempo de respuesta: Está limitado por el tiempo requerido para distribuir las cargas generadas por los fotones en la superficie del detector (tiempo transitorio de distribución), y por la resistencia y la capacitancia del dispositivo además de los circuitos electrónicos utilizados [Referencia 7].

2.3.3 Fotodetectores.

Fotodiodo p-n: es una juntura p-n cuya corriente de inversa aumenta al absorber fotones. Los fotones pueden ser absorbidos en cualquier parte del dispositivo y por lo tanto un par electrón-hueco puede generarse en cualquiera de estas partes.

Sin embargo, el transporte de portadores de carga ocurre únicamente en la presencia de un campo eléctrico, por lo que la región de vaciamiento es la región en la que es más deseable que se generen los fotoportadores.

El tiempo de respuesta está limitado por el tiempo transitorio de distribución, la resistencia y capacitancia del dispositivo, y también por procesos de difusión que se presentan cuando los portadores se generan en la vecindad de la región de vaciamiento.

El fotodiodo tiene una relación corriente-voltaje dada por:

$$i = \left(i_s \left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right) - i_p \quad (1.3.2)$$

Que corresponde a la relación un área apica i-V para una juntura p-n, con una corriente extra (i_p) que es proporcional al flujo de fotones (foto-corriente). [Referencia 8]

Existen tres modos de operación para un fotodiodo: [Referencia 8]

(a) Circuito abierto (operación foto-voltaica): incremento en el voltaje del dispositivo proporcional al flujo de fotones (celdas solares).

(b) Corto circuito: se genera una corriente de corto circuito que equivale a la foto-corriente.

un área Polarización en inversa (operación foto-conductiva): es el modo de operación más común porque reduce el tiempo transitorio de distribución y la capacitancia de la juntura, además de incrementar la región de vaciamiento con lo que se obtiene un área fotosensitiva más grande.

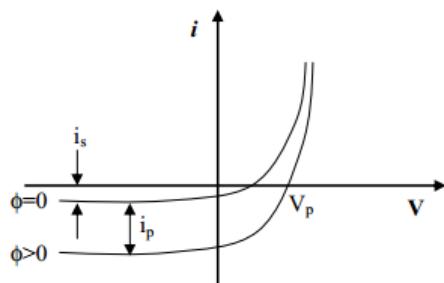


Figura (17). Relación corriente-voltaje del fotodiodo.

Fotodiodo p-i-n: Están formados por una juntura p-n con una capa de material intrínseco separando los materiales p y n. Puede operarse en las mismas configuraciones que los fotodiodos p-n y ofrecen las siguientes ventajas.

- Región de vaciamiento más ancha, lo que incrementa el área disponible para capturar luz.
- Capacitancia de juntura más baja, lo que se logra por el incremento en la región de vaciamiento, reduciendo la constante RC del circuito.

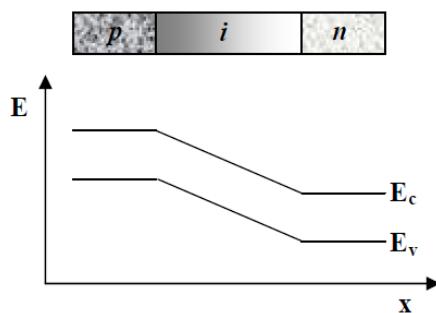


Figura (18). Estructura común de un fotodiodo p-i-n.

Con estos dispositivos es posible obtener tiempos de respuesta de decenas de ps (BW»50 GHz).

Fotodiodos Schottky: Llamados también fotodiodos de metal semiconductor.

Una de las capas de material semiconductor de la juntura (p o n) se remplaza por una película delgada semitransparente de metal (Au en Si tipo n para operar en el rango visible y PtSi en Si tipo p para operar del cercano UV al IR).

Algunas veces se utiliza una aleación de metal con un material semiconductor. Este tipo de estructura tiene eficiencias altas y tiempos de respuesta rápidos (BW»100 GHz) debido a que se reducen tanto la recombinación de portadores (por la delgadez de la película metálica) como la constante RC del circuito.

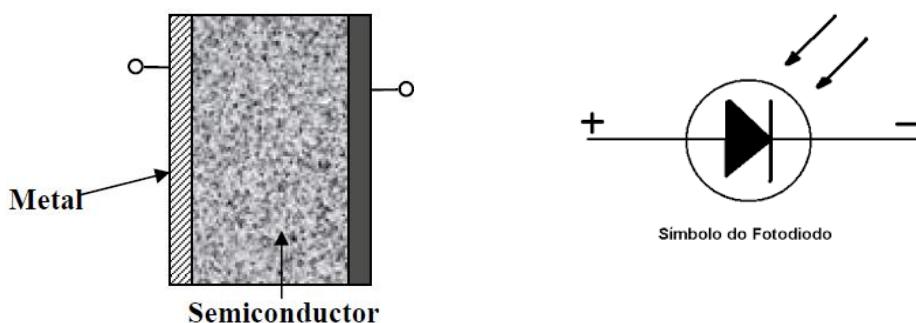


Figura (19). Estructura común de un fotodiodo Schottky.

Fotodiodos de avalancha: Operan por medio de la conversión de cada fotón detectado en una cascada de pares de portadores móviles (amplificación de corriente).

El par electrón-hueco generado por un fotón acelera bajo los efectos del campo eléctrico; si el electrón o el hueco alcanzan una energía mayor que la correspondiente a la banda prohibida, se generará otro electrón (hueco) que contribuirá a la foto-corriente. [Referencia 8]

Dado que el proceso depende de la aceleración de los portadores de carga, estos dispositivos funcionan como fotodiodos polarizados fuertemente en inversa.

2.3.4 Definiciones y conceptos.

Ganancia:

$$G = \frac{1 - k}{e^{[-(1-k)\alpha_e w] - k}} \quad (1.3.3)$$

donde k es la razón o cociente de ionización (coeficiente de probabilidad de impacto de ionización de huecos entre el de electrones), w es el ancho de la capa de multiplicación y α el coeficiente de ionización de electrones. Para $k=1$ G se calcula a partir de la ecuación diferencial con lo que se obtiene $G=1/(1-\alpha w)$.
 [Referencia 10]

Foto-corriente:

$$i_p = \frac{G\eta eP}{hv} \quad (1.3.4)$$

Tiempo de respuesta: Además de las limitantes comunes en los fotodiodos (tiempo de distribución, difusión y constante RC) se presenta otro tiempo característico llamado tiempo de construcción de avalancha. Este tiempo es bajo para dispositivos de silicio, por lo que los tiempos de respuesta son similares a los de los fotodiodos p-i-n.

Ruido en circuitos receptores: La corriente real generada en un fotodiodo es de carácter aleatorio y su valor fluctúa entre el valor promedio definido por la photocorriente:

$$\bar{i} = i_p \Re P \quad (1.3.5)$$

Dichas fluctuaciones se consideran como ruido.

Las fuentes de ruido inherentes al proceso de detección de fotones son:

- Ruido de fotones: asociado con el arribo aleatorio de los fotones al detector (generalmente descrito por una distribución de Poisson).
- Ruido foto-electrónico: para un foto-detector con $h < 1$, un fotón tiene una probabilidad h de generar un par fotoelectrón hueco, y una probabilidad $1-h$ de fallar en la conversión. Dado que esto es de carácter aleatorio, contribuye como fuente de ruido.
- Ruido de ganancia: cada fotón detectado genera un número aleatorio G de portadores, i.e., el proceso de amplificación es de carácter aleatorio.
- Ruido del circuito receptor: contribución de los componentes del circuito utilizado en el receptor óptico. [Referencia 11]

2.4 Materiales y metodología para el desarrollo del medidor UV.

2.4.1 Selección de sensor UV.

Sensor.

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, etc. [Referencia 3]

En este caso se requiere de un sensor que sea capaz de medir la radiación ultravioleta que incide sobre la superficie terrestre, por lo tanto fue necesario conocer qué tipo de sensores se pueden encontrar en el mercado, así como, las características principales de cada uno.

A través de un sensor UV se hace la medición del recurso solar que pasa posteriormente al radiómetro para hacer la adquisición de datos y transformación de la señal a [W].

Para una buena elección del sensor es indispensable tener en cuenta varios factores de importancia que permitan cumplir con el objetivo del instrumento tomando en cuenta los criterios más relevantes. [Referencia 9]

Criterios de selección del sensor	Sensor fotodiodo EPD-440-0-1.4
Ancho de banda y rango.	(190 nm – 570 nm),
Respuesta a determinada longitud de onda.	0.17 A/W
Rango de temperatura de operación.	-40 to +125 °C
Área activa	1.2 mm ²
Fotocorriente a $I = 440$ nm.	1.55 μ A

Tabla (1.9). Factores de que influyen en la selección del sensor fotodiodo.

Los datos del sensor permitieron brindar mayor seguridad en que la mejor opción para el medidor de radiación UV es el sensor EPD-440-0-1.4.

2.4.2 Sensor fotodiodo EPD-440-0-1.4.

El detector EPD-440-0-1.4 (Figura 20) es pequeño (5.31mm x 18,5 mm) y robusto. Este detector ofrece alta eficiencia a longitudes de onda menores de 570nm y un alto rechazo de respuesta a longitudes de onda infrarroja. El paquete estándar cuenta con un encabezado TO-46 con tapa.



Figura (20) Fotodetector EPD-440-0-1.4..

Los fotodiodos son dispositivos semiconductores sensibles a la luz, fabricados esencialmente de la misma manera que los diodos convencionales, la diferencia principal es que los fotodiodos son más grandes y pueden estar montados en un soporte para permitir la entrada de la luz o partículas fotónicas en el área sensible del dispositivo. [Referencia 8]

Ofrece muchas ventajas que los hacen muy prácticos para una variedad de aplicaciones, por mencionar algunas tenemos:

- Pueden medir fácilmente desde picoWatts [pW] hasta miliWatts [mW] de intensidad luminosa.
- Dependiendo del semiconductor utilizado en su fabricación, pueden detectar longitudes de onda desde 190 a > 2000nm.
- Son pequeños y ligeros.
- Tienen una sensibilidad muy reproducible.
- Se fabrican con diferentes tamaños de áreas sensibles.

Aplicaciones típicas del EPD-440-0-1.4.

- Ingeniería médica (dermatología).
- comprobación de salida de UV – lámparas y la llama del quemador de petróleo o gas.
- Medición y control de los sistemas ecológicos parámetros, control de radiación para un panel, UV.
- Instalaciones de purificación de agua.

Al fotodiodo en cuestión se le añadió un encapsulado formado por cubierta de latón y se conecta al exterior mediante un conector BNC hembra para tener una fácil manipulación de éste sin dañarlo. [Referencia 9]



Figura (21). Elemento final de sensor con cubierta de protección.

2.4.3 Selección de amplificador operacional.

Una etapa de amplificación es primordial para lograr el funcionamiento del medidor de radiación UV. [Referencia 10]

De igual manera, es necesario transformar en primera instancia la photocorriente del sensor a voltaje para poder realizar una posterior manipulación caracterización de su respuesta.

Por este motivo fue necesario investigar y elegir criterios relevantes tales como: bajo nivel de ruido, alta velocidad y una fácil utilización.

Para elegir la mejor opción, se investigaron algunos modelos de amplificadores operacionales disponibles en el mercado, y posteriormente se analizó si contaban con las características antes mencionadas.

Tras realizar la comparación de las características con las que debe contar el amplificador operacional. Se puede observar que la mejor opción es el OPA 380 de Texas Instruments.

2.4.4 Amplificador operacional OPA 380.

La familia de los amplificadores operacionales OPA380 ofrece alta velocidad (90MHz Ganancia de ancho de banda [GBW]) operación, con una precisión extremadamente alta, excelente estabilidad a largo plazo y muy bajo ruido 1/f.

Es ideal para aplicaciones de fotodiódos de alta velocidad.

El OPA380 cuenta con una tensión de offset de 25uV, deriva de 0.1uV/°C de offset y corriente de polarización de 50pA.

El ancho de banda de la señal de una amplificador de transimpedancia depende en gran parte de la (GBW) del amplificador y la capacidad parasita del fotodiodo, así como la resistencia de realimentación.

La GBW de 90MHz del OPA380 permite un ancho de banda de transimpedancia >1MHz en la mayoría de sus configuraciones.

Como resultado de las características de alta precisión y bajo nivel de ruido del OPA830, se puede lograr un rango dinámico de 4 a 5 décadas. Por ejemplo, esta capacidad permite la medición de las señales de corriente en el orden de 1nA, y hasta 100uA en una sola etapa de conversión I/V.

El OPA380 es un amplificador de transimpedancia de alto rendimiento y bajo ruido 1/f. [datasheet opa2380 Anexo E]

Como resultado de su arquitectura única, el rendimiento de un amplificador de auto-cero combinado con un amplificador de alta velocidad.

El OPA380 se utiliza en la inversión de configuraciones, con la entrada no inversora utilizado como un punto de desviación fijo.

La serie de amplificadores operacionales OPA380 funciona con un sistema de alimentación único tan bajo como 2.5V.

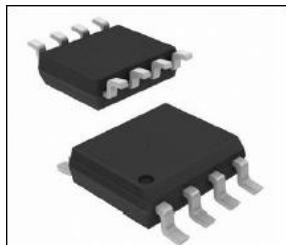


Figura (22). Dispositivo operacional OPA380

2.4.5 Microcontrolador PIC 18F4550.

La principal función que desempeña el microcontrolador dentro del instrumento es realizar la adquisición de datos, utilizar en primera instancia el teclado matricial que se integra al instrumento, esto con la finalidad del poder ingresar datos y sean procesados de manera rápida, y así poder desplegar a través del display la información que se requiere no olvidando la parte más importante que es el amplificador el cual va a suministrar valores al microcontrolador como primera instancia.

Las ventajas de los microcontroladores de Microchip son muchas, dentro de las cuales encontramos:

- Amplia gama: gran variedad de familias que permiten adaptar el microcontrolador a las necesidades de cada aplicación.
- Herramientas de desarrollo comunes.
- Gran variedad de unidades funcionales embebidas (temporizadores, USART, I2C, SPI, unidades de comparación/captura/PWM, convertidores A/D, USB, receptores/transmisores de RF, Ethernet, etc).
- Buen soporte (datasheet, libros, notas de aplicación, seminarios, mucha información disponible en internet). [datasheet Anexo A]

2.4.6 Display LCD 16X2.

El display utilizado es un JHD 162, es de 16 caracteres por dos líneas.

Se utiliza en modo de 4 bits para utilizar el menor número de pines posibles, en este modo sólo se utilizan 4 bits de datos para escribir en él.

La principal función del display LCD es mostrar tanto los datos requeridos para que se tienen que ingresar para poder tener una correcta medición, para mostrar los resultados de las mediciones que se quieran realizar a distintas fuentes de radiación UV, o luz visible.

Cabe mencionar que es una manera muy práctica de tener acceso a la información requerida rápidamente, que es en este caso la intensidad o potencia incidente que es el dato final que se puede visualizar en pantalla.



Figura (23). Representación de un display 16x2.

2.4.7 Teclado matricial 4x4.

La principal función del teclado matricial es ingresar los datos requeridos que en primera instancia son visualizados en el display de 16x2, los cuales es necesario

introducir para que sean procesados en el microcontrolador y podamos ver la respuesta o el dato específico en el LCD.

