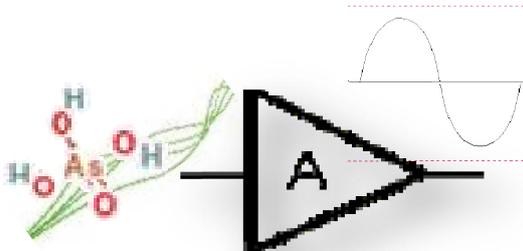




Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

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



Residentes:

Luis Alejandro Pola López

Carlos Toledo Fagoaga

Carrera:

Ing. Electrónica

Asesor:

Dr. Jorge Luis Camas Anzueto

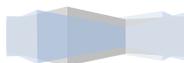
# INDICE

## CAPITULO I

1. <b>Introducción</b> .....	5
a. <b>Objetivos</b> .....	6
i. <b>Objetivo General</b> .....	6
ii. <b>Objetivo Especifico</b> .....	6
b. <b>Planteamiento del problema</b> .....	7
c. <b>Hipótesis</b> .....	8
d. <b>Justificación</b> .....	8

## CAPITULO II

2. <b>Marco teórico</b> .....	9
a. <b>Fibras ópticas</b> .....	9
i. <b>Formas de enviar datos a través de la fibra óptica</b> .....	13
ii. <b>Conectores de fibra</b> .....	14
iii. <b>Sensores con Fibra Óptica</b> .....	15
b. <b>Biosensores con fibras ópticas</b> .....	16
i. <b>Principio de operación de un Biosensor</b> .....	16
ii. <b>Componentes básicos de un biosensor óptico</b> .....	17
c. <b>Fotodetectores</b> .....	18
i. <b>Fotodiodo</b> .....	19
ii. <b>Principio de operación del fotodiodo</b> .....	20
iii. <b>Composición del Fotodiodo</b> .....	21



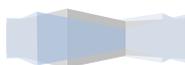
## CAPITULO III

### 3. Amplificador Operacional

a. Amplificador Operacional	22
i. Notación	23
ii. Comportamiento en corriente continua CD	24
1. Lazo abierto	24
2. Lazo cerrado o retroalimentado	24
iii. Análisis	26
iv. Configuraciones	26
1. Comparador	26
2. Seguidor	27
3. Inversor	28
4. No inversor	29
5. Sumador inversor	30
6. Restador inversor	31
7. Integrador ideal	32
8. Derivador ideal	33
9. Conversor de corriente a voltaje	34
b. Amplificador de transimpedancia	35

## CAPITULO IV

4. Metodología	37
a. Circuito amplificador de transimpedancia	37
b. Fotodiodo opt 101	38
c. Opa 380	40
5. Cronograma	14
6. Conclusión	15
7. Bibliografía	16
8. Anexos	26



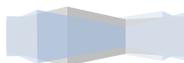
## INDICE DE FIGURAS

1. <b>CAPITULO I</b> .....	5
1.1. Problemática.....	7
2. <b>CAPITULO II</b> .....	9
2.1. Fibras Ópticas.....	9
2.2. Partes de una fibra óptica.....	11
2.3. Tabla Características de una fibra óptica.....	12
2.4. Reflexión de la fibra.....	13
2.5. Estructura de un Biosensor.....	17
3. <b>CAPITULO III</b> .....	23
3.1. Símbolo amplificador.....	23
3.2. Comparador.....	26
3.3. Seguidor.....	27
3.4. Inversor.....	28
3.5. No inversor.....	29
3.6. Sumador inversor.....	30
3.7. Restador inversor.....	31
3.8. Integrador ideal.....	32
3.9. Derivador ideal.....	33
4. <b>CAPITULO IV</b> .....	
4.1. Simulación amplificador de transimpedancia.....	37
4.2. Circuito equivalente del fotodiodo.....	39
4.3. Circuito amplificador opa 380.....	40
4.4. Simulación inicio de amplificacion.....	43

4.5. Simulación 100 $\mu$ A .....	43
4.6. Simulación 500 $\mu$ A .....	44
4.7. Simulación 4.5mA .....	44
4.8. Simulación 4.6mA .....	45
4.9. Esquemático sistema completo .....	46
4.10 Rutado final .....	46
4.11 Simulación proteus .....	47
4.12 Arreglo experimental biosensor .....	48
4.13 Tabla resultados .....	49
4.14 señal 1 khertz entrada salida .....	50
4.15 honda cuadrada entrada y salida .....	50
4.16 Instrumentos utilizados .....	51
4.17 Tabla cronograma .....	52

## INDICE DE FORMULAS

3.1 voltaje de salida con ganancia. ....	22
3.2 voltaje de salida seguidor. ....	27
3.3 despeje voltaje de salida inversor. ....	28
3.4 voltaje de salida inversor. ....	28
3.5 voltaje de salida no inversor. ....	29
3.6 voltaje de salida sumador inversor. ....	30
3.7 voltaje de salida restador inversor. ....	31
3.8 Voltaje de salida integrador ideal. ....	32
3.9 voltaje de salida derivador ideal .....	33
3.10 voltaje de salida en transimpedancia. ....	34

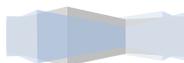


## INTRODUCCION

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.

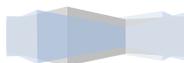
Los amplificador de transimpedancia debe tener alta ganancia, bajo nivel de ruido por lo tanto se diseñan amplificadores con un fotodiodo PIN como dispositivo de entrada el cual sea lo suficientemente sensible para detectar la pequeña señal óptica emitida por el bioreceptor esta señal será amplificada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

En este trabajo de residencia se discute los resultados del modelo de 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.



