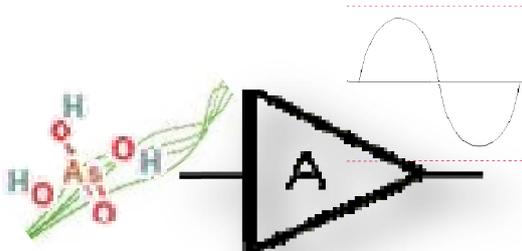




Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDANCIA PARA UN BIOSENSOR DE FIBRA OPTICA



Residente:

Luis Alejandro Pola López

Carrera:

Ing. Electrónica

Asesor:

Dr. Jorge Luis Camas Anzueto

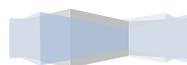
CAPITULO I

1. Introducción.....	9
2. Objetivos.....	10
a. Objetivo General.....	10
b. Objetivo Especifico.....	10
3. Planteamiento del problema.....	11
4. Hipótesis.....	12
5. Justificación.....	12

CAPITULO II

6. Marco teórico.....	13
a. Fibras ópticas.....	14
i. Formas de enviar datos a través de la fibra óptica..	15
ii. Conectores de fibra.....	19
iii. Sensores con Fibra Óptica.....	20
b. Biosensores con fibras ópticas.....	21
i. Principio de operación de un Biosensor.....	21
ii. Componentes básicos de un biosensor óptico.....	22
c. Fotodetectores.....	23
i. Fotodiodo.....	24
ii. Principio de operación del fotodiodo.....	25
iii. Composición del Fotodiodo.....	26

Índice



CAPITULO III

7. Diseño de un Sensor Óptico	27
a. Características Eléctricas.....	28
b. Características Ópticas.....	29
c. Características Corriente-Tensión (I-V).....	29
d. Ruido.....	31
i. Ruido de Disparo.....	31
ii. Ruido Johnson.....	31
iii. Ruido Total.....	31
iv. Potencia de Ruido Equivalente (NEP).....	31
e. Efecto de la Temperatura en los Fotodiodos.....	32
i. Resistencia Paralelo y Corriente de Oscuridad.....	32
ii. Tensión de Ruptura.....	33
iii. Responsividad.....	33
f. Elección del Fotodiodo.....	34
g. Sistema de acondicionamiento de la señal.....	35
i. Modo Fotovoltaico.....	35
ii. Modo Fotoconductor.....	35
h. Circuitos de Acondicionamiento de la señal.....	36

Índice





CAPITULO IV

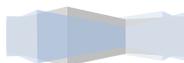
8. Amplificador Operacional	39
a. Amplificador Operacional.....	40
i. Notación.....	41
ii. Comportamiento en corriente continua CD.....	42
1. Lazo abierto.....	42
2. Lazo cerrado o retroalimentado.....	42
iii. Análisis.....	44
iv. Configuraciones.....	44
1. Comparador.....	44
2. Seguidor.....	45
3. Inversor.....	46
4. No inversor.....	47
5. Sumador inversor.....	48
6. Restador inversor.....	49
7. Integrador ideal.....	50
8. Derivador ideal.....	51
9. Conversor de corriente a voltaje.....	52
b. Amplificador de transimpedancia.....	53



Índice

CAPITULO V

9. Metodología.....	55
a. Configuración del Fotodiodo	
b. Circuito amplificador de transimpedancia.....	56
c. Fotodiodo opt 101.....	57
d. Opa 380.....	59
10. Resultados.....	69
11. Bibliografía.....	73



INDICE DE FIGURAS

1. CAPITULO I	9
1.1 Fibras Ópticas.....	9
1.2 Problemática.....	11
2. CAPITULO II	14
2.1 Fibras Ópticas.....	14
2.2 Partes de una fibra óptica.....	16
2.3 Características de una fibra óptica.....	17
2.4 Reflexión de la fibra.....	18
2.5 Estructura de un Biosensor.....	22
3. CAPITULO III	29
3.1. Circuito equivalente a un fotodiodo de Silicio.....	31
3.2 características de un Fotodiodo.....	34
3,3 Variación de la responsabilidad.....	36
3.4 Modos de Operación del Fotodiodo.....	37
3.5 Circuitos de acontecimientos.....	38
3.6 Amplificador de transimpedancia.....	39



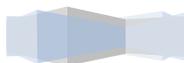
4. CAPITULO IV	41
4.1 Símbolo amplificador	41
4.2 Comparador	44
4.3 Seguidor	45
4.4 Inversor	46
4.5 No inversor	47
4.6 Sumador inversor	48
4.7 Restador inversor	49
4.8 Integrador ideal	50
4.9 Derivador ideal	51
5. CAPITULO V	
5.1 Simulación amplificador de transimpedancia	56
5.2 Circuito equivalente del fotodiodo	58
5.3 Circuito amplificador opa 380	59
5.4 Simulación inicio de amplificación	62
5.5 Simulación 100 μ A	62
5.6 Simulación 500 μ A	63
5.7 Simulación 4.5mA	63
5.8 Simulación 4.6mA	64
5.9 Esquemático sistema completo	64
5.10 Ruteado final	65
5.11 Simulación proteus	66
5.12 Arreglo experimental biosensor	67
6. Resultados	
6.1 señal 1 khertz entrada salida	70
6.2 honda cuadrada entrada y salida	70
6.3 Instrumentos utilizados	71





CAPITULO I

Presentación



INTRODUCCION

Actualmente la transmisión de señales desarrolla un papel importante en los biosensores con fibra óptica, ya que la señal emitida por el bioreceptor son señales muy bajas por lo cual debe ser amplificada a una señal medible para llevar a cabo el procesamiento de los datos.

Los amplificador de transimpedancia debe tener alta ganancia, bajo nivel de ruido por lo tanto se diseñan amplificadores con un fotodiodo PIN como dispositivo de entrada el cual sea lo suficientemente sensible para detectar la pequeña señal óptica emitida por el bioreceptor esta señal será amplificada y convertida a un voltaje.

En este trabajo de residencia se discute los resultados del modelo base para el circuito de amplificación de transimpedancia con un fotodiodo de alta calidad, para predecir una respuesta exacta del circuito, logrando utilizar el modelado como punto de referencia.



1.1 Fibras Ópticas

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un amplificador de transimpedancia para detectar una señal de corriente eléctrica en el orden de los 100 nA generada por un fotodetector PIN al captar intensidades ópticas provenientes del biosensor de fibra óptica.

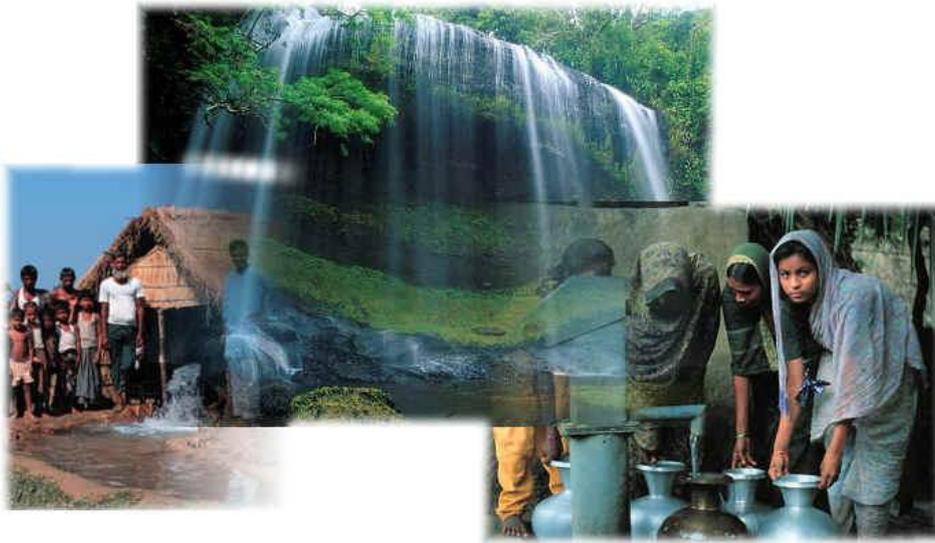
OBJETIVO ESPECIFICO

La señal obtenida de la reacción de la bacteria modificada genéticamente, al estar en contacto con el arsénico produce una bioluminiscencia, emisión de luz amplificada con el amplificador de transimpedancia.

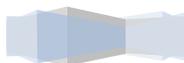


PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la necesidad de cuantificar la cantidad de contaminantes disueltos en el agua, se encontró que la bacteria *Escherichia Coli* es una bacteria idónea para detectar arsénico, esta emitirá una señal la cual debe ser amplificada para su detección, procesamiento y control de datos obtenidos.



1.2 Problemática

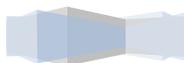


HIPOTESIS

El amplificador de transimpedancia amplificara la señal obtenida por el foto detector PIN convirtiendo la corriente en el orden de los 100 nA en un voltaje medible.

JUSTIFICACION

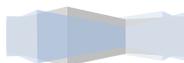
El amplificador de transimpedancia es una de las partes más importantes que conforman un biosensor ya que transforma la señal obtenida quitándole la mayor cantidad de ruido obteniendo una señal pura y transformarla para que sea medible.





CAPITULO II

MARCO TEORICO



FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un medio de transmisión que consiste en un tubo de vidrio o plástico muy delgado a través del cual viaja información en forma de energía

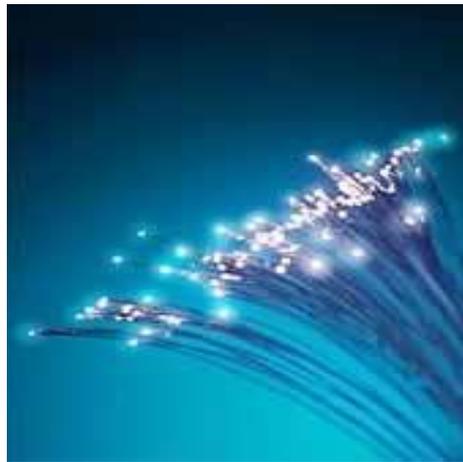
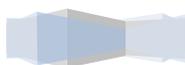


FIG. 2.1 Fibra óptica

La fibra óptica es tan sólo una diminuta varilla -que bien puede ser de vidrio o de plástico- con un gran índice de refracción mediante la cual se transmiten haces de luz, que previamente modulados transmiten información de un punto a otro con una calidad de comunicación inimaginable por otros medios.

La fibra a marcado un punto de inflexión en el mundo de las telecomunicaciones a parte de otras muchas ramas, las cuales comentaremos posteriormente.



Esta tiene una infinidad de propiedades que la caracterizan y aventajan sobre los otros medios convencionales:

- Presenta un gran ancho de banda, lo que supone más información por conductor que con los medios convencionales. Se manejan valores desde cientos de MHz hasta decenas de GHz.
- La atenuación de la fibra óptica es ínfima, lo cual permite recorrer larguísimas distancias sin necesidad de amplificar la señal, cosa que sería impensable en una comunicación estándar.
- La fibra es inmune al ruido y a las interferencias, algo bastante importante sobre todo cuando el cable debe pasar por zonas donde hay instalaciones de alta tensión, o se trabaja con ellas en empresas en las que se trabaja con líneas de alta tensión
- La información que viaja por la fibra no se puede interceptar sin que los usuarios de la comunicación se percaten de ello. Esta es una de las razones de por que la fibra es usada comúnmente en instalaciones militares.
- La fibra presenta unas dimensiones muchísimo más reducidas que los medios preexistentes, lo que se traduce en economía de transporte y una ligereza bastante superior a los otros medios. Posee una gran resistencia al cambio de temperatura, así como a las corrosiones. Además, la fibra puede ser muy útil en el cambio de temperaturas, ya que, según para que aplicaciones posee una sensibilidad a la presión, ondas de sonido, calor, movimiento.



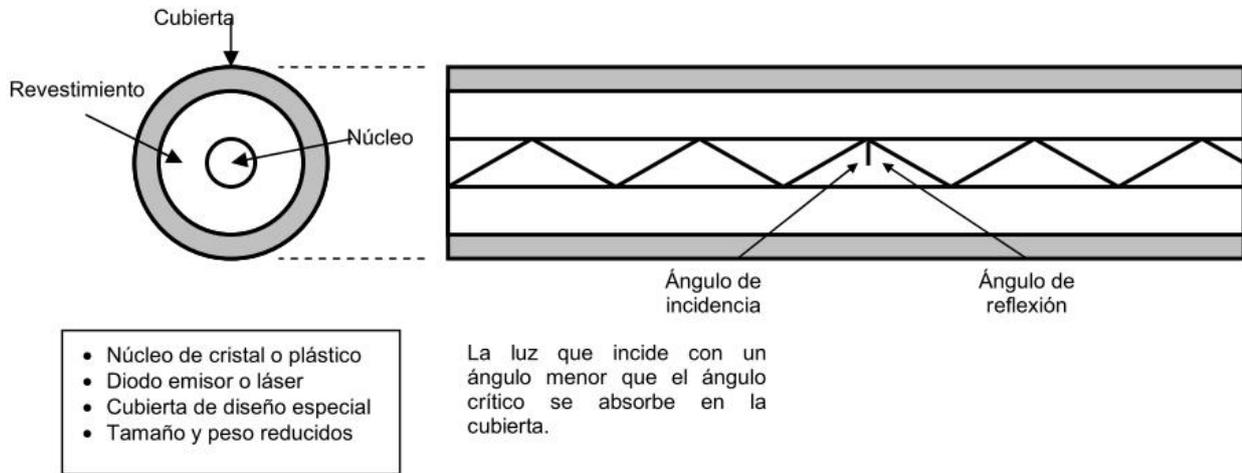


FIG. 2.2 partes de una Fibra óptica

- **El núcleo.** Es la sección más interna, está constituido por una o varias hebras o fibras de cristal o plástico.
- **El revestimiento.** Se trata de un cristal o plástico con propiedades ópticas distintas a las del núcleo. Cada fibra está rodeada por su propio revestimiento.
- **La cubierta.** Se trata de la capa más exterior que envuelve a uno o varios revestimientos. Está hecha de plástico y otros materiales dispuestos en capas para proporcionar protección contra la humedad, la abrasión, aplastamientos y otros peligros.