Hay que tomar en cuenta que es un teclado de 4x4, lo que implica que solo pueden ser introducidos los dígitos que en la programación estén señalados, ya que para esto no es necesario utilizar algunas de las teclas que tiene trae por defecto el teclado matricial.

Este teclado fue seccionado por su fácil adquisición e implementación para un microcontrolador de cualquier familia, de hecho es muy común encontrarlos en cualquier circuito del más sencillo al más complicado.



Figura (24). Representación del teclado matricial 4x4 implementado en medidor de UV.

2.5 La radiación Ultravioleta. Su efecto dañino y consecuencias para la salud humana.

2.5.1 Agentes dañinos al DNA.

Las radiaciones ultravioleta constituyen uno de los agentes físicos causantes de mutaciones en los más diversos organismos de nuestro planeta y éstas están indisolublemente ligadas a los procesos de photocarcinogénesis. [Referencia 14]

La luz UV es una parte de la energía radiante que proviene del sol y constituye la porción más energética del espectro electromagnético que incide en la superficie de la tierra.

Las radiaciones UV de mayor energía son las de tipo C, con longitudes de onda de 100 a 280nm, pero éstas junto a otras radiaciones (radiación X, Gamma y Cósmica), son retenidas totalmente por la capa de ozono en la estratosfera y no alcanzan la superficie terrestre.

Sin embargo este tipo de radiación es emitida por fuentes artificiales tales como lámparas germicidas y lámparas de arco de mercurio. Las radiaciones UV de tipo B se encuentran entre las longitudes de onda de 280 a 320nm y las menos energéticas son las de tipo A con longitudes de onda de 320 a 400nm.

La luz solar natural que percibimos en la tierra está compuesta por UVB (0.3%), UVA (31.9%). Luego, de la radiación UV que recibimos, la UVB comprende aproximadamente el 5% y la UVA el 95% restante, sin embargo la luz UVB es la responsable de la mayor parte de los daños biológicos ocasionados por la luz solar.

Si la piel de los mamíferos se somete a una exposición crónica de radiación UV, se inducen varias respuestas biológicas, por ejemplo: el desarrollo de eritema, edema, quemaduras de las células, hiperplasia, inmunosupresión, daño en el DNA, fotoenvejecimiento y melanogénesis. Estas alteraciones pueden estar directa o indirectamente involucradas en el desarrollo de cáncer. [Referencia 14].

2.5.2 Efectos sobre la piel.

La radiación UVA se considera como la “radiación de envejecimiento” y es capaz de penetrar profundamente en la epidermis y en la dermis de la piel. Es más eficaz que la UVB en lograr un curtido de la piel inmediato que se produce por oscurecimiento de la melanina en la epidermis. [Referencia 15]

La piel se puede quemar si es sometida a exposiciones intensas y prolongadas y hasta puede dañar las estructuras en el corion y causar fotoenvejecimiento prematuro de la piel, así como elastosis solar.

En estas zonas se pueden suprimir algunas funciones inmunológicas, y se pueden desencadenar procesos oxidativos donde se generen especies reactivas del oxígeno (ROS) que pueden causar el daño a las proteínas celulares, lípidos, y carbohidratos.

También pueden generarse especies reactivas del nitrógeno y este exceso de radicales libres provoca una cascada de eventos que propician un deterioro progresivo de las estructuras y funciones celulares.

La lesión de UVA tiende a causar necrosis de las células endoteliales, dañando los vasos sanguíneos dérmicos. Dado que este tipo de radiación puede producir daño estructural al DNA y dañar el sistema inmunológico, puede llevar a la formación de cáncer.

La misma se ha relacionado con el 67% de los melanomas malignos.

La radiación UVB se considera como la “radiación de quemaduras”. Es capaz de penetrar en la epidermis actuando principalmente a nivel de la capa basal de células, dañando el genoma de los queratinocitos, las células vitales del tallo de la epidermis.

Produce efectos biológicos adversos directos e indirectos por ejemplo: formación de fotoproductos, detención del ciclo celular, fotoenvejecimiento prematuro y photocarcinogénesis.

Es característico la formación de estrés oxidativo con la producción de radicales libres en la zona irradiada, además, una excesiva radiación de UVB disminuye los niveles de enzimas antioxidantes en la piel posibilitando una disminución de su capacidad de defensa frente a los procesos oxidativos generados posteriores de las radiaciones. [Referencia 15].

2.5.3 Enfermedades comunes a causa de los rayos UV.

- Melanoma maligno cutáneo: cáncer maligno de la piel potencialmente mortal.
- Carcinoma espinocelular: cáncer maligno que generalmente avanza con menor rapidez que el melanoma y ocasiona la muerte con menor frecuencia (Figura 25).
- Carcinoma basocelular: cáncer cutáneo de crecimiento lento que predomina en las personas mayores (Figura 26).
- Las radiaciones ultravioleta ocasionan efectos agudos en los ojos, conocidos como fotoqueratitis (inflamación de la córnea) y fotoconjuntivitis (inflamación de la conjuntiva).
- Fotoenvejecimiento: pérdida de la firmeza de la piel y aparición de queratosis solares [Referencia 6]



Figura 25. Carcinoma Espinocelular



Figura 26. Carcinoma basocelular

Capítulo 3. Desarrollo del medidor de radiación UV.

En este capítulo se describen las características por medio de las cuales se aborda el problema del diseño y la construcción del prototipo en forma física. Se menciona todo aquello que lo compone así como los algoritmos por los cuales llega a su consolidación final, cabe mencionar que fue necesario incluir un lenguaje de programación y ciertos aditamentos que lo hacen especial, las ecuaciones y los parámetros descritos son parte vital en el tratamiento del diseño y la operación optima al momento de funcionar.

3.1 Diagrama a bloques.

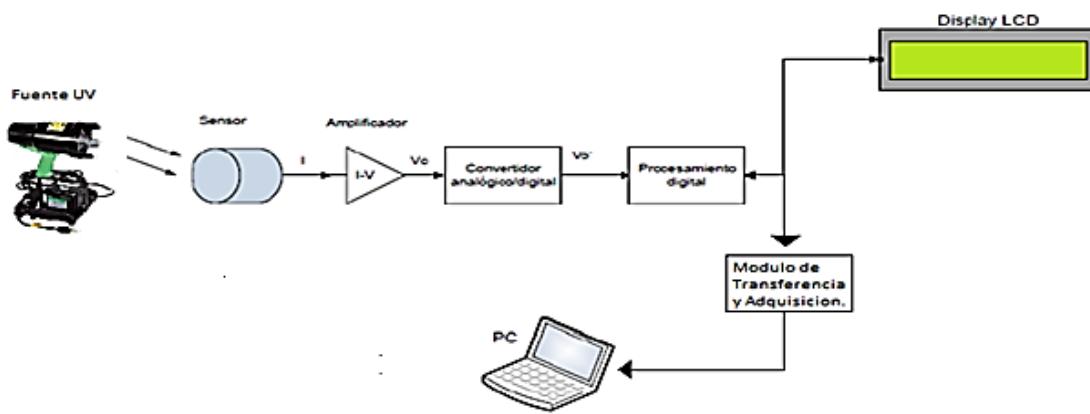


Figura (27). Diagrama a bloques de las partes principales del medidor de radiación.

En la figura (27), se muestra la electrónica involucrada en el desarrollo del prototipo en cuestión, se puede ver que el medidor de radiación UV cuenta con un sensor, un amplificador de señal, un acondicionador, un bloque de procesamiento y un bloque de despliegue de resultados.

3.1.1 Análisis teórico para el desarrollo del prototipo.

A través del análisis de nuestras expectativas para crear un dispositivo que fuera eficiente, práctico y funcional, se opta por crear un aparato constituido por los materiales más comerciales y las herramientas más versátiles con los dispositivos más adecuados que garanticen un buen desempeño a la hora de ejecutar mediciones las cuales provean al usuario de datos reales en los diferentes ambientes y escenarios a los cuales sea expuesto, que le den la seguridad de entender adecuadamente e interpretar la información que recibe, para así poder darle una correcta utilización al aparato. [Referencia 10]

La curva de Respuesta del sensor es una propiedad muy importante que servirá más adelante para calcular la cantidad de intensidad luminosa incidente en el área activa del fotodiodo.

La Figura (24), muestra la gráfica la Respuesta dada en A/W en función de la longitud de onda dada en nm.

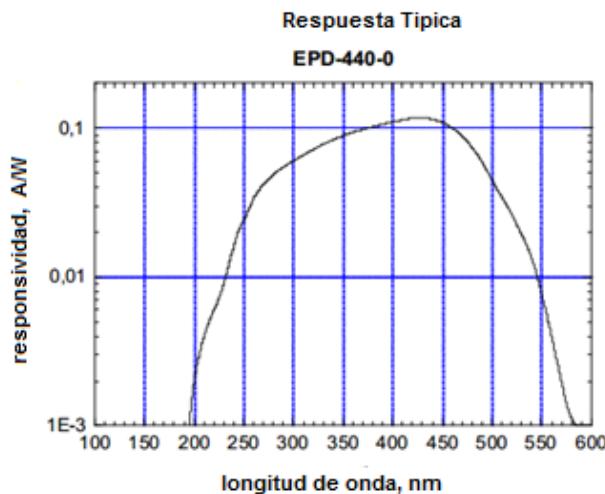


Figura (28). Grafica de la Respuesta dada en A/W, del sensor fotodiodo.

La curva de respuesta nos indica la efectividad del sensor para transformar la energía luminosa en energía eléctrica.

Polarización para el fotodiodo.

Aunque existen muchos circuitos utilizados para medir la señal del fotodiodo, la manera en que es polarizado se encuentra dentro de dos categorías fundamentales.

El modo fotovoltaico y el modo fotoconductivo.

En el modo fotovoltaico el fotodiodo es directamente conectado a un resistor de carga, mientras que en el modo fotoconductivo se conecta mediante un voltaje en inversa (Figura 28). [Referencia 8]

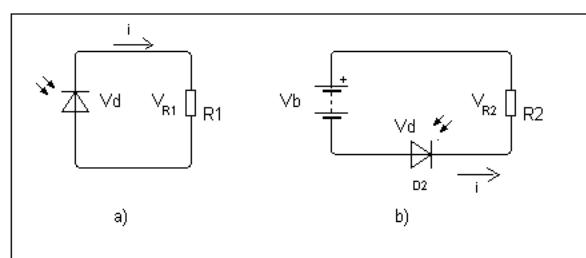


Figura (29). **A)** Modo fotovoltaico **b)** Modo fotoconductivo

En el modo fotoconductivo, Figura 28 (b), la corriente i del circuito no depende únicamente de la intensidad de la luz incidente, sino también de los valores de $R_{1,2}$ y V_b .

Haciendo suma de voltajes para el modo fotoconductivo.

$$V_d + V_b + V_{R1,2} = 0 \quad (1.5.3)$$

Y haciendo

$$V_{R1,2} = iR \quad (1.5.4)$$

Y resolviendo para la corriente i , se obtiene:

$$i = -\frac{1}{R_{1,2}}(V_d + V_b) \quad (1.5.5)$$

La ecuación (1.5.5) es llamada la línea de carga, y da una relación entre la corriente i y el voltaje del fotodiodo V_d que es impuesta por el circuito externo.

Otra relación entre i y V_d proviene de la estructura interna del mismo fotodiodo, esta es la ecuación general del diodo, ecuación (1.5.6), y es empleada para el caso de no absorción de luz.

$$i_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right) \quad (1.5.6)$$

Dónde:

V_d : es el voltaje en las terminales del fotodiodo.

I_s : es la corriente de saturación.

V_T : es el voltaje térmico.

N : el coeficiente de emisión que depende del proceso de fabricación del fotodiodo y del material.

Por otro lado, cuando la luz es absorbida, se crea una corriente negativa adicional llamada *fotocorriente*. La magnitud de la fotocorriente está dada por la ecuación (1.5.7).

$$i_\lambda = P_{in}R_\lambda \quad (1.5.7)$$

Dónde: P_{in} es la intensidad luminosa incidente, R_λ es la Respuesta del fotodiodo.

Esta fotocorriente (ecuación (1.5.7)), se añade a la corriente del fotodiodo en condiciones de no absorción de luz (ecuación (1.5.6)), para obtener la corriente total del fotodiodo indicada en la ecuación (1.5.8). [Referencia 8]

$$i = I_S \left(e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right) - i_\lambda \quad (1.5.8)$$

Como se puede ver de esta ecuación, la curva i - Vd del fotodiodo se mueve hacia abajo (a lo largo del eje i) en una cantidad i_λ , que es proporcional a la intensidad de luz incidente.

En la Figura (29), se muestran algunas curvas i - Vd para valores de intensidad luminosa espaciados igualmente.

La corriente y el voltaje de operación del fotodiodo deben de satisfacer ambas ecuaciones (1.5.5) y (1.5.8), la solución puede ser encontrada al graficar la línea de carga, en la misma gráfica de las curvas del fotodiodo, este procedimiento es llamado análisis de línea de carga.

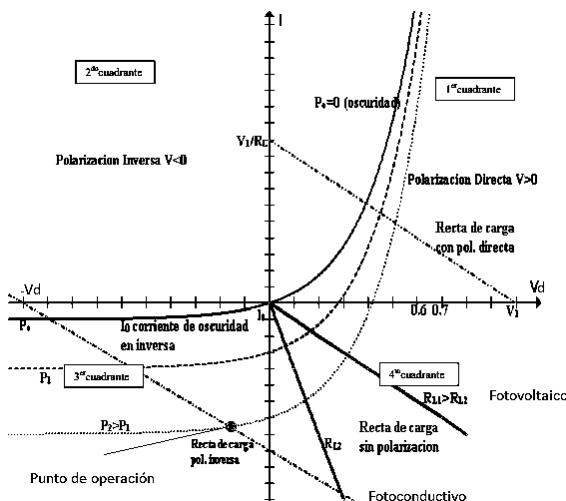


Figura (30). Punto de operación del fotodiodo intersección entre la línea de carga y la curva.

Ya que el modo fotovoltaico es un caso del modo fotoconductivo, el análisis de línea de carga se puede realizar en la misma gráfica haciendo $V_b = 0$.

La intersección de la línea de carga y la curva i - Vd corresponde al *punto de operación* del circuito, que da el valor de la corriente i y el voltaje Vd .

Tanto el modo fotoconductivo como el fotovoltaico tienen sus ventajas y desventajas, dependiendo de la aplicación, bajo condiciones de oscuridad (sin absorción de luz), el punto de operación del modo fotoconductivo está en $i = -I_s$, que corresponde a la corriente de saturación. Esta corriente mínima es llamada *corriente oscura*, $I_s = I_0$.

Lo que hace al modo fotoconductivo más ruidoso. Mientras que el punto de operación del modo fotovoltaico está en $i = 0$, eliminando así la corriente oscura. [Referencia 8]

Sin embargo, el modo fotoconductivo tiene un tiempo de respuesta más rápido que el fotovoltaico y el rango donde es lineal es mayor.

Para desarrollar nuestro aparato de medición, el modo fotovoltaico es el más adecuado ya que el tiempo de respuesta no es un parámetro a considerar para este dispositivo en particular, por otro lado, para esta aplicación la corriente oscura sí es una fuente de ruido que se tiene que eliminar.