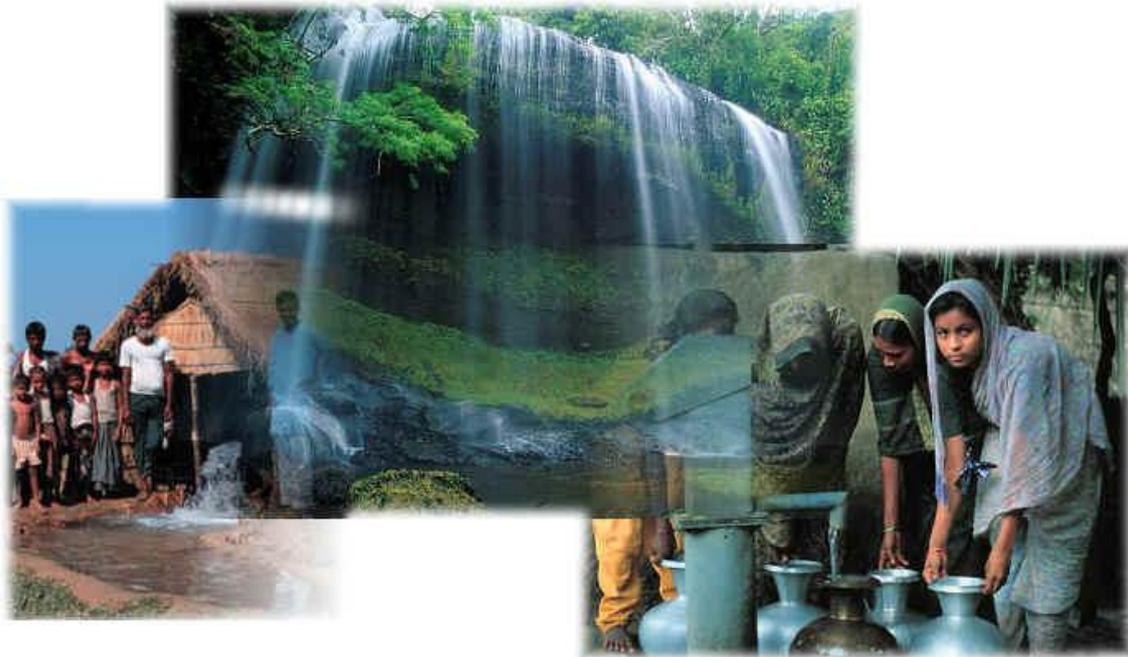
## OBJETIVO GENERAL

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



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un líquido vital para la vida de los seres vivos como se muestra en la fig. 1.1 y el Arsénico en el agua es un contaminante que afecta negativamente la salud de las personas, debido a esto a la necesidad de cuantificar la cantidad de contaminantes disueltos en el agua, se encontró que la bacteria eschirichia 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.



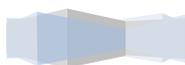
1.1 Problemática

## HIPOTESIS

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

## JUSTIFICACION

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



## MARCO TEORICO

### FIBRA ÓPTICA

#### **Concepto de 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.

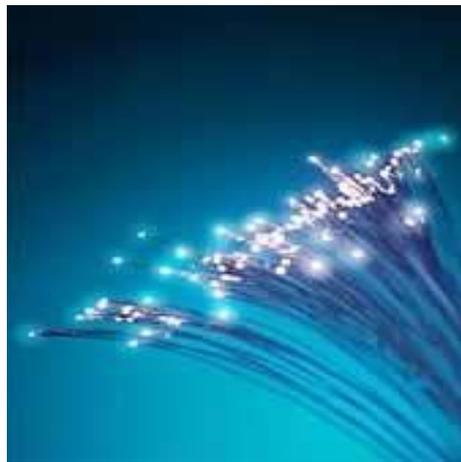


FIG. 2.1 Fibra óptica

La fibra óptica como se muestra en la figura 2.1 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.

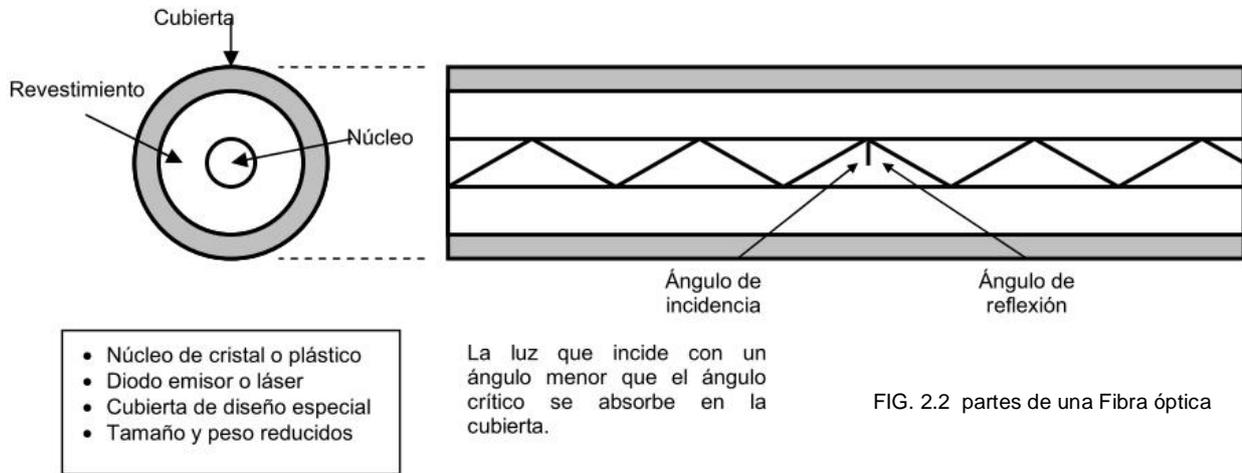
La fibra a marcado un punto de inflexión en el mundo de las telecomunicaciones a parte de otras muchas ramas, las cuales comentaremos posteriormente.



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.





Tomando en cuenta la fig 2.2 las diferentes partes de una fibra óptica son:

- **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.

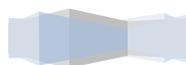
## EXISTEN TRES MODOS DE TRANSMISIÓN:

A continuación se describen los modos de transmisión que se muestran en la Tabla 2.3 y las características de cada uno.

- 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.

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	

Tabla. 2.3 características de Fibra



## FORMA DE ENVIAR DATOS A TRAVES DE FIBRA OPTICA

La fibra óptica se basa en el principio de la reflexión total figura 2.4. 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.

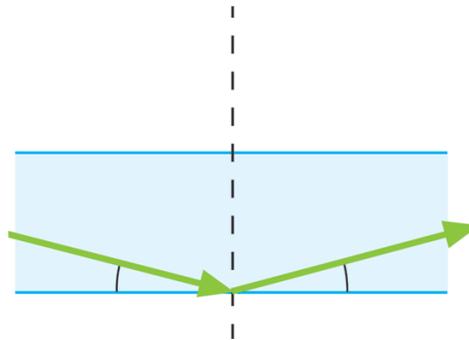


FIG. 2.4 Reflexión total de la fibra

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.



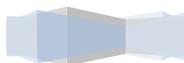
El elemento receptor. Debe reconvertir esos rayos de luz en voltajes y corrientes analógicas o digitales de forma que la estación del usuario pueda separar y utilizar las señales de información que se habían transmitido.

## 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.

Los componentes básicos del biosensor se muestran a continuación fig. 2.5, y a continuación se describen cada uno de ellos.

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.

