

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PARA UN
ESPECTROFOTOMETRO DE LUZ UV-VISIBLE**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

HERMINIO BARDALES DIAZ

**PROMOCIÓN
2004-II**

**LIMA – PERÚ
2011**

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PARA UN ESPECTROFOTOMETRO DE LUZ UV-VISIBLE

A mi familia, que siempre me han animado a salir
adelante.

En especial a mi madre que ha sufrido la carrera
casi tanto como yo.

A mi esposa, por su apoyo incondicional y
paciencia que tiene a veces conmigo.

Y por supuesto, a mi hija alessandra, que ha traído
alegría a nuestras vidas.

SUMARIO

En el presente informe se desarrolla el análisis del acondicionamiento de señales involucrado en el funcionamiento del espectrofotómetro UV-Visible, donde para este fin, los componentes del equipo corresponden a los básicos o generales y no a los que hayan sido incorporados por diversos fabricantes como consecuencia del avance tecnológico.

Para tener una visión general sobre la parte donde se desarrolla el acondicionamiento de la señal, se presenta a los componentes que conforman el espectrofotómetro UV-Visible, donde, se logra identificar el sistema electrónico, como parte fundamental del proceso de funcionamiento del equipo, en la cual destaca el sistema de lectura o registro. Además se realiza el análisis de los sensores de luz utilizados en el sistema de detección de los espectrofotómetros UV-Visible, permitiendo obtener las señales eléctricas las cuales serán tratadas en un acondicionador de señales.

En el análisis de los sistemas de acondicionamientos de señales, principalmente se estudia las funciones de acondicionamiento de señal para un espectrofotómetro de luz UV-Visible, tales como: la etapa de amplificación y la etapa de la conversión de la corriente a voltaje; finalmente, se realiza la explicación de dos circuitos acondicionadores de señal, donde se ilustra principalmente el ejemplo para el caso del fotodiodo y se hace también referencia adicional para el caso del fototransistor y la fotorresistencia, que son utilizados por algunos fabricantes de espectrofotómetros UV-Visible, para luego ser aplicados a las señales que provienen del sistema detector de luz, las que serán acondicionadas para su posterior procesamiento.

INDICE

CAPITULO I

MARCO TEORICO DE ESPECTROFOTOMETRIA

1.1	Introducción.....	03
1.2	Concepto de espectrofotómetro.....	03
1.3	Fundamentos, leyes y principios de la espectrofotometría.....	04
1.3.1	Radiación electromagnética y su interacción con la materia.....	04
1.3.2	Absorción y emisión de radiación por parte de la materia.....	05
1.3.3	Ley de Beer Lambert.....	07

CAPITULO II

COMPONENTES DE ESPECTROFOTOMETRO UV-VISIBLE

2.1	La fuente de luz.....	10
2.1.1	Tipos de lámparas.....	10
2.2	El monocromador.....	13
2.2.1	Funciones del monocromador.....	14
2.2.2	Partes del monocromador.....	14
2.3	El portador de muestras.....	15
2.4	Sistema detector.....	16
2.5	Sistema de lectura.....	17

CAPITULO III

SENSORES DE LUZ UTILIZADOS EN ESPECTROFOTOMETRO DE UV-VISIBLE

3.1	Introducción.....	19
3.2	Conceptos generales.....	19
3.2.1	Transductor.....	19
3.2.2	Sensor.....	19
3.2.3	Diferencia entre sensor y transductor.....	20
3.2.4	Propiedades de los sensores y transductores.....	20
3.3	Sensores de luz.....	21
3.3.1	Fotorresistencia (LDR).....	22
3.3.2	Fotodiodo.....	25
3.3.3	Fototransistor.....	29
3.3.4	Fotomultiplicador.....	31

CAPITULO IV**ACONDICIONADORES DE SEÑALES DE UN ESPECTROFOTOMETRO UV-VISIBLE**

4.1	Introducción.....	34
4.2	Sistemas de adquisición de datos.....	34
4.3	Acondicionadores de señal UV-Visible.....	35
4.3.1	Funciones de acondicionamiento de señales comunes.....	36

CAPITULO V**APLICACION DE CIRCUITOS ACONDICIONADORES EN ESPECTROFOTOMETROS UV-VISIBLE**

5.1	Introducción.....	43
5.2	Circuito acondicionador 1.....	43
5.3	Circuito acondicionador 2.....	46
CONCLUSIONES.....		50
BIBLIOGRAFÍA.....		51

INTRODUCCION

El propósito del presente informe de suficiencia es mostrar el análisis de las partes que constituyen un espectrofotómetro UV-Visible, para luego poder entender el funcionamiento del equipo y tener claro el conocimiento de las tecnologías utilizadas, sobretodo, en la etapa del acondicionamiento de las señales, el cual es fundamental para el desarrollo de la información que se quiere obtener, tomando en cuenta la importancia del equipo en el campo de la medicina y la investigación.

Los acondicionadores de señal, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico (en este caso sensor de luz), una señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar.

En el primer capítulo, se refiere a la presentación de los conocimientos teóricos acerca de la radiación electromagnética y su interacción con la materia, sobretodo, la interacción de la luz con la materia dentro del rango de estudio que es el Ultravioleta-Visible, además mencionamos las leyes que identifican la relación existente entre la concentración de la muestra y la intensidad de la luz transmitida a través de la misma, que son principios para el estudio de la espectrofotometría.

En el segundo capítulo, se describe la interrelación de los diversos componentes de un espectrofotómetro UV-Visible, las etapas con las que cuenta el equipo como el sistema óptico y el sistema electrónico, el proceso del funcionamiento del equipo, y sus componentes, tales como: fuente de luz, espejos, rendijas, rejilla de difracción, detector y filtros. También se describe el sistema electrónico para el acondicionamiento de la señal.

En el tercer capítulo, se refiere al estudio de los sensores, sus propiedades, además, se analiza los tipos de sensores de luz utilizados en el sistema de detección de los espectrofotómetros de UV-Visible, Así también, se presentan las etapas de acondicionamiento de la señal.

En el cuarto capítulo, se analizan los sistemas de acondicionamientos de señales, tales como: la etapa de amplificación, etapa del filtrado, etapa de la conversión de la corriente a voltaje que es típico en el análisis de los sensores de luz utilizados en el sistema de detección de los espectrofotómetros UV-Visible.

En el quinto capítulo, se realiza la explicación de dos circuitos acondicionadores de señal, utilizados por algunos fabricantes de espectrofotómetros UV-Visible, que son

aplicados a las señales que provienen del sistema detector de luz, las que serán acondicionadas para su posterior procesamiento y finalmente puedan ser registradas o visualizadas, dependiendo de la salida si es analógica o digital.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO DE ESPECTROFOTOMETRÍA

1.1 Introducción

La espectrofotometría permite hacer el estudio cuantitativo del espectro luminoso, al realizar el análisis de sustancias orgánicas o inorgánicas dentro de un rango de longitud de onda determinado. En general, cuando la luz pasa a través de una solución o muestra, una parte de la misma será absorbida por esta, mientras que otra parte pasará o será transmitida a través de la solución.

La luz absorbida depende de la longitud de onda, la concentración de la solución y la longitud de la trayectoria. La luz transmitida permite determinar propiedades de las sustancias, entre ellos, la concentración que es muy importante en el área de la salud básica de los pacientes.

1.2 Concepto de espectrofotómetro

La palabra espectrofotómetro se deriva de la palabra latina spectrum, que significa imagen y de la palabra griega phos o photos, que significa luz.

El espectrofotómetro, construido mediante procesos avanzados de fabricación, es uno de los principales instrumentos de diagnósticos y de investigación creados por el ser humano. Utiliza las propiedades de la luz y su interacción con otras sustancias para determinar la naturaleza de las mismas, en el caso particular, existen espectrofotómetros de luz UV-Visible.

En general, la luz de una lámpara de características especiales es guiada a través de un dispositivo que selecciona y separa la luz de una determinada longitud de onda y la hace pasar por una muestra o solución que se quiere analizar. La intensidad de la luz obtenida de la muestra es captada y comparada con la intensidad de la luz que incidió originalmente. A partir de esta comparación se estima la transmitancia y la absorbancia de la muestra, parámetros que dependen de factores como la concentración de la sustancia [1].

Entre las características principales de un espectrofotómetro están: amplio rango de longitud de onda, gran cavidad de transmitancia para líquidos y sólidos, de haz simple, doble haz, fácil mantenimiento, diseño compacto, ligero y funcional. En la Figura 1.1 se ilustra un espectrofotómetro general.



Figura 1.1 Espectrofotómetro moderno

1.3 Fundamentos, leyes y principios de la espectrofotometría

En esta sección se presentaran los fundamentos, leyes y principios fundamentales de la espectrofotometría, tales como:

- Radiación electromagnética y su interacción con la materia.
- Absorción y emisión de radiación de la materia.

1.3.1 Radiación electromagnética y su interacción con la materia

Los modelos que explican la estructura de la materia tienen como fundamento las características ondulatorias de las partículas, que proporcionan un marco de referencia conveniente para describir las interacciones entre la radiación electromagnética y la materia.

La energía radiante esta constituida por fotones, los cuales tiene como característica una longitud de onda. Toda la radiación electromagnética se desplaza con la misma velocidad en el vacío, lo cual es la máxima observada en el universo. Para un medio material la interacción entre los campos eléctricos y magnéticos que existen y los correspondientes de la radiación, puede llegar a reducir esa velocidad de propagación; por esta razón es solamente en el vacío en donde se observa esa velocidad máxima.

Si se asigna una longitud de onda característica a cada tipo de radiación, la propagación de esa onda se hará con una frecuencia tal que al multiplicarla por su longitud debe proporcionar la velocidad de propagación [3], definido por:

$$C=\lambda f \quad (1.1)$$

La energía asociada con cada una de las ondas, se obtiene mediante la ecuación de Planck:

$$E=hf \quad (1.2)$$

Donde: E es la energía de ondas, h es la constante de Planck, f es la frecuencia.

$$f=c/\lambda \quad (1.3)$$

Donde: λ es la longitud de onda y $c= 2,99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ es la velocidad de la luz en el vacío.

En la Figura 1.2 se ilustra el espectro electromagnético y la relación de la frecuencia con la longitud de onda.

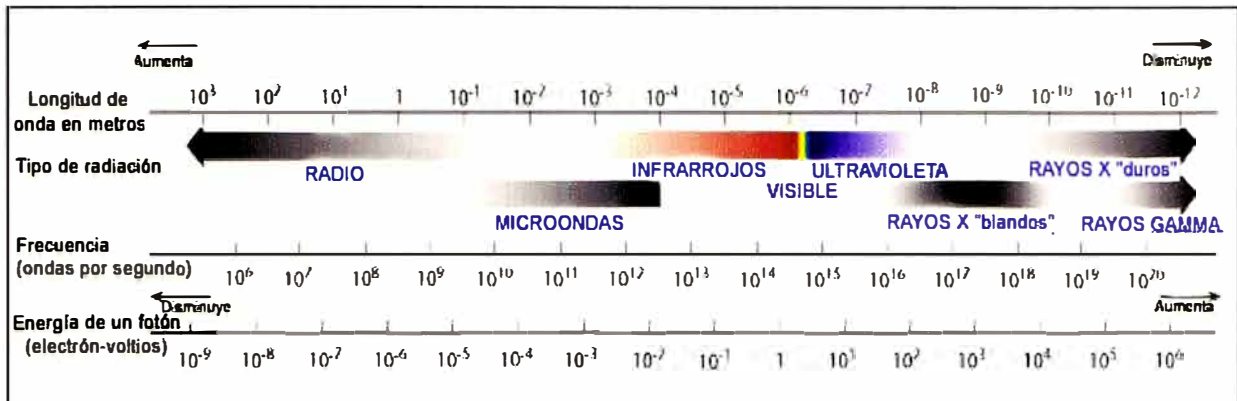


Figura 1.2 Espectro electromagnético versus la longitud de onda

1.3.2 Absorción y emisión de radiación de la materia

Al describir en forma simplificada la estructura de la materia, se permite explicar los enlaces entre los átomos para formar moléculas en términos de la localización de ciertas partículas subatómicas, los electrones, y entre átomos. Estas partículas evidencian sus características ondulatorias, por que interactúan con la radiación electromagnética. Cuando un fotón de radiación electromagnética (con la energía apropiada), incide sobre una molécula, se incrementa su contenido energético absorbiendo ese fotón. Entonces, la molécula pasó a un estado excitado, al estar energizada se encuentra en un estado que no es estable en las condiciones ambientales; por lo tanto tiende a regresar a la condición estable y para lograrlo emite un fotón con la energía que logró excitarla antes.

La materia absorbe radiación de diversas regiones del espectro electromagnético, originadas en diferentes tipos de interacciones entre la materia y la radiación electromagnética. Depende del tipo de interacción para analizar las transiciones electrónicas que se puede causar con la radiación ultravioleta o visible.

Para el fotón que llega a afectar a una molécula que tiene un alto contenido de energía, no se produce absorción que se pueda emitir después, lo que hace es modificar la estructura de la sustancia.

El principio básico considera que la luz es una forma de energía electromagnética, que en el vacío tiene una velocidad constante C de aproximadamente 3×10^8 m/s. En cualquier otro medio transparente por el que pase la luz, su velocidad será diferente y podrá calcularse mediante la siguiente ecuación [3]:

$$V=C/n \quad (1.4)$$

Donde: V es la velocidad a través del medio por el que pasa la luz y n es el índice de refracción del medio, cuyo valor oscila, por lo general, entre 1,0 y 2,5.

La energía electromagnética dispone de una muy amplia gama de longitudes de onda. La Tabla N° 1.1 contiene los rangos de la longitud de onda de las principales ondas electromagnéticas.

Tabla N° 1.1 Rango de longitud de algunas ondas electromagnéticas

Tipo de energía Electromagnética	Rango de la longitud de onda
Ondas de radio	De pocos metros a pocos kilómetros
Ondas de radar	De 1 a 10 cm
Ondas infrarrojas	De 1 a 10 micras (10 ⁻⁶ m)
Luz visible	De 300 a 700 nm (nanómetros)
Rayos X	De 0,1 a 0,5 Å (Ångstrom)
Rayos gama	Aprox. 0,0012 Å (Ångstrom)

La Tabla N° 1.2 contiene los rangos de longitud de onda en donde se utiliza el espectro luminoso para realizar pruebas de espectrofotometría.

Tabla N° 1.2 Región del espectro para pruebas del espectrofotómetro

Región del espectro luminoso	Rango de la longitud de onda (nm-nanómetros)
Ultravioleta	10-200 nm
Ultravioleta cercano	200-280 nm
Luz visible	380-780 nm
Infrarrojo cercano	780-3 000 nm
Infrarrojo medio	3 000-20 000 nm
Infrarrojo lejano	30 000-300 000 nm

La luz, al pasar o interactuar con diversos medios, presenta una serie de fenómenos, entre los que destacan la reflexión, refracción, difracción, absorción, difusión, polarización y otros que son utilizados en diversos instrumentos y dispositivos [3].

Con respecto a la interacción de la luz con la materia, en la Figura 1.3 se ilustra los fenómenos que ocurren. El esquema muestra que la radiación incidente "I₀" sufre transformaciones. Parte de la radiación se refleja "I_r", se transmite "I_t", se difunde "I_d" y parte se absorbe e incide directamente en fenómenos como la fluorescencia "I_f". Los fenómenos en los que se basa la espectrofotometría son principalmente la absorción y la transmisión.

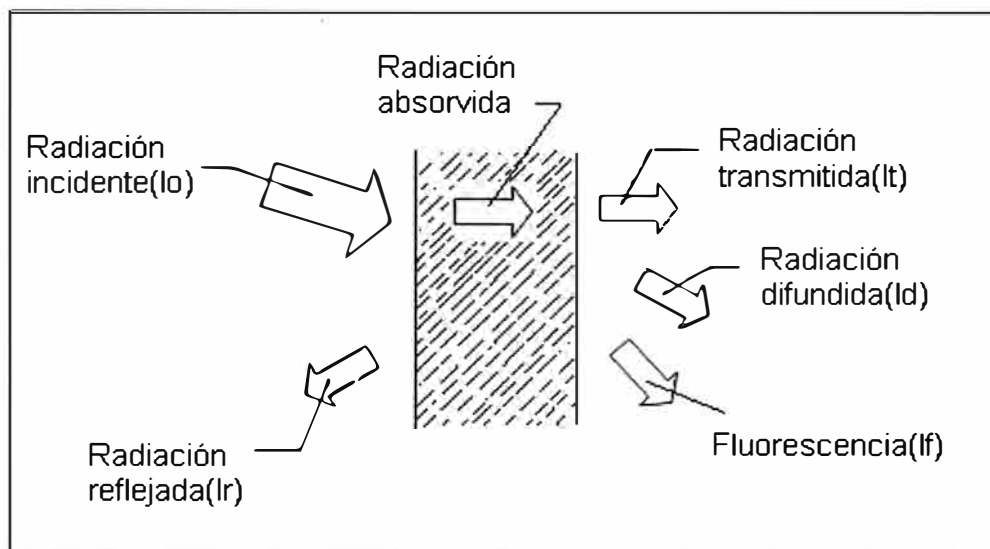


Figura 1.3. Fenómenos que ocurren en la interacción de la luz con la materia

1.3.3 Ley de Beer Lambert

Esta ley identifica la relación existente entre la concentración de la muestra o solución y la intensidad de la luz transmitida a través de ella. Además hace mención dos conceptos importantes: la transmitancia T y la absorbancia A [1].

La Transmitancia T. Es la fracción de la luz incidente que a una determinada longitud de onda pasa a través de la solución o muestra. Se define por la siguiente relación [1]:

$$T = I_t / I_0 \quad (1.5)$$

Donde:

I_t: intensidad de la radiación transmitida

I₀: intensidad de la radiación incidente

La Absorbancia A. La concentración de moléculas absorbentes de luz en la muestra es proporcional a la absorbancia A de la muestra. Se define por la siguiente relación [1]:

$$A = \epsilon \times l \times c \quad (1.6)$$

Donde:

A: absorbancia medida

ϵ : coeficiente de absortividad molar [litros/moles/cm]

l: distancia de la trayectoria recorrida por la luz dentro de la muestra

c: concentración de la muestra [moles/litros]

La relación de la absorbancia con la transmitancia es mediante la siguiente ecuación:

$$A = \log_{10} \frac{1}{T} = \log_{10} \frac{I_0}{I_t} = \log_{10} 10^{\epsilon \times c \times l} = \epsilon \times c \times l \quad (1.7)$$

La Figura 1.4 ilustra el fenómeno de la absorbancia A.