Para el diseño de este aparato de medición se parte de la selección del sensor más adecuado que en este caso es un fotodiodo; se emplea la topología en modo fotovoltaico.

El Amplificador

A continuación se consideran otros circuitos que además de proveer la correcta polarización al fotodiodo, también tienen una amplificación. [Referencia 16]

Amplificador a través de un transistor FET.

En esencia es el mismo circuito de la Figura 29 (b), únicamente añadiendo la etapa de amplificación mediante un FET (Transistor de efecto de campo). El voltaje generado en la resistencia de carga RL se aplica entre la compuerta (G) y la fuente (S) del FET.

Esto da como resultado un voltaje de salida V_{out} amplificado entre fuente y drenaje (D). Este circuito se puede utilizar en modo fotovoltaico, con $V_b = 0$, para eliminar la corriente oscura.

El incremento del voltaje en RL causa un decremento en el voltaje de salida, este ejemplo se implementa en modo fotovoltaico, para esto es necesario eliminar la fuente de voltaje, además el fotodiodo se modela como una fuente de corriente proporcional a la intensidad lumínosa incidente.

En la Figura (31) se muestra un ejemplo de la estructura de un circuito de amplificación para la señal del fotodiodo, el cual se realizó a partir de la implementación de un transistor FET (transistor de efecto de campo).

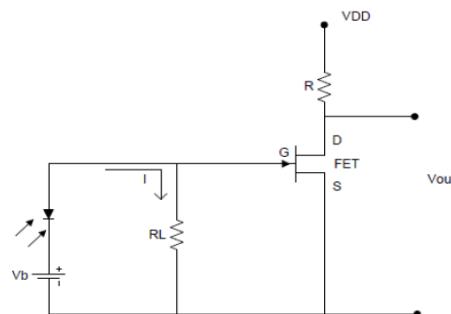


Figura (31). Circuito amplificador FET de alta impedancia con fotodiodo.

El funcionamiento del circuito al utilizar un FET presenta una desventaja ya que muchos de sus valores hay que obtenerlos experimentalmente, además si se utiliza un transistor FET diferente muchos de los valores cambian; para cada FET, su rango es muy pequeño, y además la respuesta no es lineal.

Amplificador a través de un transistor BJT

La Figura (32), muestra un circuito desarrollado a partir de un transistor BJT, el cual se utiliza en su configuración emisor común, para implementar un amplificador con el que interactúe el fotodiodo. [Referencia 16]

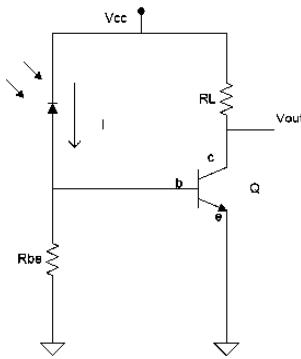


Figura (32). Circuito amplificador implementando un transistor BJT.

En el circuito mostrado en la Figura (32) la photocorriente producida por el fotodiodo causa un decremento en el voltaje de salida V_{out} . El resistor R_{be} sirve para suprimir la influencia de la corriente oscura (I_0), por lo que se elige de tal manera que cumpla con las siguientes condiciones:

$$\frac{V_{be}}{\left(I - \frac{V_{cc}}{RL\beta} \right)} < R_{be} < \frac{V_{be}}{I_0} \quad (1.5.9)$$

Para eliminar la presencia de la corriente oscura en el circuito, hay que hacer que el voltaje generado con esta corriente, en la resistencia R_{be} sea menor al voltaje de encendido V_{be} ; para que de este modo, no se encienda el transistor por causa de esta dicha corriente.

Tenemos que:

$$V_{Rbe} < V_{be} \quad (1.6.0)$$

Donde:

$$V_{Rbe} < R_{be}I_0 \quad (1.6.1)$$

Sustituyendo la ecuación (1.6.1) en la desigualdad (1.6.0) y despejando R_{be} se obtiene que el valor de la resistencia debe de ser

$$R_{be} < \frac{V_{be}}{I_0} \quad (1.6.2)$$

Para asegurarse de que el transistor se enciende cuando circula la señal de corriente, I , que se pretende medir, es necesario que esta corriente genere un voltaje mayor a V_{be} en la resistencia R_{be} . Para tener así al transistor encendido, por lo que:

$$V_{Rbe} > V_{be} \quad (1.6.3)$$

Se considera el voltaje en R_{be} que es generado por la influencia de la corriente I .

$$V_{Rbe} = (I - i_b)R_{be} \quad (1.6.4)$$

i_b es la corriente que circula por la base del transistor, por lo tanto $(I - i_b)$ es la corriente que circula a través de la resistencia R_{be} , i_b se expresa en función de V_{cc} y de RL de manera que:

$$i_b = \frac{V_{cc}}{RL\beta} \quad (1.6.5)$$

Sustituyendo la ecuación (1.6.7) en la ecuación (1.6.4) tenemos que:

$$V_{Rbe} = \left(I - \frac{V_{cc}}{RL\beta} \right) R_{be} \quad (1.6.6)$$

Finalmente, se sustituye este valor (1.6.6) en la desigualdad (1.6.3), para obtener la segunda condición de R_{be} .

$$R_{be} > \frac{V_{be}}{\left(I - \frac{V_{cc}}{RL\beta} \right)} \quad (1.6.7)$$

La salida se toma como el voltaje entre las terminales colector y emisor del transistor, V_{ce} .

El voltaje de salida no varía su valor hasta el momento en el que el transistor se enciende, aproximadamente de 0 a 0.07 mA, en este rango de corriente se encuentra la corriente oscura cuya influencia es eliminada.

Después el voltaje de salida va disminuyendo en función de la fotocorriente, hasta que el transistor alcanza su voltaje de saturación V_{cesat} .

Este circuito, al igual que el implementado con transistor tipo FET, tiene un rango muy pequeño de salida, y como la salida depende también de la beta del transistor, hace que si se utiliza un transistor diferente, la salida cambie en función del dispositivo que esté utilizándose.

Amplificador Operacional.

La Realimentación.

La realimentación consiste en tomar una fracción arbitraria de la información suministrada por un dispositivo e introducirla de nuevo en su entrada.
[Referencia 16].

Podemos definir dos grandes tipos de realimentación:

- La realimentación positiva en la que se introduce una fracción de la señal de salida en fase con la señal de entrada.
- La realimentación negativa en la que se introduce una fracción de la señal de salida en oposición de fase con la señal de entrada.

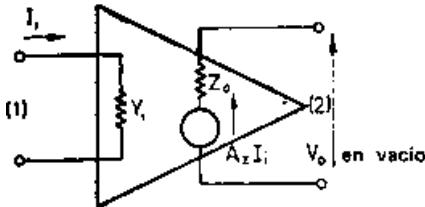
Cabe señalar que este apartado se prescinde de la estructura interna del amplificador considerado como un cuadripolo activo. Sus características son, simplemente, la ganancia A, la impedancia de entrada Z_i y de la salida Z_o .

Existen cuatro tipos de amplificadores que pueden definirse como sigue:

1. Amplificador de tensión: Suministra una tensión proporcional a la tensión de entrada.
2. Amplificador de corriente: Suministra una corriente proporcional a la corriente de entrada.
3. Amplificador de transimpedancia: Suministra una tensión proporcional a la corriente de entrada.
4. Amplificador de transadmitancia: suministra una corriente proporcional a la tensión de entrada.

Cabe mencionar que se ha escogido con fines que van más allá de una simple mención al amplificador de transimpedancia como una de las partes fundamentales que integran la estructura interna del medidor de radiación.

Por tal motivo haremos de lado la basta información adicional que podamos encontrar respecto de los amplificadores operacionales, enfocándonos solamente en el análisis y desarrollo matemático de un amplificador de transimpedancia, (Figura 33).



c) Amplificador de transimpedancia.
 A_z : dimensiones de una impedancia

Figura (33). Representación simbólica del amplificador de transimpedancia.

Clases de Realimentación.

En los amplificadores electrónicos existen cuatro formas de llevar a cabo la realimentación. [Referencia 17]

Es posible introducir a la entrada una tensión proporcional a la tensión de salida tomada en los bornes de la carga. Se trata de una realimentación tensión-tensión (V-V).

Igualmente es posible introducir a la entrada una tensión proporcional a la corriente de salida que circula por la carga útil. Se trata de una realimentación del tipo tensión-corriente (V-I).

Finalmente tenemos otros dos tipos de realimentación: la realimentación corriente-corriente (I-I) y la realimentación corriente-tensión (I-V)

Los cuatro tipos de realimentación pueden aplicarse a los cuatro tipos de amplificador, obteniéndose así 16 variantes del amplificador realimentado.

A continuación se establecen únicamente las fórmulas que caracterizan a una sola combinación del amplificador operacional.

Realimentación corriente-tensión aplicada a un amplificador de transimpedancia.

Sea el montaje de la figura (33), en el que se tiene:

- A_z ganancia de transimpedancia en circuito abierto.
- Y_i admitancia de entrada.
- Z_0 impedancia de salida.
- V_o tensión de salida del amplificador en vacío.
- V_L tensión en bornes de la carga.
- I_g corriente suministrada por una fuente de corriente.

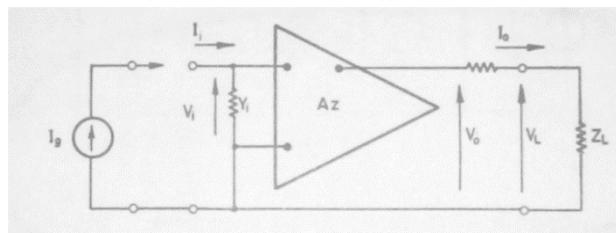


Figura (34). Representación de Realimentación para un amplificador de transimpedancia.

Por definición:

$$I_i = \alpha I_g + \beta V_L \quad (1.6.8)$$

En donde:

- α : fracción de corriente de la fuente efectivamente aplicada a la entrada del amplificador.
- β : fracción de la tensión de salida del amplificador cargado que se reinyecta en forma de corriente en la entrada.
- α : es un coeficiente sin dimensión.
- β : tiene la dimensión de una admitancia.

Se tiene:

$$V_L = A_Z = I_i - Z_0 I_0 \quad (1.6.9)$$

La figura (34), re presenta el esquema equivalente del amplificador realimentado, y:

$$V_L = A_{Zr} = I_g - Z_{0r} I_0 \quad (1.7.0)$$

La ecuación (1.6.9) puede escribirse como:

$$V_L = \left(\frac{\alpha A_Z}{1 - \beta A_Z} \right) (I_g) - (Z_0 / 1 - \beta A_Z) I_0 \quad (1.7.1)$$

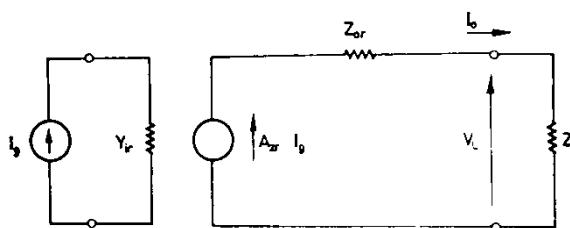


Figura (35). Representación de un amplificador de transimpedancia realimentado.

De la comparación de las ecuaciones (1.7.0) y (1.7.1) deducimos:

$$A_{Zr} = \left(\frac{\alpha A_Z}{1 - \beta A_Z} \right) \quad (1.7.2)$$

$$Z_{0r} = \left(\frac{Z_0}{1 - \beta A_Z} \right) \quad (1.7.3)$$

Nótese que:

- A_Z y A_{Zr} tienen la dimensión de una impedancia.

El producto $A_Z \beta$ (ganancia de bucle) carece de dimensión.

Calculando ahora el valor de Y_{ir} .

Teniendo en cuenta las observaciones de los párrafos anteriores, escribimos:

$$Y_{ir} = \frac{I_g}{V_i} \quad (1.7.4)$$

Pero según (1.6.8):

$$I_g = \frac{I_I - \beta V_L}{\alpha} \quad (1.7.5)$$

De donde:

$$Y_{ir} = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\beta V_L}{\alpha I_i} \right) Y_i \quad (1.7.6)$$

Pero puesto que:

$$V_L = V_0 - Z_0 I_0 \quad (1.7.7)$$

Y

$$V_0 = A_Z I_I \quad (1.7.8)$$

Resulta, teniendo en cuenta que Z_L' comprende las impedancias asociadas a la realimentación de la red.

$$Y_{ir} = \left(\frac{1 - \beta A_z}{\alpha} + \frac{\beta A_z}{\alpha} \frac{Z_0}{Z + Z'_L} \right) Y_i \quad (1.7.9)$$

En definitiva, la realimentación negativa corriente-tensión, aplicada a un amplificador de transimpedancia, permite, bajo determinadas condiciones, la obtención de un nuevo amplificador cuya ganancia de transimpedancia no depende de la del amplificador utilizado y cuyas impedancias de entrada y de salida disminuyen considerablemente. [Referencia 17]

3.1.2 Simulación y diseño de las partes implementadas.

Acondicionamiento de la Señal Proveniente del Amplificador.

Como ya se mencionó anteriormente, finalmente, se seleccionó el amplificador de transimpedancia como el amplificador del medidor de radiación UV diseñado en este trabajo ya que cuenta con las mejores características para nuestras necesidades.

Convierte directamente el valor de la fotocorriente a un voltaje proporcional a la intensidad luminosa incidente, el arreglo fotovoltaico elimina la corriente oscura, y además tiene la mejor linealidad. [Referencia 10]

Para que este circuito se pueda acoplar correctamente con la siguiente etapa, la cual consiste en un convertidor analógico digital, es necesario que la salida del operacional esté en el intervalo de entrada del convertidor A/D para no saturarlo.

Esto es, el convertidor A/D que se utiliza tiene un rango de entrada de 0-5 V, por lo que la salida del circuito de amplificación debe de estar limitado en el mismo intervalo.

Esto se logra tomando en cuenta las especificaciones del fotodiodo y considerando el valor de la resistencia de realimentación del operacional.

Para el primer punto, de la curva de responsividad del fotodiodo, (Figura 25), se obtiene un valor aproximado de responsividad para cada longitud de onda, es decir, una $\lambda = 440 \text{ nm}$ $R_\lambda = 0.13 \text{ A/W}$, otro para $\lambda = 380 \text{ nm}$ $R_\lambda = 0.10 \text{ A/W}$.

La curva de responsividad puede variar un poco para cada fotodiodo, incluso si tienen la misma clave de fabricante, por eso es que el valor de responsividad para cada longitud de onda es aproximado.