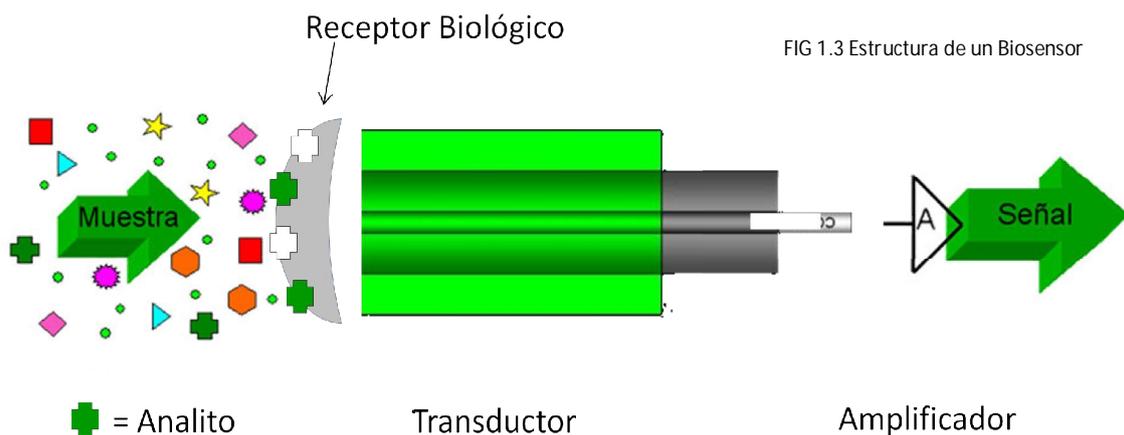
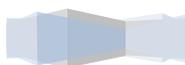


FIG 1.3 Estructura de un Biosensor

FIG. 2.5 Estructura de un Biosensor



## FOTODETECTORES

### **Concepto de Fotodetectores.**

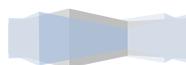
Transductor de luz que proporciona una señal eléctrica como respuesta a la radiación óptica que incide sobre la superficie sensora.

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.



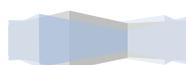
## COMPOSICIÓN DEL FOTODIODO

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 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 como a continuación en la tabla 2.6 se describen.

Material	Longitud de onda (nm)
Silicio	190–1100
Germanio	800–1700
Indio Galio Arsénico (InGaAs)	800–2600
Sulfuro de Plomo	<1000-3500

Tabla. 2.6 Longitud de onda materiales.

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.



## Capítulo III

### 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):

Formula 3.1

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

El primer amplificador operacional monolítico, que data de los años 1960, fue el Fairchild  $\mu A$  702(1964), diseñado por Bob Widlar. Le siguió el Fairchild  $\mu A$ 709 (1965), también de Widlar, y que constituyó un gran éxito comercial. Más tarde sería sustituido por el popular Fairchild  $\mu A$ 741(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 3.1:

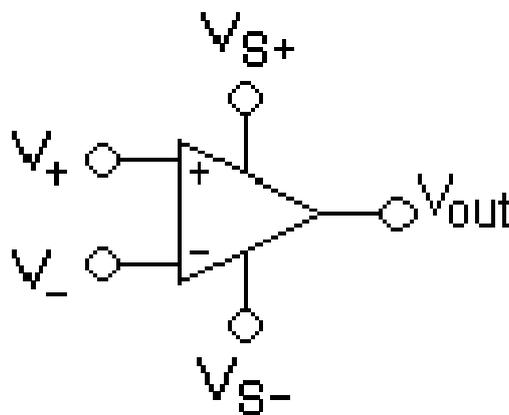


FIG. 3.1 símbolo amplificador

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 despejar la tensión en los nodos donde no se conozca.

## CONFIGURACIONES

### Comparador

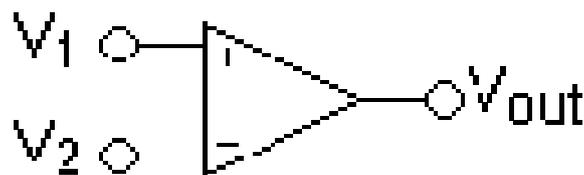
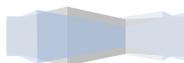


FIG. 3.2 comparador

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 fig. 3.2.



## Seguidor

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

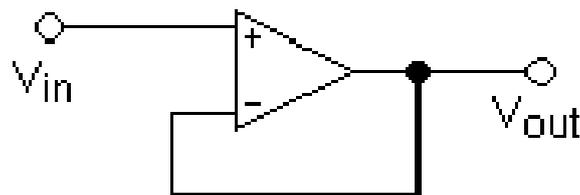


FIG. 3.3 seguidor

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) fig. 3.3.

Como la tensión en las dos patillas de entradas es igual:  $V_{out} = V_{in}$       Formula 3.2

$$Z_{in} = \infty$$

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

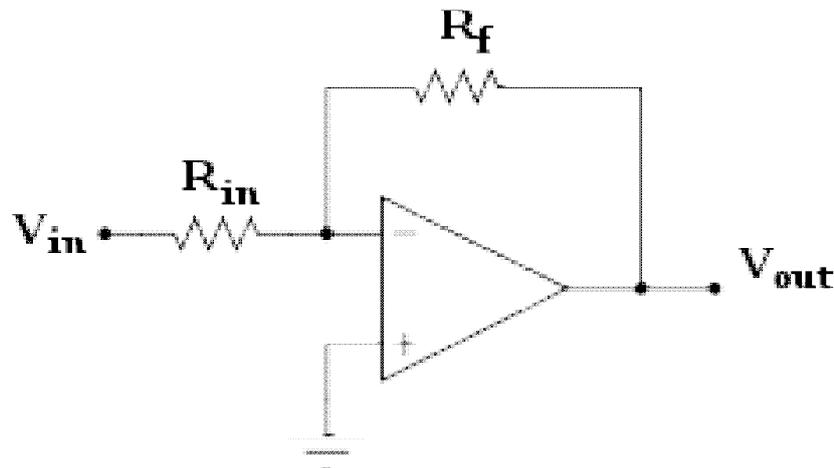


FIG. 3.4 Inversor

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 arreglo mas simple se muestra fig. 3.4.

- El análisis de este circuito es el siguiente:

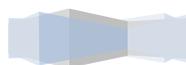
- $V_+ = V_- = 0$

$$\frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = -\frac{V_{out} - 0}{R_f} \quad \text{Formula 3.3}$$

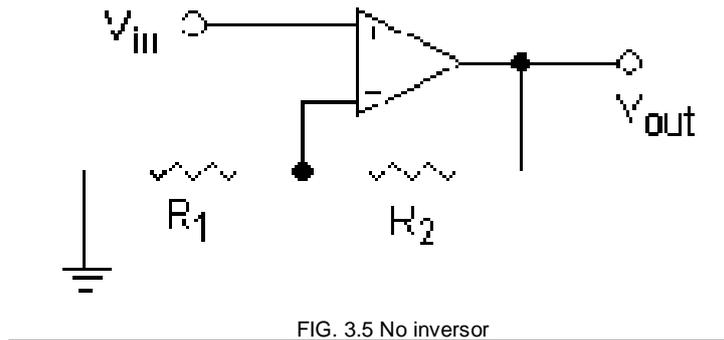
- Definiendo corrientes: y de aquí se despeja

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_f}{R_{in}} \quad \text{Formula 3.4}$$

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

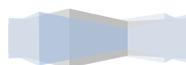


## No inversor



Como observamos fig 3.5, 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.

- $$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \text{ Formula 3.5}$$
- $Z_{in} = \infty$ , lo cual nos supone una ventaja frente al amplificador inversor.