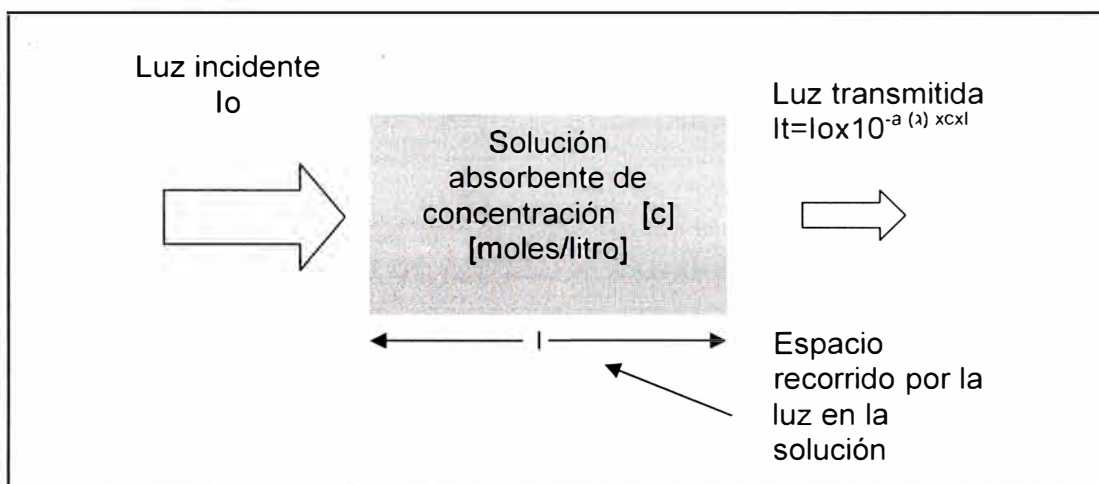


Figura 1.4 El fenómeno de la absorción

En la Figura 1.5, se ilustran la curva de variación de la transmitancia T y en la Figura 1.6 se ilustra la curva de variación de la absorbancia A en función de la concentración C , de acuerdo con la ley de Beer Lambert, en la que se basa la espectrofotometría [1].

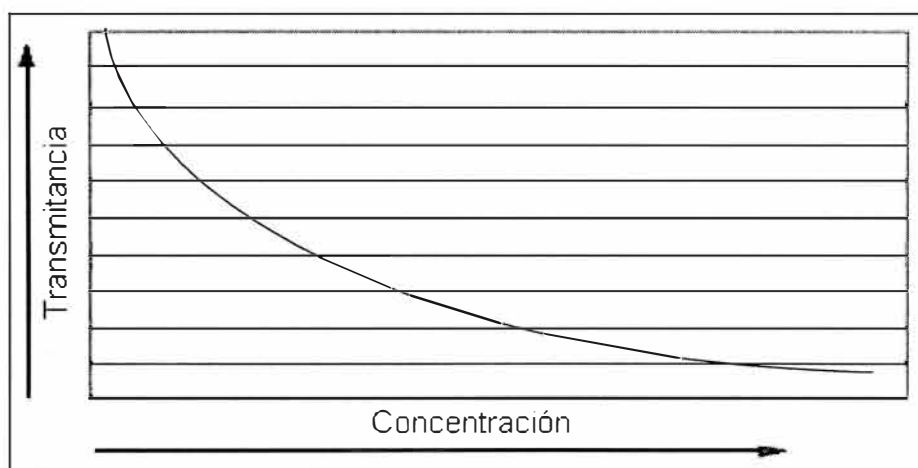


Figura 1.5 Curva de la transmitancia en función de la concentración

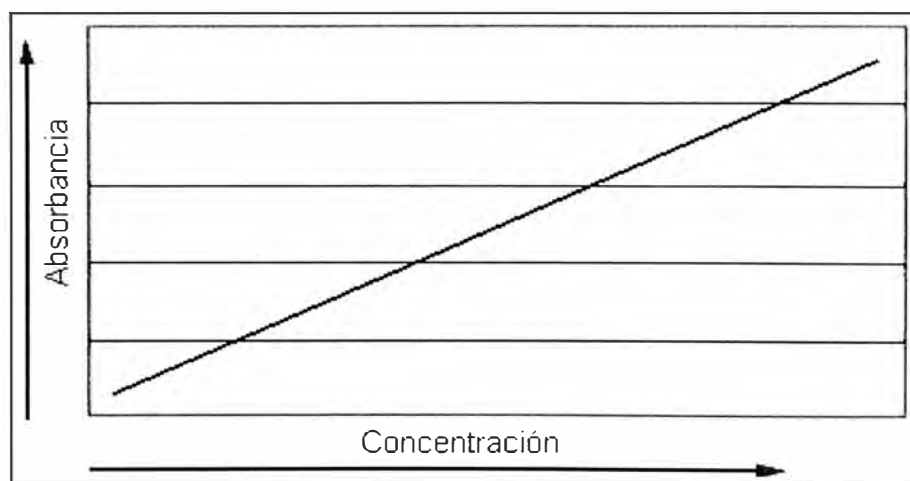


Figura 1.6 Curva de la absorbancia en función de la concentración

CAPITULO II

COMPONENTES DE ESPECTROFOTÓMETRO UV-VISIBLE

En la Figura 2.1, se ilustra los elementos que constituyen a un espectrofotómetro, en las cuales se destaca las componentes del sistema óptico y el sistema electrónico.

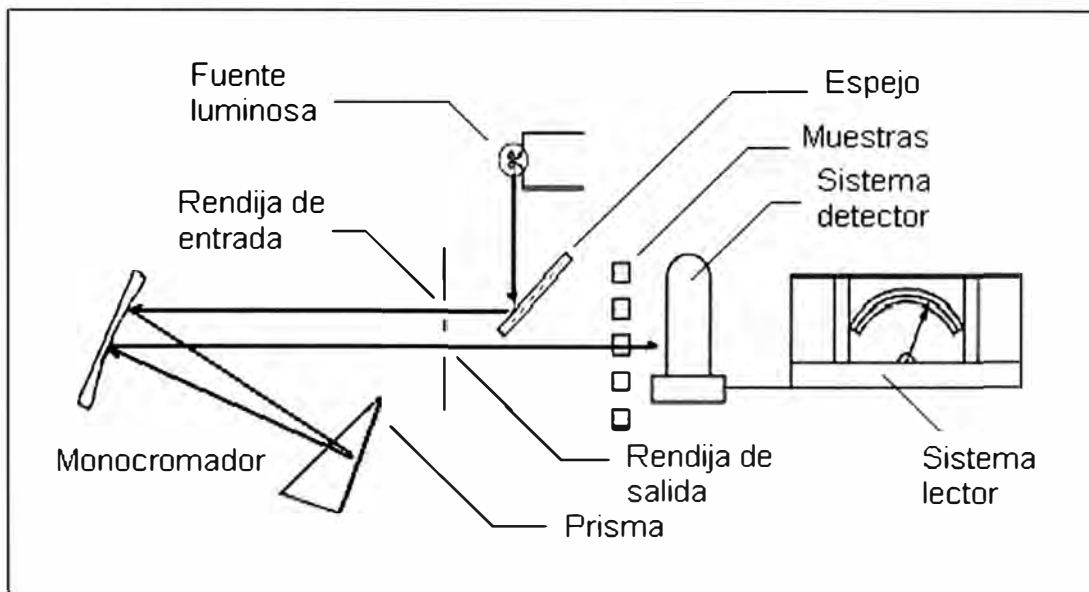


Figura 2.1 Esquema de los componentes del espectrofotómetro

En la Figura 2.2, se ilustran los componentes de un espectrofotómetro agrupados en bloques funcionales, tales como [2]:

- La fuente de luz
- El monocromador
- El portador de muestras
- El sistema detector
- El sistema de lectura

Estos componentes corresponden a los básicos o generales de este instrumento y no a los que hayan sido incorporados por diversos fabricantes como consecuencia del avance tecnológico; en el sistema óptico se encuentra la fuente de luz, espejos, rendijas, rejilla de difracción, detector y filtros. La luz policromática procedente de la fuente luminosa, se convierte en luz monocromática la cual incide sobre la solución o muestra y la luz transmitida es sensada por el fotodetector y amplificada para su posterior procesamiento.

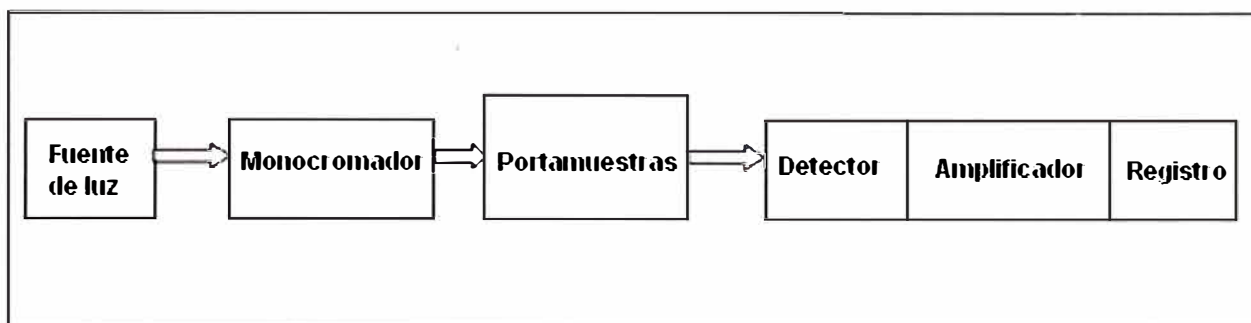


Figura 2.2 Diagrama de bloques de los componentes del espectrofotómetro

2.1 La fuente de luz

La fuente de luz ilumina la muestra, dependiendo del tipo de espectrofotometría, la fuente luminosa puede ser una lámpara con filamento de tungsteno para luz visible o una lámpara de arco de deuterio para luz ultravioleta. Algunos fabricantes han diseñado espectrofotómetros con lámparas intermitentes de xenón de alta duración que emiten luz en el rango de la luz visible y ultravioleta [2].

Las lámparas vienen montadas en una base que permite asegurar una determinada posición, para que se mantengan las condiciones de ajuste óptico y enfoque cuando está en operación o se necesita reemplazarla, éstas son controladas con un sistema electrónico para lograr tener estabilidad en la emisión del haz luminoso.

Las fuentes de luz para los espectrofotómetros deben proveer una radiación intensa y estable sobre un rango espectral amplio, por lo tanto las características deseables para las fuentes de luz son [2]:

- Que sea intensa.
- Estable.
- Intervalo espectral amplio.
- Señal uniforme.
- Tamaño óptimo.
- Larga vida.
- Bajo costo.

2.1.1 Tipos de lámparas. Entre las lámparas más usadas e importantes en la fuente de luz de los espectrofotómetros se tienen:

- Lámpara de tungsteno.
- Lámpara de deuterio.
- Lámpara de arco de xenón.

a) Lámpara de tungsteno. Es una lámpara incandescente que tiene como elemento principal un filamento de tungsteno, el cual convierte la energía eléctrica en luz y calor. Tiene potencia de salida uniforme y la salida de luz puede controlarse mediante la

energía suministrada al foco. El inconveniente es que a mayor temperatura del filamento, mayor es la velocidad de evaporación del tungsteno y por consiguiente menor el tiempo de vida de la lámpara.

En la Figura 2.3, se ilustra una bombilla pequeña de filamento enrollado, la cual es apropiada para concentrar el flujo de luz en un haz intenso.



Figura 2.3 Lámpara de tungsteno

La lámpara de tungsteno emplea longitudes de onda entre 380 a 780 nm, su radiación es continua con pequeños cortes de longitud de onda de acuerdo al material que la recubre que por lo general es vidrio. En la Figura 2.4 se ilustra la distribución espectral de la lámpara de tungsteno [9].

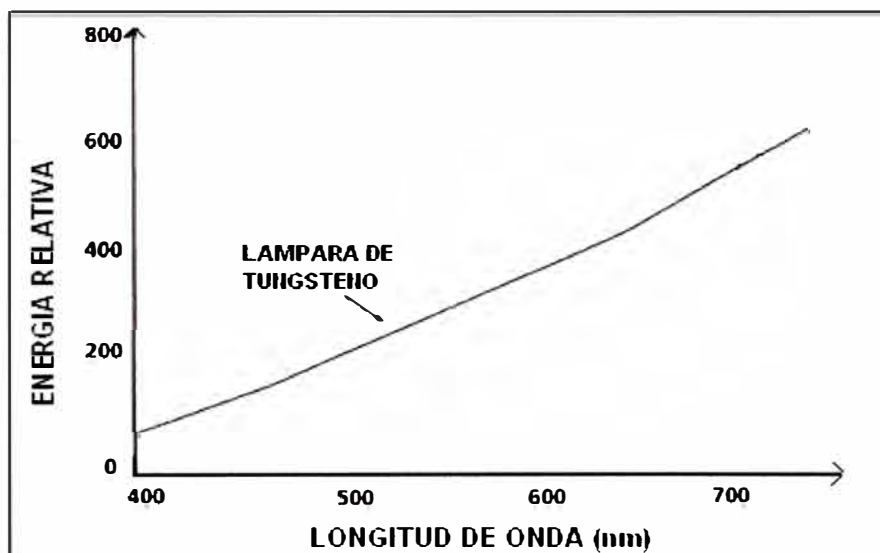


Figura 2.4 Distribución espectral de la lámpara de tungsteno

b) Lámpara de deuterio. Es una fuente de luz ultravioleta, compuesta por una cápsula de cristal o de cuarzo, que contiene en su interior deuterio a baja presión, como se ilustra en la Figura 2.5. Las lámparas de deuterio son fuentes de radiación ultravioleta de alta intensidad, pero insignificante en la emisión visible e infrarroja. Las lámparas de deuterio son fuentes ideales para la espectroscopia UV y emiten solo desde un lado y en una

dirección, a diferencia de las lámparas de arco, que irradian en todas direcciones. La vida útil típica de una lámpara de deuterio es de aproximadamente 2.000 horas. Se recomienda, que deben ser utilizadas gafas de protección, ropa y guantes cuando se trabajen en las proximidades de estas lámparas [9].



Figura 2.5 Lámpara de deuterio

En la lámpara de deuterio, el espectro continuo de la radiación luminosa se reduce a la región comprendida entre los 180 nm y los 370 nm, el cual se aprovecha para el estudio de espectrofotometría UV. En la Figura 2.6 se ilustra la distribución espectral de la lámpara de deuterio.

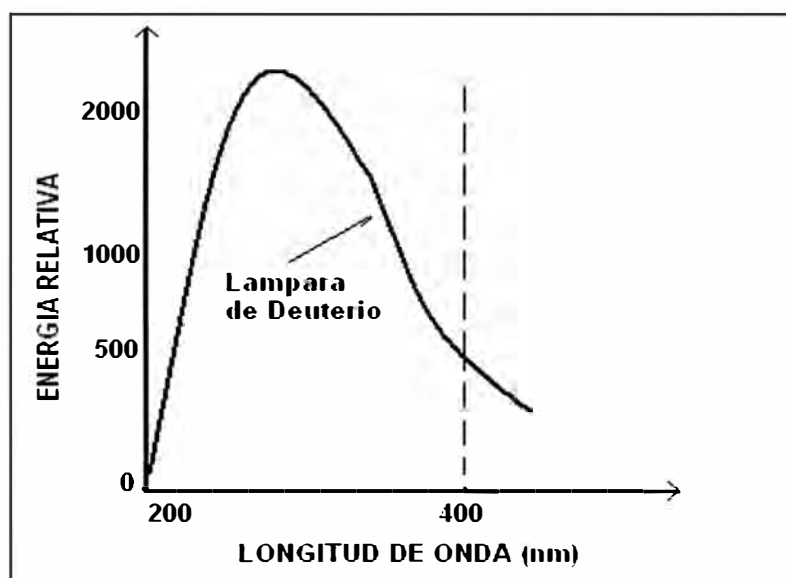


Figura 2.6 Distribución espectral de la lámpara de deuterio

c) Lámpara de arco de Xenón. Es una fuente de luz producida por un arco eléctrico (también llamado de arco voltaico). La lámpara está formada por dos electrodos, normalmente de tungsteno que están separados por un gas, como se ilustra en la Figura 2.7. Un arco eléctrico arde entre dos electrodos de tungsteno de la lámpara de descarga de gas de xenón. El espacio extremadamente pequeño para arder – una ampolla de cristal de cuarzo – contiene un relleno de gas xenón a alta presión así como mercurio y

sales metálicas en total menos de 1 mg. Para el encendido se precisa de un impulso de alta tensión, que lo crea por medio de un balastro electrónico. Este dispositivo se encarga del control de intensidad de la luz [9].

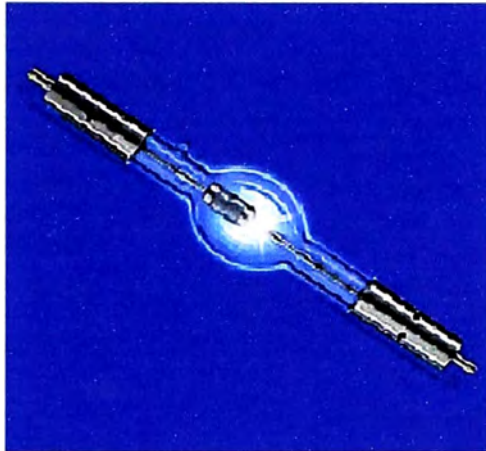


Figura 2.7 Lámpara de arco de xenón

En la Figura 2.8, se ilustra la distribución de energía espectral para la lámpara de arco de xenón próxima a la iluminación del día.

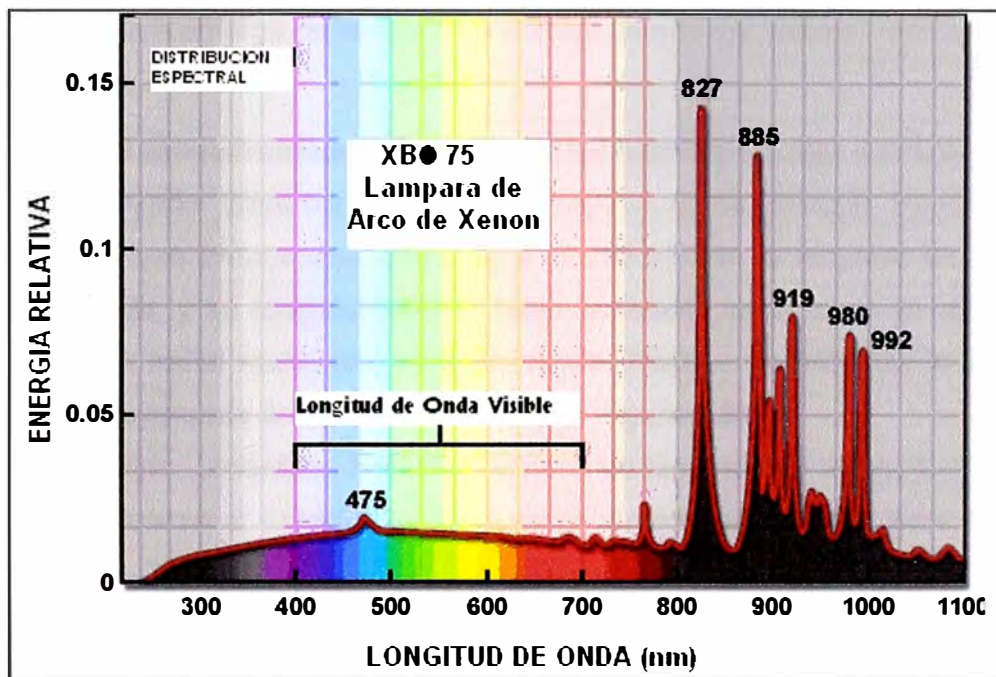


Figura 2.8 Distribución espectral de la lámpara de arco de xenón

2.2 El monocromador

Es una parte importante del espectrofotómetro, que se encarga de dispersar la luz, permitiendo examinar la intensidad luminosa en la muestra para longitudes de onda seleccionadas. El monocromador recibe luz policromática a través de una rendija de entrada, la modifica geométrica y ópticamente, luego dirige la radiación seleccionada a través de una rendija de salida. La luz monocromática que sale del monocromador incide en la muestra o solución, ocurriendo, entre otros fenómenos que parte de la luz es

absorbida y otra parte es reflejada. Pero el fenómeno de interés es la luz transmitida a través de la muestra, lo que va a permitir que dicha luz sea sensada a través de un fotodetector, además es procesada por un circuito electrónico, siendo mostrada al final como un valor en porcentaje de luz transmitida [9].