Entonces, de la (Tabla 2.0) se obtienen los valores para cada longitud de onda correspondientes a las longitudes de onda de los márgenes empleados y se muestran en la ecuación (1.8.0).

$$R_{\lambda=440nm} = \frac{0.13A}{W} \quad (1.8.0)$$

R_λ	λ
$0.13 \frac{A}{W}$	$440 nm$
$0.15 \frac{A}{W}$	$430 nm$
$0.14 \frac{A}{W}$	$420 nm$
$0.13 \frac{A}{W}$	$410 nm$
$0.12 \frac{A}{W}$	$400 nm$
$0.11 \frac{A}{W}$	$390 nm$
$0.10 \frac{A}{W}$	$380 nm$
$0.098 \frac{A}{W}$	$370 nm$
$0.095 \frac{A}{W}$	$360 nm$
$0.090 \frac{A}{W}$	$350 nm$
$0.085 \frac{A}{W}$	$340 nm$
$0.078 \frac{A}{W}$	$330 nm$
$0.075 \frac{A}{W}$	$320 nm$
$0.068 \frac{A}{W}$	$310 nm$
$0.060 \frac{A}{W}$	$300 nm$
$0.055 \frac{A}{W}$	$290 nm$
$0.048 \frac{A}{W}$	$280 nm$
$0.043 \frac{A}{W}$	$280 nm$
$0.042 \frac{A}{W}$	$270 nm$
$0.033 \frac{A}{W}$	$260 nm$
$0.025 \frac{A}{W}$	$250 nm$
$0.018 \frac{A}{W}$	$240 nm$
$0.009 \frac{A}{W}$	$230 nm$
$0.006 \frac{A}{W}$	$220 nm$
$0.004 \frac{A}{W}$	$210 nm$
$0.002 \frac{A}{W}$	$200 nm$

Tabla (2.0). Tabla de datos de la respuesta del fotodiodo en función de la longitud de onda.

Análisis para obtener los resultados correspondientes al diseño.

Si vemos al OPA como un amplificador ideal y consideramos la impedancia de entrada infinita entonces las corrientes son iguales a cero. [Referencia 10]

Entonces, retomando lo que se mencionó anteriormente como “Polarización del Fotodiodo”; para el propósito de polarizar al fotodiodo, las entradas del operacional actúan como un corto circuito; se puede ver como $RL = 0$ en los circuitos de polarización (“Polarización del Fotodiodo”), lo que mantiene a la respuesta del fotodiodo siempre lineal para cualquier nivel de intensidad luminosa de entrada.

La photocorriente fluye por la resistencia de realimentación R_f , que está conectada entre la salida y la entrada del amplificador.

El voltaje de salida es igual al voltaje generado en la resistencia de realimentación R_f , por lo que, $V_{OUT} = IR_f$.

El hecho de que las entradas del operacional actúen como corto circuito al polarizar el fotodiodo, hace que se tenga la mejor linealidad y que el rango dinámico sea el mejor posible, esto es debido a las propiedades del operacional, como se dijo anteriormente, se puede considerar que las terminales de entrada no consumen corriente, por lo que la photocorriente pasa directamente por la resistencia de realimentación.

La photocorriente es convertida directamente en un voltaje proporcional a la resistencia de realimentación, esto es, es completamente lineal la relación entre la photocorriente y el voltaje de salida.

Así, el voltaje de salida está limitado sólo por el máximo voltaje del operacional.

Como se aplica prácticamente 0 V entre las terminales del fotodiodo, entonces la corriente I es igual a la photocorriente, $I = i_\lambda$, haciendo $Vd = 0$.

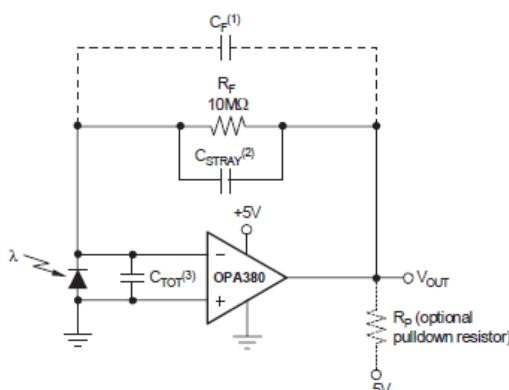


Figura (36). Configuración típica del amplificador de transimpedancia.

Del análisis de las diferentes alternativas se puede ver que esta última es la mejor opción dado que su respuesta es completamente lineal, se elimina la corriente oscura, tiene menor ruido y es la más adecuada para la siguiente etapa del fotómetro que es un convertidor analógico-digital. [Referencia 10]

Debido a que el voltaje de salida varía uniformemente desde los 0 V, y se puede adecuar para que su valor máximo sea de 5 V, los requeridos en el convertidor A/D utilizado.

Este circuito es la mejor opción para el medidor de UV ya que tiene la mejor linealidad, como se dijo anteriormente, el nivel de salida sólo está limitado por el nivel de tensión de alimentación del operacional. Y además la salida es directamente proporcional a la intensidad luminosa incidente.

Retomando el voltaje de salida del operacional, para ponerlo en función de la intensidad luminosa incidente:

$$V_{OUT} = I (Rf) \quad (1.8.1)$$

Pero como

$$I = i_\lambda \quad (1.8.2)$$

Y además

$$i_\lambda = P_{in}R_\lambda \quad (1.8.3)$$

Se obtiene que

$$V_{OUT} = P_{in}R_\lambda Rf \quad (1.8.4)$$

Para que este circuito se pueda acoplar correctamente con la siguiente etapa, la cual consiste en un convertidor analógico digital, es necesario que la salida del operacional esté en el intervalo de entrada del convertidor A/D para no saturarlo como ya antes se mencionó.

Esto es, el convertidor A/D que se utiliza tiene un rango de entrada de 0-5 V, por lo que la salida del circuito de amplificación debe de estar limitado en el mismo intervalo.

Para el primer punto, de la curva de respuesta del fotodiodo, con una $\lambda = 440nm$, y una $i_\lambda = 1.55\mu A$ de la hoja de características tenemos que para encontrar una resistencia de retroalimentación Rf tenemos que de la ecuación (1.8.1):

$$Rf = \frac{V_{OUTmax}}{i_{\lambda max}} \quad (1.8.5)$$

Y sustituyendo datos en la ecuación anterior

$$Rf = \frac{V_{OUTmax}}{i_{\lambda max}} = \frac{5V}{1.55\mu A} = 3.225M\Omega \quad (1.8.6)$$

Ajustando la resistencia a un valor que corresponda a un rango más amplio de valores para la potencia incidente $Rf = 5M\Omega$.

Se opta por estos cálculos, ya que se desconoce la potencia de cualquier fuente a la cual se desee realizar una medición con el instrumento.

A la configuración mencionada del amplificador se le agregó un capacitor entre la salida y la entrada del operacional con la finalidad de evitar que el circuito oscile a altas frecuencias por lo que realiza la función de un filtro pasa bajas.

Programación del Microcontrolador.

La parte de procesamiento de la señal es una de las etapas más importantes del medidor de UV, para esto se implementó el siguiente código en C (Anexo para el PIC16F4550. [Referencia 12]

Mediante el microcontrolador se realiza el cálculo de la intensidad luminosa a partir del voltaje de salida del circuito de amplificación, de la respuesta a determinada longitud de onda y de la resistencia de realimentación.

Para realizar el cálculo de la intensidad incidente P_{in} , se despejó esta variable de la ecuación (1.8.4) quedando como lo muestra la ecuación (1.8.7).

$$P_{in} = \frac{V_{OUT}}{R_\lambda R_f} \quad (1.8.7)$$

Donde:

- V_{out} es voltaje de salida del operacional.
- R_λ es la respuesta a determinada longitud de onda.
- R_f es la resistencia de realimentación.

Los valores de R_λ y R_f son conocidos, dependiendo de la longitud de onda seleccionada y la escala, respectivamente.

El valor de V_{out} es el voltaje de salida del operacional.

Entonces, la función del microcontrolador es convertir la señal analógica V_{out} que proviene del operacional, a un valor digital con su convertidor A/D interno; realizar las operaciones necesarias para determinar la Pin correspondiente a la luz incidente en el sensor, de acuerdo a la longitud de onda y a la escala seleccionada por el usuario; también debe desplegar este valor en un display LCD.

Convertidor analógico digital.

El primer proceso a realizar en el microcontrolador es la conversión de la salida analógica del operacional V_{out} , que varía entre 0 V y 5 V, a una representación binaria de 10 bits. [Referencia 12]

La finalidad de esto es que se puedan realizar las operaciones necesarias de manera digital con esta señal y de esta forma poder obtener un valor de la intensidad luminosa Pin a partir de V_{out} proveniente del amplificador de transimpedancia.

Para realizar la conversión A/D el PIC necesita un voltaje de referencia, V_{ref} , el cual se puede tomar de la misma fuente de alimentación, esto es $V_{dd} = 5\text{ V}$.

Si esto es así, entonces considerando que el convertidor A/D es de 10 bits, y el voltaje de referencia es la misma fuente se puede calcular la resolución con la fórmula:

$$V_{min} = \frac{V_{ref}}{10^N - 1} = \frac{5}{2^{10} - 1} = 4.8mV \quad (1.8.8)$$

Donde N es el número de bits del convertidor A/D.

Esto quiere decir que el voltaje mínimo que se puede representar con el convertidor de 10 bits es de 4.8 mV. El primer nivel (0000000000) representa 0 V, el segundo (0000000001) 4.8 mV y así sucesivamente hasta llegar a los (1111111111) 5 V.

Entonces, para calcular el valor del voltaje en la salida del operacional, V_{out} , a partir de estos valores binarios hay que hacer:

$$V_{out'} = \frac{V_{ref}V_{bin}}{2^{10} - 1} = \frac{V_{bin}5}{1023} \quad (1.8.9)$$

$V_{out'}$ es el valor calculado de V_{out} pero ya digitalizado.

Donde V_{bin} es la representación binaria que el convertidor A/D hace de V_{out} o lo que es lo mismo, es el resultado de la conversión A/D. V_{bin} está en el rango de 0000000000 a 1111111111 (0-1023 en sistema decimal).

Cálculo de la Intensidad Luminosa en el Microcontrolador.

Tomando en cuenta las consideraciones vistas en los apartados anteriores, se puede obtener el valor de Pin realizando las operaciones mostradas en la ecuación (1.9.0) por medio del PIC. [Referencia 12]

Combinando las ecuaciones (1.8.7) y (1.8.9) se puede reescribir el valor de Pin como se muestra en la ecuación (1.9.0)

$$P_{in} = \frac{V_{OUT}}{R_\lambda Rf} = V_{out'} = \frac{V_{ref} V_{bin}}{(2^{10} - 1)(R_\lambda Rf)} = \frac{V_{bin} 5}{1023(R_\lambda Rf)} \quad (1.9.0)$$

Para hacer el proceso más sencillo, se puede definir una constante k

$$k = \frac{V_{ref}}{R_\lambda Rf} \quad (1.9.1)$$

Entonces la ecuación (1.9.0) toma la forma de la ecuación (1.9.2)

$$P_{in} = \frac{V_{bin} k}{1023} \quad (1.9.2)$$

Simulación del circuito con amplificador operacional.

El circuito esquemático de la (figura 37), es la representación más formal de lo que equivale el circuito primario que consiste de una pequeña fuente de voltaje controlada a 5 volts a través de un regulador, está dotada de sus etapas de filtrado y una salida de 5vcd. [Referencia 12]

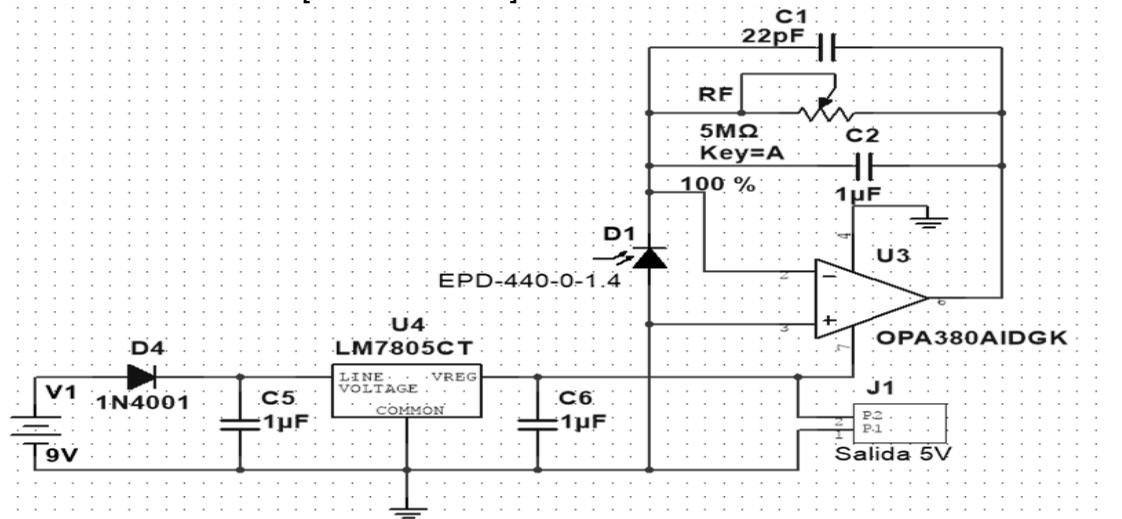


Figura (37). Diagrama esquemático de las partes principales del medidor de radiación.

La pequeña fuente de corriente representa al fotodiodo en operación, el cual suministra una pequeña alimentación a la entrada del amplificador, la cual lo hace interactuar a través de su resistencia de retro, y entregar a la salida un voltaje no mayor a 5VCD el cual está limitado a ese valor ya que este es el potencial al que esta polarizado el amplificador.

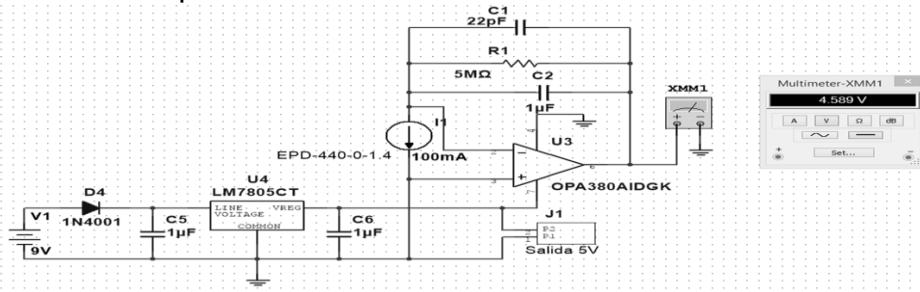


Figura (38). Representación esquemática del circuito implementado como amplificador de transimpedancia.

En la figura (39) se muestra el circuito completo en el cual se puede observar todos los componentes que integran al circuito. [Referencia 12].

