

# Laboratorio de Electrotecnia

## Experiencia 3: Amplificadores Operacionales

Braulio Cancino (bjcancin@uc.cl) - Guillermo Montecinos (gamontec@uc.cl)

### Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>2</b>
2.1. Amplificadores de Voltaje . . . . .	2
2.2. El Opamp Ideal . . . . .	4
2.3. El Opamp Real . . . . .	6
2.4. Configuraciones Típicas de Opamps . . . . .	7
2.5. Potenciómetros . . . . .	9
<b>3. Consideraciones Prácticas</b>	<b>9</b>
3.1. Código de Resistores . . . . .	9
3.2. Amplificador Operacional LM358 . . . . .	10
3.3. Potenciómetros . . . . .	11
<b>4. Cuestionario</b>	<b>11</b>
<b>5. Experiencia Práctica</b>	<b>12</b>
5.1. Materiales . . . . .	12
5.2. Procedimiento . . . . .	13

## 1. Introducción

La mayor parte del control y medida de los procesos industriales se realiza mediante circuitos electrónicos, en donde el amplificador operacional (Opamp) juega un rol fundamental. A pesar de que actualmente el procesamiento de la información y la toma de decisiones de sistemas se realiza con circuitos digitales o sistemas basados en microprocesadores, siempre se requiere convertir variables físicas (temperatura, presión, velocidad) en variables eléctricas, ya sea transformándolas a señales de voltaje o de corriente, o viceversa, transformar señales digitales en señales con significado físico, cómo por ejemplo el movimiento de un motor eléctrico.

Esta experiencia tiene por objetivo el estudio del amplificador operacional, el cual es uno de los circuitos más utilizados en la electrónica. Analizaremos tanto su marco teórico como su comportamiento real, y construiremos circuitos de prueba para comprender de mejor manera el funcionamiento de este dispositivo electrónico.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Amplificadores de Voltaje

Un amplificador de voltaje, tal y como su nombre lo indica, es un dispositivo que toma un voltaje de entrada  $v_i$  y su salida corresponde a un voltaje  $v_o$  que corresponde a un múltiplo del voltaje de entrada  $v_i$ . Se define la ganancia de un amplificador de voltaje  $A_v$  como:

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} \quad (1)$$

El esquema de un amplificador de voltaje genérico se presenta en la siguiente figura:

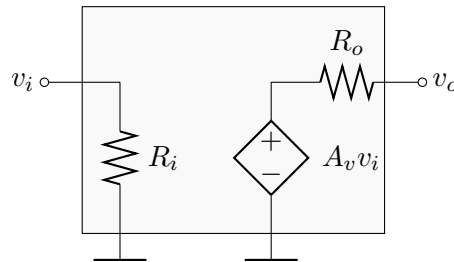


Figura 1: Amplificador de Voltaje Genérico.

En la figura anterior, podemos apreciar dos nuevos elementos: la resistencia de entrada  $R_i$  y la resistencia de salida  $R_o$  del amplificador. El rombo que aparece corresponde a una fuente de voltaje dependiente, en donde la diferencia de voltaje entre sus terminales corresponde a la ganancia del amplificador  $A_v$  multiplicada por el voltaje de entrada  $v_i$ . Ahora analicemos el efecto de la resistencia de entrada y salida sobre el desempeño de un circuito.

**Resistencia de Entrada** Todas las fuentes de voltaje reales pueden ser modeladas como una fuente de voltaje ideal, más una resistencia de salida  $R_s$  que idealmente es nula. Supongamos el siguiente esquema de conexión de nuestro amplificador de voltaje:

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} \quad (2)$$

El esquema de un amplificador de voltaje genérico se presenta en la siguiente figura:

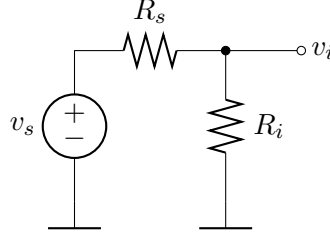


Figura 2: Resistencia de Entrada.