2.2.1 Funciones del monocromador. En general, el monocromador consiste de una fisura de entrada que provee una imagen óptica estrecha de la fuente de radiación, un colimador que suministra la radiación emanada por la fisura de entrada paralela, una rejilla o prisma para dispersar la radiación incidente, un colimador para reformar la imagen de la fisura de entrada en la fisura de salida y una fisura de salida para aislar la banda espectral deseada mediante el bloqueo de la radiación dispersa excepto aquella dentro del intervalo deseado.

- **La función primaria del monocromador:** proveer un haz de energía de radiación que proporcione una longitud de onda única y un ancho de banda espectral. La salida espectral de algunos monocromadores se usa como una fuente de radiación continua.

- **La función secundaria del monocromador:** consiste en ajustar la energía que circula. El flujo luminoso que emerge de la fisura de entrada puede ser variada mediante el ajuste del ancho de ésta.

2.2.2 Partes del monocromador. Entre las partes más importantes se tiene:

1) Rendija de entrada: Sirve como una fuente para el monocromador. Es un rectángulo largo y estrecho que proporciona una mayor resolución de la longitud de onda de la energía dispersada, y su longitud permite tener suficiente energía en el sistema como para producir una señal manejable posteriormente. Reducen al máximo la luz difusa y evita que la luz dispersada entre en el sistema (ver Figura 2.9).

2) Rendija de salida: Determina la banda de paso en términos de la longitud de onda de la energía que alcanza el detector de la muestra. Impide que la luz difusa atraviese la cubeta (ver Figura 2.9).

3) Colimador: Permite dirigir los rayos que emanan de la rendija de entrada de forma que los rayos provenientes de todas las posiciones de la rendija lleguen al elemento de dispersión con el mismo ángulo. El segundo colimador forma una imagen de la rendija de entrada, después de que ha sido dispersada como función de la longitud de onda, en la rendija de salida. Produce un haz paralelo de radiación electromagnética (ver Figura 2.9).

4) Elemento de dispersión: Es la parte más importante del monocromador. En los monocromadores convencionales se utiliza red de difracción (ver Figura 2.9) o el prisma como elemento de dispersión de la luz y se selecciona la longitud de onda deseada a través de una rendija estrecha. Los monocromadores de prisma y retículo dan unas radiaciones monocromáticas que presentan longitudes de onda de variación continua.

Existen otros tipos de elementos de dispersión como por ejemplo los filtros que están compuestos por un material que transmite selectivamente una longitud de onda, absorbiendo todas las demás.

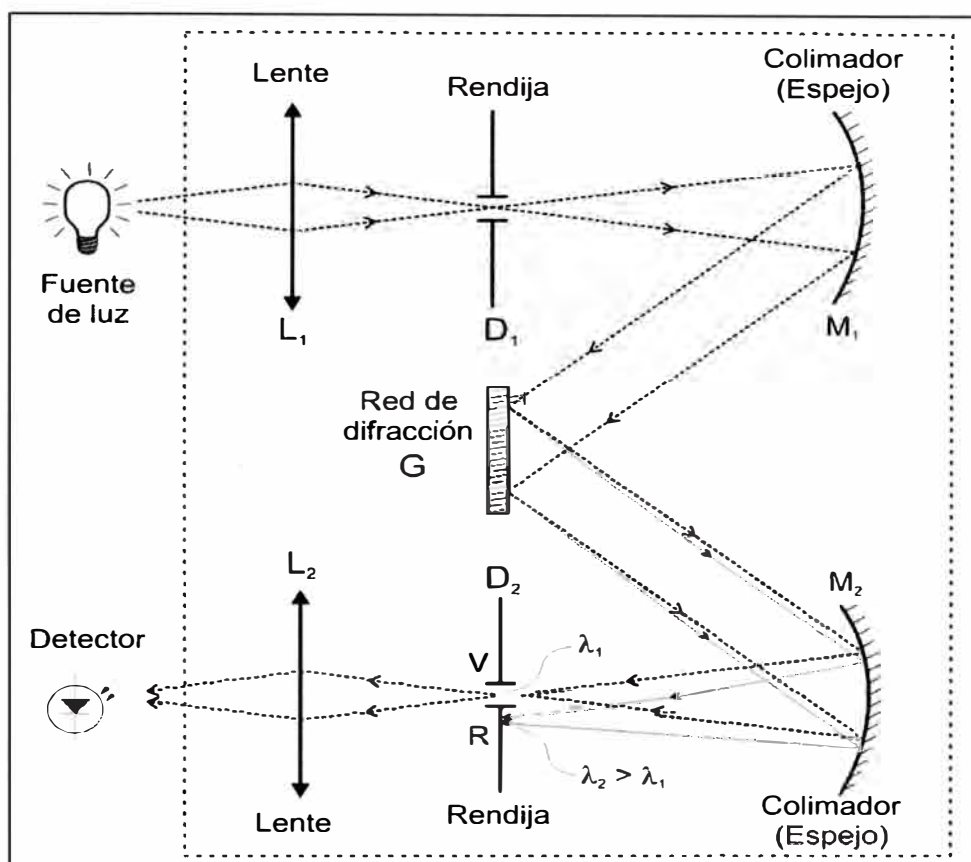


Figura 2.9 Esquema de un monocromador

En resumen, el desarrollo de un monocromador envuelve tres factores relevantes:

- Resolución.
- Luz potente concentrada.
- Pureza en la radiación de salida.

2.3 El portador de muestras

Se diseñan para sostener la muestra que se quiere analizar dentro del rayo de luz de longitud de onda determinada por el monocromador.

El elemento que contiene la muestra es una celda o cubeta, por lo general, rectangular, estos deben ser de un material que permita el paso de la radiación de la región espectral de interés. Por lo tanto para el estudio en diferentes regiones del espectro se utilizan diferentes materiales:

- Cuarzo o sílice fundido para ultravioleta.
- Cristal óptico y plástico, en el visible.

Las cubetas suelen tener un espacio interior de 10 mm de espesor, aunque también pueden variar, dependerá de la muestra con que se trabaje.

Las mejores cubetas tienen ventanas que son perfectamente perpendiculares a la dirección del haz, con estas caras planas minimizan las pérdidas por reflexión. Así también, puede ser empleadas cubetas cilíndricas para el ultravioleta-visible, en este caso se debe tener cuidado en repetir la posición de la cubeta respecto del haz de radiación [2].

La calidad de los datos de absorbancia depende de la forma, uso y mantenimiento de las cubetas. Las huellas dactilares, la grasa u otras manchas en las paredes alteran la transmisión a través de la cubeta.

En la Figura 2.10 se ilustra un tipo de celda portadora de muestra, fabricado con material de cuarzo utilizado para luz ultravioleta.

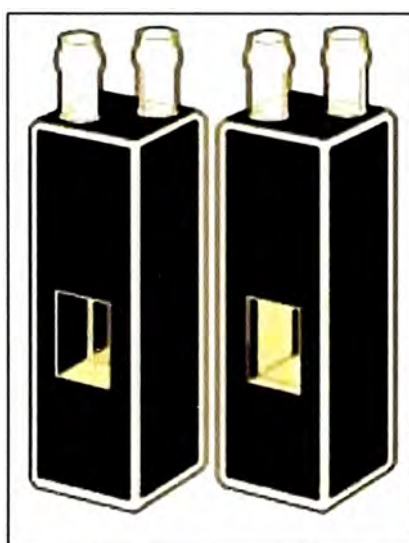


Figura 2.10 Celda portadora de muestra

2.4 Sistema detector

El sistema de detección se encuentra constituido por los sensores de luz, los cuales proporcionan una salida eléctrica utilizable en respuesta a una radiación electromagnética incidente en la porción UV-Visible del espectro.

Los sensores de luz o detectores de luz utilizados en el sistema detector de un espectrofotómetro UV-Visible son: fotoceldas, fototubos, fotodiodos o fotomultiplicadores. Esto depende de los rangos de longitud de onda, de la sensibilidad y de la velocidad de respuesta requeridas.

El sistema de detección recibe la energía lumínica proveniente de la muestra y la convierte en una señal eléctrica proporcional a la energía recibida. La señal eléctrica puede ser procesada y amplificada, para que pueda interpretarse a través del sistema de lectura.

La Tabla N° 2.1 contiene un resumen de las ventajas y desventajas de los dispositivos normalmente usados en los sistemas de detección [2].

Tabla 1.2 ventajas y desventajas de los dispositivos de detección

ELEMENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fotoceldas	Económicas	Longitud de onda limitada entre 400 y 750 nm.
	Pequeñas	Baja sensibilidad.
	Robustas	Respuesta lenta a cambio de intensidad luminica
	No requieren fuentes de energia ni amplificadores de señal	Agotamiento. La señal es muy dependiente de la temperatura.
Fototubos	Se fabrican para que sean sensibles entre los 190 y los 650 nm. También entre los 600 y los 1000nm.	Requieren calibraciones, dependiendo de la temperatura del ambiente en que se encuentra instalado el equipo.
		Se agotan con altos niveles de iluminación.
Fotodiodos	Carecen de partes mecánicas móviles.	
	Adquieren datos espectrales de forma simultanea.	
	Disponen de un rango dinámico amplio.	
	Brindan excelente reproducibilidad de la longitud de onda.	
Fotomultiplicadores	Son más sensibles que los fototubos y las fotoceldas.	Pueden quemarse, si la luz diurna penetra cuando están trabajando.
	Trabajan en rangos más amplios de longitudes de onda.	Son costosos.
	Tienen respuestas más rápidas a los cambios de intensidad luminosa.	Necesitan fuente de alto voltaje.
	No se agotan como las fotoceldas.	Se usan solo en espectrofotómetros especializados.
	Pueden ser fabricados con sensibilidad a la luz en todo el rango de la luz ultravioleta y visible.(Desde 190 hasta 900nm.)	

2.5 Sistema de lectura

Los sistemas de lectura pueden ser: de lectura directa que van aplicados a aparatos con detectores de tipo fotocélula o pueden producir una amplificación previa de la señal como ocurre en los aparatos con fotodiodos.

La mayoría de las señales analíticas son señales analógicas. Los transductores de los instrumentos convierten normalmente las señales analógicas químicas en señales analógicas eléctricas, en un formato estándar analógico o digital.

La señal que es detectada recibe diversas transformaciones, tal como la amplificación que transforma su intensidad a un valor que resulte proporcional al porcentaje de transmitancia/absorbancia, que es el valor de lectura que determina el análisis de la muestra.

Existen sistemas de lectura de tipo análogo (muestra la magnitud leída sobre una escala de lectura) o digital (muestra la magnitud leída en una pantalla) [2].

Los indicadores de tipo análogo (ver Figura 2.11) reciben el nombre de metros. Su exactitud depende, entre otros factores, de la longitud de la escala y del número de divisiones que tenga (mientras más divisiones, el valor de lectura es más exacto). La principal desventaja que pueda tener es que la lectura puede ser errada por la fatiga de los operadores o errores, cuando disponen de varias escalas, al tratar de identificar las escalas sobre las que deben realizar la lectura.



Figura 2.11 Espectrofotómetro con lectura análoga

Los indicadores digitales (ver Figura 2.12) usualmente presentan los resultados en una pantalla, en forma de caracteres alfanuméricos luminosos. Esto los hace menos propensos a que se cometan errores de lectura.



Figura 2.12 Espectrofotómetro con lectura digital

CAPITULO III

SENSORES DE LUZ UTILIZADOS EN ESPECTROFOTOMETRO UV-VISIBLE

3.1 Introducción

En este capítulo se estudian los sensores de luz más comunes que se utilizan en el sistema de detección del espectrofotómetro, los cuales proporcionan una salida eléctrica utilizable, como respuesta a una radiación electromagnética que incide sobre ellos en la porción UV-Visible del espectro.

3.2 Conceptos generales

3.2.1 Transductor

Son dispositivos que convierten una determinada energía de entrada en una de salida, es decir, sirven para medir distintas variables del entorno y normalizarlas de manera que podamos trabajar con ellas. Por ejemplo, en la Figura 3.1 se ilustra un transductor de presión que realiza la medición de la presión de una caldera y al conectarse a un regulador este variará el funcionamiento de la caldera según la presión medida. También, un transductor de temperatura, que mida la temperatura del entorno y mediante un regulador realice la apertura o cierre de un sistema de calefacción.

Hay muchos tipos de transductores y en su nombre se indica el tipo de cambio de unidad que realizan. Otros transductores son electromagnéticos, electromecánicos, electrostáticos [4].



Figura 3.1 Tipos de transductores

3.2.2 Sensor

Es un dispositivo que detecta una determinada acción externa, donde, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que esta en

función de la variable que se mide. Sensor y transductor se utilizan a veces como sinónimos, pero sensor tiene un significado más extenso: la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos.

3.2.3 Diferencia entre sensor y transductor

Entre las diferencias encontradas podemos mencionar que, el sensor convierte una magnitud física en una señal eléctrica, mientras tanto el transductor convierte una forma de energía en otra. Si los dos dispositivos son utilizados para medir una magnitud pueden resultar parecidos, pero el sensor requiere siempre de alimentación de energía, por que no transforma si no que mide. Mientras que el transductor obtiene parte de la energía de la magnitud que esta midiendo para conseguir una señal eléctrica [4].

Los sensores del mundo real generan señales que deben ser previamente acondicionadas para que sean procesadas de una manera exacta y confiable.

3.2.4 Propiedades de los sensores y transductores

Entre las principales propiedades de los sensores y transductores se tienen:

a) Sensibilidad: Es la pendiente de la curva que relaciona la salida eléctrica con la magnitud física a medir, como se ilustra en la Figura 3.2.

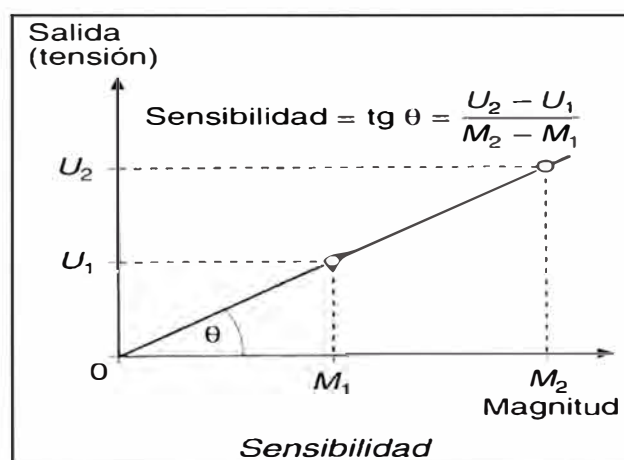


Figura 3.2 Curva de sensibilidad

b) Rango de medida: Es la diferencia entre los valores máximos y los mínimos que se necesita medir. Se recomienda no utilizar un transductor para medidas por debajo de 1/10 del máximo valor que se puede medir.

c) Repetitividad: Cuando la medida se realiza varias veces, la gráfica magnitud-senal eléctrica no siempre pasa por el mismo lugar. La máxima diferencia será el valor absoluto de la repetitividad.

e) No-linealidad: Es la mayor distancia entre la curva de funcionamiento del sensor (en dirección ascendente) y la recta del punto inicial al final de funcionamiento (ver Figura 3.3).

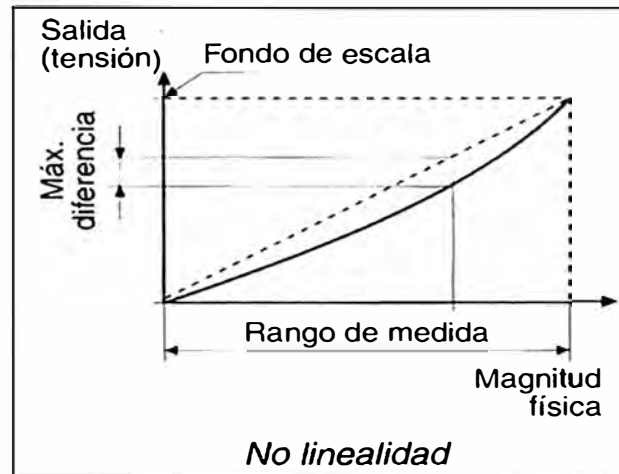


Figura 3.3 Representación de la no linealidad

d) Resolución: Es la variación detectable más débil.

f) Histéresis: En ocasiones los caminos que sigue la gráfica (magnitud-senal eléctrica) no tienen el mismo en al aumento y en la disminución (ver Figura 3.4).

$$\text{Histéresis} = \frac{\text{Máxima diferencia}}{\text{Rango de medida}} \times 100 \quad (3.1)$$

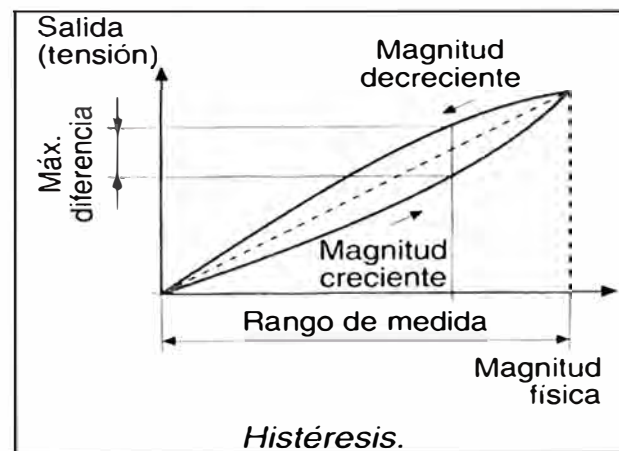


Figura 3.4 Representación de la histéresis

3.3 Sensores de luz

Los sensores de luz o detectores de luz proporcionan una salida eléctrica utilizable en respuesta a una radiación electromagnética incidente en la porción UV-Visible del espectro. Los sensores de luz utilizados en sistemas de detección de los espectrofotómetros de UV-Visible son los siguientes [4]:

- Fotorresistencia (LDR).
- Fotodiodo.
- Fototransistor.
- Fotomultiplicador.