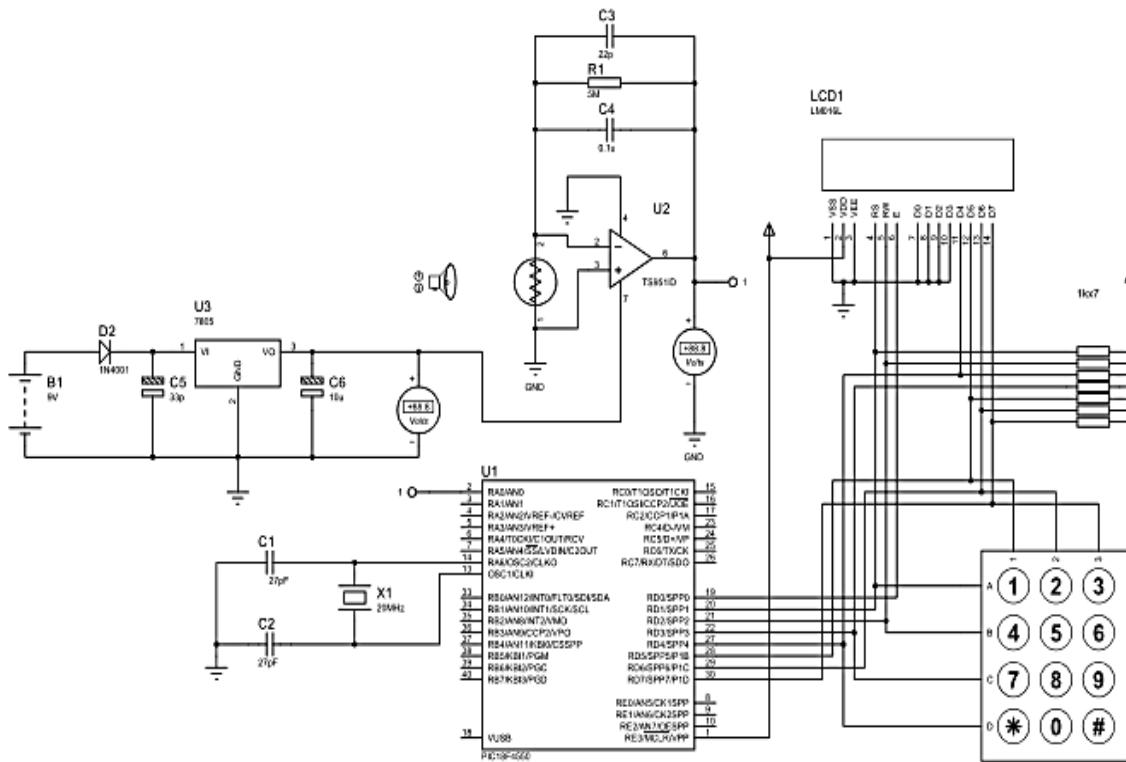


Figura (39). Representación esquemática del circuito implementado como amplificador de transimpedancia y sistema con microcontrolador PIC18F4550 y despliegue de datos.

3.1.3 Diseño y montaje en circuito impreso.

En la siguiente figura se muestra el circuito elaborado para su impresión en el software de diseño ALTIUM DESIGNER, este es el más importante en el cual se puede observar el amplificador de transimpedancia, con su fuente diseñada e introducida en el mismo circuito impreso. [Referencia 12]

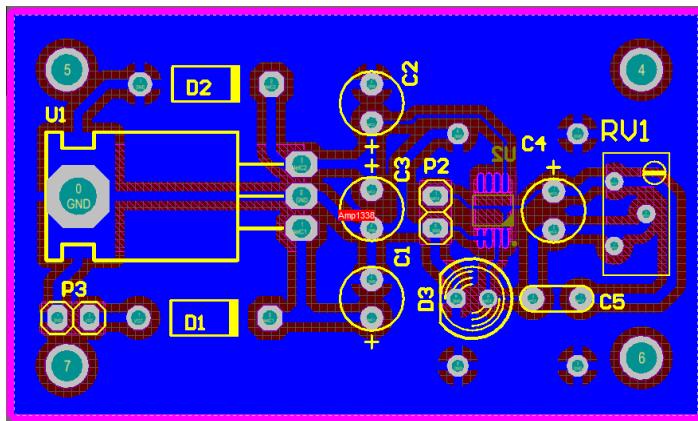


Figura (40). Representación en PCB del circuito implementado como amplificador de transimpedancia y fuente de alimentación.

En la siguiente figura se muestra el circuito secundario pero no menos importante en el cual se puede observar el microcontrolador diseñado en PCB con la entrada de señal, el teclado matricial 4x4 y el display LCD son añadidos a este circuito a través de arneses o buses, lo que lo hace más práctico a la hora de ensamblar en el gabinete predispuesto para su montaje.

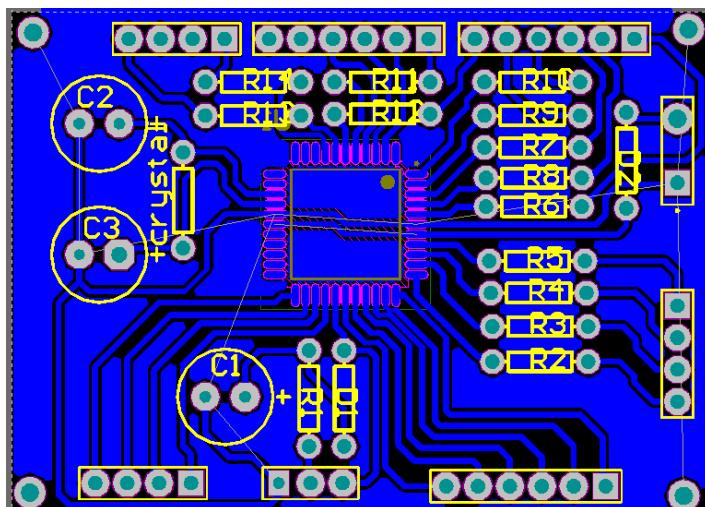


Figura (41). Representación en PCB del circuito implementado como Microcontrolador con los buses de acceso a los puertos del microcontrolador.

3.1.4 Estructura y programación.

- Mediante el siguiente código de programación obtenemos los resultados adecuados a través de los cuales podemos manipular el instrumento.

Código en C.

```
#include <18F4550.h>
#device adc=10 //RESOLUCION 10-BITS
#fuses HS,NOMCLR,NOPROTECT,NOWDT,NOLVP,CPUDIV1
#use delay (clock = 20000000)
#include <lcd.c>
#include <kbd.c>
#include <internal_eeprom.c>
#include <stdlib.h>

//VARIABLES/
int32 Rf=5000000;
int Vrf=5;
float lectura;
char data[3];
int i=0;
char k;
int16 numero;
float32 pot;
//Funciones
Void tecla (void);

void main()
{
lcd_init();
kbd_init();
setup_adc_ports(AN0_TO_AN3|vss_vdd); //PUERTOS UTILIZADOS PARA EL
ADC Y LA LECTURA DEL VOLTAJE (VALOR ENTRE 0-5V (vss_vdd))
setUP_adcadc_clock_internal); //SE UTILIZA EL RELOJ INTERNO A UNA
FREC DE 20MHZ.
While(TRUE)
{
tecla(); //Regresa dato teclado lñada
numero = ( ( (100)*((long) data[0]-48 ) ) + ( (10)*((long) data[1]-48 ) ) + ((long) data[2]-48 ) ); //CONVIERTE VALOR ENTERO
set_adc_channel(0);
lectura=read_adc(); //GUARDA EL VALOR QUE SE LEE EN EL ADC.
Delay_us(500); //tiempo de espera para cambiar a otro canal
printf(lcd_putc,"fLamda=%ldnm\n",numero);
if(numero == 200){
```

```

pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.002*Rf);
printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);
//lcd_gotoxy(15,2);
//printf(lcd_putc,"uw");
delay_ms(5000);
}
if(numero == 210)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.004*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}
if(numero == 220)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.006*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}
if(numero == 230)
{
    pot=(7*Vrf)/(1023*0.009*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}
if(numero == 240)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.018*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}
if(numero == 250)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.025*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}
if(numero == 260)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.033*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}

```

```

}

if(numero == 270)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.042*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}

if(numero == 280)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.048*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}

if(numero == 290)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.055*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}

if(numero == 300)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.060*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}

if(numero == 310)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.068*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}

if(numero == 320)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.075*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}

if(numero == 330)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.078*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);
}

```

```

        delay_ms(5000);
    }
    if(numero == 340)
    {
        pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.085*Rf);
        printf(lcd_putc," Pot=%e",pot);

        delay_ms(5000);
    }
    if(numero == 350)
    {
        pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.090*Rf);
        printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

        delay_ms(5000);
    }
    if(numero == 360)
    {
        pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.095*Rf);
        printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

        delay_ms(5000);
    }
    if(numero == 370)
    {
        pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.098*Rf);
        printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

        delay_ms(5000);
    }
    if(numero == 380)
    {
        pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.10*Rf);
        printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

        delay_ms(5000);
    }
    if(numero == 390)
    {
        pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.11*Rf);
        printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

        delay_ms(5000);
    }
    if(numero == 400)
    {

```

```

pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.12*Rf);
printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

delay_ms(5000);
}

if(numero == 410)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.13*Rf);

    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}
if(numero == 420)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.14*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}
if(numero == 430)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.15*Rf);
    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);

    delay_ms(5000);
}
if(numero == 440)
{
    pot=(lectura*Vrf)/(1023*0.13*Rf);

    printf(lcd_putc,"Pot=%e",pot);
    delay_ms(5000);
}}
Void tecla (void)
{
printf(lcd_putc,"fINGRESA Lambda\n");
do {
    k=kbd_getc();
    if(k != 0){
        data[i]=k;
        if(i != 3)
            {printf(lcd_putc,"%c",k);}
        delay_ms(50);
        i++; } }
while(k != '*');
i=0; }

```

El programa mostrado a groso modo tiene la siguiente estructura, a la cual se hace referencia en el diagrama de flujo referenciado. [Referencia 12]

- Tiene una rutina de ingreso de datos a través del teclado matricial 4X4 (mostrado en el capítulo 2).
- Los datos obtenidos, o ingresados a través del teclado son validados para posteriormente llevar a cabo una comparación.
- El voltaje de entrada al micro es leído por el ADC y convertido a valores binarios.
- Se realiza una comparación si la longitud de onda introducida es la que se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el programador, así a través de una condicional, de ser el valor correcto se lleva a cabo la ecuación de potencia incidente.
- De no introducir de manera correcta la longitud de onda regresa al inicio del menú para volver a introducir la longitud de onda de manera correcta.
- Si es correcta la longitud de onda se muestra en el display y se mantiene a través de un ciclo, hasta que los niveles decaigan a cero (se retire la fuente).
- Reinicia el modo menú volviendo a solicitar el introducir la longitud de onda.

3.1.5 Pruebas de funcionamiento del Prototipo.

Ensamblado final del prototipo.

Figura (42). Gabinete soporte circuitos



Figura (43). Gabinete, soporte display

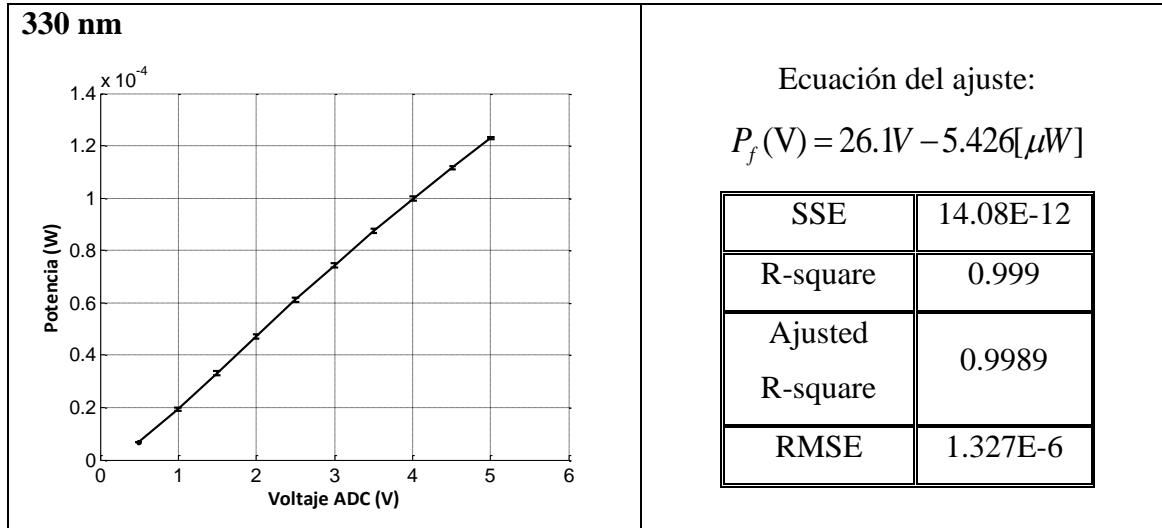


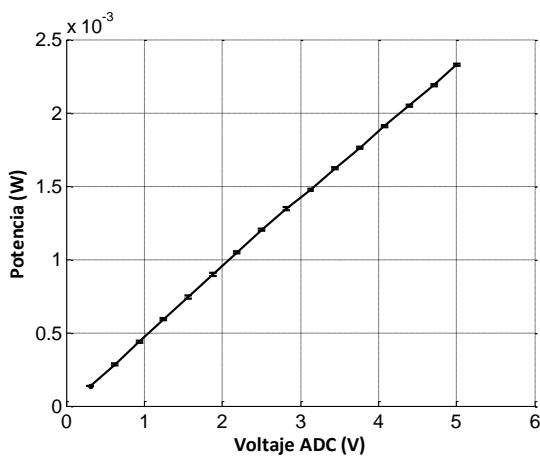


Figura (44). Ensamble final del instrumento.

Aquí se muestra el armado final del prototipo, los materiales que fueron utilizados de uso comercial, además de su tamaño, es muy compacto y no tiene algún elemento que lo haga de uso delicado, únicamente cuando tiene conectado el sensor es cuando deben de extremarse precauciones, el fotodiodo es muy sensible y puede sufrir algún daño por golpes o la mala utilización de instrumento.

3.2 Calibración.

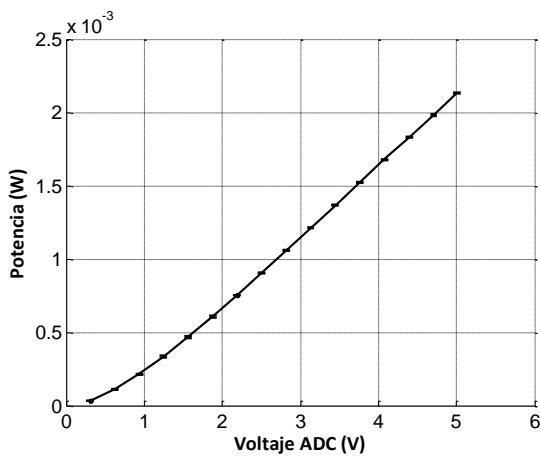


365 nm

Ecuación del ajuste:

$$P_f(V) = (466.3V + 9.109)[\mu W]$$

SSE	2.809E-9
R-square	0.9996
Ajusted R-square	0.9996
RMSE	14.16E-6

385 nm

Ecuación del ajuste:

$$P_f(V) = (460.8V - 213.7)[\mu W]$$

SSE	22.86E-9
R-square	0.9968
Ajusted R-square	0.9966
RMSE	40.41E-6

Tabla (2.1) Datos técnicos de calibración a través de una Termopila en un módulo de acople con led y fibra óptica.

- Los datos mostrados en la tabla (2.2) fueron obtenidos a través de la calibración por medio de una termopila para este determinado equipo.
- Basandonos en los datos de las tablas se toman las referencias para los valores mostrados en el display.

La calibración se efectúa a través de la longitud de onda de 330nm.

Ecuación del ajuste:

$$P_f(V) = 26.1V - 5.426[\mu W] \quad (1.9.3)$$

Aquí podemos ver la ecuación de ajuste utilizada en la calibración del módulo con el que se trabajaron los valores establecidos en las tablas.

- Se ajusta la programación en el microcontrolador según sea el caso para manipular la respuesta del sensor, o la longitud de onda, según sea el caso.
- Se realizan mediciones constantemente, comprando los parámetros

A continuación se presentan las ecuaciones con las cuales se encuentra la correspondencia entre los valores correspondientes al módulo de leds acoplados con fibra óptica.