Dadas las resistencia de salida de la fuente  $R_s$  y la resistencia de entrada del amplificador  $R_i$ , es posible obtener el voltaje de entrada  $v_i$  en función del voltaje de la fuente  $v_s$ . Esta relación es:

$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s \quad (3)$$

la cual corresponde a la relación de un divisor de voltaje. Idealmente, el amplificador de voltaje debe ser equivalente al voltaje entregado por la fuente  $v_s$ , pero notamos de (3) que esto sólo se cumple sólo cuando  $R_s/R_i \rightarrow 0$ , lo que equivale a decir que la resistencia de entrada del amplificador de voltaje  $R_i$  es muy grande en comparación a la resistencia de salida de la fuente  $R_s$ . En el caso de que la resistencia de entrada de un amplificador de voltaje  $R_i$  sea pequeña en comparación con la resistencia de salida de la fuente de voltaje  $R_s$ , entonces de (3) podemos notar que el voltaje a la entrada del amplificador se hace nulo y difiere demasiado del voltaje de la fuente  $v_s$ .

De lo anterior, concluimos que un buen amplificador de voltaje posee una alta resistencia de entrada  $R_i$ .

**Resistencia de Salida** La salida del amplificador de voltaje comúnmente va conectada a una carga resistiva  $R_L$ . Esto se muestra en la siguiente figura:

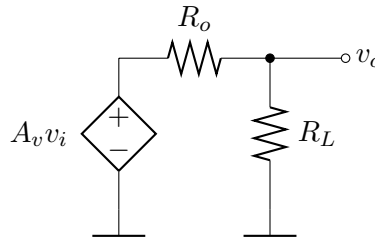


Figura 3: Resistencia de Salida.

El voltaje a la salida del amplificador  $v_o$  o en la carga está dado por:

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} A_v v_i \quad (4)$$

Idealmente deseamos que el voltaje de salida  $v_o = A_v v_i$ , y esto se cumple en el caso de que la resistencia de salida del amplificador de voltaje  $R_o$  sea muy pequeña en comparación a la resistencia de la carga  $R_L$ . De otro modo, si la resistencia de salida del amplificador de voltaje fuese muy grande, el voltaje a la salida  $v_o$  se atenuaría.

En conclusión, un buen amplificador de voltaje posee una resistencia de salida pequeña.

## 2.2. El Opamp Ideal

Un amplificador operacional es básicamente un amplificador de voltaje. Posee dos terminales de entrada y uno de salida. La figura 4 muestra el símbolo que se utiliza para representar un Opamp.

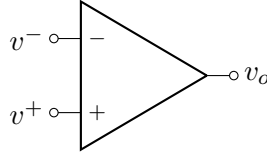


Figura 4: Símbolo de un Opamp.

En la figura anterior, los terminales  $v^+$  (entrada no inversora) y  $v^-$  (entrada inversora) corresponden a los terminales de entrada, mientras que el terminal  $v_o$  representa al terminal de salida. Podemos percatarnos que el símbolo de un amplificador operacional corresponde a un triángulo, en donde una de sus puntas corresponde a su salida, y las entradas se encuentran en la arista contraria al vértice de salida.

Ahora analizaremos las propiedades de un Opamp ideal y responderemos el significado de los nombres de los terminales de entrada.

Un Opamp es un amplificador de voltaje. Como todo amplificador de voltaje, definimos por  $A_v$  a la ganancia de nuestro amplificador. En un Opamp ideal se cumple que para cualquier componente conectado a la salida

$$v_o = A_v (v^+ - v^-) \quad (5)$$

en donde la ganancia  $A_v$  se considera extremadamente grande ( $A_v \rightarrow \infty$ ). Esta expresión nos dice que el voltaje de salida en un Opamp ideal depende de la diferencia de voltajes entre sus terminales de entrada, y de su ganancia de voltaje  $A_v$ , la cual se supone idealmente como infinita.