VENTAJAS.

Uno de los avances tecnológicos más significativos en la transmisión de datos ha sido el desarrollo de los sistemas de comunicación de fibra óptica. Su perfeccionamiento continuado, así como su reducción en precio ha contribuido a convertirla en un medio atractivo para los entornos LAN.

EXISTEN TRES MODOS DE TRANSMISIÓN:

- Multimodo, en el cual se aprovechan todos los ángulos de reflexión interna, pero se reduce la velocidad de transmisión al haber múltiples trayectorias.
- Monomodo, en el cual se reduce el diámetro del núcleo hasta obtener un solo ángulo de reflexión, lo que aumenta considerablemente la velocidad de transmisión.
- Multimodo de índice gradual, en el que se varía gradualmente el índice de refracción del núcleo.

Características de Fibras Ópticas

Tipo de fibra	Diámetro del núcleo	Diámetro del revestimiento	Atenuación (dB/Km) (Máx)			Ancho de banda (MHz/Km)
			850 nm.	130 nm.	1500 nm.	
Monomodo	5.0	85 o 125	2.3			5000 @ 850 nm.
	8.1	125		0.5	0.25	
Índice gradual	50.0	125	2.4	0.6	0.5	600 @ 850 nm.
	62.5	125	3.0	0.7	0.3	200 @ 850 nm.
	100.0	140	3.5	1.5	0.9	300 @ 850 nm.
Índice discreto	200 o 300	380 o 440			6.0	

FIG. 2.3 características de Fibra óptica

FORMA DE ENVIAR DATOS A TRAVÉS DE FIBRA OPTICA

La fibra óptica se basa en el principio de la reflexión total. La luz cambia de trayectoria al pasar de un medio a otro, como el aire y el vidrio. A partir de cierto ángulo, la luz no puede abandonar un medio para pasar a otro, y se refleja en la superficie que los separa. De este modo, la luz que viaja por una fibra óptica permanece en su interior, rebotando en las paredes, aunque la fibra se doble.

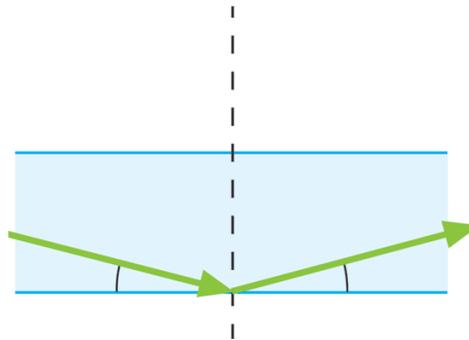


FIG. 2.4 Reflexión total de la fibra

Para enviar la información a través de la fibra óptica, lo primero que hemos de tener en cuenta son tres puntos

El transmisor, es decir, la unidad que debe generar los rayos de luz, que puede ser conectada y desconectada muy rápidamente y modulada por algún tipo de señales que representen información.

La fibra óptica, el cual debe tener una cubierta y un "encapsulamiento", así como una pureza que le hagan fuerte y transparente a las frecuencias de luz que se van a utilizar. Debe poder ser empalmada y reparada cuando sea necesario y tener capacidad para llevar los rayos de luz a una distancia razonable antes de que una estación repetidora tenga que reamplificar la luz

Para hacer posible que ésta atraviese la distancia casi total en la cual debe viajar. En algunos casos hay que usar muchas estaciones repetidoras.



El elemento receptor. Debe reconvertir esos rayos de luz en voltajes y corrientes analógicas o digitales de forma que la estación del usuario pueda separar y utilizar las señales de información que se habían transmitido.

CONECTORES DE FIBRA

Para unir la fibra óptica con el transmisor y el receptor se utilizan conectores, que son, por definición, dispositivos desmontables utilizados cuando se necesitan conectar y desconectar fácilmente las fibras. En el mercado existen dos tipos de conectores: los metálicos y los de plástico, que a su vez se pueden dividir en conectores para fibras múltiples y para fibras únicas. Los conectores de metálicos sirven para fibras de alta calidad, utilizadas en los sistemas de transmisión de un tráfico de información elevado, debiendo presentar muy bajas pérdidas. Los conectores de plástico requieren las mismas características de calidad, utilizándose en conectores de cubierta de plástico. Se usan con fibras de diámetro más elevado, con lo cual son más sencillos mecánicamente y, en consecuencia, más económicos.

Estos conectores, han de presentar unas características comunes:

- Pérdida de inserción baja (< 1.5 dB) y insensible a cambios de temperatura
- Pérdida de retorno alta
- Conectarse y desconectarse hasta 1000 veces sin degradación de la transmisión
- Protección contra humedad y polvo
- Resistir altas tensiones



SENSORES CON FIBRA OPTICA

El mundo de las telecomunicaciones ha experimentado un enorme crecimiento en los últimos años. Los continuos avances que se producen en el campo de la optoelectrónica han impulsado el desarrollo de los novedosos Sensores de fibra óptica, dispositivos de medida que evolucionan al ritmo de los últimos avances científico-tecnológicos.

Esta particular clase de sensores se caracteriza por poseer una fase sensible, donde en ocasiones se encuentra inmovilizado un indicador, cuyas propiedades ópticas se modifican en función de la concentración de analito (parámetro o especie objeto de la determinación) presente en la muestra. La señal óptica así generada es conducida a continuación a través de una fibra óptica hasta un detector, para más tarde ser amplificada y procesada convenientemente.

Las ventajas de los sensores de fibra óptica resuelven muchos de los inconvenientes presentados por los dispositivos de medida tradicionales. En el caso de la medida de voltaje y corriente, resultan especialmente interesantes características como el carácter dieléctrico de la fibra óptica y su inmunidad frente a la interferencia electromagnética, ya que eliminan la necesidad de incorporar complejos sistemas de aislamiento, que muchas veces incluyen sustancias peligrosas o contaminantes.



BIOSENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Un biosensor se define como un dispositivo compacto de análisis que incorpora un elemento de reconocimiento biológico (ácido nucleico, enzima, anticuerpo, receptor, tejido, célula) o biomimético (PIMs, aptámeros, PNAs) asociado a un sistema de transducción que permite procesar la señal producida por la interacción entre el elemento de reconocimiento y el analito.

Por lo tanto, podemos definir un biosensor como un dispositivo bioquímico-electrónico que permite identificar, transformar y cuantificar un evento biológico.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN BIOSENSOR

El principio de detección de un biosensor se basa en la interacción específica entre el compuesto o microorganismo de interés y el elemento de reconocimiento. Como resultado de esta unión se produce la variación de una o varias propiedades físico-químicas (pH, transferencia de electrones, de calor, cambio de potencial, de masa, variación de las propiedades ópticas, etc) que detecta el transductor.

Este sistema transforma la respuesta del elemento de reconocimiento en una señal electrónica indicativa de la presencia del analito sometido a estudio o proporcional a su concentración en la muestra.

El biosensor está en contacto directo con la muestra a través del bioreceptor, que le confiere la selectividad a través de un sitio selectivo que identifica al analito y lo transforma de alguna manera. El bioreceptor es crucial pues produce el efecto físico-químico que será detectado por el transductor. Esto involucra procesos como biocatálisis, acoplamientos inmunológicos o quimiorrecepción.

COMPONENTES BÁSICOS DE UN BIOSENSOR ÓPTICO.

A.- BIORECEPTOR: Es la bacteria modificada genéticamente la cual emite una señal luminosa.

B.- TRANSDUCTOR (fibra óptica) : Provee la evidencia de que ha ocurrido una reacción en el bioreceptor conduciendo la señal óptica emitida.

C.- AMPLIFICADOR: Recibe la señal óptica emitida elimina todo el ruido que esta contenga y la transforma a una señal eléctrica para después amplificarla para su procesamiento.

D.- PROCESAMIENTO DE DATOS: son procesados y cuantificados todos los datos recibidos.

E.- MUESTRA DE DATOS: Muestra de forma visual la señal proceda obtenida.

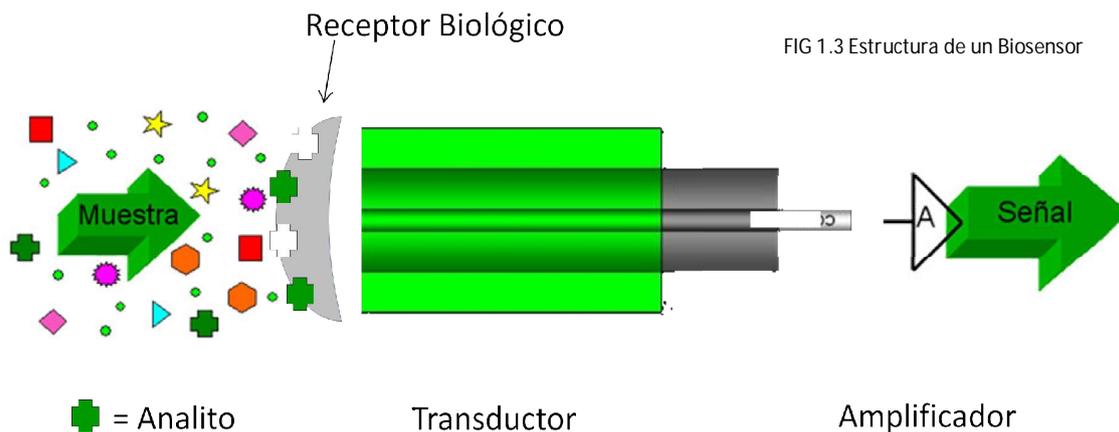
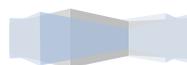


FIG. 2.5 Estructura de un Biosensor



FOTODETECTORES

Concepto de Fotodetectores.

Transductor de luz que proporciona una señal eléctrica como respuesta a la radiación óptica que incide sobre la superficie sensora.

En los sistemas de comunicación por Fibra Óptica se utilizan fundamentalmente dos tipos de detectores de luz en el extremo receptor. La débil señal óptica que llega al final de la fibra debe ser convertida a una señal eléctrica, antes de que continúe su paso por etapas de Amplificación, demodulación, de multiplexaje, etc. Un detector de luz es, entonces, el primer elemento de la cadena de dispositivos que propiamente conforman al equipo receptor.

Los dos tipos de detectores que se emplean son, ambos, fotodiodos. De acuerdo con lo dicho, su función es transformar la potencia óptica de entrada a una corriente eléctrica de salida.

Al igual que las fuentes luminosas, los detectores ópticos están fabricados con semiconductores de estado sólido, que en base a la teoría de las uniones P-N generan un flujo de corriente cuando captan un fotón; su grado de respuesta depende de los materiales empleados y de la longitud de onda de trabajo. La explicación de los principios físicos bajo los cuales funcionan los fotodiodos es un análisis amplio en electrónica por lo que nos limitaremos simplemente a mencionar algunos aspectos relacionados con dichos detectores ópticos.

Entre otros parámetros de operación, es deseable que los fotodiodos sean altamente eficientes, que tengan un bajo nivel de ruido, un amplio ancho de banda (es decir, que respondan de manera uniforme y rápida en todas las longitudes de onda de la señal), que sean poco sensibles a las variaciones de temperatura, baratos, pequeños, etc.



La eficiencia de un fotodiodo está relacionada con su responsividad, es decir, la cantidad de electrones que es capaz de generar en relación con los fotones recibidos. Dicho de otra forma, es la corriente eléctrica que entrega a la salida en relación con la potencia óptica de entrada.

Los tipos de fotodiodos que se emplean son el fotodetector PIN y el fotodiodo de avalancha (APD). La responsividad de un fotodiodo de avalancha es mayor que la de un fotodetector PIN. Sin embargo, el primero es más sensible a los cambios de temperatura y más caro que el segundo. El detector PIN se usa más comúnmente en enlaces de corta distancia y el ADP es muy útil en transmisiones de larga distancia, donde la señal óptica de llegada es muy débil y se requiere alta responsividad. Por lo que se refiere a la velocidad de respuesta, ambos fotodiodos pueden trabajar actualmente a velocidades muy altas de transmisión digital.

FOTODIODO

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por la luz. Debido a su construcción, los fotodiodos se comportan como células fotovoltaicas, es decir, en ausencia de luz exterior generan una tensión muy pequeña con el positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo. Esta corriente presente en ausencia de luz recibe el nombre de corriente de oscuridad.



PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL FOTODIODO

Un fotodiodo es una unión PN o estructura P-I-N. Cuando una luz de suficiente energía llega al diodo, excita un electrón dándole movimiento y crea un hueco con carga positiva. Si la absorción ocurre en la zona de agotamiento de la unión, o a una distancia de difusión de él, estos portadores son retirados de la unión por el campo de la zona de agotamiento, produciendo una fotocorriente.

Los diodos tienen un sentido normal de circulación de corriente, que se llama polarización directa. En ese sentido el diodo deja pasar la corriente eléctrica y prácticamente no lo permite en el inverso. En el fotodiodo la corriente (que 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 producirá un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz.