## Sumador inversor

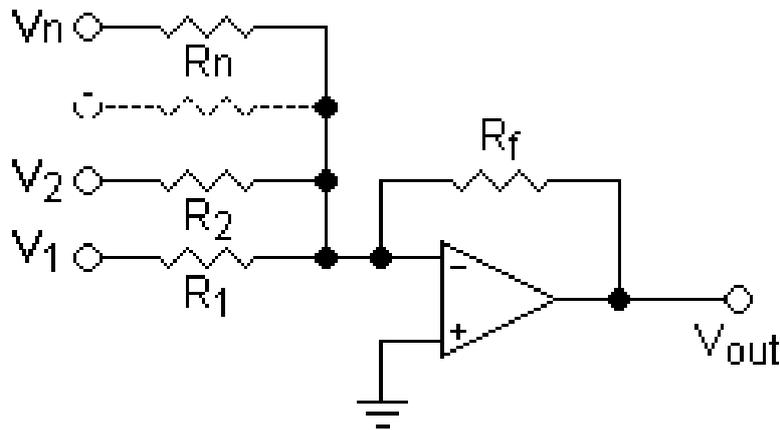


FIG. 3.6 sumador Inversor

En la fig. 3.6 se muestra el arreglo de resistencias y la resistencia de retroalimentación para tener una configuración de sumador inversor.

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

$$V_{out} = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right) \quad \text{Formula 3.6}$$

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



## Restador Inversor

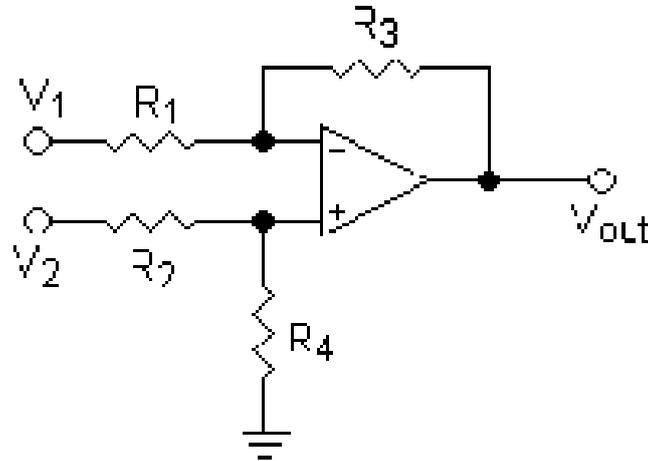


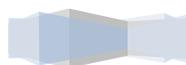
FIG. 3.7 Restador Inversor

- Fig 3.7 Para resistencias independientes  $R_1, R_2, R_3, R_4$ :

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

Formula 3.7

- 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

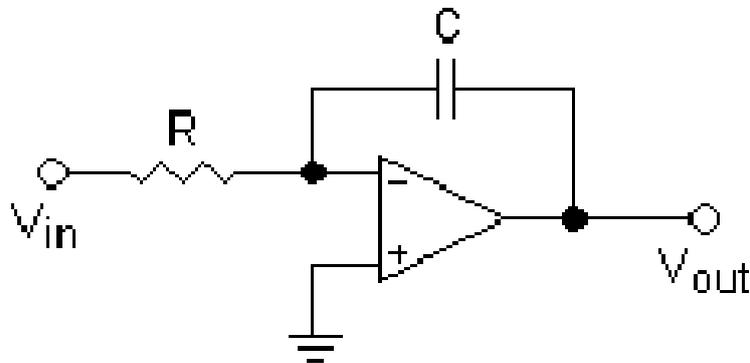


FIG. 3.8 integrador ideal

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

- $$V_{out} = \int_0^t -\frac{V_{in}}{RC} dt + V_{inicial} \quad \text{Formula 3.8}$$

- $V_{inicial}$  es la tensión de salida en el origen de tiempos

El integrador Fig. 3.8 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

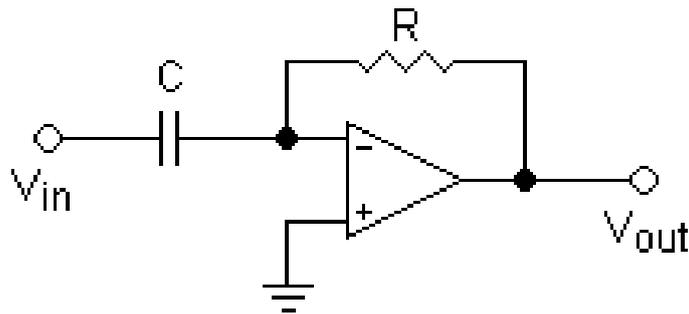


FIG. 3.9 derivador ideal

- Deriva e invierte la señal respecto al tiempo

$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt} \text{ Formula 3.9}$$

- Este circuito también se usa como filtro

NOTA: Es un circuito Fig. 3.9 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)

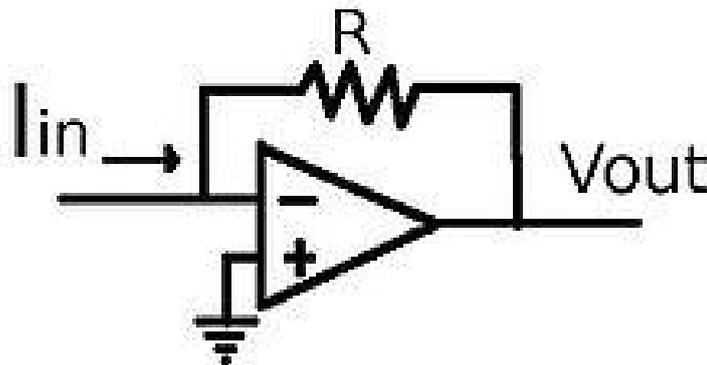


FIG. 3.10 circuito de transimpedancia

En la Fig. 3.10 muestra la configuración mas simple de un 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:

$$V_{out} = -R \cdot I_{in} \quad \text{Formula 3.10}$$



## AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDANCIA

El amplificador de transimpedancia Fig 3.11 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  $V_{SALIDA}$ .