La entrada  $v^+$  se denomina entrada no inversora debido a que en (5) si uno aumenta el voltaje en la entrada  $v^+$ , aumenta el voltaje en la salida  $v_o$ . En cambio, la entrada  $v^-$  se denomina entrada inversora debido a que al aumentar su voltaje disminuye el voltaje en la salida  $v_o$ .

Otro aspecto importante de un amplificador operacional es su resistencia de entrada. La resistencia de entrada de un amplificador operacional ideal se considera como infinita. Esto en otras palabras implica que al conectar un Opamp ideal a un circuito, la corriente que entra desde el circuito hacia los terminales  $v^+$  o  $v^-$  es nula.

Una forma de comprender el significado de las resistencias de entrada y/o de salida es analizando la siguiente figura:

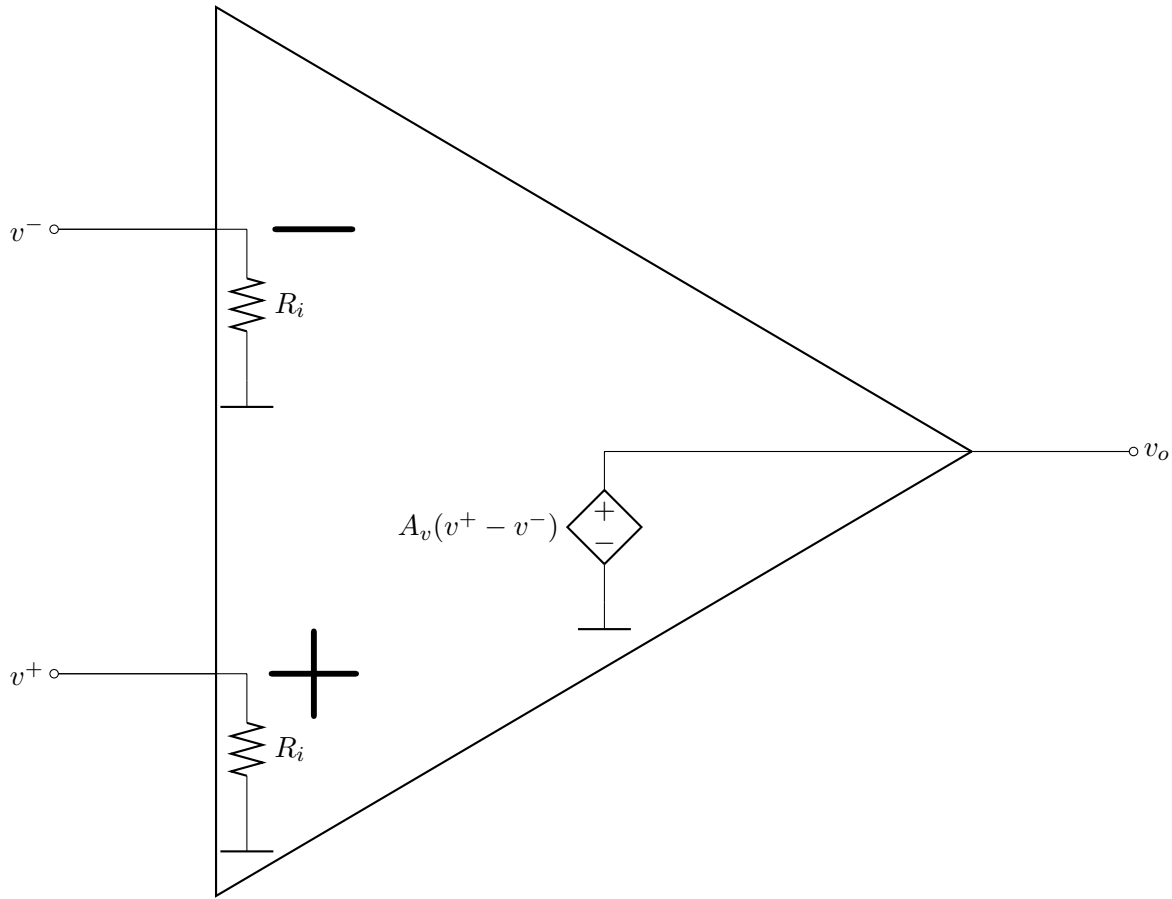


Figura 5: Impedancia de Entrada de un Opamp.