- Para la calibración a 330nm, se obtienen los siguientes valores.

Del código de programación (pag(66-71), introducimos el dato lectura en la ecuación de la potencia incidente (ec. 1.9.0), para poder encontrar el dato lectura, que conocemos la potencia que se está manejando en la fuente Modulo de leds acoplados con fibra.

$$P_{in} = \frac{V_{OUT}}{R_\lambda Rf} \Rightarrow \frac{\text{lectura } V_{ref}}{(2^{10} - 1)(R_\lambda Rf)} \quad (1.9.4)$$

Con $\lambda=330\text{nm}$; obteniendo lectura de la ecuación.

$$37.639 \times 10^{-6} = \frac{\text{lectura } V_{ref}}{(2^{10} - 1)(R_\lambda Rf)} = \frac{\text{lectura (5)}}{(1023)((0.078)(5 \times 10^6))} \quad (1.9.5)$$

$$\text{lectura} = 3003.366$$

Lectura real: Con $\lambda=330\text{nm}$; obteniendo lectura de la ecuación.

$$1.5038 \times 10^{-6} = \frac{\text{lectura } V_{ref}}{(2^{10} - 1)(R_\lambda Rf)} = \frac{\text{lectura (5)}}{(1023)((0.078)(5 \times 10^6))}; \quad (1.9.6)$$

$$\text{lectura} = 11.99942$$

Datos obtenidos.

$$1595 \Rightarrow 2937.92 \qquad \qquad \qquad 1342 \Rightarrow (5)$$

$\lambda=330\text{nm}$	(ADC)	PLED.	Medidor UV	
1.09		0.20×10^{-4}	3.6814×10^{-5}	1.6814×10^{-5}
2.09		0.50×10^{-4}	8.48×10^{-5}	3.98×10^{-5}
3.07		0.78×10^{-4}	1.38×10^{-5}	6×10^{-5}

Tabla (2.2) Muestras de las primeras mediciones tomadas con el medidor.

$$0.2 \times 10^{-4} = \frac{\text{lectura } V_{ref}}{(2^{10} - 1)(R_\lambda Rf)} = \frac{\text{lectura (5)}}{(1023)((0.078)(5 \times 10^6))}; \quad (1.9.7)$$

$$\text{lectura} = 1595.88$$

$$3.6819 \times 10^{-5} = \frac{\text{lectura } V_{ref}}{(2^{10} - 1)(R_\lambda Rf)} = \frac{\text{lectura (5)}}{(1023)((0.078)(5 \times 10^6))}; \quad (1.9.8)$$

$$\text{lectura} = 11.7517$$

$\lambda = 330\text{nm}$	Medidor UV
1.09	2.07×10^{-5}
2.09	4.47×10^{-5}
3.01	6.71×10^{-5}
.4171	8.03×10^{-6}
1.59	4.40×10^{-5}
2.53	7.57×10^{-5}
3.55	1.09×10^{-4}
3.99	1.21×10^{-4}

Tabla (2.3) Muestras de las mediciones tomadas con el medidor ya calibrado.

- A continuación se muestran los gráficos obtenidos con los resultados de las mediciones, tomando en cuenta el patrón de calibración correspondiente a $\lambda=330\text{nm}$.
- Cabe señalar que este valor de $\lambda=330\text{nm}$ fue escogido como patrón para el medidor, ya que la fuente de UV (Modulo de led acoplado con fibra óptica), tiene longitudes de onda más dispersas en rango y valor.
- Es necesario destacar que el medidor de radiación toma muestras a través de intervalos de 10 dígitos entre cada longitud de onda.

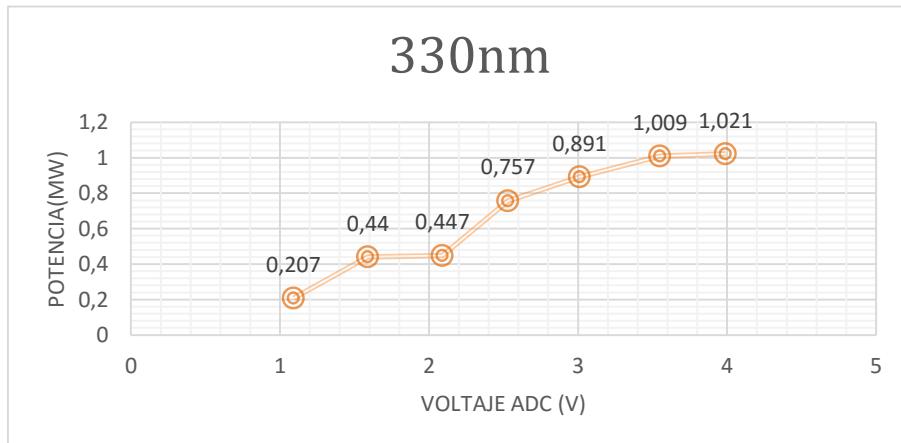


Figura (45). Grafica de la respuesta del medidor de radiación (linealidad).

- Una muestra de la toma de mediciones correcta se muestra en la siguiente gráfica y su comportamiento, ya que podemos ver, como inicia la recta con una forma lineal y ocurre una secuencia continua de puntos cuando se realiza una medición a 1.5V y 0.3mW.
- Esto es debido a que al encontrarnos próximos al punto máximo de la curva de respuesta del fotodiodo, comienza a producirse una saturación en el instrumento de medición, ya que mantiene una ganancia constante en el circuito de transimpedancia.

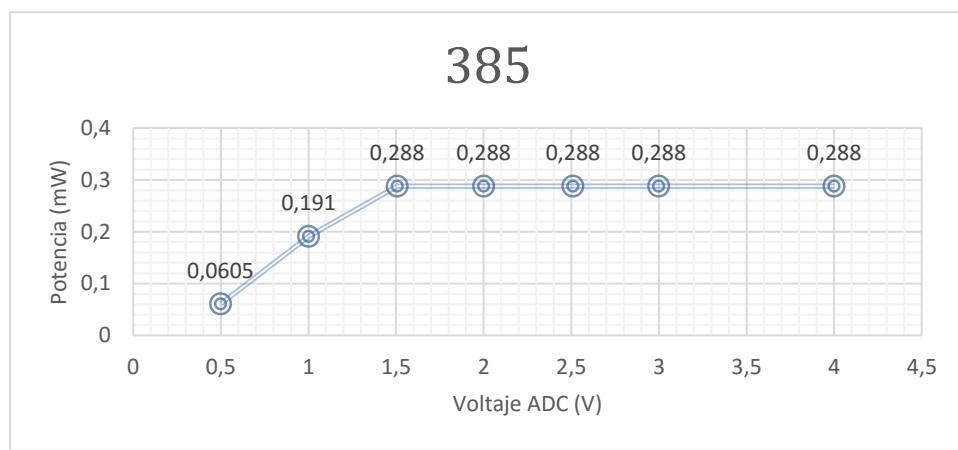


Figura (46). Grafica de la respuesta del medidor de radiación (Medición Saturada).

- En las siguientes figuras se puede observar los equipos utilizados para calibrar el medidor de radiación UV.



Figura (47 ,48). Equipo Modulo de leds con acoplamiento para fibra y demás equipo.

- En la siguiente figura (48) se muestra la interfaz grafica por medio de la cual se controlaba al sistema de leds, que en este caso se ocupó el de $\lambda = 330\text{nm}$ para la calibración, con los valores de potencia predispuestos.

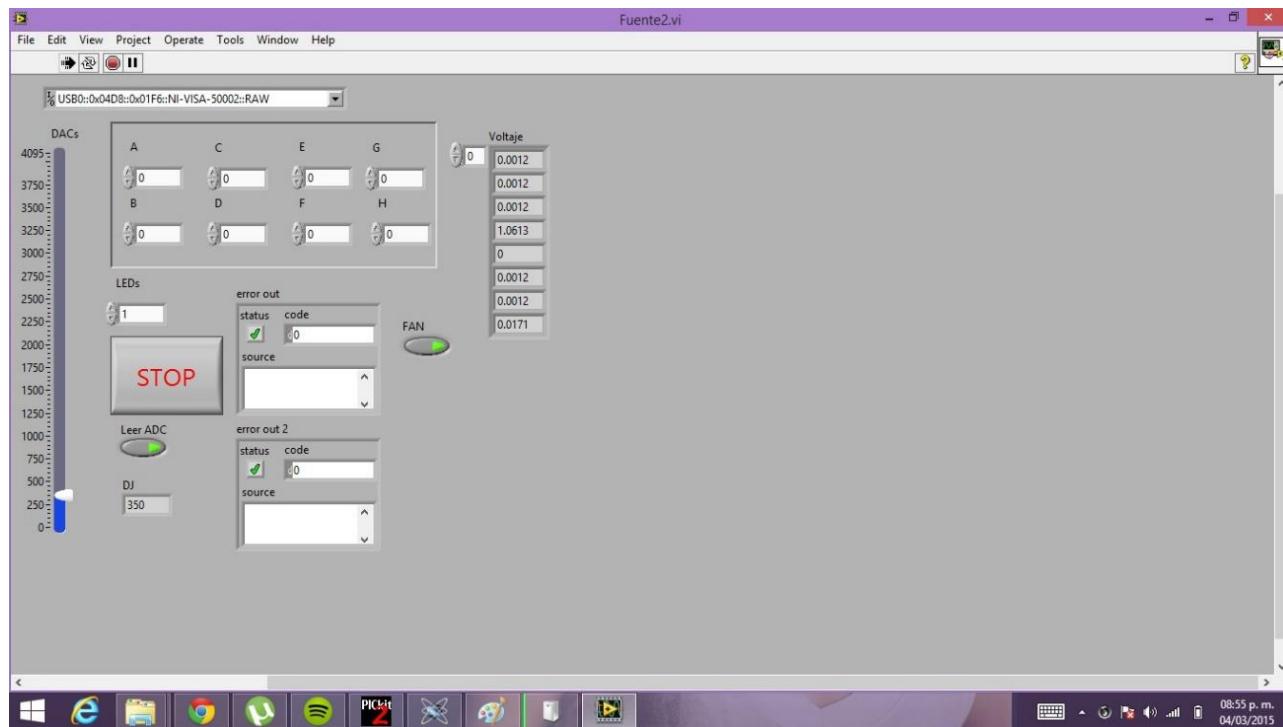


Figura (49). Interfaz grafica para manipular el Modulo de acoplamiento de Leds con fibra óptica

3.2.1 Normatividad.

Los sensores para medir la radiación, en su mayoría, no son absolutos y deben calibrarse con un instrumento absoluto. En este caso, la exactitud del valor medido depende de la precisión del instrumento y del procedimiento de calibración.

La precisión del instrumento está determinada por:

- a) La resolución, es decir, la variación más pequeña de la magnitud de radiación que puede detectar el instrumento.
- b) Las variaciones de la sensibilidad debidas a alteraciones de las variables ambientales.
- c) La no linealidad de la respuesta, es decir, cambios de sensibilidad asociados a variaciones de irradiancia.
- d) La desviación de la respuesta espectral respecto a la postulada.

La calibración se ejecuta bajo exposición de luz ultravioleta y se compara contra un medidor de luz UV que se usa como estándar.

Capítulo 4. Viabilidad económica.

Este capítulo hace referencia a los distintos equipos que cumplen con las características más adecuadas para efectuar mediciones de radiación UV en base a los tres tipos mencionados con anterioridad (UVA, UVB, UBC), aunque la mayoría de los equipos más comerciales en el mercado, a los cuales tienen acceso la mayoría de las personas, y por cuestiones comerciales, son aquellos que solo realizan mediciones de radiación ultravioleta del tipo A (UVA).

Aunque algunos de más capacidad también están acondicionados para medir radiación ultravioleta del tipo C (UVC), pero en general el común de las personas solo requiere hacer mediciones básicas por alguna necesidad que así lo requiera.

4.1 Información de mercado.

En base a los diferentes equipos que hay disponibles en el mercado, se encontró que todos tienen de manera general un mismo principio de funcionamiento.

A continuación se hace referencia a los dispositivos más comerciales.

Sensores disponibles en el mercado.

Sensores tipo PLC UV / VIS:

PLC UV / VIS (Figura 45) sirven como cabezales para la medición con alto grado de precisión de la irradiación UV y luminancias en sistemas controlados por un sistema de control lógico programable (PLC).

El rango espectral, rango de medida, tensión de trabajo y la señal se pueden elegir de acuerdo a la tarea que se requiere implementar y al tipo de PLC que se utilizará.



Figura (50). Sensor PLC UV/VIS.

OKI Semiconductor ML8511-00FC:

El Sensor ML8511 (Figura 46) es un sensor que mide la radiación UV, este sensor se puede utilizar tanto para la adquisición de la intensidad UV en interiores así como para exteriores.

Este sensor está equipado con un amplificador interno, que convierte foto-corriente a voltaje en función de la intensidad UV.

Sus características generales Son: Sensor óptico para la medición de rayos UV-A y UV-B con una salida analógica, dispositivo pequeño y delgado para su montaje en superficie.

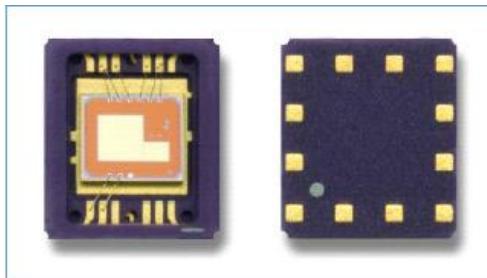


Figura (51). Sensor PLC UV/VIS.

Sensor Ultravioleta SU-100:

El SU-100 es un sensor ultravioleta que mide radiación UV entre 250 y 400nm, cuenta con una cubierta sólida para evitar la acumulación de agua y la condensación interna en ambientes húmedos.

El sensor es sensible a los rayos UV-B, pero también puede incluir la UV-A para proporcionar una medida total de la radiación UV.

Este sensor es especialmente útil para la determinación de la transmitancia de rayos UV en plásticos transparentes y vidrio.

A continuación se muestran sus características técnicas tomadas directamente de la hoja de datos del fabricante (Figura 47).

Especificaciones	Tiempo de respuesta
Precisión Absoluta	1 ms
+ - 10 %	
Repetitividad	Temperatura de Operación
+ - 1%	-25 hasta 55 °C
Poder de entrada	Peso
Ninguno	75 g

Figura (52). Características del sensor. SU-100.

4.2 Mercado de consumo.

Instrumentos de medición UV con más seguimiento en el mercado.

Medidor de radiación (Radiómetro) UVA - UVB PCE-UV34

El medidor de radiación UVA - UVB PCE-UV34 (Figura 48) es un aparato para la medición de la radiación ultravioleta. Este medidor detecta longitudes de onda de entre 290 a 390 nm.

Entre las aplicaciones de este tipo de sensores se encuentran las cabinas de bronceado para detectar cuándo los niveles de radiación UVA pueden comenzar a deteriorar la salud de los usuarios.

También se utiliza en sistemas de esterilización, compensación fotoquímica en laboratorios de virología o en la investigación del ADN.

Este instrumento es de fácil uso debido a que cuenta con detector externo.



Figura (53). Medidor de Radiación PCE-UV34.