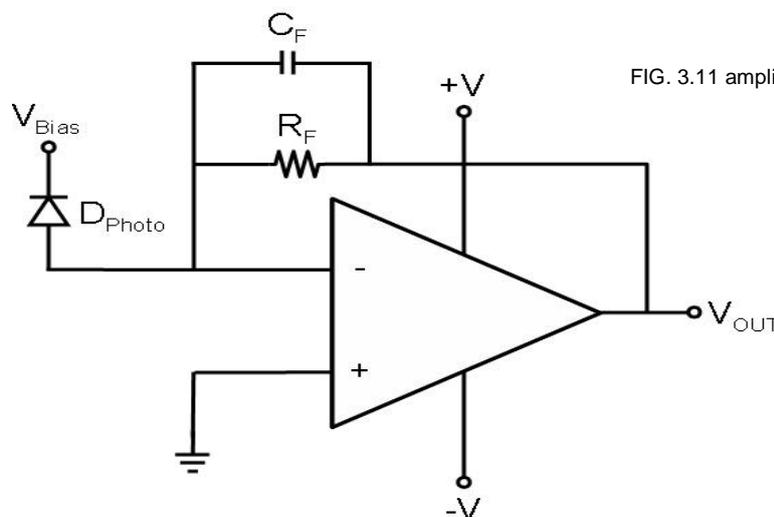


FIG. 3.11 amplificador de transimpedancia

. En la mayoría de los casos, la selección de los fotodiodos permite que el diseñador utilice el mismo suministro de  $V_{Bias}$  y  $V_{+}$ . Uso de fuentes de división mantiene la entrada inversora del amplificador operacional en tierra virtual



# CAPITULO 4

## METODOLOGIA

### CIRCUITO AMPLIFICADOR TRANSIMPEDANCIA

Utilizando el circuito equivalente de arriba para el fotodiodo, el circuito amplificador de transimpedancia se muestra a continuación Fig4.1:

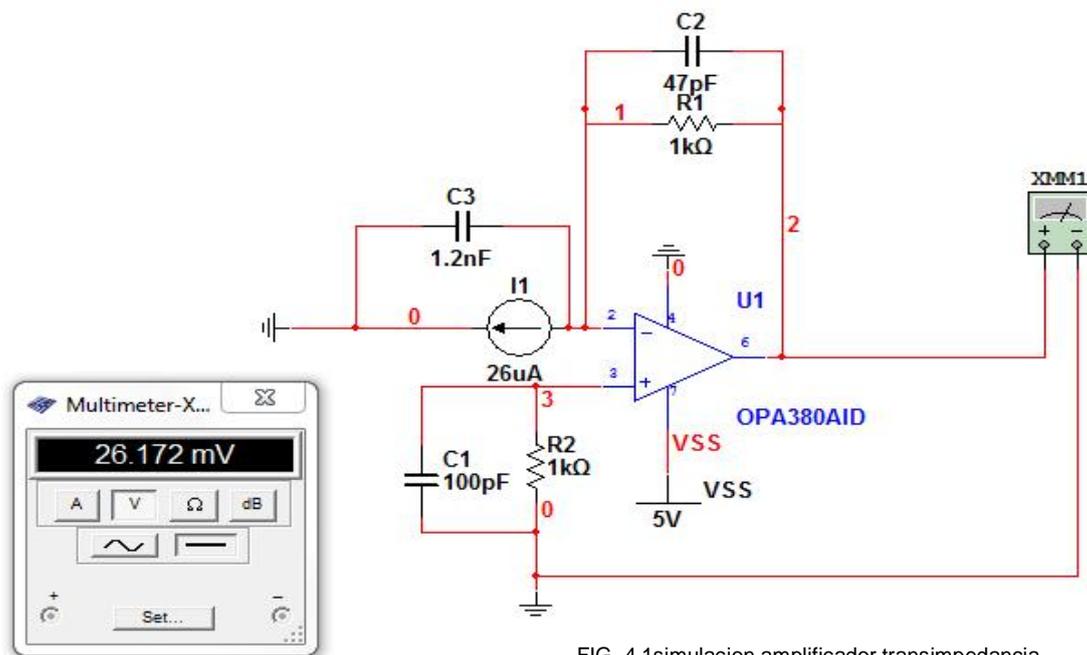
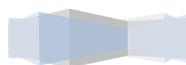


FIG. 4.1 simulacion amplificador transimpedancia

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 fig. 4.2. unión PN es esencialmente una potencia óptica a 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  $\lambda$  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 IP 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:



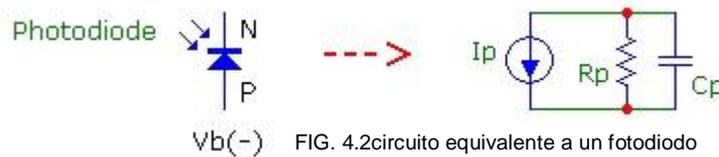


FIG. 4.2 circuito equivalente a un fotodiodo

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  $C_p \sim 5 \text{ pF}$  y  $R_p 100\text{Mohm}$  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

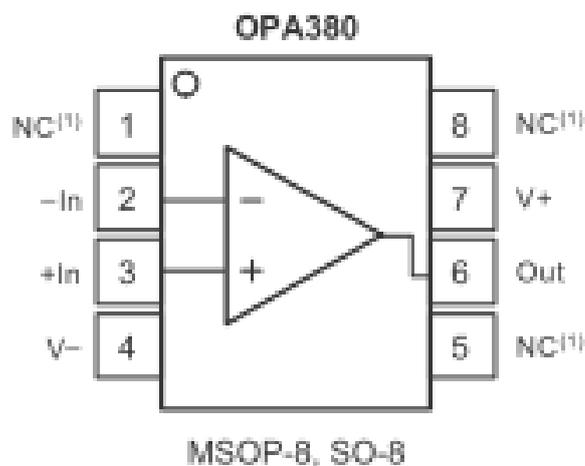


FIG. 4.3 circuito amplificador Opa380

## Descripción

La familia de amplificadores OPA380 fig.4.3, proporciona 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  $50\text{pA}$ . 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  $> 1\text{ MHz}$  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  $1\text{nA}$ , y hasta a  $100\mu\text{A}$  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  $5\text{V}$ , el rango de tensión de salida se puede ampliar para incluir a  $0\text{V}$ .



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  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ .

### 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.....	$-40^{\circ}\text{C}$ a $125^{\circ}\text{C}$
Temperatura de almacenamiento.....	$-65^{\circ}\text{C}$ a $+150^{\circ}\text{C}$
La salida de temperatura.....	$150^{\circ}\text{C}$
Temperatura de plomo (soldadura, 10s).....	300 C
Clasificación EDS (modelo del cuerpo humano).....	2000V



Fig. 4.4, el amplificador de transimpedancia empieza a amplificar linealmente a partir de  $26\mu\text{A}$  así lo demuestra la simulación hecha.