En la figura anterior podemos ver que los terminales de entrada  $v^+$  y  $v^-$  internamente van a un resistor  $R_i$  conectado a tierra. El hecho de que el Opamp ideal tenga una resistencia de entrada muy grande (que tienda a infinito) implica que  $R_i \rightarrow \infty$ , por lo que cualquier circuito que conectemos a la entrada verá una impedancia extremadamente grande y la corriente que fluirá por la resistencia  $R_i$  será nula para ambas entradas. Además, tal y como vimos en la subsección anterior, un Opamp ideal es un buen amplificador de voltaje debido a que posee una resistencia de entrada que tiende a infinito.

También, en un Opamp ideal la resistencia de salida es nula.

A modo de resumen, las características de un Opamp ideal se pueden resumir como:

1. El voltaje de salida está dado por:

$$v_o = A_v (v^+ - v^-)$$

2. Su ganancia de voltaje  $A_v \rightarrow \infty$ . Esto se debe a que la resistencia de salida del Opamp ideal es nula.
3. La impedancia de entrada de sus terminales de entrada  $v^+$  y  $v^-$  tiende a infinito, por lo que a su entrada es un amplificador de voltaje ideal. Esta característica implica que la corriente que entra por los terminales de entrada de un Opamp ideal es nula.

### 2.3. El Opamp Real

Como siempre, en la electrónica nada es ideal. Un esquema de un Opamp real se muestra en la siguiente figura:

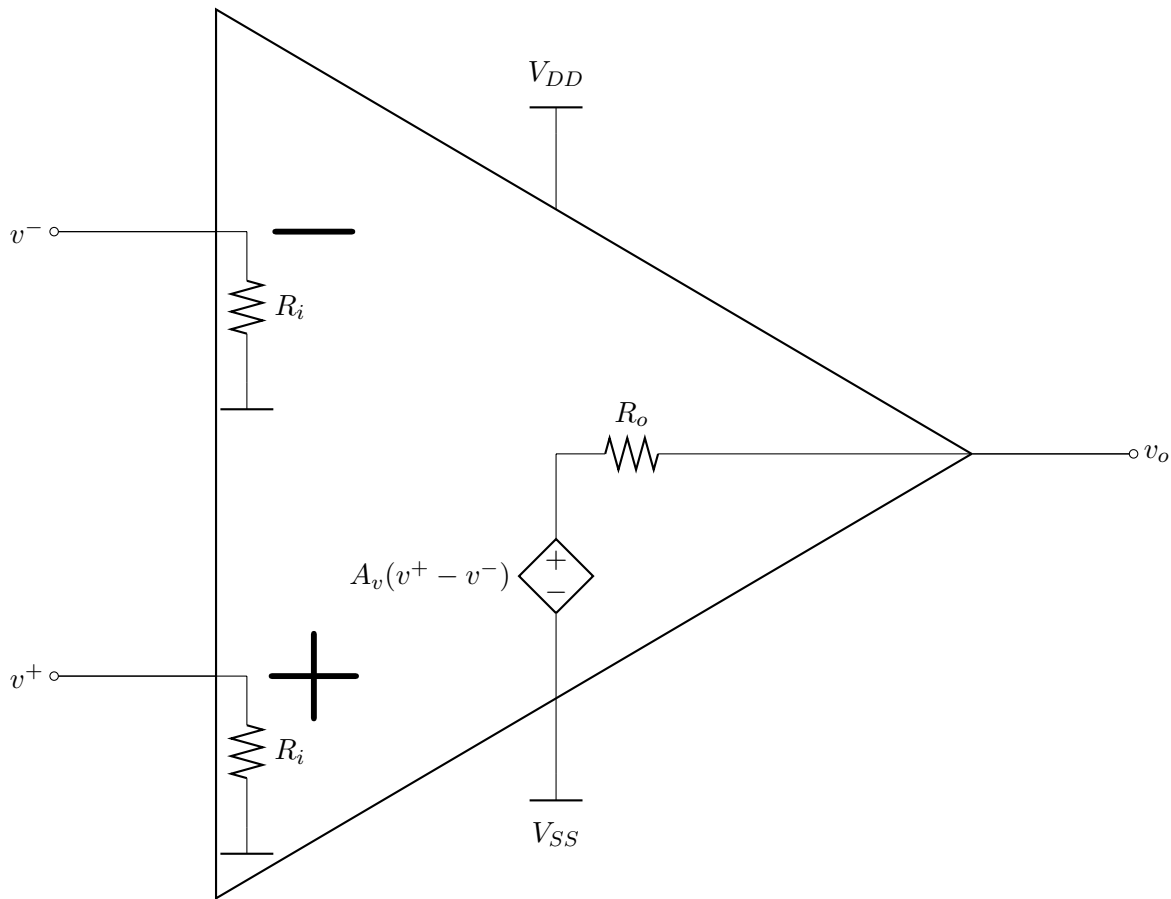


Figura 6: Esquema de un Opamp Real.

En la figura anterior podemos reconocer la ganancia de voltaje  $A_v$ , la impedancia de entrada  $R_i$ , pero ahora tenemos otro componente, el cual corresponde a la resistencia de salida  $R_o$  del Opamp Real. Además, tenemos dos terminales más ( $V_{DD}$  y  $V_{SS}$ ) que corresponden a los terminales de alimentación del Opamp real. De ahora en adelante cuando hablemos de Opamp (sin decir que es ideal) nos referiremos al Opamp Real.

Ahora analizaremos las no idealidades del Opamp (real):

- **Resistencia de Entrada Finita:** Como vimos con anterioridad, el Opamp ideal poseía impedancia de entrada  $R_i$  infinita. En el caso de los Opamps reales, la impedancia de entrada a pesar de seguir siendo muy grande es finita. Esto implica que por los terminales de entrada si fluye corriente, y hay una atenuación de voltaje tal y como se analizó en la subsección de amplificadores de voltaje.
- **Resistencia de Salida No Nula:** El hecho de que un Opamp posea una resistencia de salida no nula implica que al conectar una carga, el voltaje de la carga no será exactamente el voltaje amplificado, si no que más bien, dependerá de la relación entre la resistencia de salida del Opamp y la resistencia de la carga.

- **Saturación:** Un Opamp ideal puede alcanzar en su salida cualquier valor de voltaje. Por ejemplo, si  $v^+ - v^- > 0$ , entonces la salida tenderá a infinito, debido a que su ganancia  $A_v$  es infinita. En el caso de los Opamps reales, el voltaje de salida no puede ir más allá de los voltajes de alimentación ( $V_{DD}$  y  $V_{SS}$ ). Por ejemplo, si  $V_{DD} = 5\text{ V}$  y  $V_{SS} = -5\text{ V}$ , entonces si la salida teórica fuese  $v_o = 10\text{ V}$ , la salida real será a lo más  $v_o = 5\text{ V}$ . Lo mismo pasa con voltajes que sean menores que el voltaje de alimentación negativo.

## 2.4. Configuraciones Típicas de Opamps

Es posible aprovechar la gran ganancia de un Opamp para construir otros circuitos que posean una ganancia determinada por el usuario. Para ello conectaremos los Opamps en una configuración que posea realimentación negativa. Este concepto, que escapa a los contenidos de este laboratorio, nos permite transar una alto  $A_v$  por precisión en la ganancia de salida. Ahora analizaremos dos configuraciones básicas del Opamp considerando Opamps ideales (nos olvidaremos de los Opamps reales de aquí en adelante).