MEDIDOR DE RADIACIÓN TPM-UV-340B

El Radiómetro TP-UV-340B (Figura 49) utiliza un sensor exclusivo que filtra la radiación ultravioleta mostrando solamente la UV-A y UV-B.

Puede ser utilizado para monitoreo de radiación en diferentes procesos tales como: esterilización por UV, borrado de UV EPROM, curación de enlaces, adhesivos y recubrimientos.



Figura (54). Radiómetro TMP-UV-340B

Medidor de radiación (Radiómetro UV) Magnaflux

El radiómetro UV Magnaflux (Figura 50) es capaz de medir rayos UV-A con un diseño compacto y robusto, fácil de operar. El medidor de UV multifuncional ha demostrado ser muy eficaz para medir y calibrar las fuentes de luz ultravioleta utilizada en partículas magnéticas fluorescente y líquidos penetrantes.

El sistema está integrado por; un sensor remoto desmontable, pantalla digital LCD de alto contraste, batería de 9V y estuche protector.



Figura (55). Radiómetro UV Magnaflux.

Medidor de Radiación Ultravioleta MED-UV-01

El medidor de luz digital (Figura 51) opera dentro de los límites de 220 a 400 nm (UV-A /UV-B). Cuenta con una pantalla dual de cristal líquido de 4 dígitos con iluminación de fondo, receptáculo para instalación trípode y posee certificado de calibración.

La capacidad de iluminación del medidor permite al usuario realizar mediciones cuantitativas precisas de radiación ultravioleta: requerimientos de radiometría y laboratorio, curado UV en impresión offset, intensidad y envejecimiento de lámparas UV, control de procesos industriales, fabricación de semiconductores, intensidad de luz UV de la luz solar para evitar daños a la piel, control ambiental y de esterilización.



Figura (56). Medidor de Radiación Ultravioleta MED-UV-01

Radiómetro EPPLEY

El Radiómetro EPPLEY (Figura 52) es un instrumento que fue desarrollado para la medición de la radiación solar UV.

Las principales características de diseño son que es de fácil operación y se combina con su óptimo desempeño que se compara con los piranómetros meteorológicos destinados a registro de la radiación total de onda corta emitida por el Sol y el cielo sobre una superficie horizontal.

Otra característica importante es que este radiómetro prescinde de métodos sofisticados para amplificar la señal, ya que utiliza potenciómetros.

El radiómetro Eppley UV utiliza un recipiente herméticamente cerrado de selenio y una celda fotoeléctrica, que está protegida por una ventana de cuarzo.

Por estar construido de latón cromado, es ideal para soportar las inclemencias del tiempo así también cuenta con un filtro óptico interno que controla la temperatura manteniéndola a 25 °C, independiente de la temperatura externa, esto elimina las variaciones de la sensibilidad espectral causadas por el cambio de temperaturas.

Los radiómetros se han diseñado para mediciones precisas de la radiación ultravioleta de la atmósfera para tres diferentes rangos espectrales. Todos los modelos miden la radiación UV global

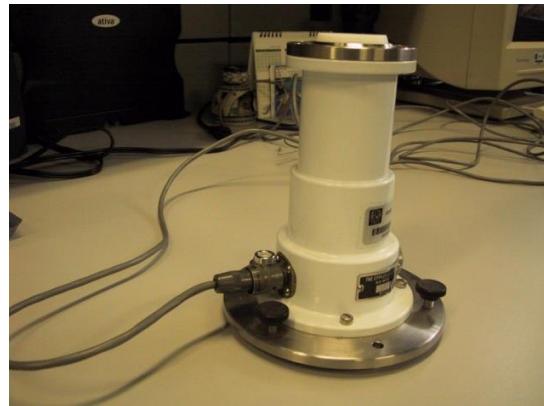


Figura (57). Radiómetro Eppley

4.3 Análisis de costos de producción (prototipo).

Material	Precio en pesos mexicanos
Microcontrolador PIC18F4550	\$ 95.0
Display LCD 16X2	\$ 25.0
Sensor UV	\$ 100
Amplificador Operacional OPA 380	\$ 200.0
Otros	\$ 250.0
Plástico (estuche)	\$ 45.0
TOTAL	\$715

Tabla (2.4). Tabla de datos de los costos que se produjeron por el material requerido para el prototipo.

- Comparado con otros equipos que tienen un costo bastante elevado, este instrumento tiene una buena factibilidad, lo que hace que se tome en cuenta como un proyecto en el cual se piense a futuro para poder introducirlo al mercado de consumo.
- Como se puede observar en la tabla (2.4) este instrumento prácticamente tiene un costo de producción bastante mínimo, cabe señalar que es necesario pensar en estandarizar el instrumento y adecuarlo a las normas de calidad para darle un mejor manejo y presentación.

Mejoras para el proyecto.

- Una de las mejoras más notables para el proyecto, es incluir una fuente de alimentación además de la batería recargable que contiene, esto con la finalidad de poderlo instalar en equipos de radiación UV de aplicaciones médicas.

- Otra de las mejoras es adaptar una sección de resistencias que puedan ser seleccionables para modificar la ganancia del medidor de radiación UV y así evitar que se sature en las mediciones más próximas al punto máximo de la curva de respuesta del fotodiodo.
- Por ultimo una mejora más eficiente seria cambiar el intervalo de longitudes de onda tomando valores para la curva de respuesta de uno en uno, para así tener una mayor precisión en las mediciones e incluir cualquier longitud de onda deseada.

Proyectos a Futuro.

- Implementar un sistema más exacto y de acuerdo con la normativa para su utilización y modo de empleo.

Conclusiones.

A través de la realización de este trabajo, se pone de muestra el conocimiento que a través del tiempo se adquirió con la finalidad de aportar de manera sencilla algo significativo para la satisfacción misma de nosotros los estudiantes.

Hoy en día a pesar de la gran diversidad de aparatos existentes en el mercado que tienen como principal objetivo medir la radiación UV, la implementación de este instrumento es muy viable en cuanto a su capacidad para reflejar mediciones no solo en el espectro de luz visible, si no en un rango de longitudes de onda más propicio para su correcta aplicación, además de poder realizar tareas más complicadas, como la calibración de equipo médico o simplemente medir en un amplio rango de longitudes de onda.

Su bajo costo de producción fue algo que prácticamente brinda un mejor confort en cuanto a la idea de adquirir un instrumento eficiente y además económico.

La construcción de este aparato, además de utilizarlo en aplicaciones muy particulares, como para censar una fuente de radiación UV que involucre parte de la radiación perjudicial para la salud humana.

Uno de los factores que mayor impactaron dentro del desarrollo de este medidor de radiación UV fue la calibración, ya que en todo instrumento es fundamental tener una buena referencia en cuanto a los parámetros en los cuales se está efectuando el software dentro del microcontrolador, esto es de gran importancia para poder efectuar a través de un bloque patrón una buena calibración.

Glosario.-

Radiometría: es el campo de la ciencia y de la ingeniería relacionado con la medición de la energía de radiación electromagnética no coherente.

Longitudes de onda: Distancia real que recorre una onda en un determinado intervalo de tiempo.

Radiación: en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

Reacciones fotoquímicas: ocurre hay absorción de luz causando que una molécula gane la energía de activación necesaria para experimentar cambio.

Espectro: Conjunto de longitudes de onda emitidas o absorbidas por un objeto.

Cámara de ionización: dispositivo usado con dos fines principales: la detección de partículas en el aire (como en un detector) y la detección o medición de la radiación ionizante.

Electrómetro: Se denomina electrómetro a un electroscopio dotado de una escala.

Fotosensores: elemento que detecta la presencia de luz. Y genera una señal eléctrica enviándola a un circuito de control para realizar una tarea.

Fotocátodo: es un dispositivo sensible a la luz formado por una capa de una sustancia metálica como el cesio, sodio o antimonio sobre una base de cuarzo o vidrio y que descarga electrones cuando se expone a cierto nivel de luminosidad.

Efecto fotoeléctrico: es el fenómeno en el que las partículas de luz llamadas fotón, impactan con los electrones de un metal arrancando sus átomos. El electrón se mueve durante el proceso, dado origen a una corriente eléctrica.

Energía cinética: es el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta una velocidad indicada.

Corriente obscura: es una corriente eléctrica relativamente pequeña que fluye a través de dispositivos fotosensibles.

Angulo sólido: es el ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado.

Microcontrolador: Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.

Teclado matricial: Es un simple arreglo de botones conectados en filas y **columnas**, de modo que se pueden leer varios botones con el mínimo número de pines requeridos

Responsividad Fotodiodo: se refiere a la cantidad de electrones que es capaz de generar en relación con los fotones recibidos.

Acrónimos

UV: Ultra Violeta

WHO: World Health Organization

Display: pantalla de cristal líquido

LCD: pantalla de cristal líquido

DNA: deoxyribonucleic acid

Fotoconductivo: Conducción de Fotones

FET: Transistor de efecto campo (Field-Effect Transistor o FET, en inglés).

BJT: Transistor de unión bipolar (del inglés bipolar junction transistor).

PCB: Placa de circuitos impresos (del inglés: Printed Circuit Board, PCB)

PLC: Controlador lógico programable (en inglés Programmable Logic Controller)

Bibliografía.

- [1] Tecnología Ultravioleta, [en línea]. Disponible en la web: www.wordpress.com
- [2] Randy Russell, " Windows to the Universe: Radiation Ultraviolet (UV)". National Earth Science Teachers Association ,2010.
- [3] Larry Godfrey. *Choosing the Detector for your Unique Light Sensing Application.* EG&G Optoelectronics.
- [4] Echarri Prim Luis, "Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente", Libro electrónico [en línea].Disponible en la web:
<http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/00General/IndiceGral.html>
- [5] Häder Donat-Peter J., "Sun protection in man", Elsevire Comprehensive Series in Photosciences, pág. 3, 2001.
- [6] "Las radiaciones ultravioletas y la salud humana", Organización Mundial de la Salud, Nota descriptiva No. 305, 2009.
- [7] 1997Richard S. Quimby. *Photonics and Lasers: An Introduction.* 2006. John Wiley & Sons, Inc. pp. 249-277.
- [8] *Photodiode/Phototransistor Application Circuit. Application Note.* Optoelectronics. 1999 by SHARP Corporation. SMA99017
- [9] Michael Wilson. *Choosing an integrated silicon optical sensor.* 2008. Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Plano, TX. <http://www.taosinc.com>
- [10] Jerald G. Graeme, *Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions.* Mc Graw-Hill. 1996.
- [11] Wilmar Hernandez, Member, IEEE. *Robustness and Noise Voltage Analysis in Two Photometer Circuits.* IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 7, NO. 12, DECEMBER 2007
- [12] Eduardo García Breijo. *Compilador C CCS y Simulador Proteus para Microcontroladores PIC.* Primera Edición: Alfaomega. 2008.
- [13] Quiñones L.A., Almanza R., "Modeling Ultraviolet radiation for the Mexican conditions".ISES Solar World Congress, 2013.
- [14] Roldán Arjona Juan Manuel, "Efectos de la radiación en el organismo", pág. 17, 2010.
- [15] Riveros Reciné Tatiana Dr., "Efectos de la radiación ultravioleta en el ser humano: aspectos clínicos", Comisión de Fotobiología de SOCHDERM Clínica Alemana de Santiago ,2010.

- [16] El amplificador operacional y sus aplicaciones. J.C marchais, Marcombo Boixareu.
- [17] Teoria y diseño de circuitos electrónicos, R. Boylestad, Editorial Pearson.
- [18] *Application Notes*. <http://www.kingfisherfiber.com/Appnotes/A01.htm>
- [19] *AND. Intelligent Alphanumeric*. Application Notes. 1999
- [20] Apogee, Ultraviolet Sensor SU-100, [en línea]. Disponible en la web : www.apogeeinstruments.com
- [21] Solar Light Co., Inc., “A comparison of Spectroradiometers to Radiometers for UV Radiation Measurements”
- [22] OKI SEMICONDUCTOR, UV Sensor ML8511 [en línea]. Disponible en la web : <http://www.oki.com/>

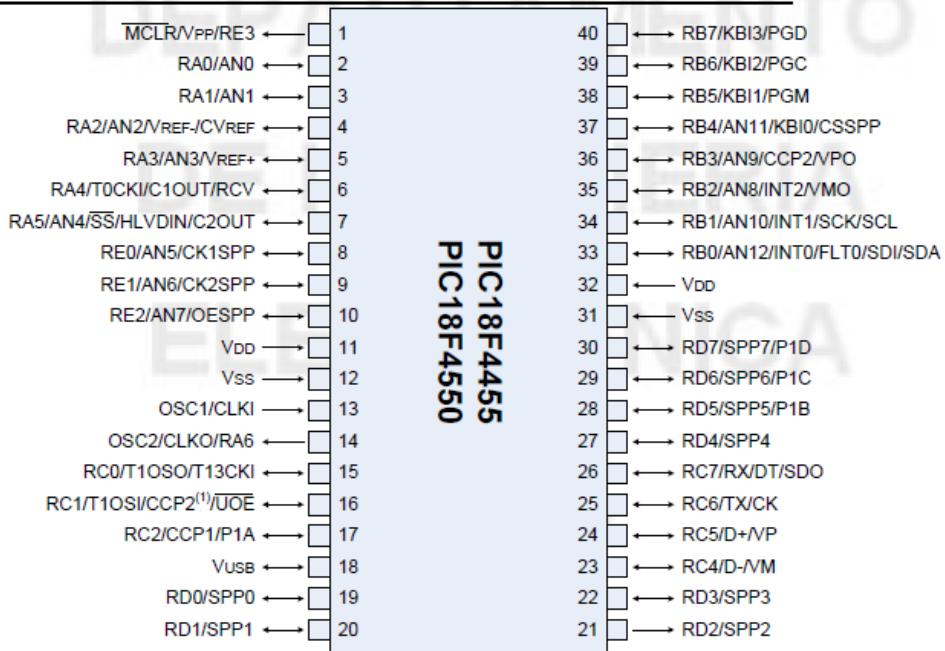
Anexos.

Anexos A. MICROCONTROLADOR.