Fotodiodos de avalancha Tienen una estructura similar, pero trabajan con voltajes inversos mayores. Esto permite a los portadores de carga fotogenerados al ser multiplicados en la zona de avalancha del diodo, resultando en una ganancia interna, que incrementa la respuesta del dispositivo.



COMPOSICIÓN DEL FOTODIODO

El material empleado en la composición de un fotodiodo es un factor crítico para definir sus propiedades. Suelen estar compuestos de silicio, sensible a la luz visible (longitud de onda de hasta $1\mu\text{m}$); germanio para luz infrarroja (longitud de onda hasta aprox. $1,8\mu\text{m}$); o de cualquier otro material semiconductor.

Material	Longitud de onda (nm)
Silicio	190–1100
Germanio	800–1700
Indio galio arsénico (<u>InGaAs</u>)	800–2600
sulfuro de plomo	<1000-3500

Cuadro 2.1

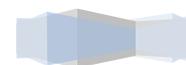
También es posible la fabricación de fotodiodos para su uso en el campo de los infrarrojos medios (longitud de onda entre 5 y $20\mu\text{m}$), pero estos requieren refrigeración por nitrógeno líquido.





CAPITULO III

Diseño de un Sensor Óptico.



Diseño de un Sensor Óptico.

La elección del elemento sensor del piranómetro ha requerido un minucioso estudio de las características eléctricas y ópticas de los fotodiodos, así como un amplio análisis de los dispositivos comerciales disponibles, ya que constituye uno de los elementos clave para poder obtener las mejores prestaciones del piranómetro desarrollado. Se requería un fotodiodo que tuviera una respuesta dentro del espectro visible, de alto valor y lo más lineal posible.

a. Características Eléctricas.

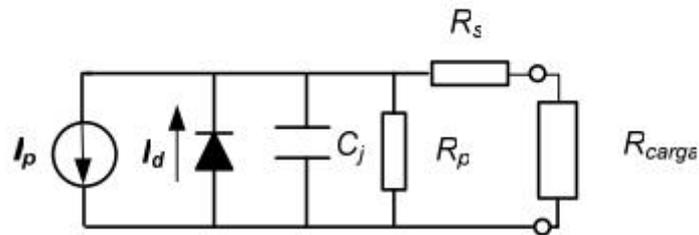
El fotodiodo puede operar aplicándole o no una tensión inversa, en función de las características que se desee. Así se denomina modo fotoconductor cuando se le aplica una tensión inversa y modo fotovoltaico cuando no se le aplica.

Un fotodiodo de silicio se puede representar como una fuente de corriente en paralelo con un diodo ideal. La fuente de corriente representa la corriente generada por la radiación incidente y el diodo representa la unión p-n. Junto a estos elementos principales y, dependiendo del grado de precisión requerido para el modelo, hay que considerar también la capacidad de transición C_j , la resistencia R_p y la resistencia serie R_s .

La resistencia paralelo R_p es la pendiente de la curva I-V del fotodiodo en el origen.

Aunque un fotodiodo ideal debería tener una resistencia paralelo infinita, los valores normales varían desde 10 a 1.000 $M\Omega$. Se puede obtener experimentalmente aplicando un pequeño incremento de tensión (del orden de mV), midiendo la corriente y calculando la resistencia. Esta resistencia se usa para determinar la corriente de ruido en el fotodiodo sin polarización (modo fotovoltaico), siendo mejor el funcionamiento del fotodiodo cuanto mayor sea R_p .





3.1 Circuito equivalente a un Fotodiodo de Silicio

La resistencia serie proviene de la resistencia de los contactos y del propio material semiconductor que forma la unión pn. Permite determinar la linealidad del fotodiodo en modo fotovoltaico y está dada por la siguiente ecuación (3.1):

$$R_s = \frac{(W_s - W_d)\rho}{A} + R_c \quad \text{Formula 3.1}$$

Donde W_s es el espesor del sustrato, W_d es el ancho de la región de deplexión, A es el área de difusión de la unión, ρ es la resistividad del sustrato y R_c es la resistencia del contacto.

Aunque en un diodo ideal R_s debería ser prácticamente 0, tiene valores típicos comprendidos entre 10 y 1.000 Ω .

La capacidad de transición C_j es proporcional a la polarización inversa del fotodiodo, en modo fotoconductor, y determina la velocidad de respuesta del fotodiodo. C_j viene determinada por la ecuación siguiente (3.2).

$$C_j = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 A}{\sqrt{2\mu\rho(V_A + V_{bi})}} \quad \text{Formula 3.2}$$

Donde $\epsilon_{Si} = 11,9$ es la constante dieléctrica del silicio, $\epsilon_0 = 8.8854 \cdot 10^{-14}$ F/cm, es la permitividad del vacío, $\mu = 1.400$ cm²/V·s es la movilidad del electrón a 300 K, ρ es la resistividad del silicio, que varía fuertemente con la temperatura, V_A es la tensión de polarización aplicada y V_{bi} es el voltaje de conducción (built-in) del silicio, en torno a los 0,7 V.

b. Características Ópticas.

I. Responsividad, R_λ .

Da idea de la corriente que circula por el dispositivo en función de la potencia óptica incidente. Es la medida de la sensibilidad a la luz, y se define como la relación entre la fotocorriente I_p generada y la energía de la luz a incidente P a una longitud de onda determinada λ . Sus unidades son A/W

$$R_\lambda = \frac{I_p}{P}$$

Formula 3.3

La responsividad es pues la medida de la efectividad de la conversión de la potencia luminosa en corriente eléctrica. Varía con la longitud de onda de la luz incidente, así como con la polarización inversa, la temperatura y el ángulo de incidencia de la radiación sobre el fotodiodo.

También puede recibir otros nombres en las hojas de características de los dispositivos, como fotosensibilidad, sensibilidad espectral, etc.

II. Eficiencia Cuántica, Q.E.

Se define como la fracción de los fotones incidentes que contribuyen a la fotocorriente. Se relaciona con la responsividad por la Formula 3.4:

$$Q.E. = \frac{R_{\lambda\text{observada}}}{R_{\lambda\text{ideal}}} = R_\lambda \frac{h_c}{\lambda q} = 1240 \frac{R_\lambda}{\lambda}$$

Formula 3.4

Donde $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$

J· s es la constante de Planck, $c = 3 \cdot 10^8$, es la velocidad de la luz y $q = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ C es la carga del electrón. R_λ es la responsividad en A/W y λ la longitud de onda en nanometros.



C. Característica Corriente-Tensión (I-V).

La característica corriente-tensión de un fotodiodo sin que incida luz sobre él es parecida a la de un diodo rectificador. Si el fotodiodo es polarizado de forma directa, se produce un aumento exponencial de la corriente. Cuando se polariza de forma inversa, circula una pequeña corriente inversa de saturación. Esta corriente denominada corriente de oscuridad, ya que no hay iluminación, es análoga a la de un diodo rectificador:

$$I_D = I_{SAT} \left(e^{\frac{qV_D}{k_B T}} - 1 \right)$$

Formula 3.5

Donde I_D es la corriente de oscuridad, I_{SAT} es la corriente inversa de saturación, q la carga del electrón, k_B la constante de Boltzman y T la temperatura absoluta en kelvins.

Cuando se ilumina el fotodiodo, la curva I-V se desplaza proporcional a la fotocorriente I_p , como se observa en la figura 4.7 a diferentes niveles de iluminación (P_0 - P_3).

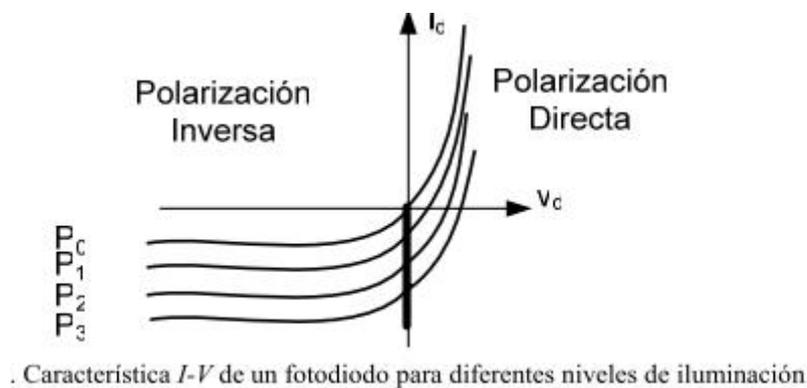
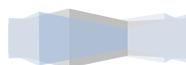


Figura 3.2

d. El ruido.

Hay dos fuentes de ruido en los fotodiodos, el ruido de disparo (shot noise) y el ruido Johnson

I El ruido de disparo.



Está relacionado con la fluctuación estática de la fotocorriente I_p y la corriente de oscuridad I_D . Se expresa como en la Formula 3.6:

$$I_{sn} = \sqrt{2q(I_p + I_D)\Delta f}$$

Formula 3.6

Donde q es la carga del electrón, I_p es la fotocorriente generada, I_D es la corriente de oscuridad y Δf es el ancho de banda del ruido medido.

II. Ruido Johnson.

La resistencia paralelo R_p (ver Fig. 4.6), tiene un ruido asociado debido a la generación térmica de portadores, que vale formula 3.7:

$$I_{jn} = \sqrt{\frac{4K_B T \Delta f}{R_p}}$$

Formula 3.7

III. Ruido Total.

La corriente de ruido total generada viene determinada por la formula 3.8:

$$I_{tn} = \sqrt{I_{sn}^2 + I_{jn}^2}$$

Formula 3.8

IV. Potencia de ruido equivalente (NEP).

Es la cantidad de luz incidente en un fotodiodo que genera una fotocorriente igual a la corriente de ruido. Viene expresada como:

$$NEP = \frac{I_{tn}}{R_\lambda}$$

Formula 3.9

Donde R_λ es la responsividad expresada en A/W e I_{tn} es el ruido total del fotodiodo. Los valores de NEP oscilan entre 10-11W/Hz^{1/2} para fotodiodos de una gran área activa y 10-15W/Hz^{1/2} para fotodiodos de poca área activa.



e. Efecto de la temperatura en los fotodiodos.

Todas las características de los fotodiodos como son la resistencia paralelo R_p , la corriente de oscuridad I_D , la tensión de ruptura, la responsividad R_λ , y en menor medida la capacidad de transición C_j , se ven afectadas por los cambios en la temperatura.

I. Resistencia paralelo y corriente de oscuridad.

Son dos las corrientes que determinan los valores de R_p e I_D , la corriente de difusión (diffusion current) y la corriente de deriva (drift current). En el modo de operación fotovoltaico, la corriente de difusión es el factor dominante e influye en el valor de R_p , variando con el cuadrado de la temperatura.

En el modo de operación fotoconductor es la corriente de deriva el factor predominante en la corriente de oscuridad y varía directamente con la temperatura. De esta forma, los cambios en la temperatura afectan más al fotodiodo en modo de operación fotovoltaico que fotoconductor.

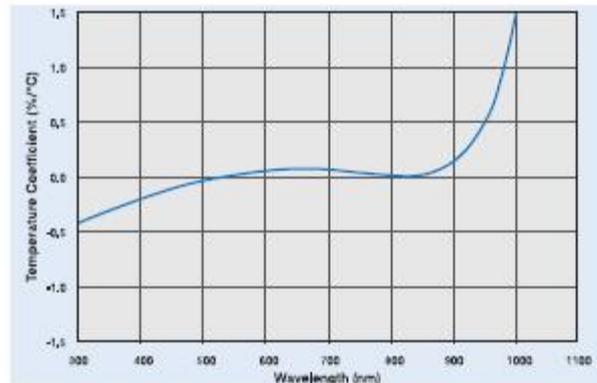
En modo fotoconductor, la corriente de oscuridad, I_D , puede doblarse aproximadamente cada $10\text{ }^\circ\text{C}$ de incremento de temperatura. Los valores exactos van a depender del valor de la tensión inversa aplicada, la resistividad y del espesor del sustrato. En modo fotovoltaico, la R_p puede valer aproximadamente el doble cada $6\text{ }^\circ\text{C}$ de aumento de la temperatura.

II. Tensión de ruptura.

En fotodiodos con un área activa pequeña, el voltaje de ruptura es por definición aquél en el que la corriente de oscuridad alcanza $10\text{ }\mu\text{A}$. Como la corriente de oscuridad crece con la temperatura, el voltaje de ruptura disminuye de forma similar con la temperatura.

III. Responsividad.

Los cambios en la temperatura de funcionamiento de un fotodiodo afectan directamente a su responsividad, ya que provocan aumentos o disminuciones en la tensión de banda prohibida, cuyo coeficiente de temperatura se ve modificado [194], [207]. En la Fig. 4.8 (de la hoja de características de un fotodiodo del fabricante Osram), se muestra la variación del coeficiente de temperatura con la longitud de onda y por tanto, la variación de la responsividad con la temperatura, ya que la responsividad varía en función de la longitud de onda (λ) de la luz incidente.



Variación de la responsividad de un fotodiodo debido a su coeficiente de temperatura (Osram)

Figura 3.3

f. Elección del fotodiodo.

En la búsqueda del mejor sensor para el sistema de medida se trabajó en dos direcciones, por un lado utilizando las hojas de características suministradas por los fabricantes, y por otro realizando pruebas reales en laboratorio con los fotodiodos seleccionados.