**Configuración Inversora** La configuración inversora se muestra en la siguiente figura:

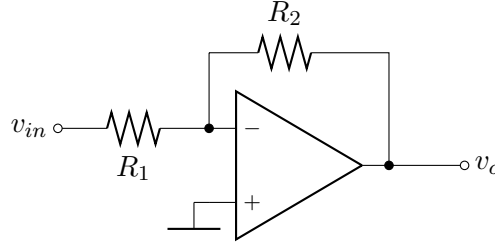


Figura 7: Configuración Inversora.

De la figura, si la ganancia de voltaje del Opamp ideal está dada por  $A_v$ , entonces, el voltaje a la salida será:

$$v_o = A_v (v^+ - v^-) = -A_v v^- \quad (6)$$

debido a que  $v^+ = 0\text{ V}$ . Ahora veamos la corriente que pasa por el resitor  $R_1$ . Esta corriente está dada por:

$$I_1 = \frac{v_{in} - v^-}{R_1} \quad (7)$$

mientras que la corriente por  $R_2$  es:

$$I_2 = \frac{v^- - v_o}{R_2} \quad (8)$$

Debido a que un Opamp ideal posee impedancia de entrada infinita, entonces la corriente  $I_3$  que entra por el terminal - del Opamp cumple con  $I_3 = 0$ . Entonces:

$$I_2 = I_1 + I_3 = I_1 \Leftrightarrow \frac{v_{in} - v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_o}{R_2} \quad (9)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, obtenemos que:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A_v}} v_{in} \quad (10)$$

$$v^- = \frac{R_2}{(A_v + 1)R_1 + R_2} v_{in} \quad (11)$$

Dado que se trata de un Opamp ideal, entonces  $A_v \rightarrow \infty$ , con lo que finalmente:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}v_{in} \quad (12)$$

$$v^- = 0 \quad (13)$$

**Configuración No Inversora** La configuración no inversora se muestra en la siguiente figura:

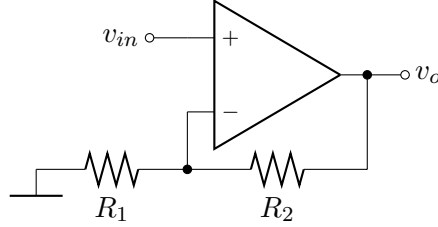


Figura 8: Configuración No Inversora.

De la figura, si la ganancia de voltaje del Opamp ideal está dada por  $A_v$ , entonces, el voltaje a la salida será:

$$v_o = A_v (v^+ - v^-) = A_v (v_{in} - v^-) \quad (14)$$

Dado que el Opamp ideal posee impedancia de entrada infinita, entonces la corriente que pasa por  $R_1$  y  $R_2$  son equivalentes. Esto es:

$$I_1 = -\frac{v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_o}{R_2} = I_2 \quad (15)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, obtenemos que:

$$v_o = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_1 + R_2}{A_v R_1}} v_{in} \quad (16)$$

$$v^- = \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{A_v R_1}} v_{in} \quad (17)$$

Dado que se trata de un Opamp ideal, entonces  $A_v \rightarrow \infty$ , con lo que finalmente:

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{in} \quad (18)$$

$$v^- = v_{in} \quad (19)$$

**Seguidor de Voltaje** La configuración de seguidor de voltaje se muestra en la siguiente figura:

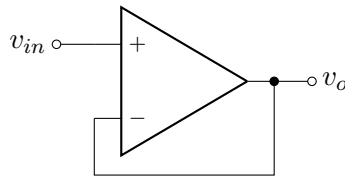


Figura 9: Configuración Seguidor de Voltaje.



El voltaje de salida  $v_o$  estará dado por:

$$v_o = \frac{A_v}{1 + A_v} v_{in} \quad (20)$$

Si el Opamp es ideal, entonces:

$$v_o = v_{in} \quad (21)$$

## 2.5. Potenciómetros

Los potenciómetros corresponden a resistores de tres terminales. La representación de un potenciómetro se muestra en la siguiente figura:

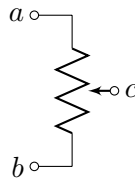


Figura 10: Esquema de un Potenciómetro.