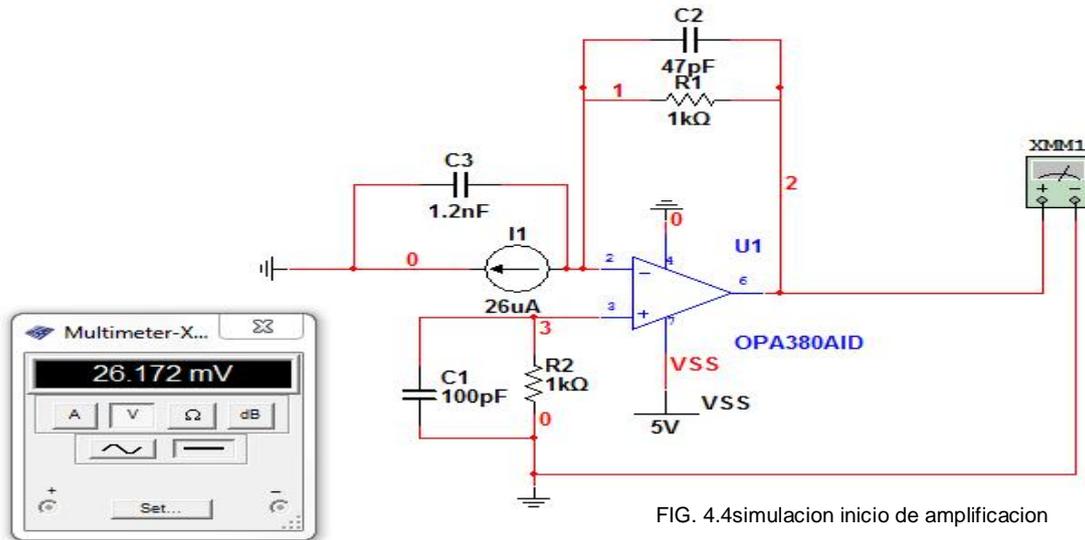


Fig. 4.5 , con una corriente de  $100\mu\text{A}$  se genera un voltaje de amplificación de salida de  $100.148\text{mV}$ .

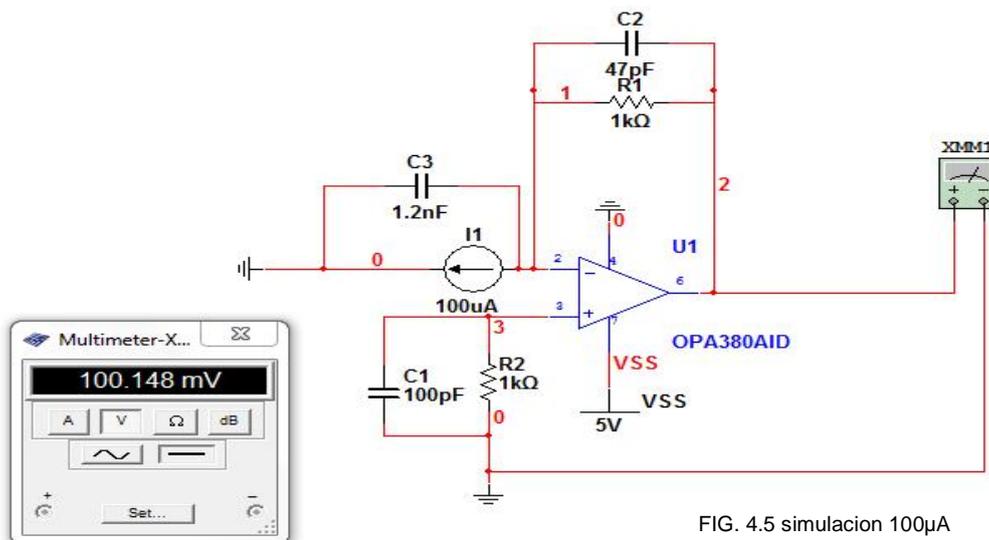


Fig 4.6, con una corriente de  $500\mu\text{A}$  se genera un voltaje de amplificación de salida de  $500.145\text{mV}$ .

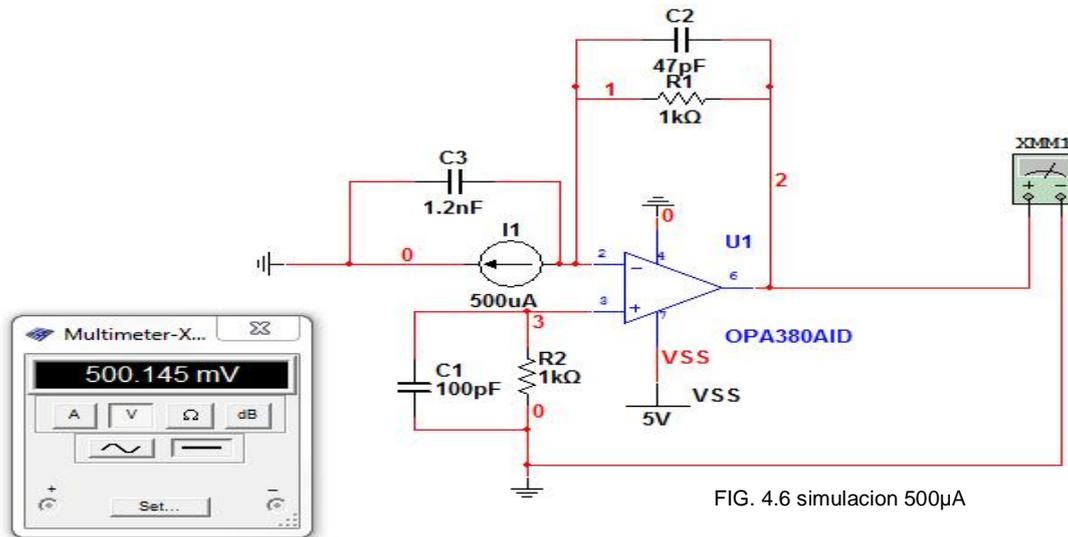


Fig. 4.7 ,hasta llegar a  $4.5\text{mA}$  se nota amplificación lineal.

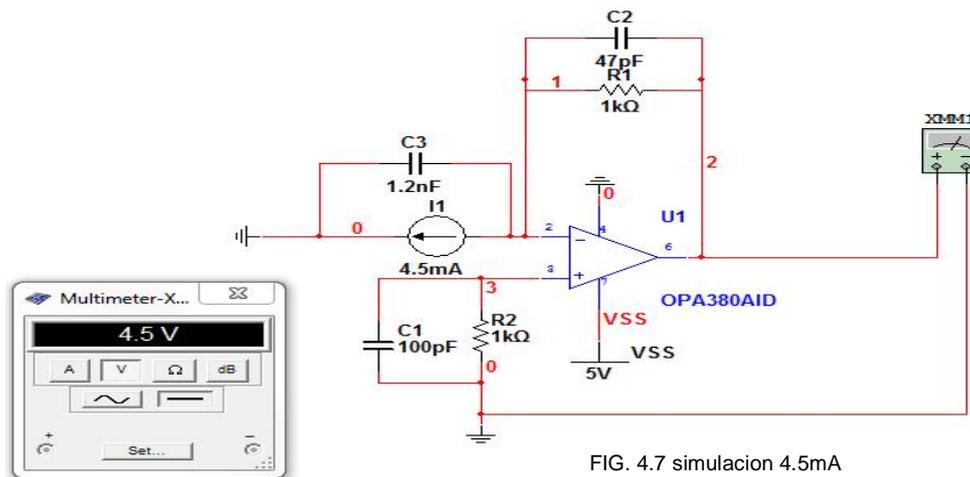
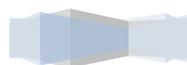
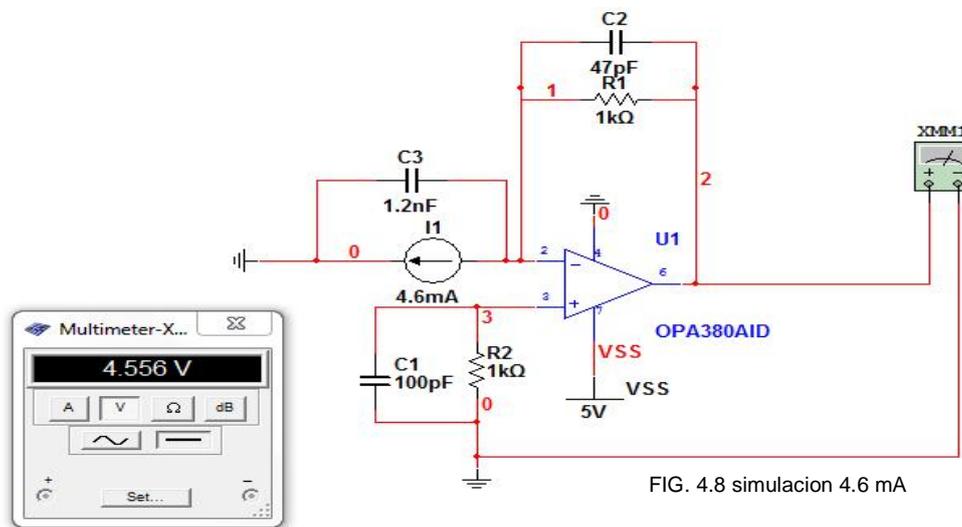