A partir de las hojas de características se realizó una primera selección de fotodiodos. Así, se decidió pasar a la etapa de ensayos reales con dos tipos de elementos diferentes, a saber: fotodiodos con el acondicionador de señal integrado en el propio chip (DAL 1530 y DAH de IPL, y OPT 301 de Burr-Brown), y fotodiodos tal cual, sin electrónica adicional (BPW 21 de Osram, OSD5-5T y OSD15-5T de Centronics, S921901 de Hamamatsu y VTB101 de Perkin Elmer)

Uno de los criterios a seguir en las pruebas de laboratorio era analizar que la respuesta del dispositivo dentro del espectro visible fuera lo más lineal y mayor posible. Para efectuar este análisis se realizó un ensayo consistente en medir la salida en cortocircuito de los fotodiodos, iluminándolos con una fuente de luz halógena. La lámpara utilizada en el laboratorio de calibración es una lámpara estándar de irradiancia espectral (200 A-H) de cuarzo de tungsteno de 1000 W con filamento horizontal¹⁴ [203] en espiral, suministrada por los laboratorios Optronic, con designación S-1066 y certificada por NIST. Esta lámpara se colocó a 50 cm del fotodiodo.

Este primer ensayo permitió desechar los fotodiodos que incorporaban el circuito acondicionador en el propio chip, ya que se sus salidas se saturaban de forma inmediata a alta luminosidad.

De los pertenecientes al grupo de fotodiodos sin acondicionador de señal, las curvas de respuesta obtenidas se observan en la figura

Las curvas de respuesta tienen un perfil muy parecido. La que menor respuesta presenta es el OSD5-5T. El VTB 101 se desechó porque a baja iluminación presentaba un comportamiento extraño y también porque su salida era fuertemente dependiente de la temperatura, ya que al ir aumentando la luminosidad y por tanto la temperatura del fotodiodo, se comportaba de forma irregular.

g. Sistema de acondicionamiento de la señal.

La señal de salida de un fotodiodo se puede medir en forma de tensión o de corriente, siendo ésta última la que presenta mejores características de linealidad, offset y ancho de banda.

La fotocorriente generada ha de ser convertida a tensión usando una configuración de amplificador de transimpedancia [205], [207]. El fotodiodo puede operar aplicándole o no una tensión inversa, en función de las características que se deseen. Como ya se ha expuesto con anterioridad, se denomina modo fotoconductor cuando se le aplica una tensión inversa y modo fotovoltaico cuando no se le aplica.

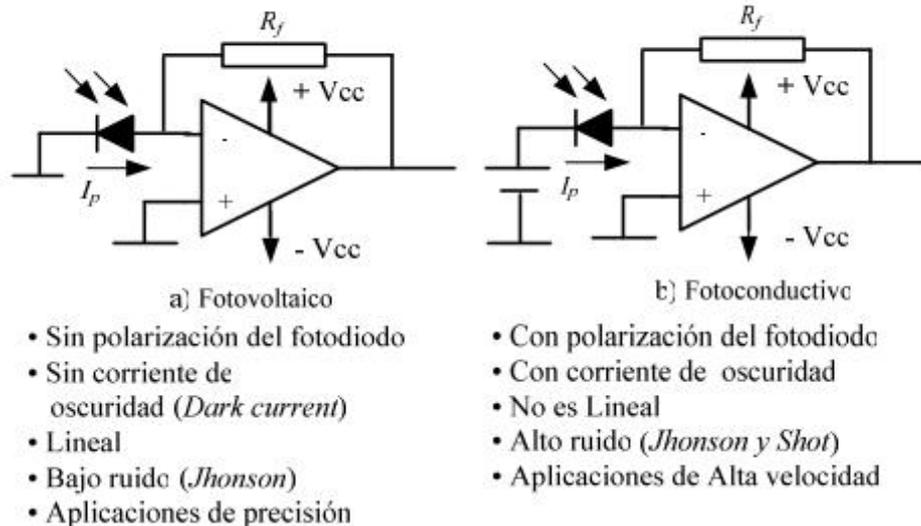
I. Modo fotovoltaico.

Es el modo preferido cuando se usan fotodiodos en aplicaciones de baja frecuencia. En este modo, la fotocorriente generada tiene menos variaciones de la responsividad con las variaciones de temperatura y una alta sensibilidad.

II. Modo Fotoconductor.

Se produce cuando se polariza inversamente al fotodiodo. Este modo de funcionamiento mejora la velocidad de respuesta del dispositivo, ya que se aumenta el ancho de la región de deplexión y por tanto disminuye la capacidad de transición Cj. Como contrapartida aumentan las corrientes de oscuridad y de ruido.





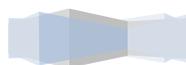
. Fig. 3.4 Modos de operación del fotodiodo. a) Modo fotovoltaico. b) Modo fotoconductor

h. Circuitos de acondicionamiento.

La medida de la luz incidente con un fotodiodo se puede realizar de múltiples formas. En la tabla 4.2 se recogen diferentes sistemas de acondicionamiento de la señal de los fotodiodos y se comparan entre sí.

A la vista de la tabla 4.2, se puede concluir que los circuitos de acondicionamiento más interesantes se basan en la medida de la corriente a tensión cero o bien la corriente cuando el diodo soporta una determinada tensión inversa. La medida en la zona directa del diodo es desaconsejable debido a la falta de linealidad y a que la capacidad es elevada, sin embargo el ruido es muy reducido y se aconseja este tipo de montaje cuando los niveles de luz a medir son muy bajos, caso que no nos ocupa.

Cada uno de los circuitos mostrados en la tabla 4.2, se han montado físicamente en el laboratorio, siendo el que ha presentado una mejor respuesta lineal el montaje (a), ya que el (b) y (c) presentaban una respuesta excelente pero con alto nivel de ruido.



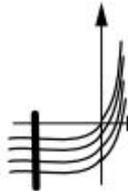
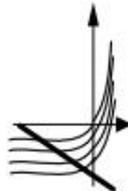
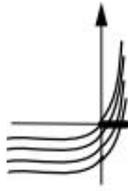
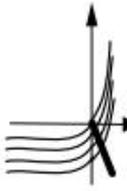
Circuito	Zona de trabajo				
	(a)	Inversa		Directa	
Objetivo	Medida de la corriente en cortocircuito	Medida de la corriente con una tensión inversa fija	Medida de la corriente en zona inversa sobre una resistencia de carga	Medida de la tensión en circuito abierto	Medida en zona directa sobre una resistencia de carga
Recta de carga					
Linealidad	Excelente	Buena	Aceptable	No es lineal	Media-baja
Dependencia con la temperatura	Muy baja	Baja	Baja	Muy elevada	elevada
Corriente de oscuridad	Baja	Elevada	Media	Muy baja	Muy baja
Tiempo de respuesta	Medio	Muy pequeño	Medio	Alto	Alto
Ruido	Medio	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Comentarios	Excelentes características generales	Adecuado cuando se requiere un ancho de banda elevado	Muy simple. Aplicaciones con pocas exigencias	No es lineal. Poco recomendable	Comportamiento intermedio entre los circuitos (a) y (d).

Figura 3.5 Circuitos de acondicionamiento para fotodiodos

Por otra parte, la fotocorriente es sensiblemente lineal con la luz incidente, lo cual quiere decir que la ecuación (4.21) es muy aproximada, tanto que el error que se comete al utilizarla es menor del 1% en un margen de ocho o diez órdenes de magnitud entre 1pW y 10 mW [202].

Como ventajas adicionales en cuanto a al utilización del fotodiodo sin polarizar o modo fotovoltaico, también habría que resaltar los siguientes aspectos:

- La dependencia con la temperatura es más reducida.
- La corriente de oscuridad es pequeña puesto que no se aplica tensión inversa y por tanto el ruido también es pequeño por este mismo motivo.

- Aunque el mayor inconveniente del circuito utilizado reside en que la capacidad de transición C_j es relativamente elevada, lo que limita el tiempo de respuesta, se puede reducir esta capacidad aplicando tensión inversa al fotodiodo, aunque aparecen otros inconvenientes ligados a una mayor corriente de oscuridad, ruido, etc.

Es por todo lo anterior, lo que nos ha motivado el utilizar un circuito de acondicionamiento de la señal del fotodiodo, basado en un amplificador de transimpedancia, tal como se muestra en la figura 4.13.

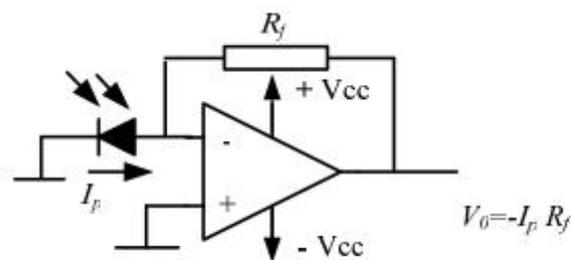


Fig. 4.13. Amplificador de transimpedancia con salida negativa.

En la figura 4.13 se puede observar que basta con cambiar los terminales del fotodiodo para invertir la tensión de salida. Por conveniencia en el montaje final se utiliza esta configuración para obtener tensiones positivas en la salida.

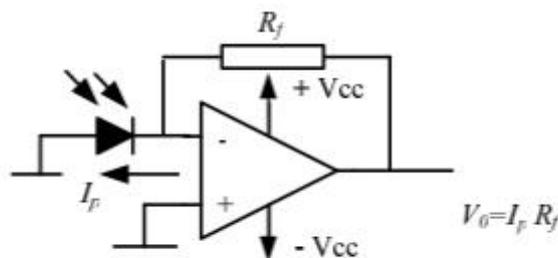
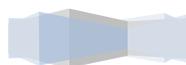


Fig. 4.14. Amplificador de transimpedancia con salida positiva.

Para corregir el error de continua debido a las corrientes de polarización se conecta una resistencia (R_c) en la entrada no inversora del operacional del mismo valor que R_f . No obstante, esta resistencia produce un efecto pernicioso, ya que el ruido en la entrada no inversora del operacional resulta amplificado. Para evitarlo (limitando el ancho de banda del ruido) se conecta un condensador en paralelo (C_c) con la resistencia de compensación (R_c)





CAPITULO IV

AMPLIFICADOR OPERACIONAL



AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Un amplificador operacional (comúnmente abreviado A. O. u op-amp), es un circuito electrónico (normalmente se presenta como circuito integrado) que tiene dos entradas y una salida. La salida es la diferencia de las dos entradas multiplicada por un factor (G) (ganancia):

$$V_{out} = G \cdot (V_{+} - V_{-})$$

El primer amplificador operacional monolítico, que data de los años 1960, fue el Fairchild $\mu A702$ (1964), diseñado por Bob Widlar. Le siguió el Fairchild $\mu A709$ (1965), también de Widlar, y que constituyó un gran éxito comercial. Más tarde sería sustituido por el popular Fairchild $\mu A741$ (1968), de David Fullagar, y fabricado por numerosas empresas, basado en tecnología bipolar.

Originalmente los A.O. se empleaban para operaciones matemáticas (suma, resta, multiplicación, división, integración, derivación, etc.) en calculadoras analógicas. De ahí su nombre.

El A.O. ideal tiene una ganancia infinita, una impedancia de entrada infinita, un ancho de banda también infinito, una impedancia de salida nula, un tiempo de respuesta nulo y ningún ruido. Como la impedancia de entrada es infinita también se dice que las corrientes de entrada son cero.



NOTACION

El símbolo de un amplificador es el mostrado en la siguiente figura:

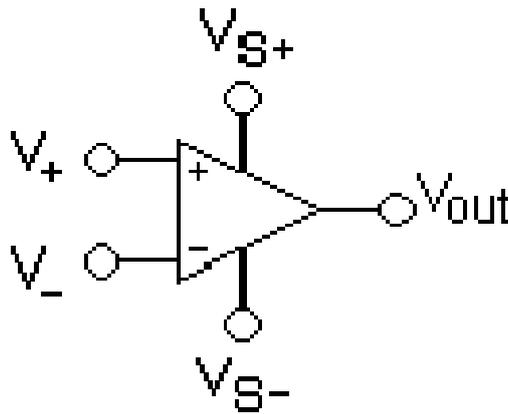


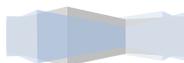
FIG. 4.1 símbolo amplificador

Los terminales son:

- V_+ : entrada no inversora
- V_- : entrada inversora
- V_{OUT} : salida
- V_{S+} : alimentación positiva
- V_{S-} : alimentación negativa

Los terminales de alimentación pueden recibir diferentes nombres, por ejemplos en los A.O. basados en FET V_{DD} y V_{SS} respectivamente. Para los basados en BJT son V_{CC} y V_{EE} .

Normalmente los pines de alimentación son omitidos en los diagramas eléctricos por claridad.



COMPORTAMIENTO EN CORRIENTE CONTINUA (DC)

Lazo abierto

Si no existe realimentación la salida del A. O. será la resta de sus dos entradas multiplicada por un factor. Este factor suele ser del orden de 100.000 (que se considerará infinito en cálculos con el componente ideal). Por lo tanto si la diferencia entre las dos tensiones es de 1V la salida debería ser 100.000 V.

Debido a la limitación que supone no poder entregar más tensión de la que hay en la alimentación, el A. O. estará saturado si se da este caso. Esto será aprovechado para su uso en comparadores, como se verá más adelante. Si la tensión más alta es la aplicada a la patilla + la salida será la que corresponde a la alimentación V_{S+} , mientras que si la tensión más alta es la del pin - la salida será la alimentación V_{S-} .