3.3.1 Fotorresistencia (LDR)

La fotorresistencia está compuesta de un material semiconductor, donde la resistencia varía en función de la iluminación. La fotorresistencia reduce su valor resistivo en presencia de rayos luminosos. También a la fotorresistencia se le llama resistencias dependientes de luz (*light dependent resistors*) o fotoconductores. La Figura 3.5(a) ilustra el símbolo de la fotorresistencia y (b) su forma física.

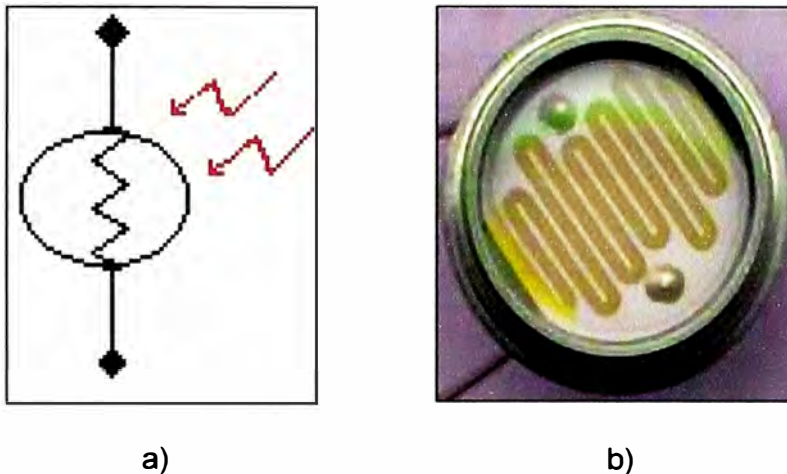


Figura 3.5 La fotorresistencia a) símbolo b) forma física

La fotorresistencia está hecha de un semiconductor de alta resistencia. Si la luz que incide en el dispositivo es de alta frecuencia, los fotones son absorbidos por la elasticidad del semiconductor dando a los electrones la suficiente energía para saltar de la banda de valencia a la banda de conducción, aumentando así la conductividad del dispositivo y disminuyendo su resistencia. La Figura 3.6 ilustra la curva característica resistencia-irradiación de los LDR.

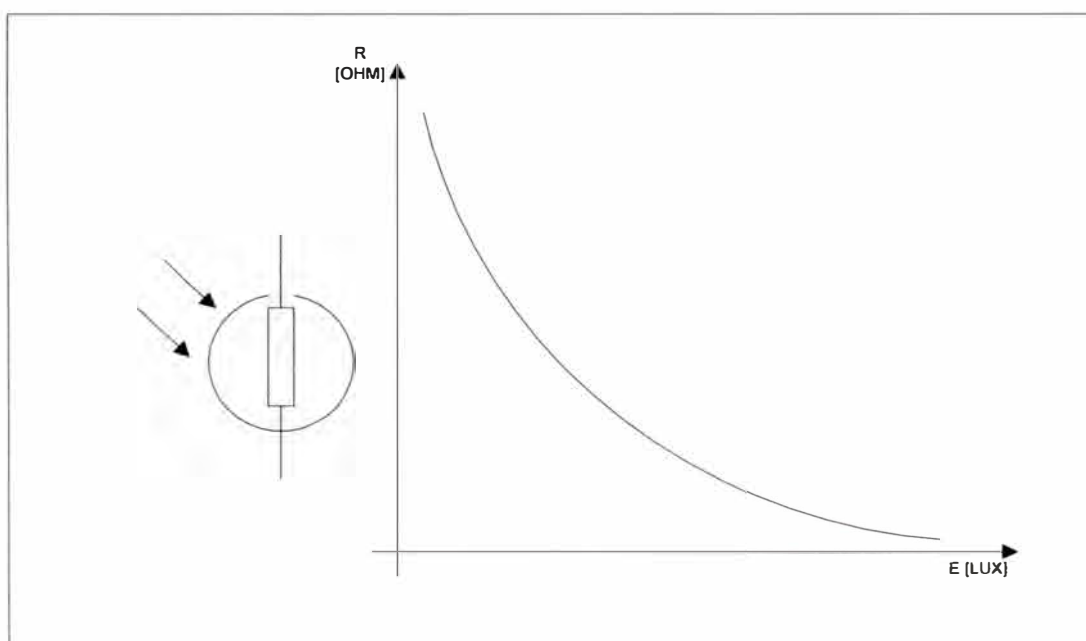


Figura 3.6 Curva característica resistencia-irradiación de los LDR

a) Principio de funcionamiento

La resistencia de estos tipos de componentes varía en función de la luz que recibe en su superficie. Así, cuando están en oscuridad su resistencia es alta y cuando reciben luz su resistencia disminuye considerablemente. Cuando incide la luz en el material fotoconductor se generan pares electrón – hueco (ver Figura 3.7). Al haber un mayor número de portadores, el valor de la resistencia disminuye. De este modo, la fotorresistencia iluminada tiene un valor bajo de resistencia. Las células son también capaces de reaccionar a una amplia gama de frecuencias, luz visible y ultravioleta (UV). Los materiales que intervienen en su construcción son Sulfuro de Cadmio, utilizado como elemento sensible a las radiaciones visibles. Estos materiales se colocan en encapsulados de vidrio o resina.

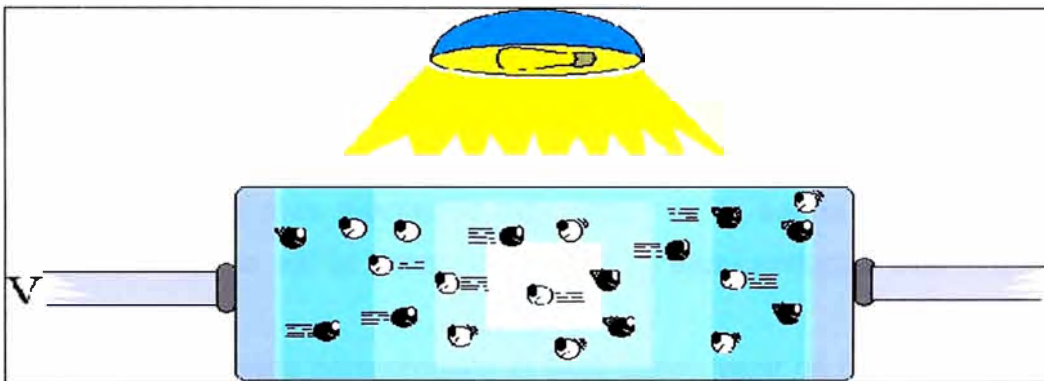


Figura 3.7 Fotogeneración de portadores

Cuando se deja de iluminar, los portadores fotogenerados (ver Figura 3.8) se recombinarán hasta volver a sus valores iniciales. Consecuentemente, el número de portadores disminuirá y el valor de la resistencia será mayor. El material de la fotorresistencia responderá de acuerdo a unas longitudes de onda determinadas.

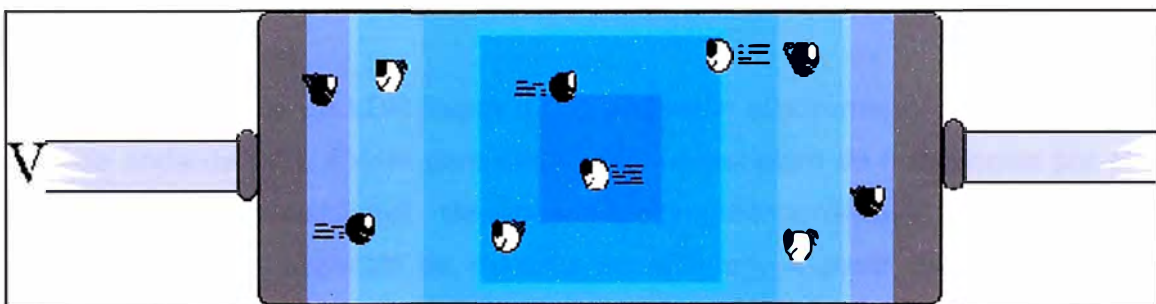


Figura 3.8 Estado de conducción sin fotogeneración

Es decir, la variación de la resistencia será máxima para una longitud de onda determinada. Esta longitud de onda depende del material y el dopado, y deberá ser suministrada por el proveedor. En general, la variación de resistencia en función de la longitud de onda presenta curvas como ilustrado en la Figura 3.9.

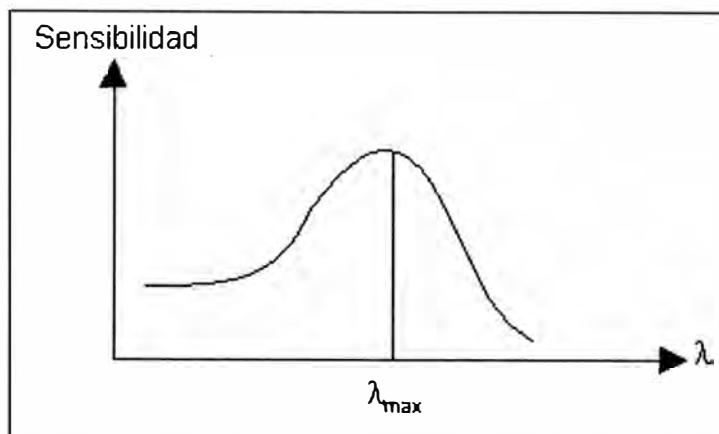


Figura 3.9 Curva característica de los LDR

La conductividad eléctrica en un material depende del número de portadores en la banda de conducción. En un semiconductor, a baja temperatura la mayor parte de sus electrones están en la banda de valencia comportándose casi como aislante. Al aumentar la temperatura se logra la agitación de los electrones, y tomando en cuenta que las bandas de valencia y de conducción están próximas (a diferencia de lo que sucede en un aislante), cada vez hay más electrones que saltan de la banda de valencia a la de conducción, aumentando así la conductividad. Si el semiconductor está dopado, este salto es aun más fácil.

La energía necesaria para producir el salto puede venir de otras fuentes externas además del calor, como pueden ser una radiación óptica o una tensión eléctrica.

Son sensibles también a la temperatura, que afecta también a su sensibilidad a la radiación incidente en un grado tanto más alto cuanto menor sea la iluminación (hay una generación térmica de pares electrón-hueco). La temperatura es también causa del denominado ruido térmico, que se presenta como fluctuaciones de corriente cuando se aplica una tensión a la fotorresistencia para poder medir su valor.

b) Respuesta espectral

La respuesta de un LDR frente a una radiación electromagnética depende de la longitud de onda de esta. Existe para cada LDR, un espectro de frecuencias por el cual se obtiene mayor sensibilidad, disminuyendo progresivamente a medida que nos distanciamos de este espectro de máxima sensibilidad. A partir de una determinada frecuencia umbral no se produce efecto fotoeléctrico.

La Figura 3.10 ilustra la respuesta espectral para diversos materiales, entre ellos tenemos del silicio y germanio. La elección del tipo de material está en función de la longitud de onda a detectar, además, los materiales deben ser transparentes a las longitudes de onda de interés, pues de lo contrario se producirá una excesiva reflexión superficial.

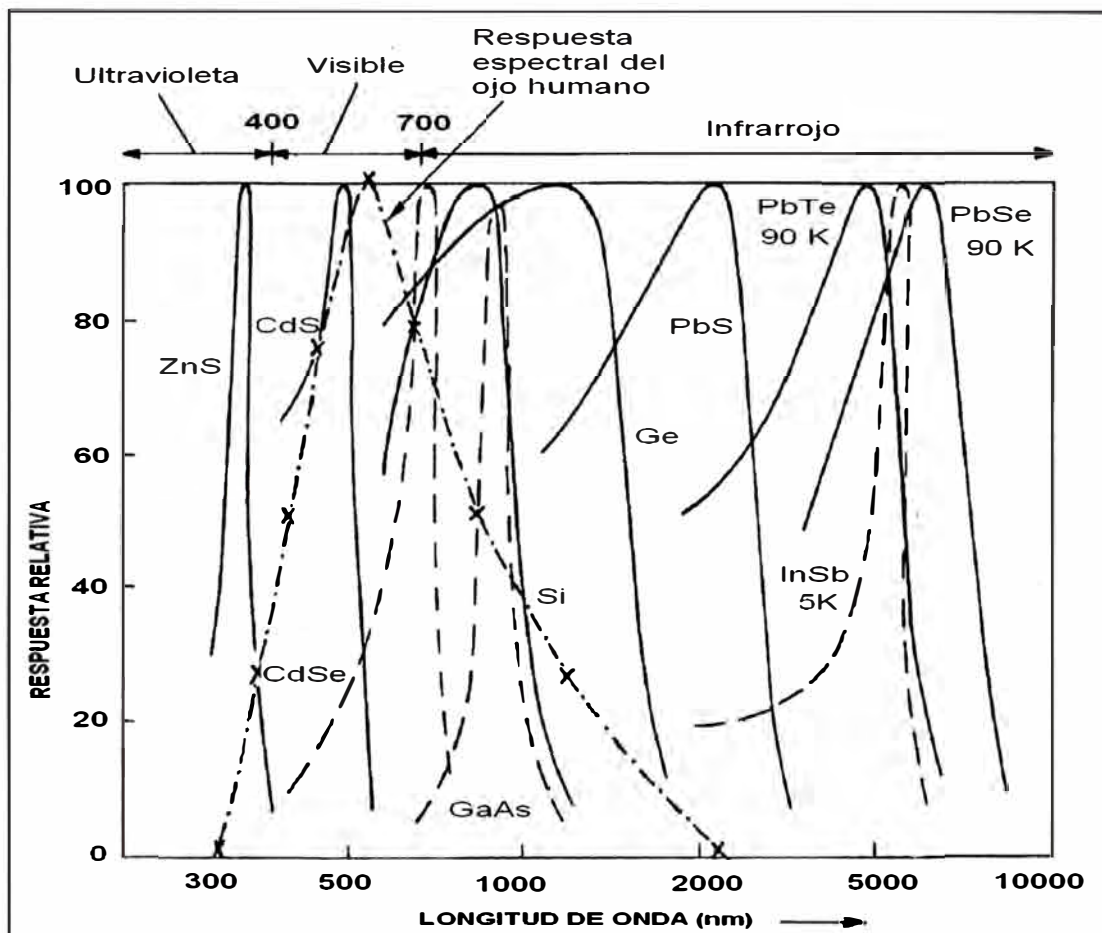


Figura 3.10 Respuesta espectral de LDR para diversos materiales

3.3.2 Fotodiodo

El fotodiodo es un dispositivo semiconductor, construido con una unión PN, al igual que otros diodos que son utilizados en varias aplicaciones, en este caso el diodo semiconductor está expuesto a la luz a través de una cobertura cristalina y a veces tienen la forma de lente; además por la naturaleza de su diseño y construcción será muy sensible a la incidencia de la luz visible. La Figura 3.11 ilustra el símbolo del fotodiodo (a), así como su presentación en diferentes formas (b).

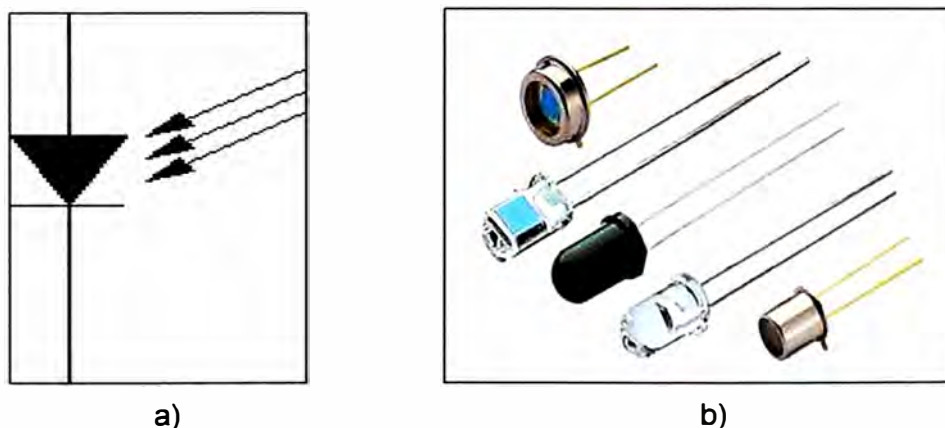


Figura 3.11 El fotodiodo a) símbolo b) diversos tipos de forma

Todos los semiconductores tienen entre sus características ser sensibles a la luz, aunque en el caso de los fotodiodos, se diseñan específicamente para esto, la construcción tiene la finalidad de lograr que esta sensibilidad sea máxima.

La base del funcionamiento de los diodos, indican que tienen un sentido normal de circulación de corriente que se llama polarización directa, donde el diodo deja pasar la corriente eléctrica en ese sentido, pero no lo permite en el inverso. En el fotodiodo la corriente generada (varía con los cambios de la luz) es la que circula en sentido inverso al permitido por la juntura del diodo. Es decir, para su funcionamiento el fotodiodo es polarizado de manera inversa. Se produce un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz.

El fotodiodo se comporta básicamente como un generador de corriente proporcional a la iluminación, y que permanece prácticamente constante hasta que se alcanza la tensión de avalancha. Operan en forma similar a las celdas fotovoltaicas, excepto que se polarizan inversamente para tener un mayor control sobre la anchura de la región desierta.

La mayoría de los detectores de luz comunes consisten en una unión de fotodiodo y un amplificador, que es necesaria porque la corriente del fotodiodo se halla en el margen comprendido entre las décimas de microamperio y las decenas de microamperios. La Figura 3.12 ilustra la curva característica que relaciona la iluminación con la corriente inversa.