Fig. 4.8 al llegar a 4.6mA llega al limite de amplificación, y empieza a notarse que el nivel de voltaje de salida se atenúa a 4.556V.



## Esquemático

En la fig 4.9 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 mínimo y una salida para visualizar en una pantalla LCD, El rutado final del circuito impreso Fig 4.10..

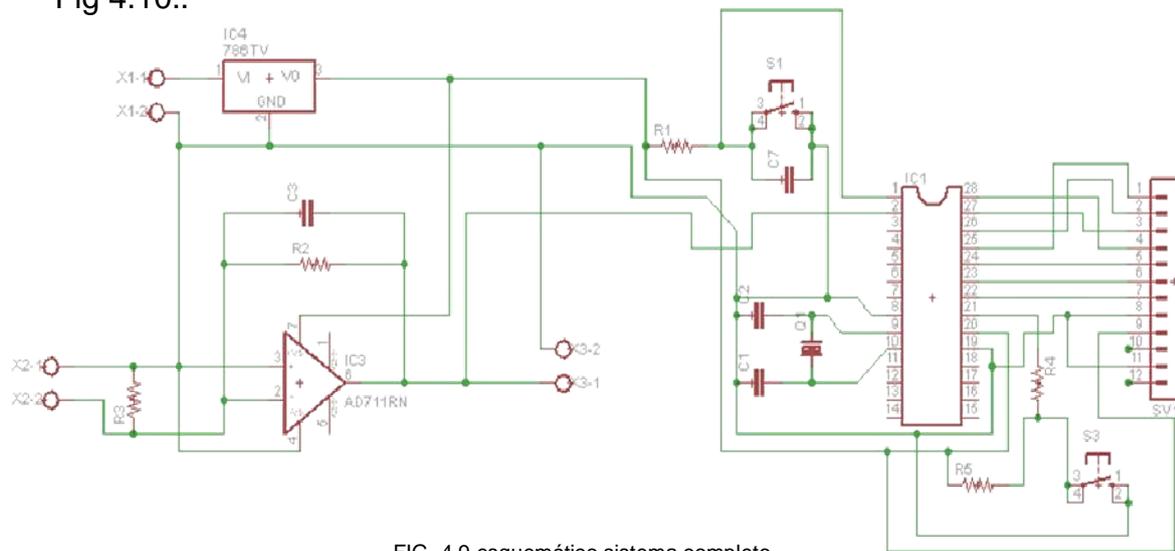


FIG. 4.9 esquemático sistema completo

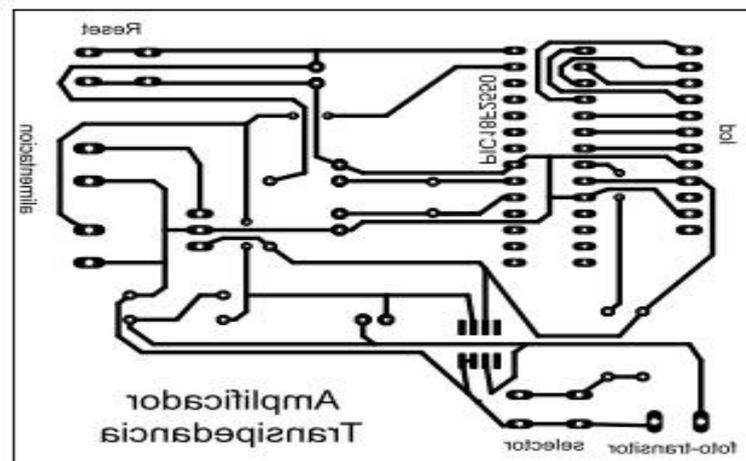


FIG. 4.10 rutado final

## Simulación de la salida de la señal

En la simulación Fig. 4.11 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.