Lazo cerrado o realimentado

Se conoce como lazo cerrado a la realimentación en un circuito. Aquí se supondrá realimentación negativa. Para conocer el funcionamiento de esta configuración se parte de las tensiones en las dos entradas exactamente iguales, se supone que la tensión en la pata + sube y, por tanto, la tensión en la salida también se eleva. Como existe la realimentación entre la salida y la pata -, la tensión en esta pata también se eleva, por tanto la diferencia entre las dos entradas se reduce, disminuyéndose también la salida. Este proceso pronto se estabiliza, y se tiene que la salida es la necesaria para mantener las dos entradas, idealmente, con el mismo valor.



Siempre que hay realimentación negativa se aplican estas dos aproximaciones para analizar el circuito:

- $V_+ = V_-$. (lo que se conoce como *principio del cortocircuito virtual*).
- $I_+ = I_- = 0$

Cuando se realimenta negativamente un amplificador operacional, al igual que con cualquier circuito amplificador, se mejoran algunas características del mismo como una mayor impedancia en la entrada y una menor impedancia en la salida. La mayor impedancia de entrada da lugar a que la corriente de entrada sea muy pequeña y se reducen así los efectos de las perturbaciones en la señal de entrada. La menor impedancia de salida permite que el -

Amplificador se comporte como una fuente eléctrica de mejores características. Además, la señal de salida no depende de las variaciones en la ganancia del amplificador, que suele ser muy variable, sino que depende de la ganancia de la red de realimentación, que puede ser mucho más estable con un menor coste. Asimismo, la frecuencia de corte superior es mayor al realimentar, aumentando el ancho de banda.

Asimismo, cuando se realiza realimentación positiva (conectando la salida a la entrada no inversora a través de un cuadripolo determinado) se buscan efectos muy distintos. El más aplicado es obtener un oscilador para el generar señales oscilantes.



ANÁLISIS

Para analizar un circuito en el que haya A.O. puede usarse cualquier método, pero uno habitual es:

1. Comprobar si tiene realimentación negativa
2. Si tiene realimentación negativa se pueden aplicar las reglas del apartado anterior
3. Definir las corrientes en cada una de las ramas del circuito
4. Aplicar el método de los nodos en todos los nodos del circuito excepto en los de salida de los amplificadores (porque en principio no se puede saber la corriente que sale de ellos)
5. Aplicando las reglas del apartado 2 resolver las ecuaciones para desear la tensión en los nodos donde no se conozca.

CONFIGURACIONES

Comparador

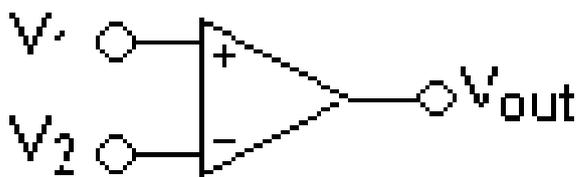
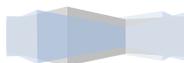


FIG. 4.2 comparador

Esta es una aplicación sin la retroalimentación. Compara entre las dos entradas y saca una salida en función de qué entrada sea mayor. Se puede usar para adaptar niveles lógicos.

$$V_{out} = \begin{cases} V_{S+} & V_1 > V_2 \\ V_{S-} & V_1 < V_2 \end{cases}$$



Seguidor

Es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada.

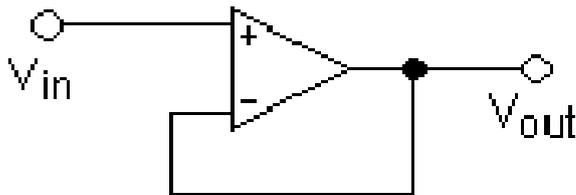


FIG. 4.3 seguidor

Se usa como un buffer, para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa)

Como la tensión en las dos patillas de entradas es igual: $V_{out} = V_{in}$

$$Z_{in} = \infty$$

Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevadísima, la de salida prácticamente nula, y puede ser útil, por ejemplo, para poder leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte apenas a la medición. De hecho, es un circuito muy recomendado para realizar medidas de tensión lo más exactas posibles, pues al medir la tensión del sensor, la corriente pasa tanto por el sensor como por el voltímetro y la tensión a la entrada del voltímetro dependerá de la relación entre la resistencia del voltímetro y la resistencia del resto del conjunto formado por sensor, cableado y conexiones.



Inversor

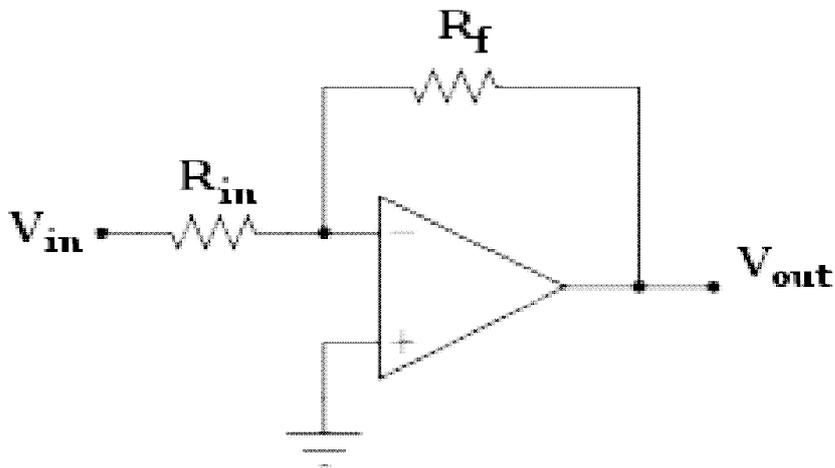


FIG. 4.4 Inversor

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: $\frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = -\frac{V_{out} - 0}{R_f}$ y de aquí se despeja

- $V_{out} = -V_{in} \frac{R_f}{R_{in}}$

- Para el resto de circuitos el análisis es similar.
- $Z_{in} = R_{in}$



No inversor

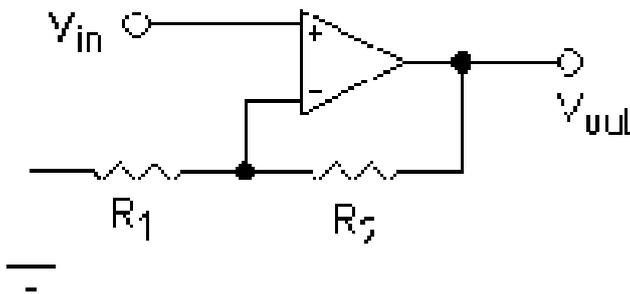


FIG. 4.5 No inversor

Como observamos, el voltaje de entrada, ingresa por el pin positivo, pero como conocemos que la ganancia del amplificador operacional es muy grande, el voltaje en el pin positivo es igual al voltaje en el pin negativo, 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.

- $$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$
- $Z_{in} = \infty$, lo cual nos supone una ventaja frente al amplificador inversor.



Sumador inversor

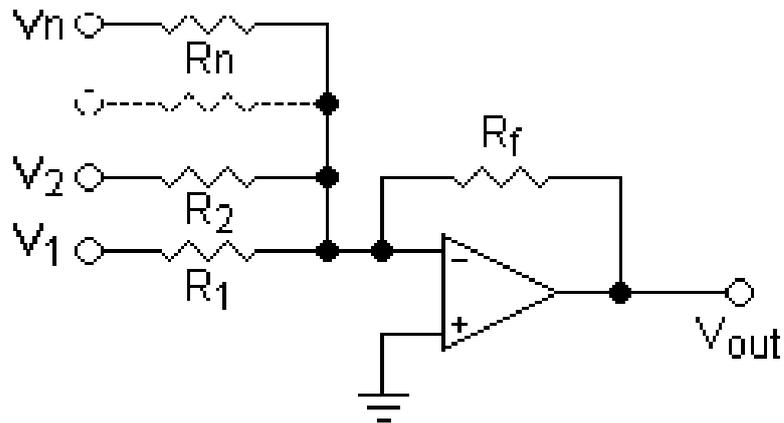
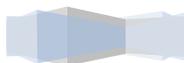


FIG. 4.6 sumador Inversor

- La salida está invertida
- Para resistencias Independiente $R_1, R_2, \dots R_n$

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

- La expresión se simplifica bastante si se usan resistencias del mismo valor
- Impedancias de entrada: $Z_n = R_n$



Restador Inversor

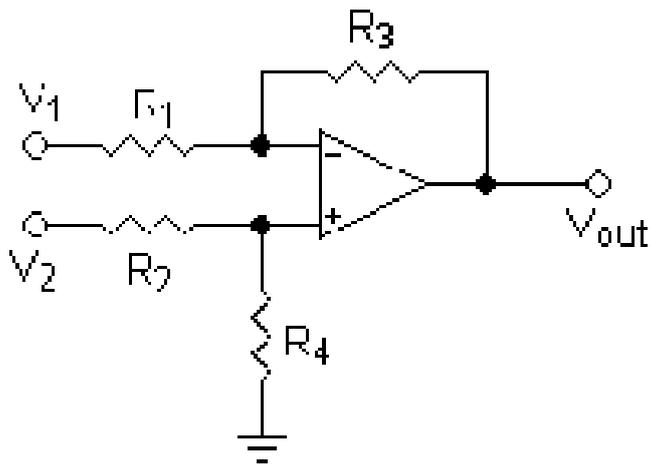


FIG. 4.7 Restador Inversor

- Para resistencias independientes R_1, R_2, R_3, R_4 :

$$V_{out} = V_2 \left(\frac{(R_3 + R_1) R_4}{(R_4 + R_2) R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right)$$

- Igual que antes esta expresión puede simplificarse con resistencias iguales
- La impedancia diferencial entre dos entradas es $Z_{in} = R_1 + R_2$
- Cabe destacar que este tipo de configuración tiene una resistencia de entrada baja en comparación con otro tipo de restadores como por ejemplo el amplificador de instrumentación.



Integrador ideal

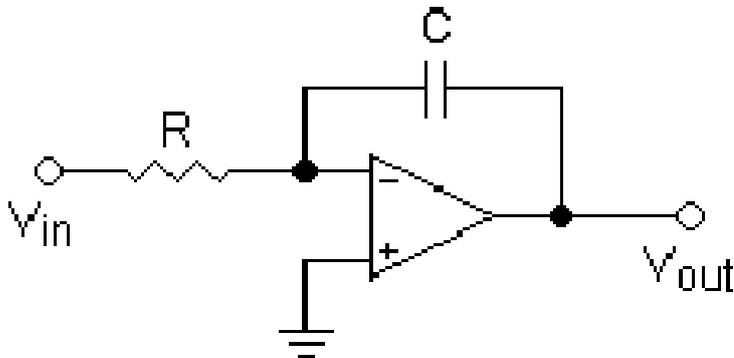


FIG. 4.8 integrador ideal

- Integra e invierte la señal (V_{in} y V_{out} son funciones dependientes del tiempo)

- $$V_{out} = \int_0^t -\frac{V_{in}}{RC} dt + V_{inicial}$$
 - $V_{inicial}$ es la tensión de salida en el origen de tiempos

El integrador no se usa en la práctica de forma discreta ya que cualquier señal pequeña de DC en la entrada puede ser acumulada en el condensador hasta saturarlo por completo; sin mencionar la característica de offset del mismo operacional, que también es acumulada. Este circuito se usa de forma combinada en sistemas retroalimentados que son modelos basados en variables de estado (valores que definen el estado actual del sistema) donde el integrador conserva una variable de estado en el voltaje de su condensador.



Derivador ideal

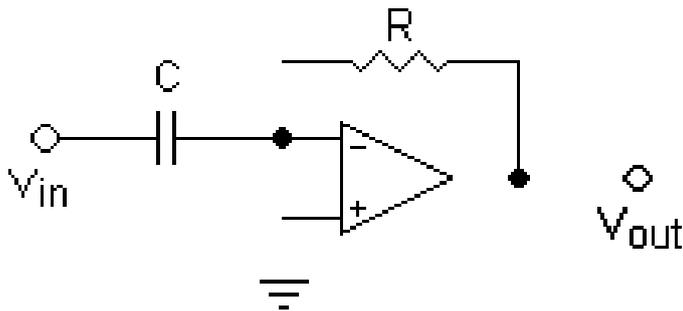


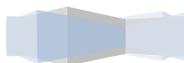
FIG. 4.9 derivador ideal

- Deriva e invierte la señal respecto al tiempo

$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

- Este circuito también se usa como filtro

NOTA: Es un circuito que no se utiliza en la práctica porque no es estable. Esto se debe a que al amplificar más las señales de alta frecuencia se termina amplificando mucho el ruido.



Convertor de corriente a voltaje (TRANSIMPEDANCIA)

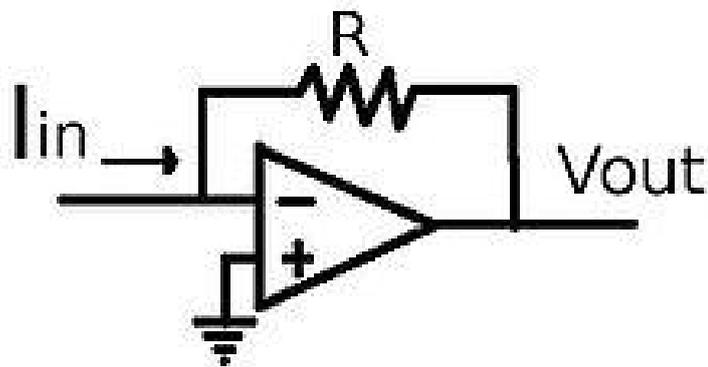


FIG. 3.10 circuito de transimpedancia

El convertor de corriente a voltaje, se conoce también como Amplificador de transimpedancia, llegada a este una corriente (I_{in}), la transforma en un voltaje proporcional a esta, con una impedancia de entrada muy baja, ya que esta diseñado para trabajar con una fuente de corriente.