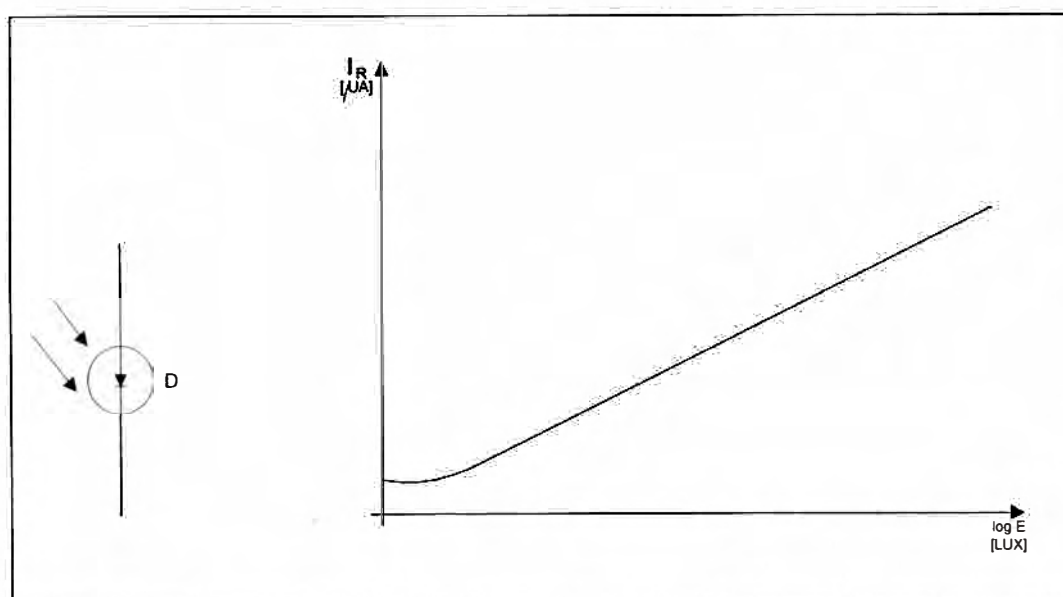


Figura 3.12 Curva característica corriente – irradiación del fotodiodo

a) Principio de Funcionamiento

La operación del fotodiodo tiene como efecto fundamental la generación de pares electrón - hueco debido a la energía luminosa. Este fenómeno hace que se diferencie del

diodo rectificador de silicio, donde, sólo existe generación térmica de portadores de carga. La generación luminosa, tiene una mayor incidencia en los portadores minoritarios, que son los responsables de que el diodo conduzca ligeramente en inversa.

El fotodiodo en inversa está básicamente influenciado por la incidencia de la luz. El diodo real presenta pequeñas corrientes de fugas de valor I_s , que son, debidas a los portadores minoritarios, electrones en la zona P y huecos en la zona N. La generación de portadores debido a la luz trae como consecuencia un aumento sustancial de portadores minoritarios, lo que se traduce en un aumento de la corriente de fuga en inversa como se ilustra en la Figura 3.13.

El fotodiodo en polarización directa apenas se ve alterado por la generación luminosa de portadores. Esto se debe a que los portadores que se generan a consecuencia del dopado (portadores mayoritarios) son mucho más numerosos que los portadores de generación luminosa.

La rapidez en los fotodiodos es mayor que las fotorresistencias, es decir, tienen un tiempo de respuesta menor; pero sólo pueden conducir en una polarización directa corrientes relativamente pequeñas.

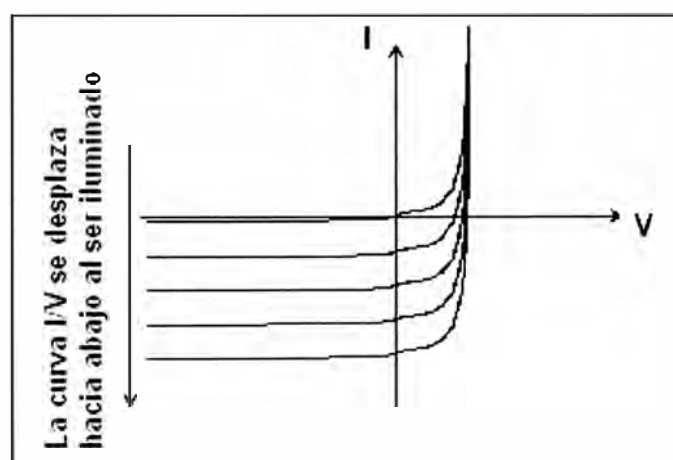


Figura 3.13 Curvas características de un fotodiodo

Esta relación es constante para un amplio intervalo de iluminaciones. El modelo circuital del fotodiodo en inversa está formado por un generador de intensidad cuyo valor depende de la cantidad de luz. En directa, el fotodiodo se comporta como un diodo normal. Si está fabricado en silicio, la tensión que cae en el dispositivo será aproximadamente 0.7 V.

El fotodiodo tiene una construcción parecida a la de un diodo LED, en el sentido que requiere de una ventana transparente a la luz, para que ingresen los rayos luminosos y puedan incidir en la unión PN. En la Figura 3.14 aparece una geometría típica, con un encapsulado transparente a la luz.

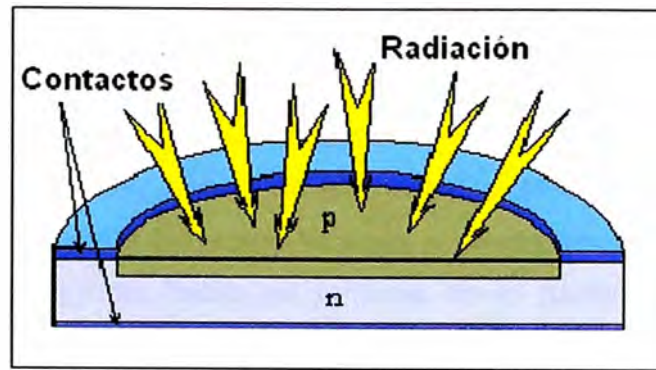


Figura 3.14 Corte transversal de un fotodiodo comercial

b) Respuesta espectral

La respuesta espectral de los fotodiodos depende de la absorción en la ventana y en el propio material detector. El silicio, por ejemplo, es transparente a las radiaciones con longitud de onda mayor de 1100 nm y, por lo tanto, al no ser absorbidas dichas radiaciones tampoco podrán ser detectadas. Por el contrario, las longitudes de onda menores de 400 nm apenas penetran y son absorbidas en una capa superficial muy fina, por lo que se cuida especialmente el acabado superficial y se procura que la zona dopada p sea muy fina. La Figura 3.15 ilustra la curva espectral de la sensibilidad fotoeléctrica de un fotodiodo de silicio y de otro de germanio. Los dos fotodiodos cubren el intervalo de longitud de onda desde unos 300 a 1800 nm. En este contexto, el diodo de silicio tiene mayor significación, puesto que cubre el espectro visible.

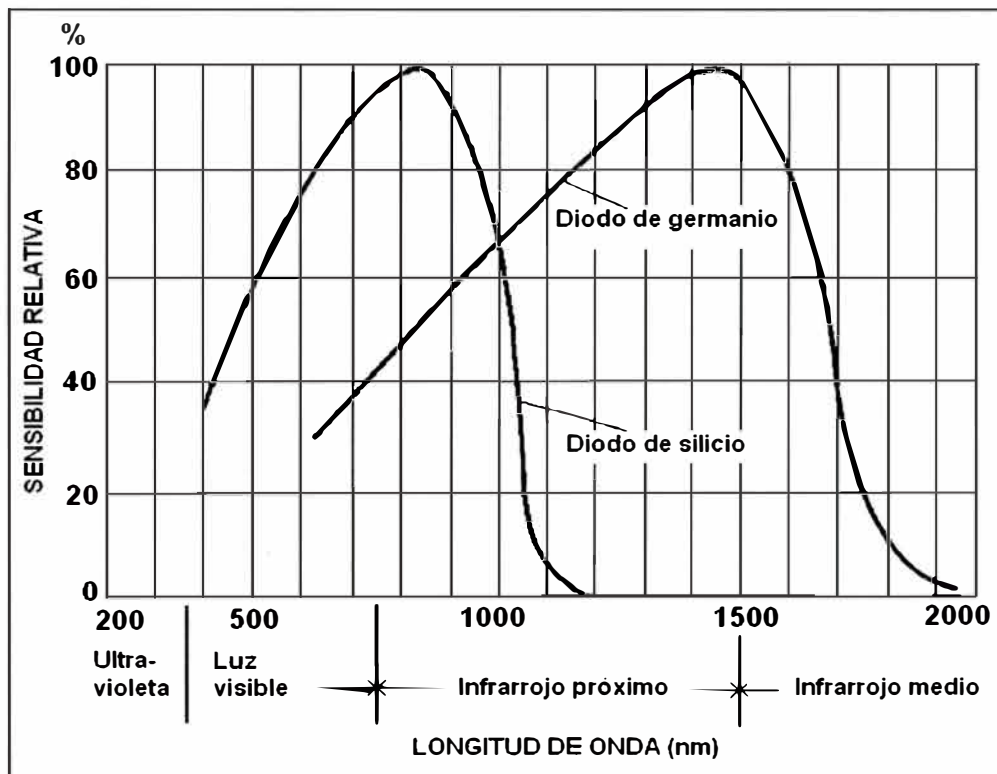


Figura 3.15 Curva espectral del fotodiodo de silicio y de germanio

3.3.3 Fototransistor

El fototransistor está compuesto de material semiconductor, tiene dos junturas y las tres conexiones externas, como el colector, base y emisor, de la misma manera que un transistor normal. Además, siendo un elemento sensible a la luz, la diferencia se encuentra en su cápsula, que tiene una ventana o puede ser totalmente transparente, para dejar que la luz ingrese hasta las junturas de la pastilla semiconductor y se produzca el efecto fotoeléctrico.

El fototransistor al contar con las mismas características de un transistor normal, regula su corriente de colector por medio de la corriente de base. También, dentro de sus características como elemento optoelectrónico, el fototransistor logra conducir más o menos corriente de colector cuando incide más o menos luz sobre sus junturas.

El fototransistor es una combinación integrada de fotodiodo y transistor bipolar npn (sensible a la luz) donde la base recibe la radiación óptica. Es importante notar que todos los transistores son sensibles a la luz, pero los fototransistores están diseñados para aprovechar esta característica. La Figura 3.16 (a) ilustra símbolo del fototransistor y (b) su presentación en diferentes formas.



Figura 3.16 El fototransistor a) símbolo b) diversos tipos de forma

Existen transistores FET, que son muy sensibles a la luz; sin embargo se encuentran que la mayoría de los fototransistores consisten en una unión npn con una región de base amplia y expuesta, como se ilustra en la Figura 3.17.

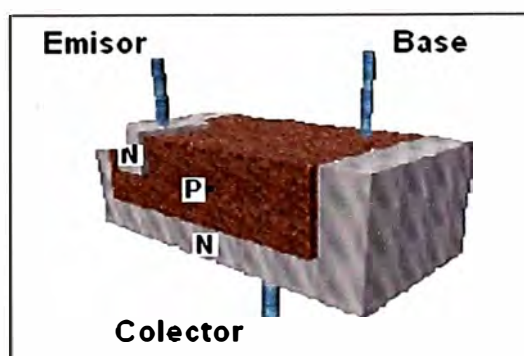


Figura 3.17 Estructura básica de fototransistor NPN

El fototransistor se alimenta con tensión positiva entre colector y emisor, y la base se puede dejar abierta o conectada al emisor con una resistencia. Cuando el fototransistor se encuentra en la oscuridad, la corriente de colector es mínima y aumenta paulatinamente con el incremento de la iluminación.

En la Figura 3.18 se ilustra el esquema de conexión del fototransistor, como también la curva característica que relaciona la variación de la corriente de colector I_c con la variación de iluminación E .

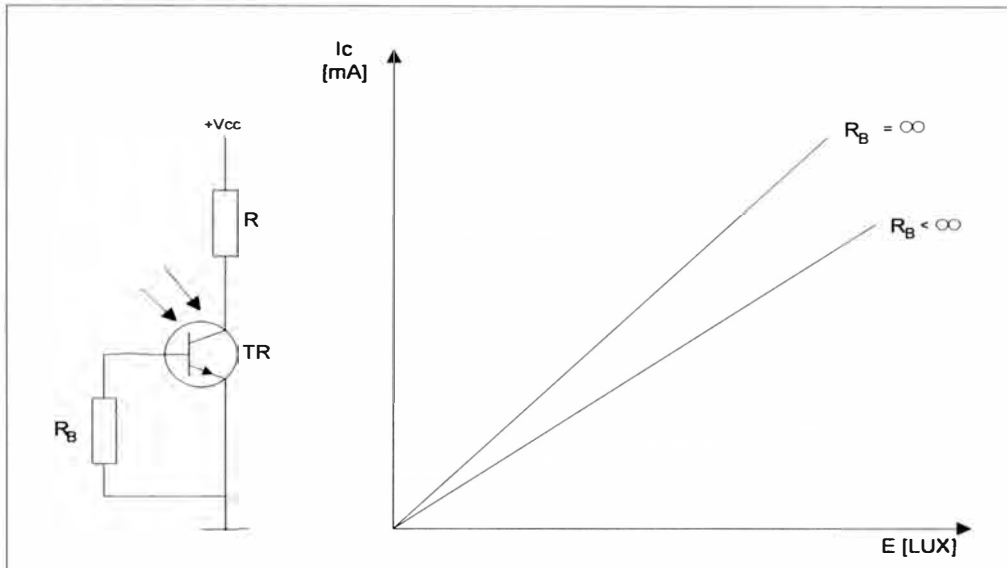


Figura 3.18 Curva característica corriente colector – irradiación del fototransistor

a) Principio de funcionamiento

El fototransistor al exponerse a la luz, hace que los fotones entren en contacto con la base del semiconductor, generando huecos y como consecuencia una corriente de base, por lo cual el transistor entra en la región activa y se origina una corriente de colector a emisor. Es decir, los fotones, reemplazan la corriente de base del transistor que usualmente es aplicado eléctricamente (ver Figura 3.19).

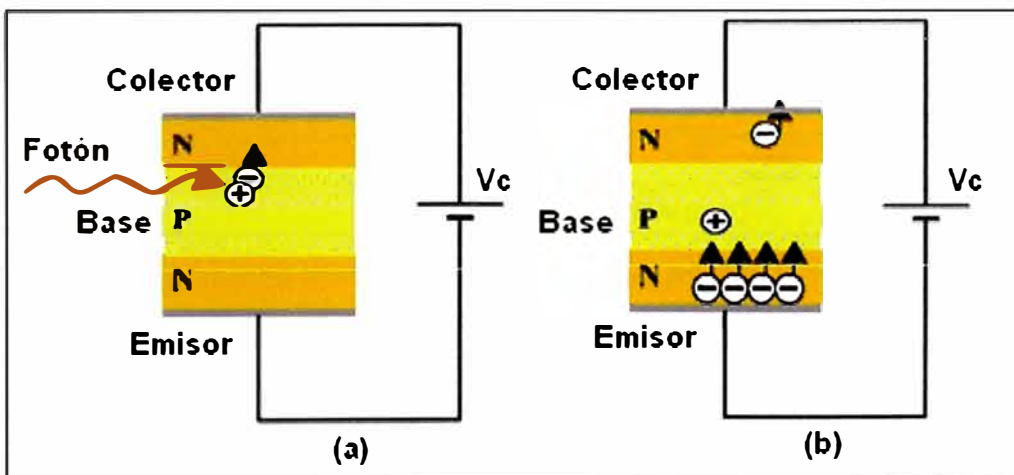


Figura 3.19 Generación de corriente de base a) fotones inciden en la base b) creación de huecos-electrón

El fototransistor se construye con silicio o germanio, al igual que cualquier tipo de transistor bipolar, además existen fototransistores npn como pnp. Como la radiación es la que dispara la base del transistor, y no una corriente aplicada eléctricamente, es por eso que generalmente la patilla que corresponde a la base no se incluye en el transistor.

Se necesita tener un cuidadoso proceso de fabricación de la pastilla del transistor para hacer compatible la máxima reducción de la corriente en la oscuridad del fototransistor, con la obtención de una alta sensibilidad a la luz. Las corrientes de este tipo, típicas del fototransistor para una tensión inversa de 10v, son del orden de 1 nA a temperatura ambiente y aumentan en un factor de 2 para cada 10 °C de aumento de temperatura.

b) Respuesta espectral

La curva de respuesta espectral nos proporciona una indicación de la habilidad del dispositivo para responder a las diferentes longitudes de onda.

Es un fototransistor de alta sensibilidad tiene un espectro de funcionamiento que encierra la luz visible, como también gran parte de la longitud infrarroja (mayor a los 700 nm), como se ilustra en la Figura 3.20.

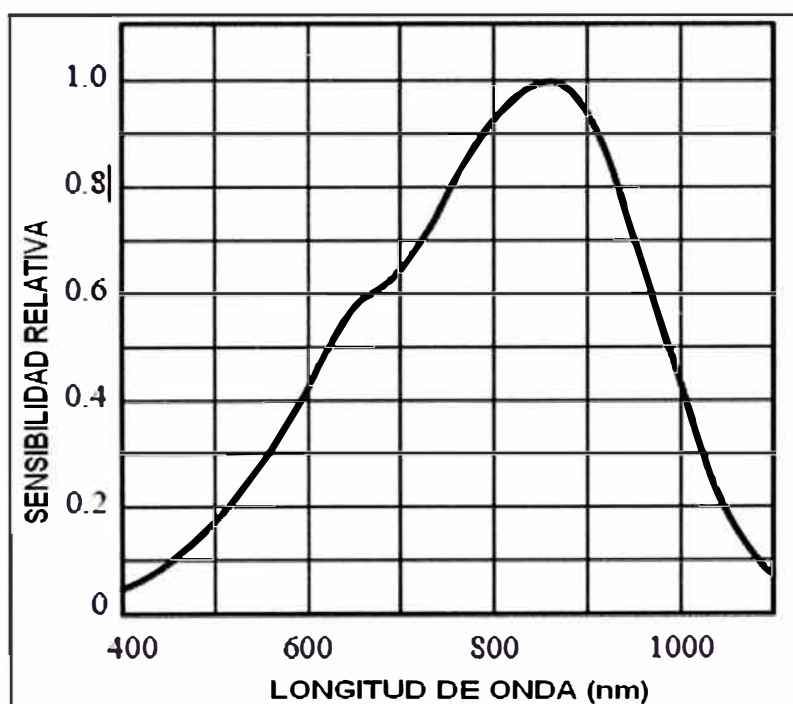


Figura 3.20 Respuesta espectral del fototransistor

3.3.4 Fotomultiplicador

Es un tipo de detector óptico de vacío que aprovecha el efecto de emisión secundaria de electrones para responder a niveles muy bajos de iluminación, manteniendo un nivel de ruido aceptable. Con la llegada de los dispositivos CCD y su gran eficiencia cuántica, los fotomultiplicadores han visto reducirse grandemente en sus

aplicaciones, quedando prácticamente reducidas a los detectores de partículas, basados en la radiación de Cherenkov. La Figura 3.21 ilustra un fotomultiplicador genérico.