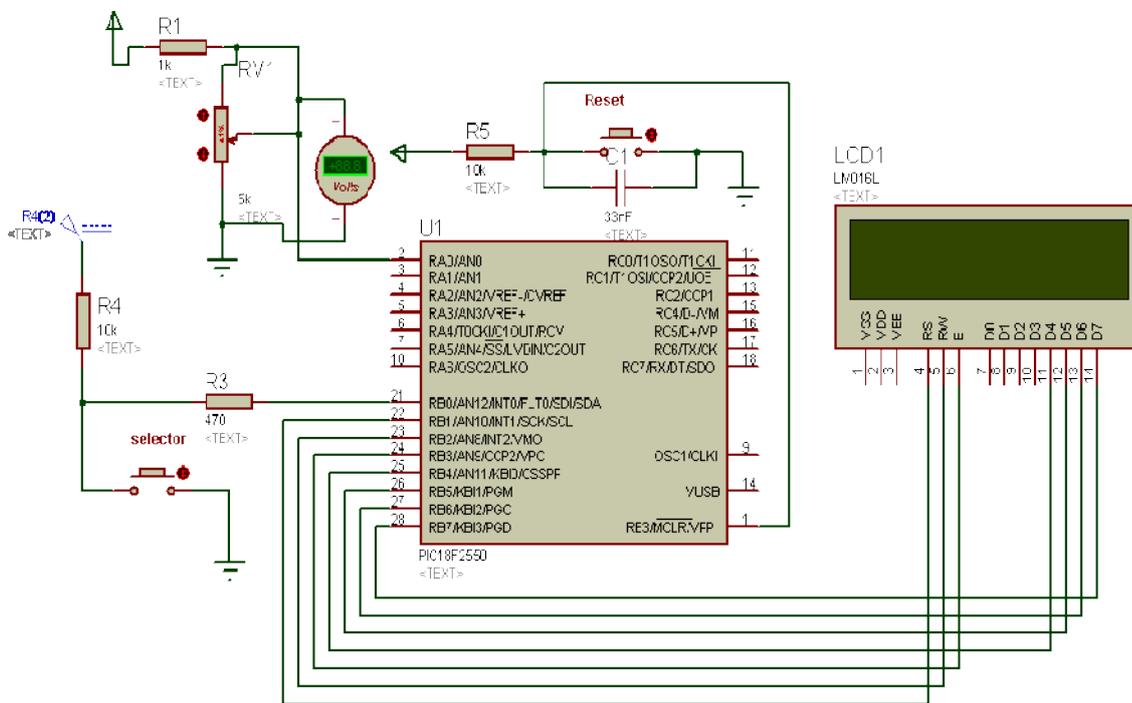
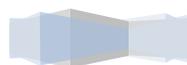
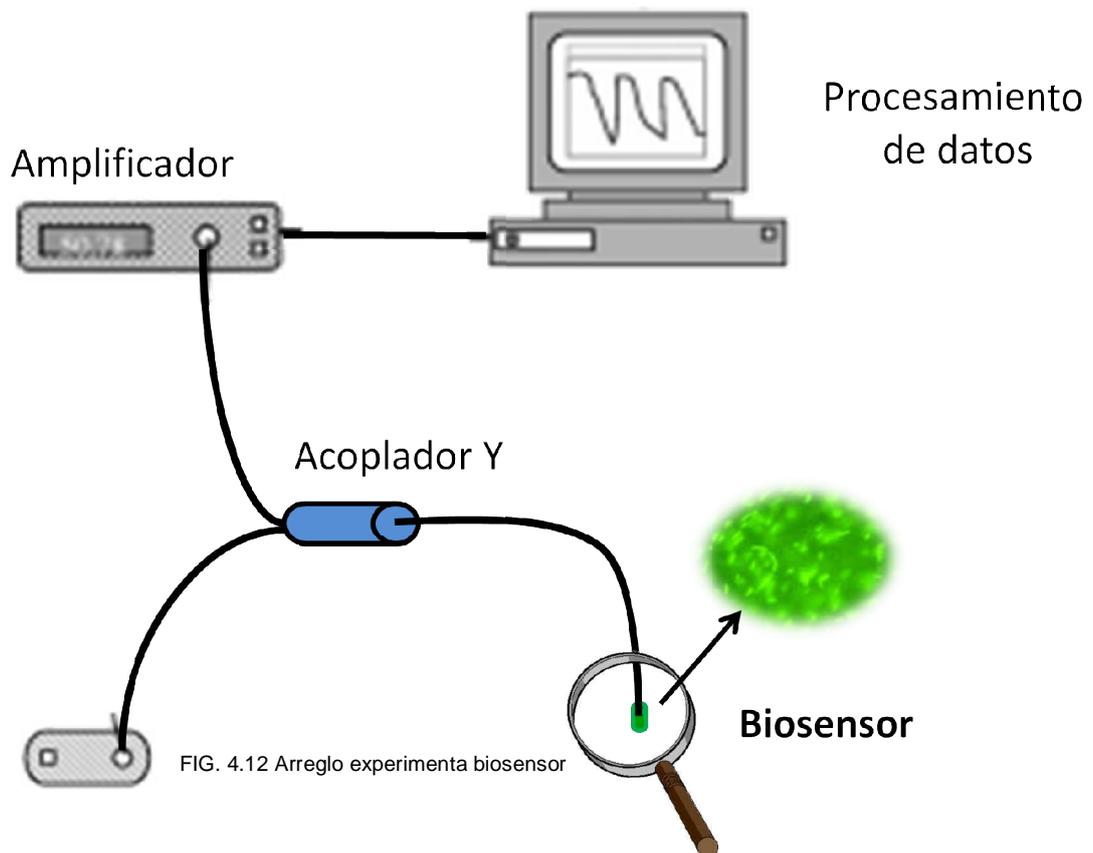


FIG. 4.11 simulación proteus



## Arreglo experimental

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.



## Resultados

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

Tabla 4.13 Resultados

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 aplico 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. 4.14 señal 1khert entrada y salida

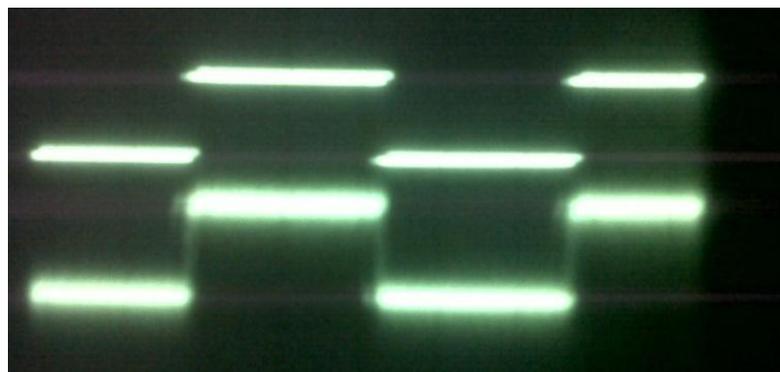
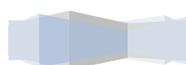


FIG. 4.15 honda cuadrada entrada y salida



## Instrumentación

Los aparatos utilizados Fig 4.16 para realizar mediciones fueron y comprobar el funcionamiento del amplificador de transimpedancia fueron.

\*osciloscopio

\*generador de señales

\*fuente

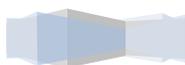


FIG. 4.16 instrumentos utilizados

## Cronograma propuesto y real

ACTIVIDAD		SEMANAS														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Investigación de amplificadores de transimpedancia	P	■	■	■												
	R	■	■	■	■	■										
Realizar el amplificador de transimpedancia	P			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	R			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Producción de la bacteria para el Biosensor	P	■	■	■	■	■										
	R	■	■	■	■	■										
Modificación Genética de la bacteria	P								■	■	■	■	■	■		
	R								■	■	■	■	■	■	■	
Caracterización de el sensor	P													■	■	■
	R													■	■	■
Pruebas con el amplificador y el sensor	P														■	■
	R														■	■
Documentación	P	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	R	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabla 4.17 cronograma



## ABREVIATURAS y SIGNIFICADOS.

OPA=amplificador operacional-

AS=arsénico.

Vout= voltaje de salida.

Vin=voltaje de entrada.

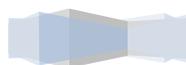
Rref=resistencia de referencia.

nm= nanómetros

Low noise=bajo ruido.

GBW=ancho de banda.

VGM= bacteria modificada geneticamente.



## 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.