Con el resistor R como factor de proporcionalidad, la relación resultante entre la corriente de entrada y el voltaje de salida es:

$$V_{out} = -R \cdot I_{in}$$



AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDANCIA

El amplificador de transimpedancia es un circuito que realiza la conversión de corriente – voltaje, son aquellos amplificadores con retroalimentación negativa lineal de corriente, comúnmente llamada serie-paralelo. Su función de transferencia voltaje/corriente.

Para diseñar un circuito amplificador de transimpedancia, se necesita una resistencia lo suficientemente grande como para convertir la corriente de entrada a una salida razonable tensión rango. Para estabilizar este circuito, se necesita un capacitor lo suficientemente grande que debe ser colocado en paralelo con la resistencia de retroalimentación. Para calcular el valor de la retroalimentación de condensadores y asegurar que el diseño cuenta con el mayor ancho de banda posible, y que siga siendo estable.

De acuerdo con la ley de Ohm ($V = IR$) una resistencia R puede actuar como un voltaje transformador de corriente. Impide (resiste) la corriente que fluye a través de él, y como resultado, una caída de tensión $V_R = I \cdot R$ aparece en la resistencia. Esta caída de tensión actúa como una tensión de salida V_{SALIDA} .

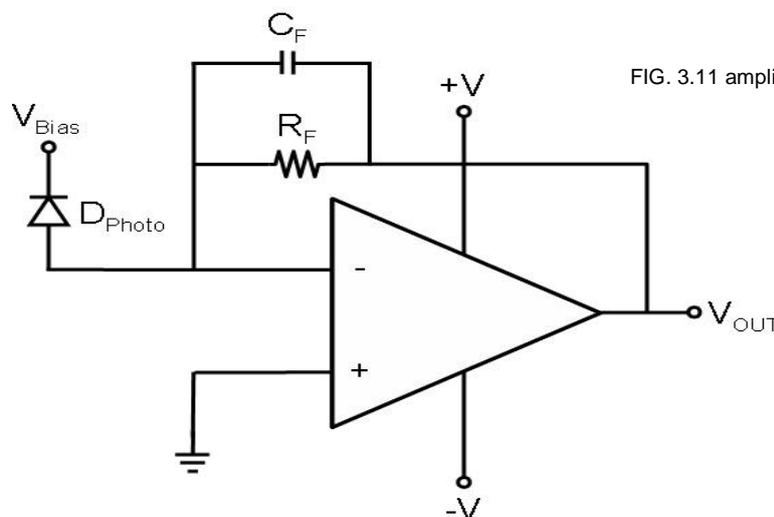
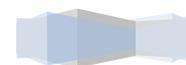


FIG. 3.11 amplificador de transimpedancia



CAPITULO 5

METODOLOGIA



METODOLOGIA

CIRCUITO AMPLIFICADOR TRANSIMPEDANCIA

Utilizando el circuito equivalente de arriba para el fotodiodo, el circuito amplificador de transimpedancia se muestra a continuación:

Datos del Fotodiodo:

$I_p=2.5\text{mA}$

$C=1200\text{pF}$

- a) Consideramos el fotodiodo como una fuente de corriente ideal.

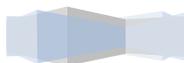
$$\beta s = \frac{X_c(s)}{X_c(s) + R_f}$$

- b) Para determinar la respuesta en frecuencia del operacional interesa conocer la relación $1/\beta s$.

$$\frac{1}{\beta(s)} = \frac{\frac{1}{sC} + R_f}{\frac{1}{sC}} = 1 + sCR_f$$

Presenta cero en F1, dada la inestabilidad en este punto.

$$F1 = \frac{1}{2\pi R_f C} = \frac{1}{2\pi(1000)(1200 * 10^{12})} = 132.62\text{KHz}$$



- c) Para estabilizar el sistema se le añade un condensador C_f en paralelo a la realimentación R_f .

Calculamos C_f

$$\beta(s) = \frac{X_c(s)}{X_c(s) + X_f(s)}$$

Siendo $X_f(s)$

$$X_f(s) = \frac{1}{sC} \parallel R_f = \frac{R_f}{sCfR_f + 1}$$

Con la Cual

$$\frac{1}{\beta(s)} = \frac{1 + R_f(C + C_f)s}{1 + R_fCfs}$$

La función de transferencia tiene un cero en:

$$s = \frac{1}{R_f(C + C_f)}$$

Esta es la frecuencia

$$F1 = \frac{1}{2\pi R_f(C + C_f)}$$

Del mismo modo $1/\beta(s)$ tiene un polo

$$s = \frac{1}{R_fCf}$$

O lo que es lo mismo a la frecuencia

$$F2 = \frac{1}{2\pi R_fCf}$$

La frecuencia de Corte entre la retroalimentación y la curva vienen dado por:

$$F2 = \beta F1 \quad \beta = \text{ancho de banda} \quad \beta F1 = C_f / (C + C_f)$$



$$f_2 = \beta \frac{C_f}{C + C_f}$$

Igualando

$$\frac{1}{2\pi R f C_f} = \beta \frac{C_f}{C + C_f}$$

Se obtiene que el condensador C_f , que corresponde al límite de estabilidad es:

$$C_f \frac{1}{4\pi R f \beta} (1 + \sqrt{1 + 8\pi R f C \beta})$$

$$C_f \frac{1}{4\pi (100)(90 * 10^6)} (1 + \sqrt{1 + 8\pi (1000)(1200 * 10^{-12})(90 * 10^6)})$$

$$C_f = 8.841 \times 10^{-13} (53.1) = 4.695 \times 10^{-11} \text{ ó } 46.9 \times 10^{-12}$$

$$C_f = 46.9 \text{ pF}$$



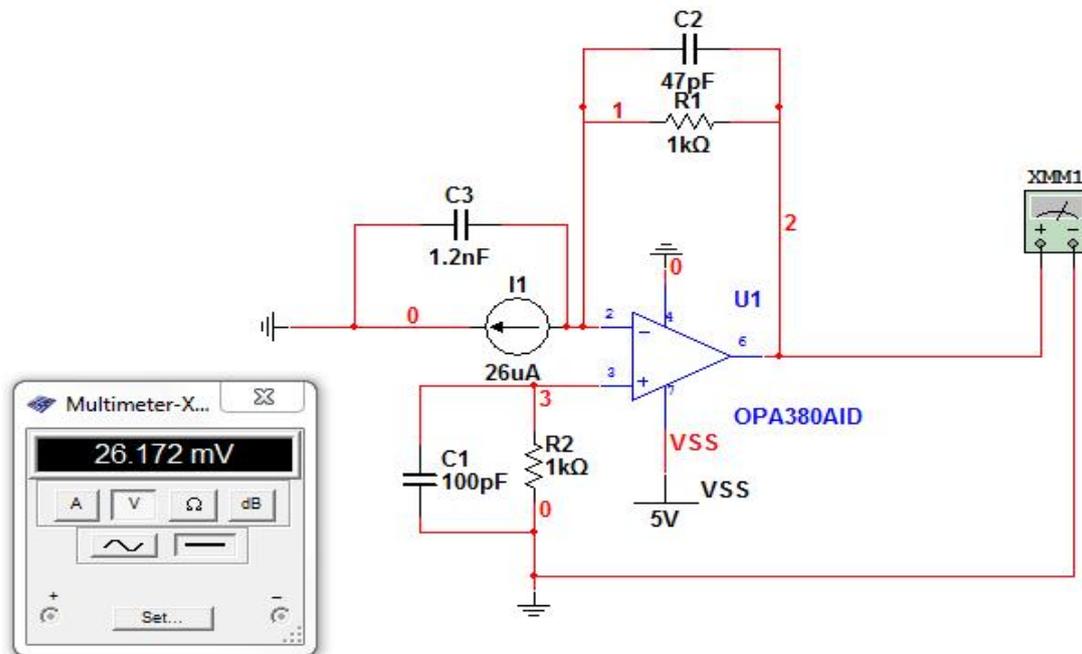


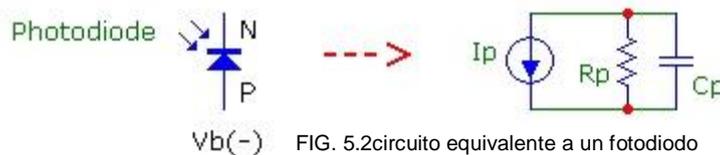
FIG. 5.1 simulacion amplificador transimpedancia

El total de entrada de la desviación de capacitancia C_i es la suma de la capacitancia del fotodiodo, las capacidades de entrada del amplificador operacional y el diseño capacitancias de fuga. Op. Capacidades de entrada de amplificador varían considerablemente dependiendo del tipo (, FET de entrada bipolar, etc) con valores que van desde un pF hasta unos cuantas decenas de pF. Los comentarios de la red total de la capacitancia en derivación C_f constan de condensadores de la regeneración explícitamente añadido, así como parásitos capacitancias de derivación.



Fotodiodo opt101

El fotodiodo unión PN es esencialmente una potencia óptica al convertidor de corriente eléctrica. La sensibilidad de longitud de onda del fotodiodo depende del material del fotodiodo (Si, GaAs, Ge, etc), con fotodiodos de Si se utiliza para la detección del infrarrojo cercano y visible. Los materiales, el diseño de fabricación (espesores de capa, etc) y λ la longitud de onda determinan en gran medida el fotodiodo Responsividad en unidades de A / W. El fotodiodo puede ser aproximadamente el modelo con un equivalente de circuito eléctrico que consiste en una fuente de corriente ideal I_p con una capacidad de maniobra C_p y resistencia a la maniobra de rupias como se muestra a continuación. Desde la fotocorriente generada por un fotodiodo es una corriente inversa, la dirección de la fuente de corriente en el circuito equivalente a continuación corresponde a la orientación de la unión PN en el diagrama:



En este modelo, la respuesta de frecuencia real del fotodiodo, cuando terminó en una carga resistiva simple es implícitamente el modelo por su capacidad en paralelo con una resistencia de carga. Esta es una simplificación de los procesos reales de transporte fotodiodo (deriva de unión y difusión de portador) que determinan la verdadera respuesta de alta frecuencia. Cuando el fotodiodo se utiliza con un circuito de retroalimentación, tales como el amplificador de transimpedancia discutido aquí, la respuesta de frecuencia será determinado por la red de realimentación, así como las características del amplificador (GBW etc.)

El fotodiodo es polarizado inversamente a menudo para reducir la capacitancia, la linealidad aumentar y aumentar R_p . Para fotodiodos de alta calidad, la corriente de fuga resultante de polarización inversa será muy pequeña (<1 nA). El fotodiodo ideal sería tener cero C_p y R_p infinita junto con el posible responsividad máxima ($\sim \lambda$ (UM) / 1,24 A / W). fotodiodos de verdad tienen características que dependen del uso previsto. fotodiodos de alta velocidad para los sistemas de fibra óptica diseñada para 100 Mb / s hasta 10 Gb / s requiere fotodiodos con muy bajas capacidades de más de 0,5 pF y revertir la fuga de corriente de baja. Para el control de baja velocidad y aplicaciones de monitoreo donde la eficiencia y conveniencia de recogida se requiere de luz, mayor área de fotodiodos se usan con capacitancias entre 10 pF a pF o superior e inferior de unión resistencias shunt 100, que se vuelven importantes, así como una mayor corriente de fuga. Las compensaciones de diseño multifacético que participan en fotodiodo / op-amp diseño, con especial énfasis

en el ruido bajo para aplicaciones de alta sensibilidad han sido muy discutido en la literatura, por ejemplo: monitoreo del fotodiodo con OP AMP. Este artículo se centrará en fotodiodos para aplicaciones de ancho de banda intermedia (PC a partir del 1 MHz - 100 MHz) con $C_p \sim 5$ pF y R_p 100Mohm Para el circuito discutido, el fotodiodo es esencialmente una fuente de corriente

ideal con una capacitancia de la desviación pequeña. Esta capacidad del fotodiodo, junto con la red de realimentación del amplificador determinará el ancho de banda del amplificador y la estabilidad generales. Mientras que la reducción al mínimo del ruido será importante en las aplicaciones de bajo nivel, en este artículo se centrará en la respuesta de frecuencia y la estabilidad y asumir mayores niveles de potencia óptica se utilizan. .



Amplificador opa380

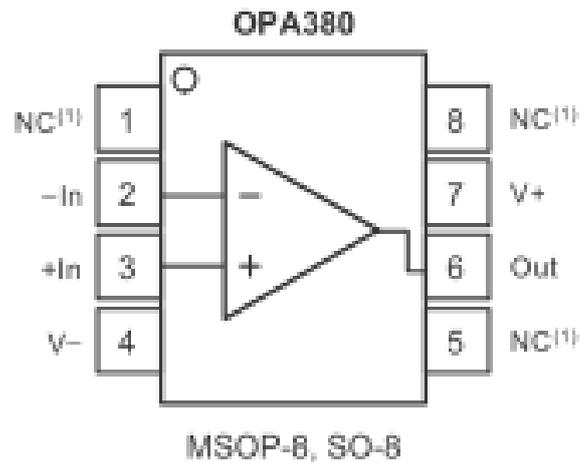


FIG. 5.3 circuito amplificador Opa380

Descripción

La familia de amplificadores OPA380 transimpedancia proporciona de alta velocidad (90MHz ancho de banda de ganancia [GBW]) la operación, con muy alta precisión, una excelente estabilidad a largo plazo, y muy bajo ruido 1/f. Es ideal para la alta velocidad aplicaciones fotodiodo. El OPA380 cuenta con un desplazamiento tensión de $25\mu\text{V}$, la deriva de desplazamiento de $0.1\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$, y el sesgo actual de 50pA . El OPA380 supera con creces el desplazamiento, la deriva, y el ruido convencionales de rendimiento que proporcionan amplificadores operacionales JFET.