Entre los extremos  $a$  y  $b$  la resistencia total  $R_{ab}$  es fija. La posición del terminal  $c$  es ajustable, con lo que las resistencias entre los terminales  $a$  y  $c$   $R_{ac}$  y la resistencia entre los terminales  $c$  y  $b$   $R_{bc}$  es variable. Para cualquier caso siempre se cumple que:

$$R_{ab} = R_{ac} + R_{bc} \quad (22)$$











es decir, si aumentamos  $R_{ac}$ , entonces disminuye  $R_{bc}$  y viceversa, pero la suma de las resistencias  $R_{ac}$  y  $R_{bc}$  es siempre constante.

## 3. Consideraciones Prácticas

### 3.1. Código de Resistores

Los resistores que utilizaremos en el laboratorio poseen un código de colores que representa el valor de su resistencia medida en ohms. El diagrama de códigos se muestra en la siguiente tabla:

Como se puede ver en la figura anterior, existen cuatro bandas coloreadas en un resistor. Las dos primeras corresponden a las dos primeras cifras del valor de la resistencia, mientras que la tercera nos indica la potencia de 10 por la cual se multiplica la cifra dada por las dos primeras bandas. La cuarta banda representa la tolerancia o error porcentual que posee la resistencia.

Color		Número	Multiplicador	Tolerancia
Negro		0	1	-
Café		1	10	-
Rojo		2	$10^2$	2 %
Naranja		3	$10^3$	-
Amarillo		4	$10^4$	-
Verde		5	$10^5$	-
Azul		6	$10^6$	-
Violeta		7	-	-
Plomo		8	-	-
Blanco		9	-	-
Dorado	-	-	-	5 %
Plateado	-	-	-	10 %

Cuadro 1: Códigos Resistores

Para comprender mejor este sistema, calculemos el valor de la resistencia del siguiente resistor:

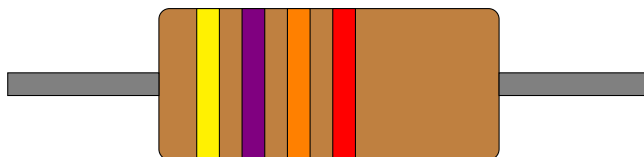


Figura 11: Resistor de Ejemplo.

La primera banda amarilla nos indica un 4, la segunda banda violeta nos indica un 7, la tercera banda naranja nos indica un multiplicador de  $10^3$ , mientras que la cuarta banda nos indica una tolerancia de un 2 %. Finalmente, la resistencia es de  $47 \text{ k}\Omega$  con una tolerancia del 2 %.

### 3.2. Amplificador Operacional LM358

El LM385 es un Opamp de bajo voltaje de alimentación que utilizaremos en esta experiencia. A continuación se muestra la configuración interna de su empaquetado:

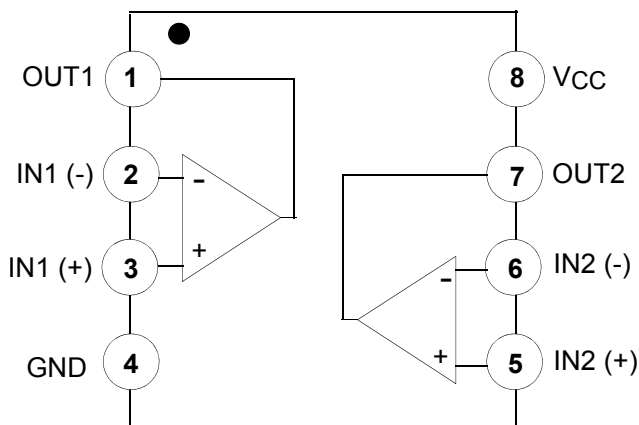


Figura 12: Configuración Interna LM358

### 3.3. Potenciómetros

Los potenciómetros que utilizaremos en el laboratorio se muestran en la siguiente figura:



Figura 13: Potenciómetro Laboratorio

El esquema de conexiones de este potenciómetro es el siguiente:

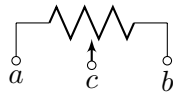


Figura 14: Esquema del Potenciómetro usado en el Laboratorio.