Figura 3.21 Presentación de un fotomultiplicador

a) Principio de funcionamiento

Los fotomultiplicadores se construyen de un tubo de vacío de cristal que contenga un fotocátodo, varios dinodos y un ánodo. Los fotones inciden en el material del fotocátodo que es presente como depósito fino en la ventana de la entrada del dispositivo, con los electrones que son producidos como consecuencia del efecto fotoeléctrico. Estos electrones son dirigidos por el electrodo de concentración hacia el multiplicador de electrón, donde los electrones son multiplicados por el proceso de la emisión secundaria. El multiplicador de electrón consiste en un número de electrodos, llamados dinodos. Cada dinodo se lleva a cabo en un voltaje más positivo que el anterior. Los electrones salen del fotocátodo, teniendo la energía del fotón entrante (menos la función de trabajo del fotocátodo). Mientras que se mueven hacia el primer dinodo son acelerados por el campo eléctrico y llegan con energía mucho mayor. En el pulso del primer dinodo, se emiten los electrones de una energía más baja y éstos, alternadamente, se aceleran hacia el segundo dinodo. La geometría de la cadena del dinodo es tal que una cascada ocurre con un número cada vez mayor de electrones que son producidos en cada etapa. Finalmente el ánodo se alcanza donde la acumulación de carga da lugar a un pulso actual agudo que indica la llegada de un fotón en el fotocátodo.

Los tubos de fotomultiplicador requieren típicamente 1000 a 2000 v para la operación apropiada. El voltaje más negativo está conectado con el cátodo, y el voltaje más positivo está conectado con el ánodo. Los voltajes son distribuidos a los dinodos por un divisor de voltaje resistente, aunque las variaciones tales como diseños activos (con los transistores o los diodos) son posibles.

Los tubos fotomultiplicadores contienen 9 o 10 dinodos (ver Figura 3.22) los cuales originan hasta 100,000 electrones por cada fotoelectrón generado en el cátodo.

Esta amplificación interna alta significa que pueden ser detectadas potencias radiantes muy bajas sin necesidad de una amplia amplificación externa.

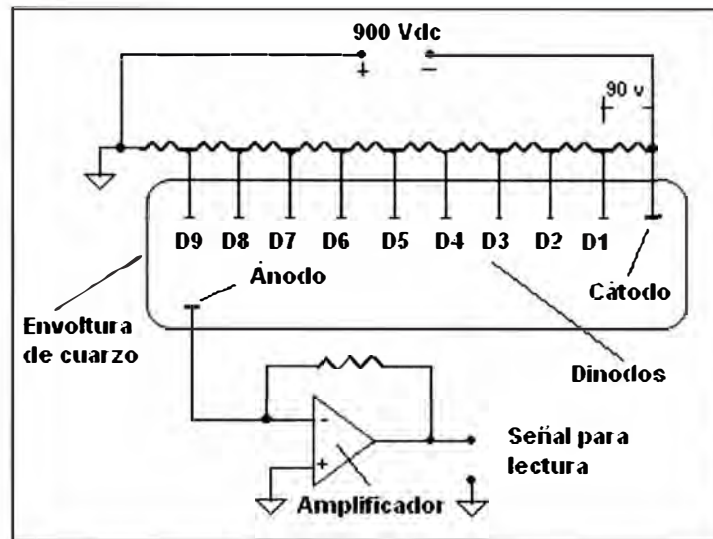


Figura 3.22 Distribución de los dinodos en un fotomultiplicador

c) Respuesta espectral

Los fotomultiplicadores tienen una eficiencia cuántica entre el 20 y 30%, siendo generalmente mayor para los azules y menor para los rojos, aun así, existen fotomultiplicadores optimizados para tener una mayor eficiencia cuántica en determinados rangos del espectro (ultravioletas, verdes, rojos, etc.), como se ilustra en la Figura 3.23.

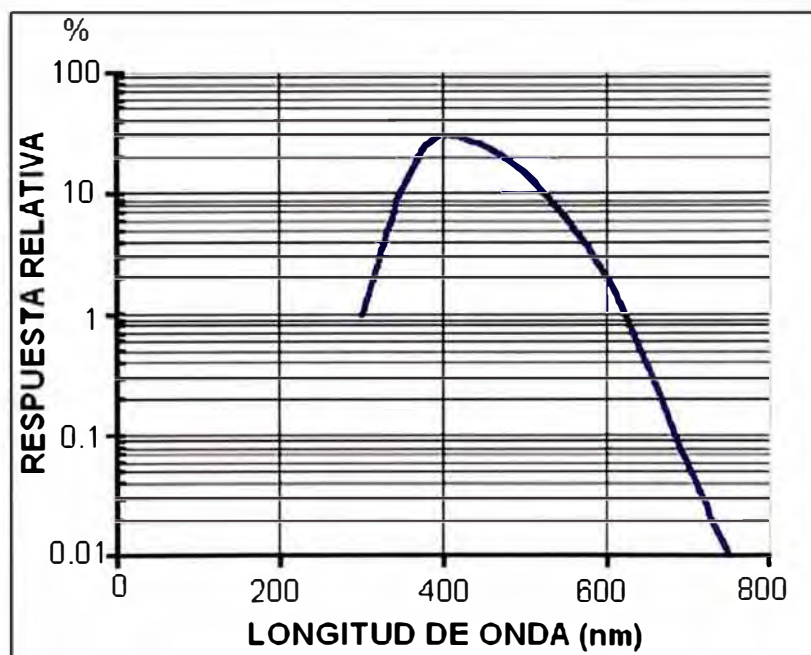


Figura 3.23 Respuesta espectral del fotomultiplicador

CAPITULO IV

ACONDICIONADORES DE SEÑALES DE UN ESPECTROFOTOMETRO UV-VISIBLE

4.1 Introducción

Los acondicionadores de señal, en un sentido amplio, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar.

En el capítulo II se presenta los componentes de un espectrofotómetro, donde, se logra identificar el sistema electrónico, en la cual destaca el sistema de lectura, parte donde se desarrolla el acondicionamiento de la señal. Además en el capítulo III se realiza el análisis de los sensores de luz utilizados en el sistema de detección de los espectrofotómetros UV-Visible, permitiendo obtener las señales eléctricas las cuales serán tratadas en un acondicionador de señales.

En este capítulo se analiza los sistemas de acondicionamientos de señales, principalmente las funciones de acondicionamiento de señal comunes para un espectrofotómetro de luz UV-Visible, tales como: la etapa de amplificación, etapa de la conversión de la corriente a voltaje.

4.2. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos (DAQ) es un equipo que nos permite tomar señales físicas del entorno y convertirlas en datos que luego se podrán procesar y presentar. En ocasiones, el sistema de adquisición es parte de un sistema de control, por tanto, la información recibida se procesa para obtener una serie de señales de control. En la Figura 4.1 se ilustra el diagrama de los bloques que componen un sistema de adquisición de datos.

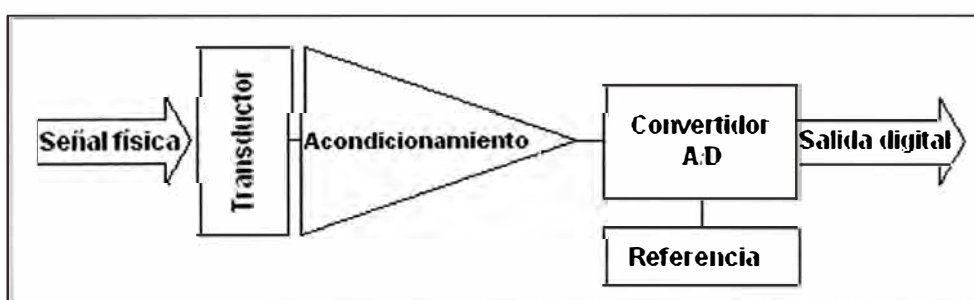


Figura 4.1 Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos (DAQ)

En esta figura se consideran los bloques principales para adquisición, tales como:

a) El transductor: Es un elemento que convierte la magnitud física que va ser medida en una señal de salida (tensión o corriente) que puede ser procesada por el sistema. Si la señal de entrada es eléctrica, entonces, se puede decir que el transductor es un elemento que transforma la energía de un tipo en otro. Por tanto, el transductor debe tomar poca energía del sistema bajo observación, para no alterar la medida.

b) El acondicionamiento de señal: Es la etapa encargada de adaptar la señal que proviene del transductor a la entrada del convertidor analógico/digital. Esta adaptación suele ser doble, se encarga de adaptar el rango de salida del transductor al rango de entrada del convertidor y acoplar la impedancia de salida de uno con la impedancia de entrada del otro.

c) El convertidor analógico/digital: Es un sistema que presenta en su salida una señal digital a partir de una señal analógica de entrada, realizando las funciones de cuantificación y codificación.

La cuantificación implica la división del rango continuo de entrada en una serie de pasos, de modo que para infinitos valores de la entrada, la salida sólo puede presentar una serie determinada de valores. Consecuentemente, la cuantificación implica una pérdida de información.

La codificación es el paso por el cual la señal digital se ofrece según un determinado código binario, de modo que las etapas posteriores al convertidor puedan leer estos datos adecuadamente. Este paso se debe tener en cuenta, ya que puede hacer que se obtengan datos erróneos, sobre todo cuando el sistema admite señales positivas y negativas con respecto a masa (tierra), momento en el cual la salida binaria del convertidor nos da tanto la magnitud como el signo de la tensión que ha sido medida.

d) La etapa de salida: Es el conjunto de elementos que permiten conectar el DAQ con el resto del equipo, y puede ser desde una serie de buffers digitales incluidos en el circuito convertidor, hasta una interface RS 232, RS 485 o Ethernet para conectar a un ordenador o estación de trabajo, para sistemas de adquisición de datos comerciales.

4.3 Acondicionadores de señal UV-Visible

El propósito primario de un circuito de acondicionamiento de señal para un espectrofotómetro UV-Visible, es modificar la salida del sensor de luz (corriente eléctrica) en una forma que pueda ser óptimamente convertida a un formato digital por su ADC (convertidor análogo-digital), de tal manera que dicha información sea procesada a través de dispositivos lógicos de propósito general como los microprocesadores o microcontroladores. Para ello, el acondicionador debe garantizar que en la entrada del ADC se cumplan, entre otros, los siguientes requisitos:

- 1) La señal de entrada debe ser una forma de onda de voltaje. Puesto que muchos dispositivos suministran una señal de corriente, como es el caso de los sensores de luz, usualmente en el rango de los pA y μ A, el acondicionador debe convertirla a una señal de voltaje.
- 2) El rango dinámico de la señal de entrada deberá ser igual al rango dinámico del dispositivo de procesamiento de la señal, para maximizar la resolución del ADC.
- 3) La impedancia de la fuente de la señal de entrada debe ser lo suficientemente baja para que los cambios en la impedancia de entrada del dispositivo de procesamiento no afecten esa señal.
- 4) El ancho de banda de la señal de entrada debe ser limitado a menos de la mitad de la tasa de muestreo de la conversión A/D.

4.3.1 Funciones de acondicionamiento de señales

Además de manejar sensores específicos, los acondicionadores de señales realizan una gran variedad de funciones de acondicionamiento de propósito general con el fin de mejorar la calidad, la flexibilidad y la confiabilidad de los sistemas de medición. Las siguientes son las más comunes [10]:

- Conversión de voltaje a voltaje
- Amplificación
- Filtrado
- Comparación
- Aislamiento
- Multiplexaje
- Conversión de corriente a voltaje
- Conversión de capacitancia a voltaje

Entre las funciones de acondicionamiento de señal comunes para un espectrofotómetro de UV-Visible se tienen: conversión de corriente a voltaje, amplificación y filtrado (ver Figura 4.2).

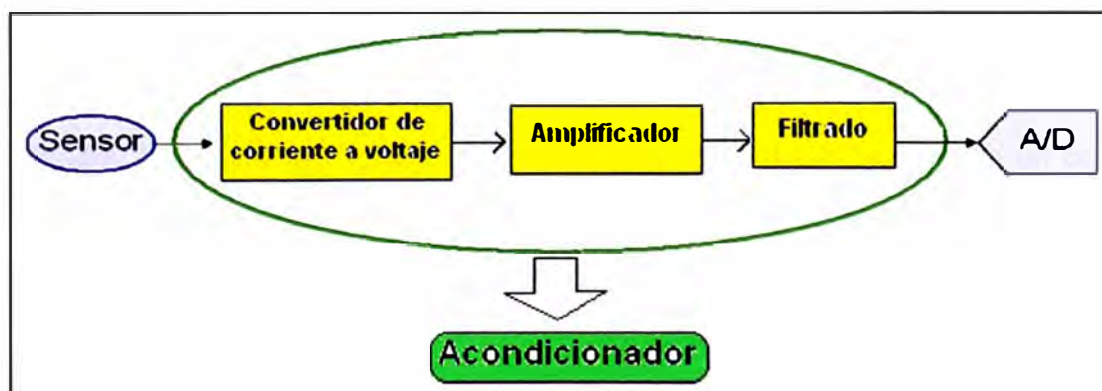


Figura 4.2 Diagrama de bloques del acondicionador en un espectrofotómetro UV-Visible

1) Amplificador. Debido a que las señales eléctricas (corriente) que provienen de los sensores de luz utilizados en los espectrofotómetros UV-Visible, son muy pequeñas en magnitud, las mismas requieren ser acondicionadas a través de amplificadores para reforzar su nivel y conseguir que se acoplen mejor al rango del ADC (convertidor análogo-digital) del sistema de procesamiento de la señal. De este modo se incrementan la exactitud, la resolución, la sensibilidad y la relación señal a ruido (SNR) de la medida. Aunque la mayoría de tarjetas de los procesadores incluyen amplificadores para este propósito, muchos sensores generalmente requieren amplificación adicional [10].

a) Consideraciones sobre los Amplificadores Operacionales. Debido a la importancia de los amplificadores operacionales (Opam) como principal componente electrónico que está presente en la composición de los circuitos acondicionadores de señal del espectrofotómetro UV-visible, se resaltan algunas consideraciones importantes.

Amplificador Operacional "Ideal". Un amplificador operacional "ideal" (ver Figura 4.3) tiene:

- Impedancia de entrada infinita
- Impedancia de salida cero
- Ganancia infinita en lazo abierto en todas las frecuencias
- Ningún error en DC
- Rechazo en modo común infinito

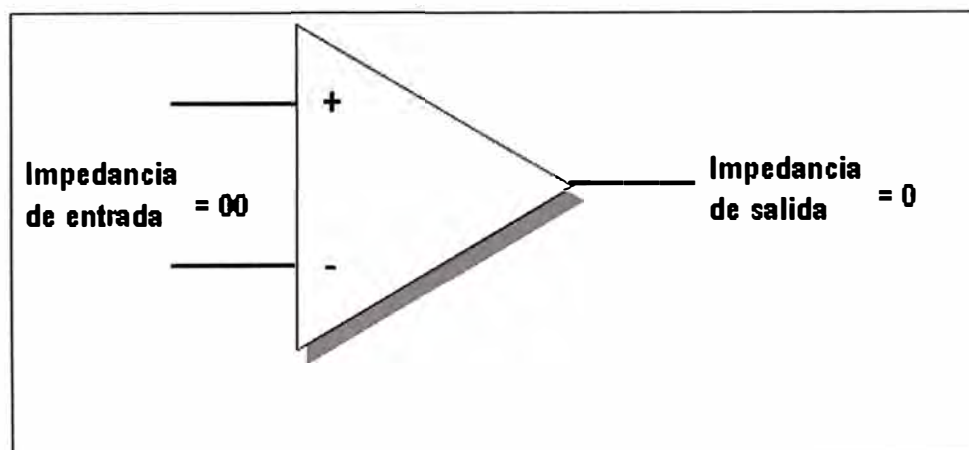


Figura 4.3 Amplificador operacional ideal

Amplificador Operacional "Real". Un amplificador operacional "real" tiene un conjunto de parámetros finitos que a veces se denominan como "términos de error" (ver Figura 4.4).

Parámetros típicos en DC:

- Tensión de "offset" de entrada, E_{OS} o V_{OS}
- Corriente de "bias" de entrada, I_b

Parámetros típicos en AC:

- Tensión de ruido de entrada, E_n
- Corriente de ruido de entrada, I_n
- Pequeña señal / ancho de banda
- Slew rate

Los valores de estos parámetros determinarán las aplicaciones para las que un amplificador está mejor preparado.

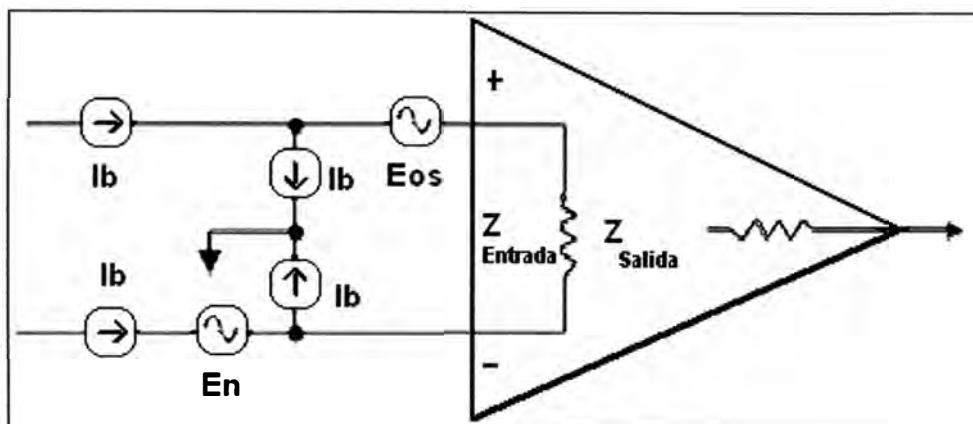


Figura 4.4 Amplificador Operacional real

b) Circuitos de amplificación. Entre los circuitos de amplificación más comúnmente usados para acondicionamiento de señales, se tienen:

1. Amplificador Inversor

Es el circuito de amplificación más comúnmente usado para acondicionamiento de señales, tal como se ilustra en la Figura 4.5. Esta estructura tiene una ganancia de voltaje A_v .

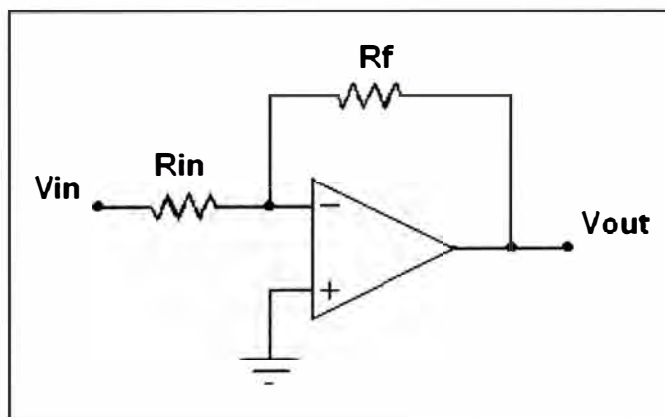


Figura 4.5 Amplificador inversor

Se denomina inversor ya que la señal de salida es igual a la señal de entrada (en forma) pero con la fase invertida 180 grados.

El análisis de este circuito es el siguiente: $V_+ = V_- = 0$

Definiendo corrientes:

$$\frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = \frac{V_{out} - 0}{R_f} \quad (4.1)$$

y de aquí se despeja:

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_f}{R_{in}} \quad (4.2)$$

Para el resto de circuitos el análisis es similar.

$$Z_{in} = R_{in} \quad (4.3)$$

Por lo cual se puede controlar la impedancia de entrada mediante la elección de R_{in} .