El ancho de banda de la señal de un amplificador depende transimpedancia en gran medida de la GBW del amplificador y parasitarias del capacitancia del fotodiodo, así como los comentarios resistencia. El GBW 90MHz del OPA380 permite un transimpedancia de ancho de banda de > 1 MHz en la mayoría de configuraciones. La OPA380 es ideal para circuitos de control rápido para el nivel de potencia en una fibra óptica.

Como resultado de la alta precisión y las características de bajo ruido de la OPA380, un rango dinámico de 4 a 5 años se puede alcanzado. Por ejemplo, esta capacidad permite que el medición de corrientes de la señal en el orden del 1nA, y hasta a 100 μ A en un yo individual / V etapa de conversión. En contraste con amplificadores logarítmicos, el OPA380 ofrece muy amplio ancho de banda en todo el rango dinámico completo. Mediante el uso de una externa desplegable resistencia a 5V, el rango de tensión de salida se puede ampliar para incluir a 0V.

El OPA380 (individual) está disponible en MSOP-8 y 8-SO paquetes. El OPA2380 (dual) está disponible en la miniatura MSOP-8 paquete. Que se especifican en -40 ° C a +125 ° C.



Propiedades:

Tensión de alimentación.....	+7 V
Señal de los terminales de entrada de voltaje.....	0,5 V (V +) + 0.5V
Señal de los terminales de entrada de Corriente	10mA
Corto-circuito de corriente (3).....	continúo
Temperatura de funcionamiento.....	-40 ° C a 125 ° C
Temperatura de almacenamiento.....	-65 ° C a +150 ° C
La salida de temperatura.....	150 ° C
Temperatura de plomo (soldadura, 10s).....	300 C
Clasificación EDS (modelo del cuerpo humano).....	2000V

El amplificador de transimpedancia empieza a amplificar linealmente a partir de 26µA así lo demuestra la simulación hecha.

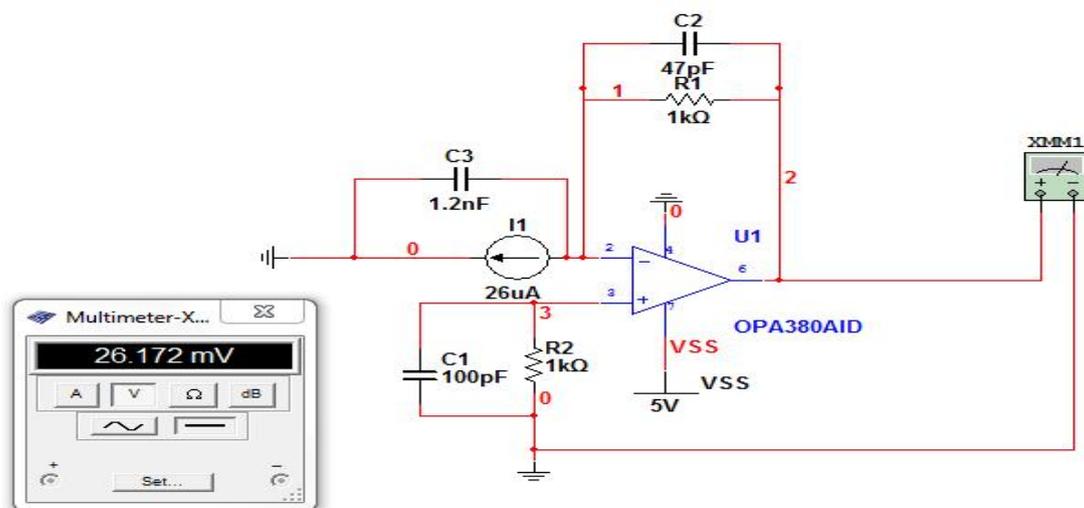


FIG. 5.4 simulación inicio de amplificación

Con una corriente de $100\mu\text{A}$ se genera un voltaje de amplificación de salida de 100.148mV .

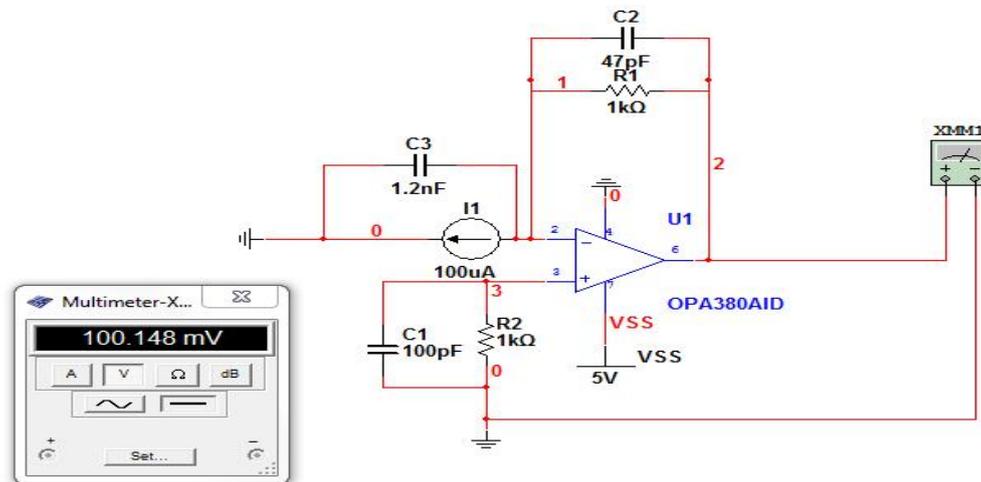
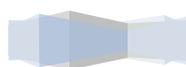


FIG. 5.5 simulacion $100\mu\text{A}$

Con una corriente de $500\mu\text{A}$ se genera un voltaje de amplificación de salida de 500.145mV .



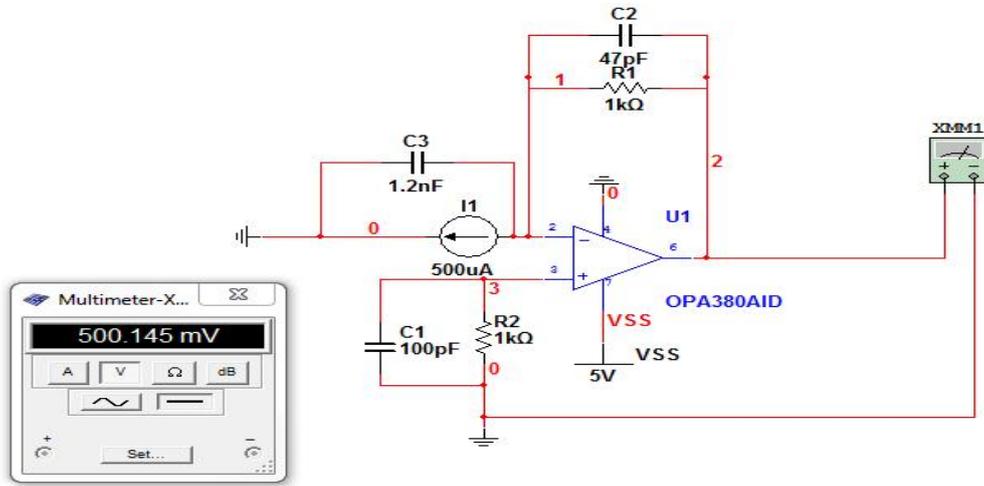


FIG. 5.6 simulacion 500 μ A

Hasta llegar a 4.5mA se nota amplificación lineal.

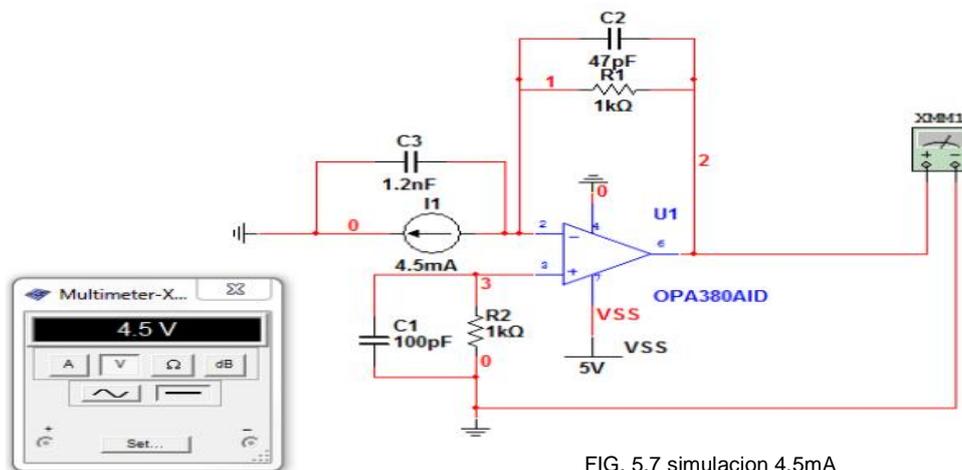
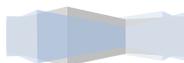
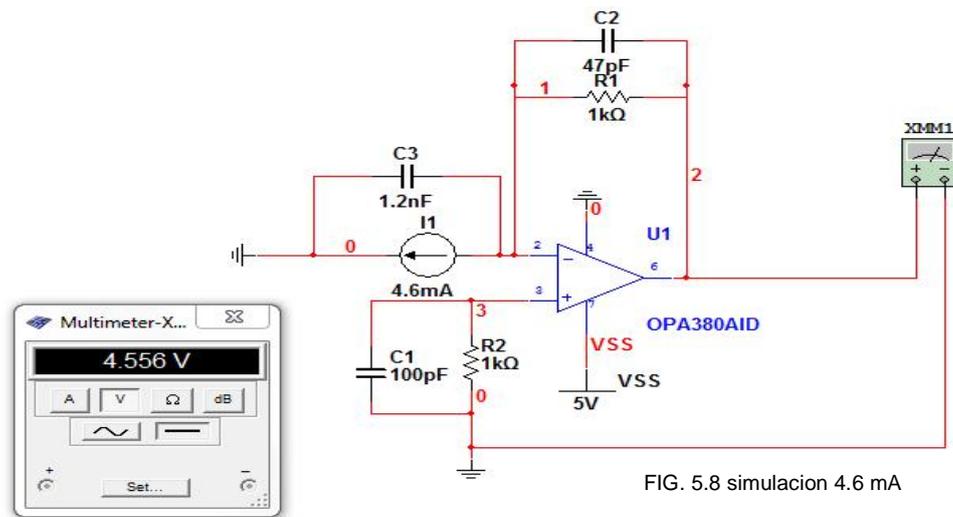


FIG. 5.7 simulacion 4.5mA



Al llegar a 4.6mA llega al límite de amplificación, y empieza a notarse que el nivel de voltaje de salida se atenúa a 4.556V.



Esquemático

En la fig 4.8 Muestra el circuito que fue realizado Eagle layout editor. consta del amplificador opa 380, las resistencias y capacitores calculados de acuerdo a las propiedades del fotodiodo, un pic 18f2550 con su sistema minimo y una salida para visualizar en una pantalla LCD.

CPU

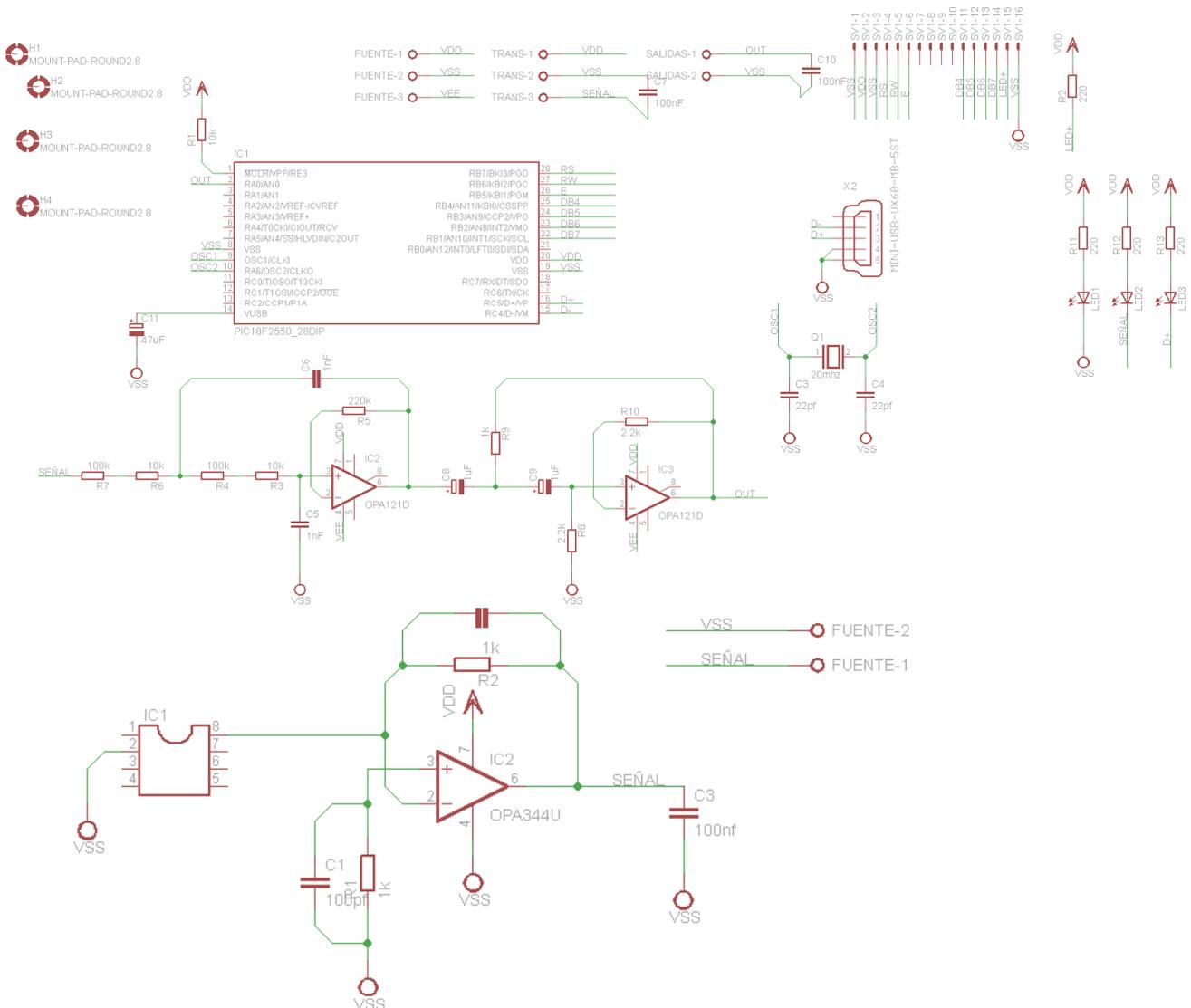


FIG. 5.10 ruteado final



Simulación de la salida de la señal

En la simulación fue realizada en proteus profesional, se simulo la salida de voltaje con el amplificador conectado al pic y mostro que realmente funcionaba de acuerdo a lo previsto mostrando el voltaje de salida en el LCD.