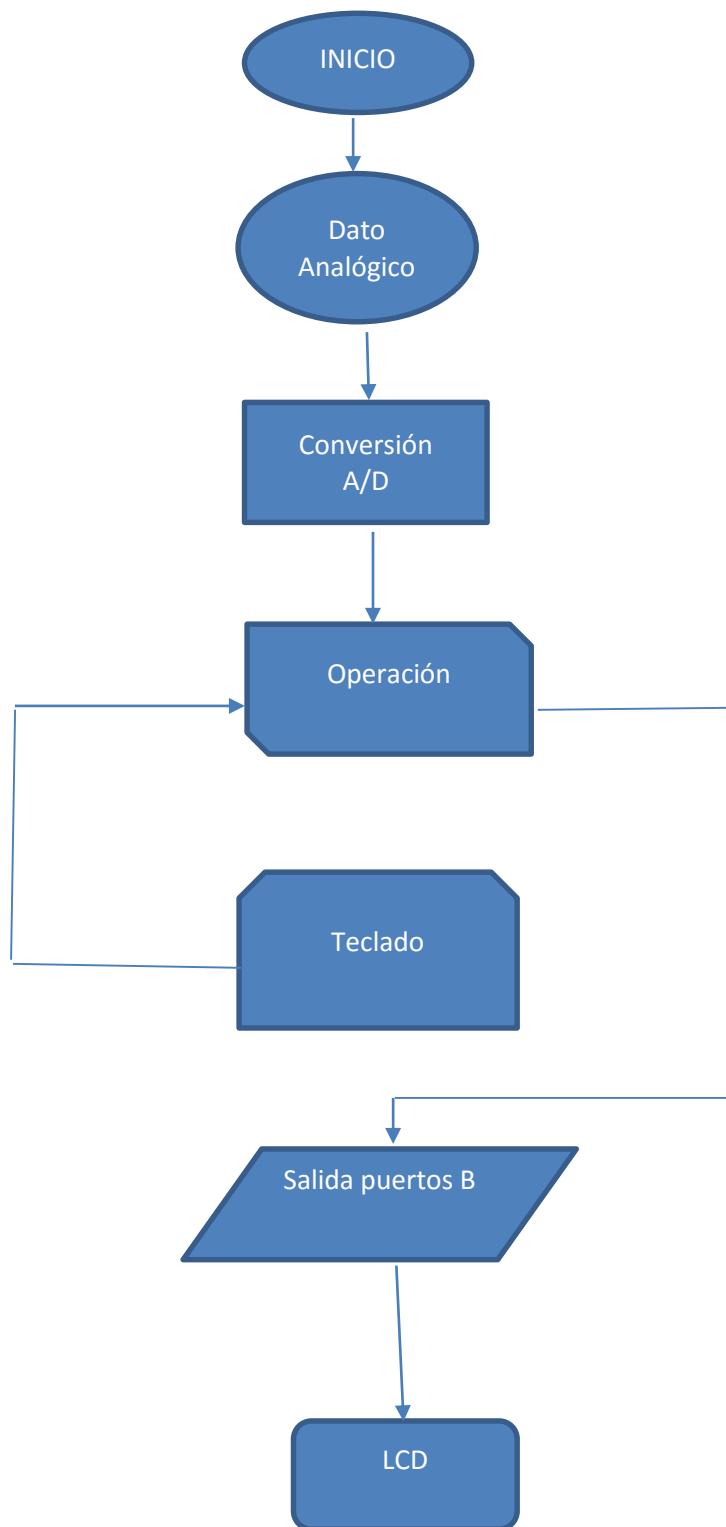
MICROCONTROLADORES PIC18F2455, PIC18F2550, PIC18F4455 y PIC18F4550

CARACTERISTICAS	PIC18F2455	PIC18F2450	PIC18F4455	PIC18F4550
Frecuencia de Operación	Hasta 48MHz	Hasta 48MHz	Hasta 48MHz	Hasta 48MHz
Memoria de Programa (bytes)	24.576	32.768	24.576	32.768
Memoria RAM de Datos (bytes)	2.048	2.048	2.048	2.048
Memoria EEPROM Datos (bytes)	256	256	256	256
Interrupciones	19	19	20	20
Líneas de E/S	24	24	35	35
Temporizadores	4	4	4	4
Módulos de Comparación/Captura/PWM (CCP)	2	2	1	1
Módulos de Comparación/Captura/PWM mejorado (ECCP)	0	0	1	1
Canales de Comunicación Serie	MSSP,EUSART	MSSP,EUSART	MSSP,EUSART	MSSP,EUSART
Canal USB	1	1	1	1
Puerto Paralelo de Transmisión de Datos (SPP)	0	0	1	1
Canales de Conversión A/D de 10 bits	10 Canales	10 Canales	13 Canales	13 Canales
Comparadores analógicos	2	2	2	2
Juego de instrucciones	75 (83 ext.)	75 (83 ext.)	75 (83 ext.)	75 (83 ext.)
Encapsulados	PDIP 28 pines SOIC 28 pines	PDIP 28 pines SOIC 28 pines	PDIP 40 pines QFN 40 pines TQFP 40 pines	PDIP 40 pines QFN 40 pines TQFP 40 pines

PATILLAJE DEL MICROCONTROLADOR PIC18F4550



Anexo B. Diagrama Flujo PIC18f4550



Anexos C. HOJAS CARACTERISTICAS DEL FOTODIODO.

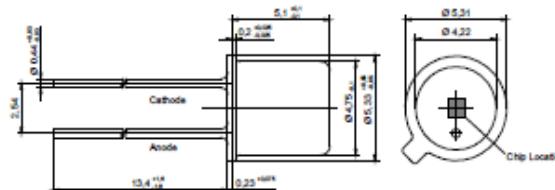
Photodiode

EPD-440-0-1.4

Preliminary

6/21/2007

rev. 03/07

Wavelength	Type	Technology	Case
UV	Schottky Contact	GaP	TO-46 + UV-glass
			Description Wide bandwidth and high spectral sensitivity in the UV and visible range (190 nm - 570 nm), mounted in hermetically sealed TO-46 package with UV-glass window
Applications Medical engineering (dermatology), output check of UV - lamps and oil or gas burner flame, measurement and control of ecological parameters, radiation control for a solarium, UV water purification facilities			

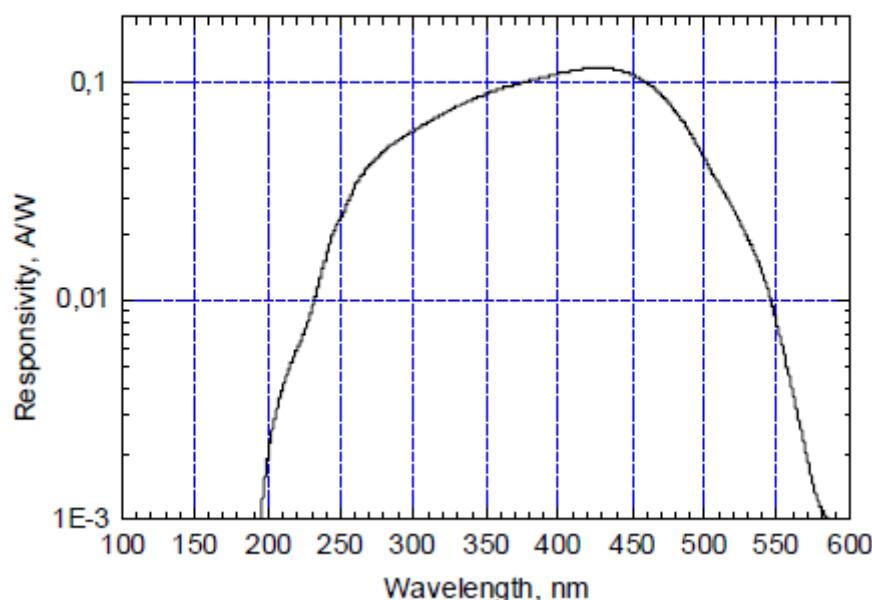
Miscellaneous Parameters

$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test conditions	Symbol	Value	Unit
Active area		A	1.2	mm^2
Temperature coefficient of I_D		$T_c(I_D)$	7.0	%/K
Operating temperature range		T_{amb}	-40 to +125	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	-40 to +125	$^\circ\text{C}$
Acceptance angle at 50% S_λ		φ	50	deg.

Typical responsivity

EPD-440-0



Optical and Electrical Characteristics

T_{amb} = 25°C, unless otherwise specified

Parameter	Test conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Breakdown voltage ¹⁾	I _R = 10 µA	V _R	5			V
Dark current	V _R = 5 V	I _D		10	30	pA
Peak sensitivity wavelength	V _R = 0 V	λ _P		440		nm
Responsivity at λ _P	V _R = 0 V	S _λ		0.17		A/W
Sensitivity range at 1%	V _R = 0 V	λ _{min} , λ _{max}	190		570	nm
Spectral bandwidth at 50%	V _R = 0 V	Δλ _{0.5}		180		nm
Shunt resistance	V _R = 10 mV	R _{SH}	150	200		GΩ
Noise equivalent power	λ = 440 nm	NEP		1.1x10 ⁻¹⁴		W/√Hz
Specific detectivity	λ = 440 nm	D*		1.0x10 ¹²		cm · √Hz · W ⁻¹
Junction capacitance	V _R = 0 V	C _J		300		pF
Switching time (R _L = 50 Ω)	V _R = 5 V	t _r , t _f		1/20		ns
Photo current at λ = 440 nm ^{1,2)}	V _R = 0 V E _e = 1 mW/cm ²	I _{Ph}		1.55		µA

¹⁾for information only

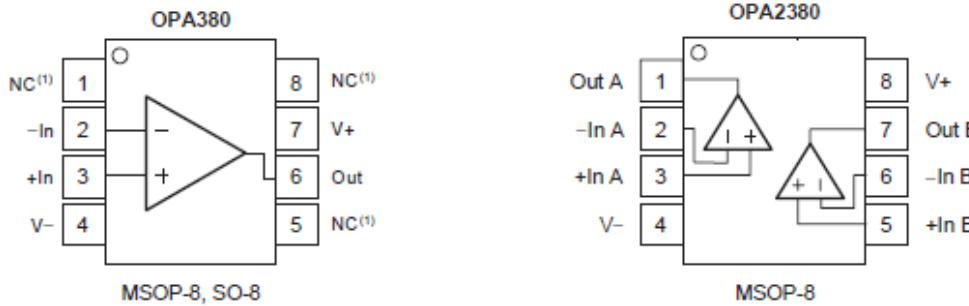
²⁾measured with common halogen lamp source and appropriate filter

Note: All measurements carried out with EP/GAP equipment

Labeling

Type	Lot N°	R _D (typ.) [GΩ]	Quantity
EPD-440-0-1.4			

Anexos D. AMPLIFICADOR OPERACIONAL OPA380.

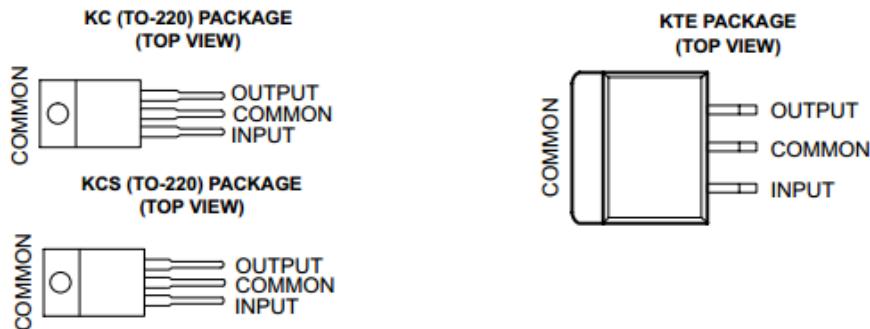


OVER TEMPERATURE		$V_{CM} = V_S/2$	TYPICAL CHARACTERISTICS			pA
Input Offset Current	I_{OS}		6	± 100		
NOISE						
Input Voltage Noise, $f = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz	e_n	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		3		μV_{PP}
Input Voltage Noise Density, $f = 10\text{kHz}$	e_n	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		67		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Input Voltage Noise Density, $f > 1\text{MHz}$	e_n	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		5.8		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Input Current Noise Density, $f = 10\text{kHz}$	i_n	$V_S = +5V, V_{CM} = 0V$		10		$\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT VOLTAGE RANGE						
Common-Mode Voltage Range	V_{CM}		V_-			V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$(V-) < V_{CM} < (V+) - 1.8V$	100	110	$(V+) - 1.8V$	dB
INPUT IMPEDANCE						
Differential Capacitance				1.1		pF
Common-Mode Resistance and Inverting Input Capacitance				$10^{13} \parallel 3$		$\Omega \parallel \text{pF}$
OPEN-LOOP GAIN						
Open-Loop Voltage Gain	AOL	$0.1V < V_O < (V+) - 0.7V, V_S = 5V, V_{CM} = V_S/2$ $0.1V < V_O < (V+) - 0.6V, V_S = 5V, V_{CM} = V_S/2, T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ $0V < V_O < (V+) - 0.7V, V_S = 5V, V_{CM} = 0V, R_P = 2k\Omega$ to $-5V(2)$ $0V < V_O < (V+) - 0.6V, V_S = 5V, V_{CM} = 0V, R_P = 2k\Omega$ to $-5V(2), T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$	110 110 106 106	130 130 120 120		dB dB dB dB
FREQUENCY RESPONSE		$C_L = 50\text{pF}$ $G = +1$ $V_S = +5V, 4\text{V Step}, G = +1$ $V_{IN} \times G \geq V_S$				
Slew Rate	SR			80		$\text{V}/\mu\text{s}$
Settling Time, 0.01%(3)	t_S			2		μs
Overload Recovery Time(4)(5)				100		ns
OUTPUT						
Voltage Output Swing from Positive Rail		$R_L = 2k\Omega$		400	600	mV
Voltage Output Swing from Negative Rail		$R_L = 2k\Omega$		60	100	mV
Voltage Output Swing from Positive Rail		$R_P = 2k\Omega$ to $-5V(2)$		400	600	mV
Voltage Output Swing from Negative Rail		$R_P = 2k\Omega$ to $-5V(2)$		-20	0	mV
Output Current	I_{OUT}			See Typical Characteristics		
Short-Circuit Current	I_{SC}			150		mA
Capacitive Load Drive	C_{LOAD}			See Typical Characteristics		
Open-Loop Output Impedance	R_O	$f = 1\text{MHz}, I_O = 0A$		40		Ω
POWER SUPPLY						
Specified Voltage Range	V_S			2.7	5.5	V
Quiescent Current	I_Q	$I_O = 0A$			9.5	mA
Over Temperature					10	mA
TEMPERATURE RANGE						
Specified and Operating Range				-40	+125	$^\circ\text{C}$
Storage Range				-65	+150	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance	θ_{JA}				150	$^\circ\text{C}/\text{W}$
MSOP-8, SO-8						

Anexos E. REGULADOR LM7805.

- 3-Terminal Regulators
- Output Current up to 1.5 A
- Internal Thermal-Overload Protection

- High Power-Dissipation Capability
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation



electrical characteristics at specified virtual junction temperature, $V_J = 10$ V, $I_O = 500$ mA (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_J \dagger$	$\mu A7805C$			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
Output voltage	$I_O = 5$ mA to 1 A, $V_J = 7$ V to 20 V, $P_D \leq 15$ W	25°C	4.8	5	5.2	V
		0°C to 125°C	4.75		5.25	
Input voltage regulation	$V_J = 7$ V to 25 V	25°C		3	100	mV
	$V_J = 8$ V to 12 V			1	50	
Ripple rejection	$V_J = 8$ V to 18 V, $f = 120$ Hz	0°C to 125°C	62	78		dB
Output voltage regulation	$I_O = 5$ mA to 1.5 A	25°C		15	100	mV
	$I_O = 250$ mA to 750 mA			5	50	
Output resistance	$f = 1$ kHz	0°C to 125°C		0.017		Ω
Temperature coefficient of output voltage	$I_O = 5$ mA	0°C to 125°C		-1.1		mV/°C
Output noise voltage	$f = 10$ Hz to 100 kHz	25°C		40		μV
Dropout voltage	$I_O = 1$ A	25°C		2		V
Bias current		25°C		4.2	8	mA
Bias current change	$V_J = 7$ V to 25 V	0°C to 125°C			1.3	mA
	$I_O = 5$ mA to 1 A				0.5	
Short-circuit output current		25°C		750		mA
Peak output current		25°C		2.2		A