Así también, es posible implementar otras configuraciones, tales como el derivador, integrador, sumador. En sistemas microelectrónicos se puede utilizar como buffer, poniendo 2 en cascada.

2. Amplificador no Inversor

Como se observa en la Figura 4.6, el voltaje de entrada, ingresa por el pin positivo, también, como se conoce que la ganancia del amplificador operacional es muy grande, entonces, el voltaje en el pin positivo es igual al voltaje en el pin negativo. Luego, conociendo el voltaje en el pin negativo podemos calcular, la relación que existe entre el voltaje de salida con el voltaje de entrada haciendo uso de un pequeño divisor de tensión.

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4.4)$$

$Z_{in} = \infty$, lo cual nos supone una ventaja frente al amplificador inversor.

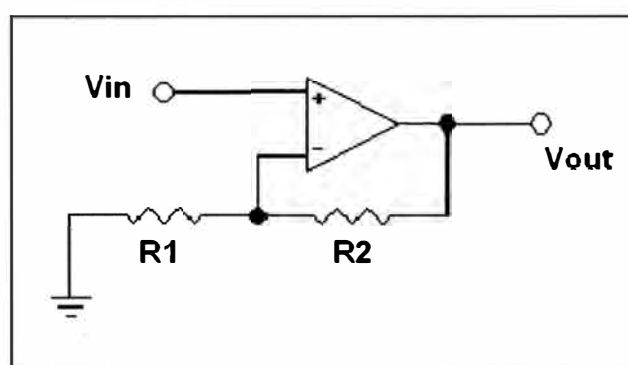


Figura 4.6 Amplificador no inversor

2) Convertidor de corriente a voltaje. Algunos sensores proporcionan como salida una corriente en lugar de un voltaje. El ejemplo mas representativo son los sensores de luz, el cual tienen una salida de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que inciden en su superficie, como se indica en el capítulo anterior.

En estos casos se necesita de circuitos de acondicionamiento adecuados para convertir la salida de corriente eléctrica del sensor en una señal de voltaje equivalente. Para convertir corriente a voltaje, usualmente se utiliza una configuración amplificadora inversora, puesto que el amplificador no inversor drena muy poca corriente.

En la Figura 4.7 se ilustra como ejemplo un circuito amplificador de corriente conectado a un fotodiodo, configurado para ser un convertidor de corriente a voltaje.

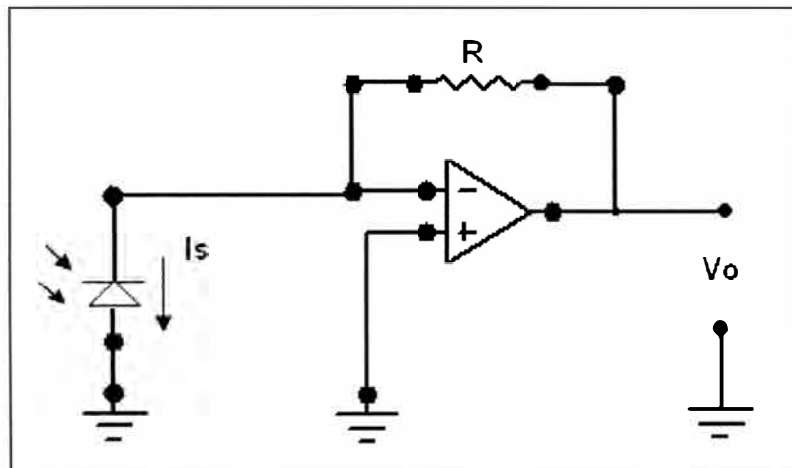


Figura 4.7 Circuito convertidor de corriente a voltaje de un fotodiodo

Se nota en el diagrama que el circuito es idéntico al amplificador inversor, excepto que se ha retirado la resistencia de entrada. A medida que se incrementa la cantidad de luz que incide en la superficie del fotodiodo, la señal de corriente de salida también se incrementa o lo hace de manera proporcional, de tal manera que el voltaje en V_o también se incrementa o lo haga en forma proporcional.

3) Filtrado. Además de amplificadores, los acondicionadores de señales incluyen también filtros para rechazar el ruido de 50 o 60 Hz, así como otras señales indeseables que corrompen la salida de los sensores. También se requieren filtros para prevenir el aliasing o aparición de frecuencias alias, un fenómeno que surge cuando una señal es submuestreada, es decir muestreada muy lentamente.

Esta distorsión solo puede ser evitada retirando, mediante un filtro pasabajos, las componentes con frecuencias por encima de la tasa de Nyquist (la mitad de la frecuencia de muestreo) antes de que la señal sea muestreada y digitalizada. Nyquist estableció que la velocidad de muestreo debe ser al menos dos veces la frecuencia de la componente de frecuencia más alta contenida en la señal de entrada.

Una forma de limitar el ancho de banda de la señal incidente, es utilizando un filtro pasabajos con amplificador operacional, esta estructura es básicamente un amplificador no inversor con la resistencia de realimentación reemplazada por una red RC, como el que se ilustra en la Figura 4.8.

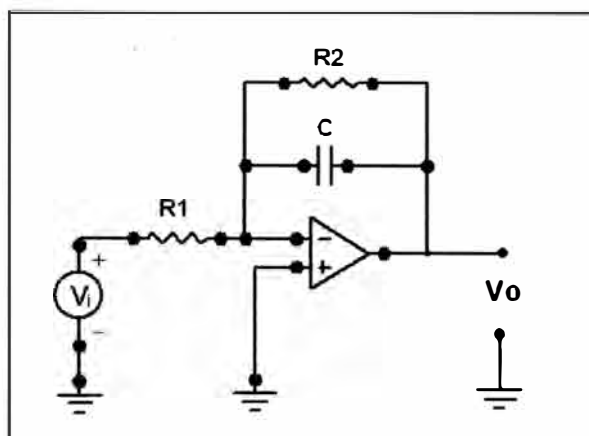


Figura 4.8 Filtro activo pasabajos de primer orden

En la Figura 4.9 se ilustra la forma típica de respuesta de frecuencia de este filtro.

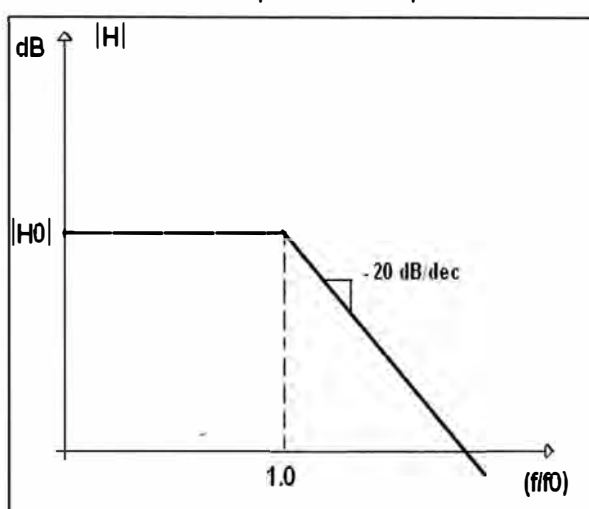


Figura 4.9 Respuesta de frecuencia de un filtro activo pasabajos

De la gráfica se tiene, que a partir de la frecuencia de corte, la ganancia cae desde su valor nominal de bajas frecuencias (H_0) hasta 0 a una pendiente negativa de -20dB por década.

La resistencia de entrada de un amplificador inversor, puede ser reemplazada por una red RC para crear un filtro pasaaltos, como se ilustra en la Figura 4.10.

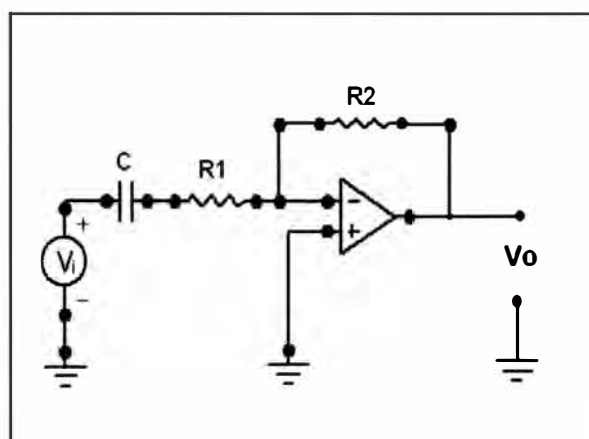


Figura 4.10 Filtro activo pasaaltos de primer orden

La curva de respuesta de frecuencia correspondiente al filtro pasaltos se ilustra en la Figura 4.11.

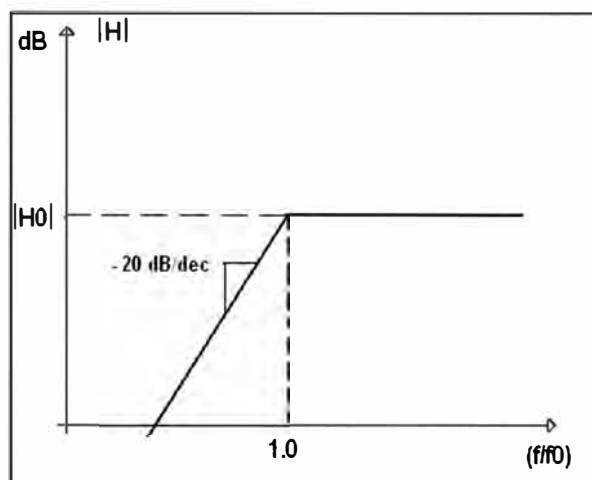


Figura 4.11 Respuesta de frecuencia de un filtro activo pasaltos

En la figura anterior se tiene, que antes de la frecuencia de corte, la ganancia de voltaje se reduce con una tasa de -20dB por década con respecto a su valor nominal en altas frecuencias (H_0).

Se pueden crear filtros de más alto orden, los cuales tienen tasas de atenuación más rápidas, conectando en cascada varios filtros de primer orden. Alternativamente, un filtro puede incluir más de una red de RC para incrementar su orden.

CAPITULO V

APLICACION DE CIRCUITOS ACONDICIONADORES EN ESPECTROFOTOMETROS UV-VISIBLE

5.1 Introducción

En esta sección se realiza la explicación de dos circuitos acondicionadores de señal, utilizados por algunos fabricantes de espectrofotómetros UV-Visible, que son aplicados a las señales que provienen del sistema detector de luz, compuesto por los sensores de luz, que se estudia en el capítulo III, principalmente el fotodiodo, además se hace referencia adicional al fototransistor y fotorresistencia, las que serán acondicionadas para su posterior procesamiento y finalmente puedan ser registradas o visualizadas, dependiendo de la salida si es analógica o digital.

En el análisis de los circuitos acondicionadores, intervienen la etapa de conversión de corriente a voltaje, debido, a que los sensores de luz, por su naturaleza entregan corriente eléctrica y lo que se necesita para el procesamiento de la señal es voltaje, además, interviene la etapa de amplificación, debido a que la señal eléctrica obtenida de los sensores de luz es muy pequeña, encontrándose en el rango de los picoamperios.

En la Figura 5.1 se ilustra el diagrama de bloques del sistema electrónico del espectrofotómetro UV-Visible, donde se identifica la relación del circuito acondicionador de señal, con el sistema detector de luz y el sistema lector o registro.

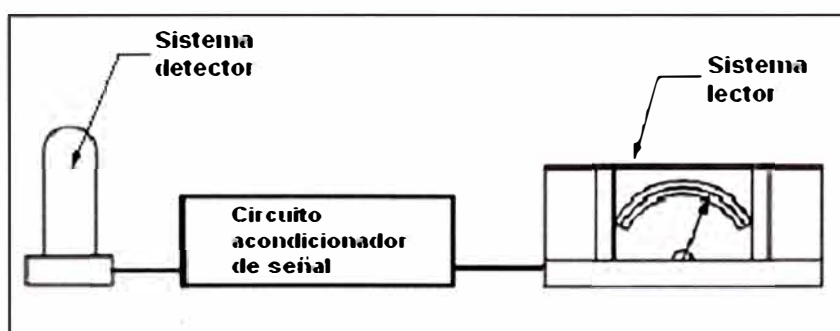


Figura 5.1 Diagrama de bloques del sistema electrónico del espectrofotómetro UV-Visible

5.2 Circuito acondicionador 1

Este circuito acondicionador de señal es básico, todavía, es frecuente encontrarlos en los espectrofotómetros de salida analógica, esta actuando sobre la señal que proviene de los sensores de luz, como el fotodiodo, fototransistor y fotorresistencia.

El circuito acondicionador 1 presentado, se ilustra en la Figura 5.2 para el caso de la fotorresistencia, Figura 5.3 para el fotodiodo y en la Figura 5.4 para el fototransistor.

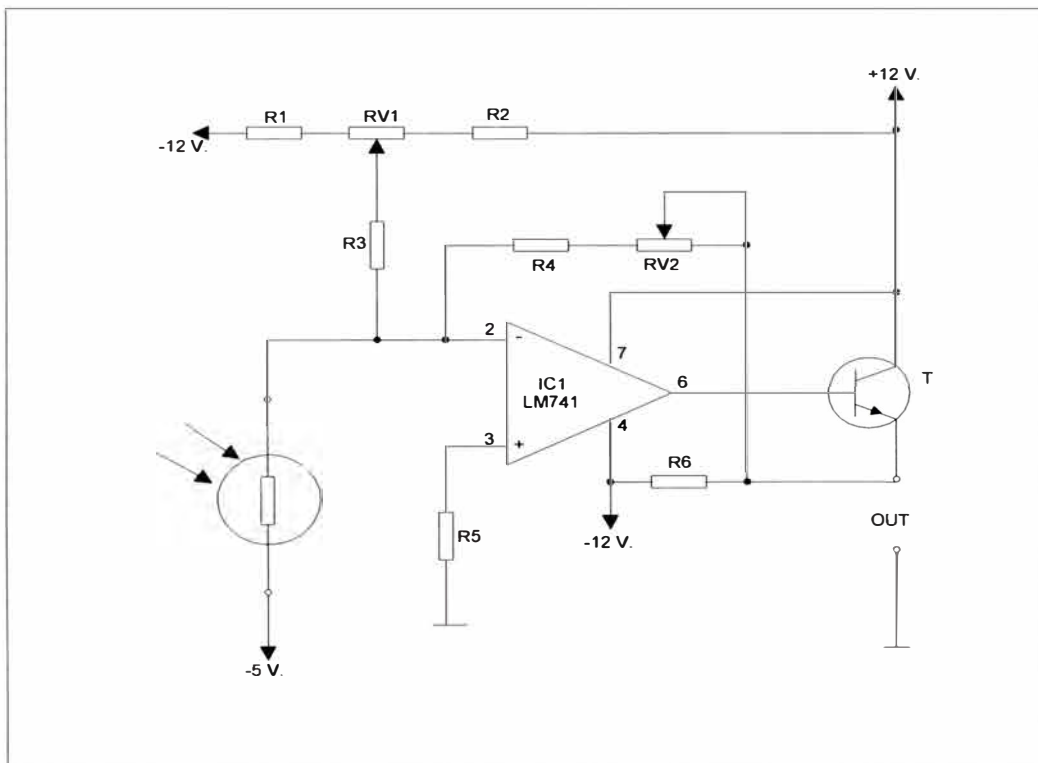


Figura 5.2 Circuito acondicionador de señal para fotorresistencia

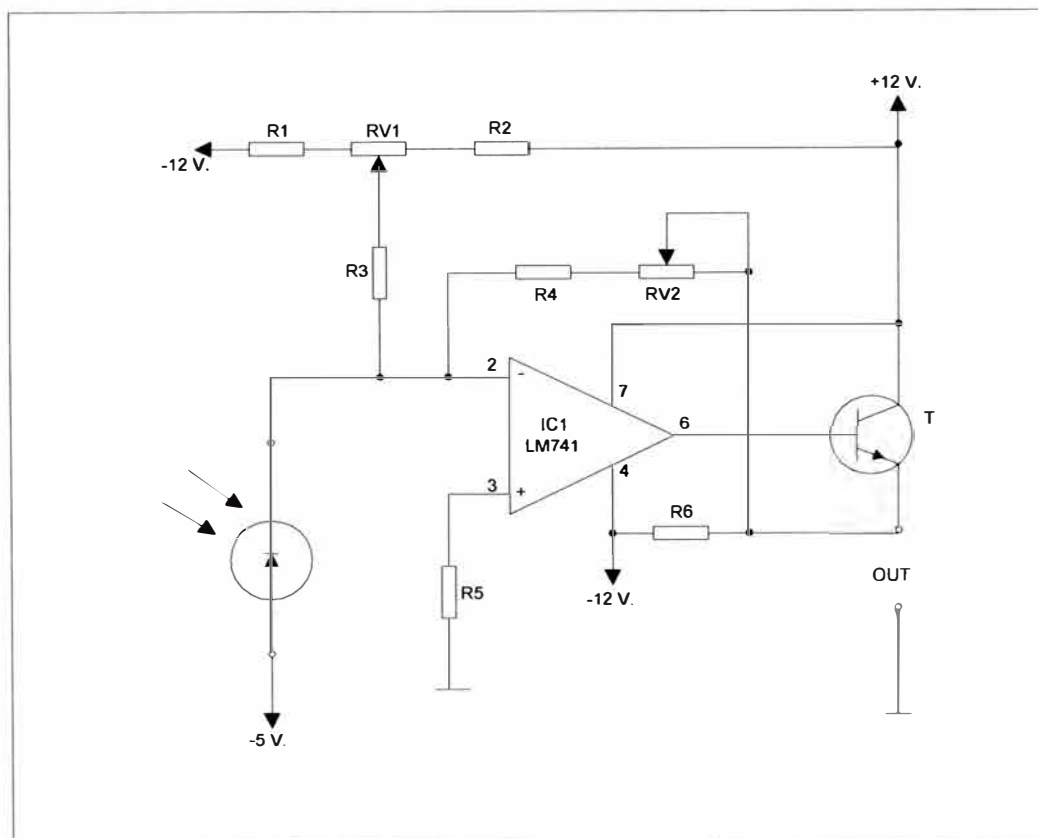


Figura 5.3 Circuito acondicionador de señal para fotodiodo

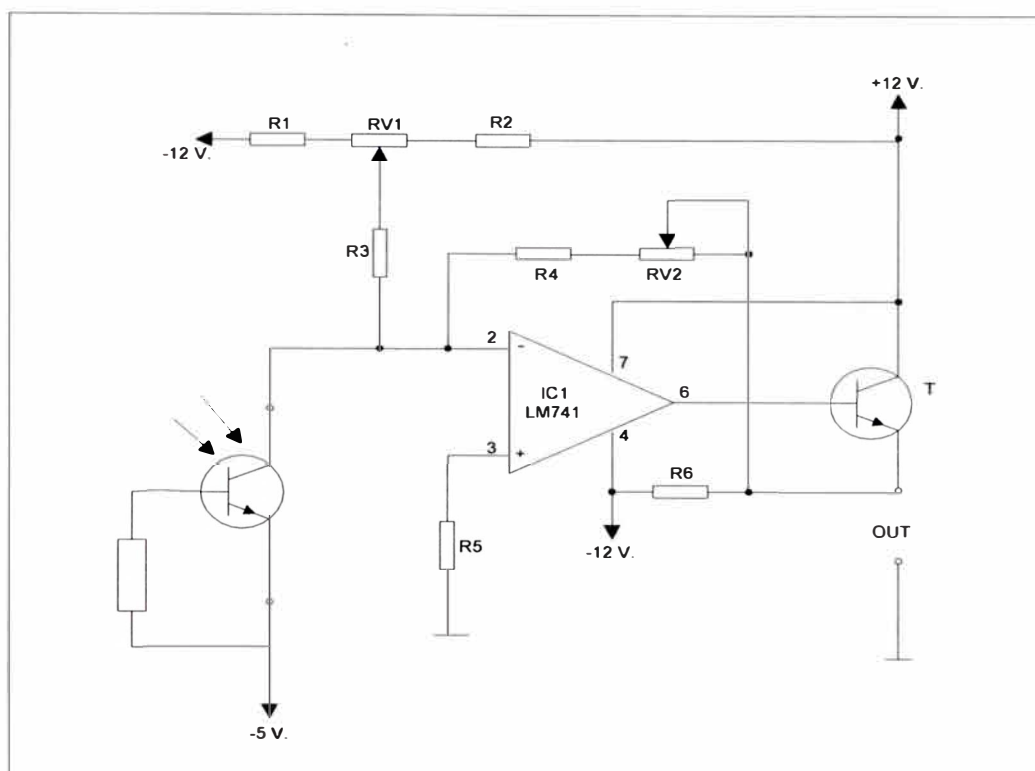


Figura 5.4 Circuito acondicionador de señal para fototransistor

El circuito está constituido por dos etapas, el convertidor de señal de corriente a voltaje y la amplificación de la señal, que se estudia en el capítulo IV.

a) Etapa de conversión de corriente a voltaje: Está constituido por un amplificador IC1 (LM 741) el cual está actuando como un circuito convertidor de corriente a voltaje, el cual está conectado como inversor. Además consta de una configuración de resistencias (R_1 , R_2 , R_3) y potenciómetros (RV_1) que permitan poner a cero el "offset" (tensión de entrada) de IC1 y que permitan polarizar el fotodiodo o fototransistor, de acuerdo al elemento con el cual se trabaje, o en el caso de la fotorresistencia, poner a cero la tensión generada por ella en la oscuridad [10].