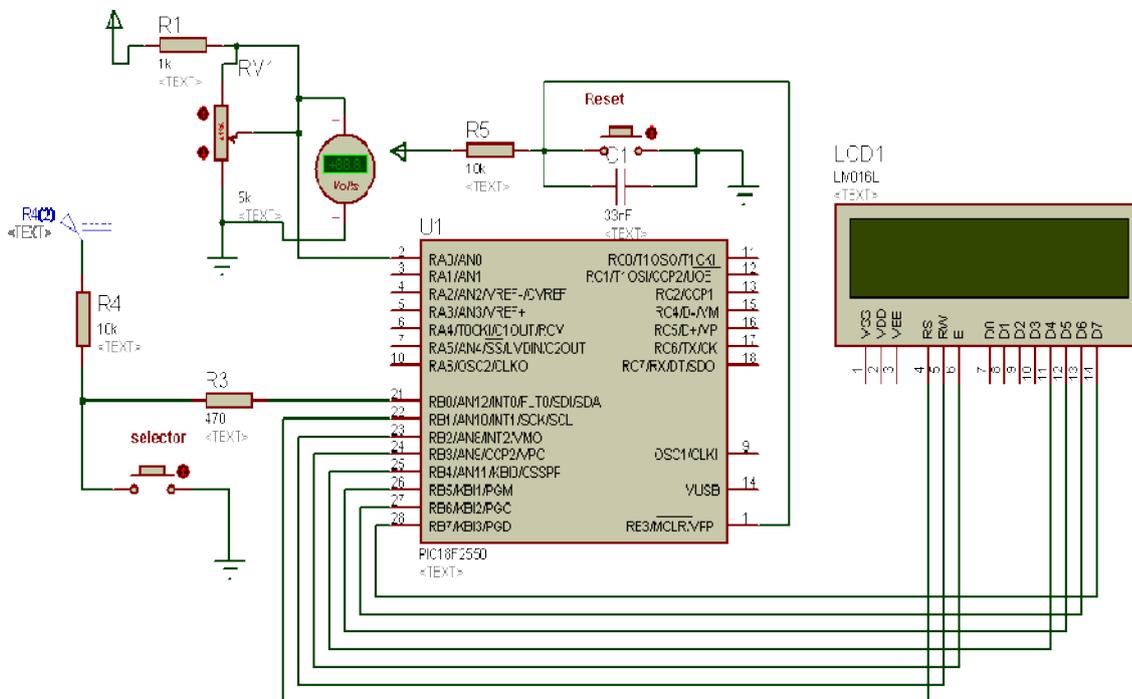


FIG. 5.11 simulación proteus



Arreglo Experimental del Biosensor

En la fig 4.12 muestra el arreglo final así como cada parte del biosensor que se implementarán a futuro este podrá ser realizado al contar con la bacteria E coli ya modificada genéticamente.

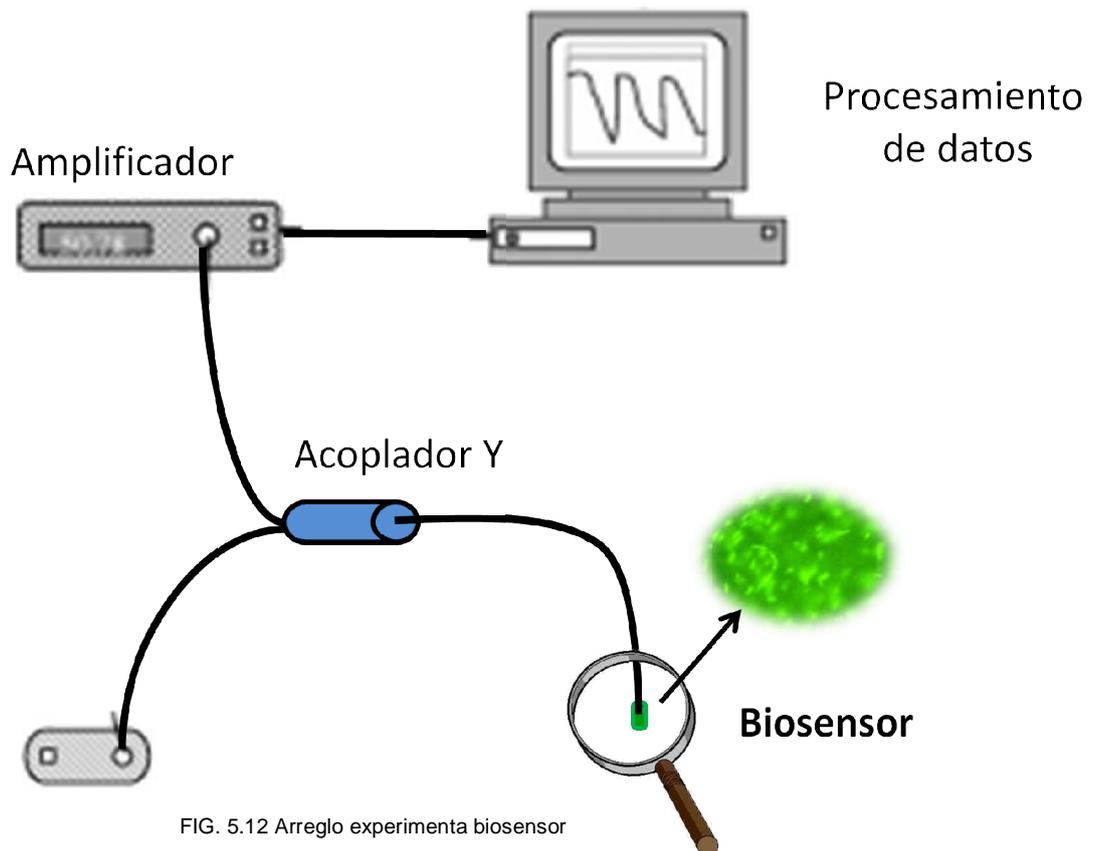
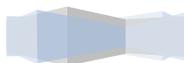
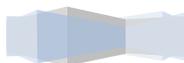


FIG. 5.12 Arreglo experimental biosensor



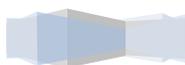


Resultados



LED's	Corriente de entrada.	Voltaje de salida.
Blanco	164.8 μ A	166.2 mV
Verde	95.8 μ A	95.6 mV
Azul	55.2 μ A	56.4 mV
Rosa	51.0 μ A	51.2 mV
Amarillo*	1.1 μ A	-----
Rojo**	8.8 μ A	22.8 mV

En los resultados obtenidos por cada muestra de color se reafirmo que el fotodiodo amplifica de los 200 a los 650nm no detectando el amarillo y el rojo quedando fuera de su rango espectral y se demostró la amplificación lineal como fue previsto en las simulaciones realizadas.



Señal entrada- salida a 1KHertz

Se aplicó una señal de entrada al circuito de 1khertz llegando a la conclusión de que es un amplificador que consta de poco ruido mostrando así una señal de salida idéntica a la señal de entrada emitida.



FIG. 6.1 señal 1khert entrada y salida

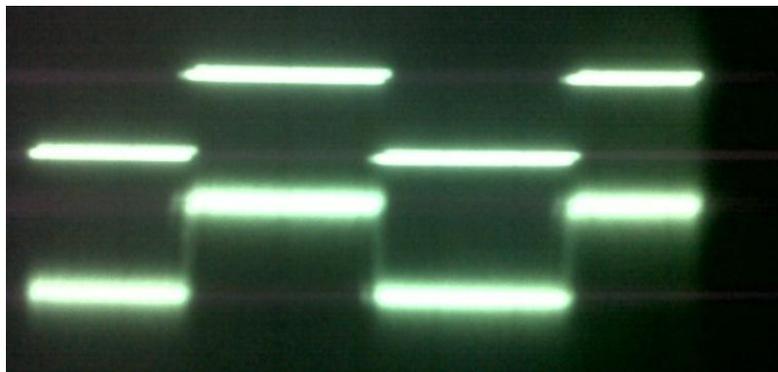
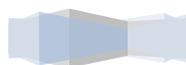


FIG. 4.14 honda cuadrada entrada y salida



Instrumentación

Los aparatos utilizados para realizar mediciones fueron y comprobar el funcionamiento del amplificador de transimpedancia fueron.

*osciloscopio

*generador de señales

*fuente



FIG. 6.3 instrumentos utilizados



REFERENCIAS

- 1.-Opa 380, Precision, High-Speed Transimpedance Amplifier, SBOS291G – NOVEMBER 2003. Texas Instruments Incorporated
- 2.- N. Holonyak Jr. and S.F. Bvacqua, Appl. Phys. Rev. 1 (1962) 82.
- 3.- Chromic Phenomena, Technological Applications of Colour Chemistry, Second Edition
- 4.- Voltage- and Current-Feedback Op Amp Comparison, OP Amps for everyone, Ron Mancini, editor in chief
- 5.- R. W. Catterall, Chemical Sensors, Oxford University Press, Oxford, UK, 1997.
- 7.- M. D. Marazuel and M. C. Moreno-Bondi, Fiber-optic biosensors—An over-view, Anal. Bioanal. Chem., 372, pp. 664–682, 2002.
- 9.- D. G. Buerk, Biosensors—Theory and Applications, Technomic Publishing Com-pany, Inc., Lancaster PA, 1995.
- 10.- M. D. Marazuel and M. C. Moreno-Bondi, Fiber-optic biosensors—An over-view, Anal. Bioanal. Chem., 372, pp. 664–682, 2002.
- 11.- MONOLITHIC PHOTODIODE AND SINGLE-SUPPLY TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER, SBOS291G – NOVEMBER 2003. Texas Instruments Incorporated
- 12.- Arsenic Determination in Water Supplies for Human Consumption of the Province of Cartago, Costa Rica, Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos-CEQIATEC. Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- .13.- Agencia para las Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) División de Toxicología y Medicina Ambiental. Resumen de Salud Pública Arsénico CAS#: 7440-38-2. Agencia para las Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) División de Toxicología y Medicina Ambiental. 2007 Agosto.
- 14.- Photodiode characteristics and applications, available on line:
[http://www.physics.utoronto.ca/~astummer/pub/mirror/Projects/Util/Photodiode%20Characteristics%20and%20Applications%20\(UDT%20Sensors%20Inc\).pdf](http://www.physics.utoronto.ca/~astummer/pub/mirror/Projects/Util/Photodiode%20Characteristics%20and%20Applications%20(UDT%20Sensors%20Inc).pdf), accessed on line May 5, 2009.
- 15 A. D. Khazan, "Transducers and their elements", Prentice Hall, 199417 K. Kaufmann, "Choosing your detector," Hamamatsu Photonics, available on line:
<http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/Combined/choosing-detector.pdf>, accessed on line May 5, 2009.

17 Burr Brown Corp. Designing photodiode amplifier circuits with OPA128. Available on line: <http://focus.ti.com/lit/an/sboa061/sboa061.pdf>

18 J. Graeme, "Photodiode amplifiers. Op amp solutions". Ed. Mc-Graw Hill. New York, 1996, pp. 24-59

19 Guidelines for proper wiring of an RS-485 (TIA/EIA-485-A) network. Maxim, Application Note 763: 2001.

20 E. O. Doebelin, "Measurement systems: Application and design", McGraw-Hill, 1990.

21 J. G. Webster, "The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook", CRC Press, 1998.

22 M. A. Early, A. Thompson, "Irradiance of horizontal quartz-halogen standard lamps", J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol, 101, pp.141-153, 1996.

23 A. R Webb, B.G. Gardiner, M. Blumthaler, P. Forster, M.Huber, and P.J. Kirsch, "A laboratory investigation of two ultraviolet spectroradiometers," Photochemistry and Photobiology, 60, 1, pp. 84-90. 1994.