La serie **LM741** son amplificadores operacionales de propósito general. Está dirigido a una amplia gama de aplicaciones analógicas. Proporcionan alta ganancia y una amplia gama del voltaje de funcionamiento; un rendimiento superior en integrador y aplicaciones generales de retroalimentación [12]. Entre sus características se tiene:

- Protección del cortocircuito.
- Excelente estabilidad de la temperatura.
- Compensación interna de frecuencia.
- Alta tensión de entrada.
- Compensación nula.

b) Etapa de amplificación: En esta etapa se tiene un transistor T que sirve para amplificar la corriente de salida de IC1 (LM741), el cual varía su propia salida hasta que

la tensión del emisor del transistor T (punto desde donde se extrae efectivamente la señal para la realimentación) alcance un nivel tal como para volver a llevar el amplificador mismo a operar en la región de linealidad (es decir, tensión de la entrada inversora igual a la tensión de la entrada no inversora).

La salida del acondicionador de señal debe calibrarse de modo que a un determinado rango de iluminación corresponda su determinado rango de tensión de acuerdo a las exigencias impuestas para el diseño.

5.3 Circuito acondicionador 2

Este circuito acondicionador de señal, es utilizado en el sistema electrónico del espectrofotómetro SPECTRONIC 21D de la marca MILTON ROY, el cual trabaja en el rango espectral de 200 nm hasta 1000 nm, permitiendo el análisis de señales de luz visible y ultravioleta (ver Figura 5.5). Además, esta compuesto por amplificadores operacionales tanto en la etapa de conversión de corriente a voltaje y la etapa de amplificación, se analiza la señal del fotodetector que es amplificada a un nivel de voltaje lo suficientemente alto para ser detectado. También, se incluye la etapa de visualización de la señal. El sensor de luz utilizado en este circuito acondicionador es el fotodiodo, que convierte la intensidad luminosa en señal de corriente que está en el rango de 100 pA.



Figura 5.5 Espectrofotómetro SPECTRONIC 21D

a) Etapa de conversión de corriente a voltaje: Tal como se ilustra en la Figura 5.6, se presenta el diagrama del circuito U1, que es el circuito convertidor de corriente a voltaje. Se ha utilizado en la entrada un circuito integrado, el AD515, el cual es especialmente utilizado para amplificar la señal que proviene de un fotodetector.

La serie AD515 es un circuito amplificador monolítico con entrada FET, utilizado generalmente como convertidor de corriente a voltaje, entre sus características se tiene [12]:

- Corriente de bias garantizada de 75 fA (f: prefijo femto 10^{-15}).

- Bajo voltaje de Offset: 1.0 mV máx.
- Bajo nivel de ruido: 4 μ V p-p, 0.1 Hz hasta 10 Hz.

El AD515 transforma la señal de corriente de entrada I_5 del fotodiodo en señal de voltaje, y en la combinación mostrada con R_1 y R_2 , proporcionan un voltaje de salida V_1 de 1mV / μ A.

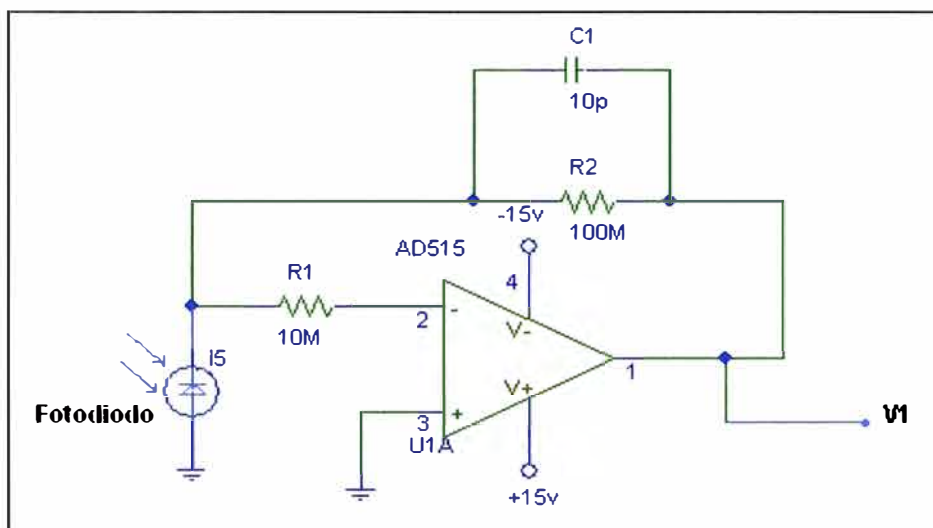


Figura 5.6 Circuito convertidor de corriente a voltaje para el fotodiodo

b) Etapa de amplificación: La señal es amplificada en el circuito U3 (LM108) el cual es un amplificador operacional, como se ilustra en la Figura 5.7.

La serie LM108 es un amplificador operacional de precisión, especialmente para amplificar señales pequeñas provenientes de los sensores de luz, con entradas FET que presenta entre otras características [12]:

- Baja corriente de entrada: 200 μ A máx.
- Bajo Voltaje de offset: 0.5 mV máx.
- Corriente de bias: 2 nA máx.
- Una gran ganancia en un amplio ancho de banda.
- Alta impedancia de entrada.

En éste circuito, el potenciómetro R_3 , fija un voltaje en el punto central que está entre + 15V y -15V. Éste pasa por R_5 y divide el voltaje con R_7 , con la siguiente relación:

$$V_{R_7} = V_{R_3} \left(\frac{R_7}{R_5 + R_7} \right) \quad (5.1)$$

Este voltaje es aplicado en el pin 3 del Opamp U3 y sirve como voltaje offset para ajustar el cero en la lectura de transmitancia (concepto visto en el capítulo I).

En el circuito se tiene el voltaje de entrada V_1 , que viene de la primera etapa la cual será amplificado. Las resistencias R_8 , R_9 y R_{12} , dan la ganancia del amplificador; C_2 se usa para filtrar y por lo tanto reducir el ruido.

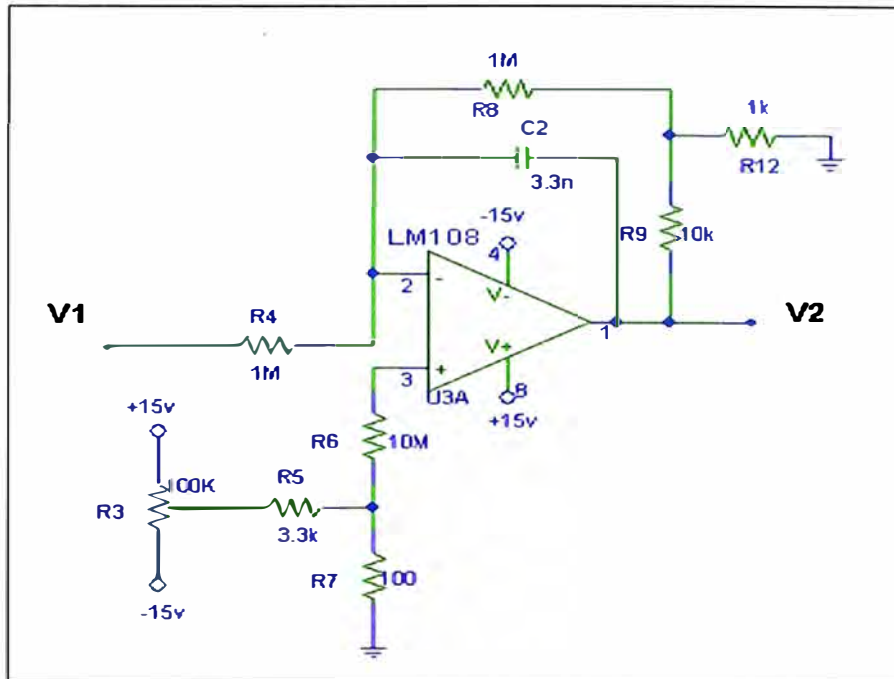


Figura 5.7 Circuito amplificador para el fotodiodo

c) Etapa de visualización: El voltaje de salida del amplificador V2 llega a la resistencia R_{10} , en serie con el potenciómetro R_{11} , como se ilustra en la Figura 5.8. En serie con estas resistencias se ha colocado un amperímetro, el cual permite tener una lectura de 0.0 a 100.0 mA ajustando el valor de la resistencia R_{11} y colocando una muestra oscura el cual representa 0 % de transmitancia, y una ausencia de muestra el 100 % de transmitancia. El amperímetro representa la etapa de visualización. El condensador C_5 sirve de filtro para tener una lectura estable

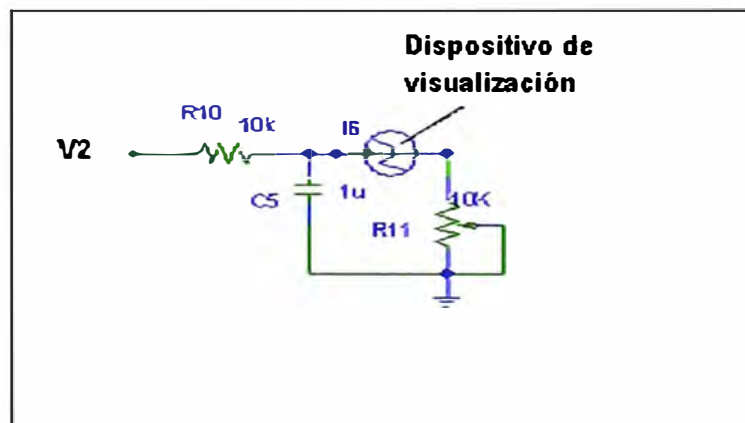


Figura 5.8 Circuito de visualización de la señal del fotodiodo

El voltaje de salida del amplificador V2, también, puede ser derivado a un circuito de filtrado antes de ingresar al circuito convertidor de señal analógico a digital (DAC), el cual, va a permitir que la señal digital sea ingresada en un sistema de procesamiento, como el microprocesador o microcontrolador, en el caso que la etapa de visualización sea digital.

A través de las tres etapas analizadas, se logra visualizar la señal que se obtuvo del detector de luz (fotodiodo) que proporciona una señal de corriente muy débil. En la Figura 5.9 se ilustran las tres etapas relacionadas, en un solo circuito acondicionador de señal utilizado en un espectrofotómetro de luz UV-visible.

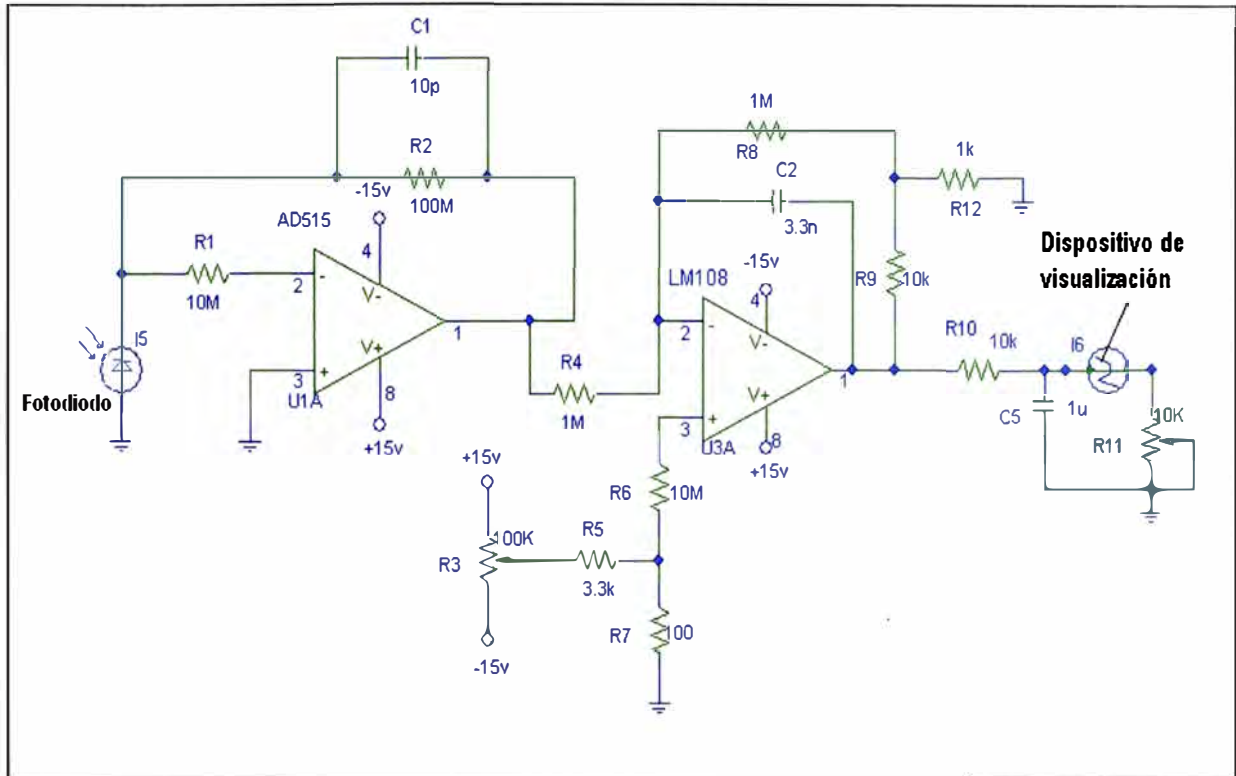


Figura 5.9 Circuito acondicionador de señal del fotodiodo

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) En el análisis de los circuitos acondicionadores de señal de un espectrofotómetro UV-Visible, por lo menos, siempre están presentes, la etapa del convertidor de señal de corriente a voltaje y la etapa de amplificación de la señal, esto se debe a que la señal que proviene de los sensores de luz es corriente y muy pequeña.
- 2) Se resalta la importancia de los amplificadores operacionales (Opam) en sus diferentes configuraciones, como el LM108, LM741 y AD515, por estar presentes en las etapas del circuito acondicionador de señal, ya sea para el procesamiento de la señal de salida analógica o digital.
- 3) Se identifica la preferencia de utilizar elementos semiconductores (sensores de luz) como el fotodiodo y las fotorresistencias, que brindan mayor confiabilidad en las lecturas, en vez de los tubos al vacío, estos a pesar de tener una muy buena respuesta al ruido, presenta inestabilidad, que se acentúa cuando los tubos envejecen.
- 4) Para el mejor funcionamiento de un espectrofotómetro se recomienda tener una fuente de suministro eléctrico de acuerdo con las normas y estándares implementados en el país, en el caso del Perú, voltaje de 220 V y frecuencia de 60 Hz. Además, un ambiente limpio, libre de polvo, una mesa de trabajo estable, que este alejada de equipos que generen vibraciones (centrifugas, agitadores).
- 5) Se recomienda que para mantener en mejores condiciones los espectrofotómetros, ya que son equipos muy especializados y costosos, conocer en gran medida la forma de instalación y utilización, por eso la importancia de las rutinas de mantenimiento del equipo, los cuales van desde la limpieza cuidadosa de sus componentes hasta procedimientos especializados, que deben realizarlo ingenieros que hayan recibido la capacitación correspondiente y dispongan de la información técnica desarrollada por los fabricantes.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Robert L. Pecsok, “Métodos modernos de análisis químicos”**
Editorial Limusa
- [2] Manual de mantenimiento para equipos de laboratorio**
Organización Mundial de la Salud. Washington D.C. 2005
- [3] J Frank, “Fundamentos de Física”**
Prentice Hall. México 2006
- [4] N Harry, “Sensores y analizadores”**
Gustavo Gili S.A. Barcelona 2002
- [5] Gonzales U., “Circuitos digitales”;**
<http://www.monografias.com>
- [6] Carr, Joseph. J, “Introduction to Biomedical Equipment Technology”**
Wiley & Sons. New York 1981
- [7] Jacob, Michael J, “Applications and desing with analog Integrated Circuits”**
Prentice Hall. New Jersey 2003
- [8] Milton Roy, “Spectronic 21 service manual”**
Philadelphia 1994
- [9] David Gonzáles, “Apuntes de Espectroscopia”**
Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador 2010
- [10] Pallas areny Ramón, “Sensores y Acondicionadores de Señal”**
MARCOMBO S.A. España 2005
- [11] Guevara Cortés, “Conversión de un espectrofotómetro analógico a digital”**
Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador 2010
- [12] www.alldatasheet.com**