Como vimos anteriormente, el terminal  $c$  es el que se mueve al girar la perilla.

## 4. Cuestionario

1. Construya un circuito divisor de tensión variable utilizando un potenciómetro y explique su funcionamiento.
2. Calcule el voltaje de salida en función de los voltajes de entrada del siguiente amplificador, considerando un Opamp ideal.

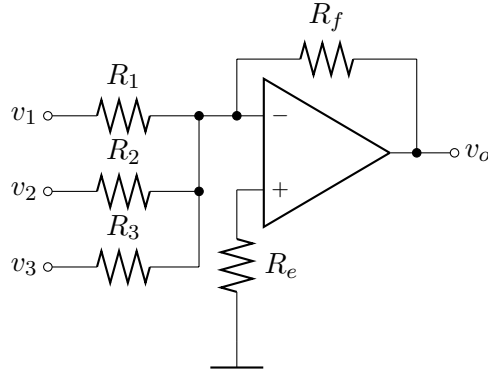


Figura 15: Figura del Problema.

3. Diseñe un amplificador que posea una ganancia de 12 dB y que invierta el voltaje. También investigue acerca de la utilidad de expresar la ganancia de un amplificador en decibeles.
4. Investigue acerca del derivador e integrador implementado con Opamps. Calcule la expresión para el voltaje en función del tiempo y el voltaje de entrada y comente acerca de los problemas que presentan estas configuraciones.
5. Investigue en la literatura qué se entiende por pérdida por inserción en un amplificador.

## 5. Experiencia Práctica

En el desarrollo de esta experiencia se implementará un amplificador no-inversor con ganancia fija, como el que se ve en la figura. Se usará un potenciómetro ( $R_3$ ) para cambiar el voltaje de entrada ( $v_{in}$ , medido entre la pata CENTRAL del potenciómetro y tierra), y las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  para fijar la ganancia.

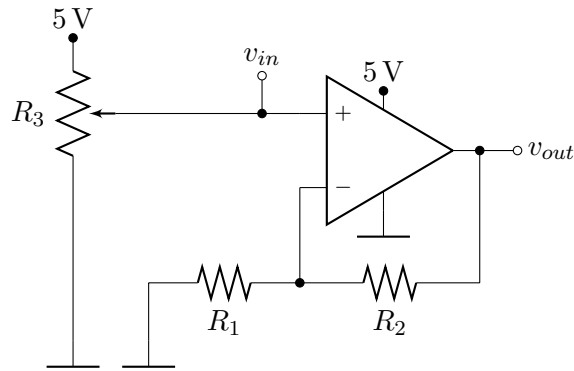


Figura 16: Circuito a Implementar.

### 5.1. Materiales

Para la correcta implementación del amplificador se requerirán los siguientes materiales:

- 1 x Protoboard.
- 3 x Resistencias.

- 1 x Potenciómetro.
- 1 x Fuente de poder.
- 1 x Tester.
- 1 x LM358.
- Cables para protoboard.

## 5.2. Procedimiento

1. Medir y anotar el valor de las resistencias proporcionadas **para determinar la ganancia**, y el valor de las mismas según el código de colores (ver consideraciones prácticas).
2. Conectar el circuito usando las 3 resistencias, el potenciómetro y el Op-Amp proporcionado. Esto debe hacerse de tal forma de obtener la mayor ganancia posible. Si tiene dudas respecto de cuál es la resistencia de protección, consulte con el ayudante.
3. Calcular la ganancia teórica del circuito, usando los valores teóricos obtenidos en el primer punto.
4. Ahora se medirá la ganancia real del circuito. Para esto deberán mover la perilla del potenciómetro, medir los voltajes de entrada ( $V_{in}$ ) y de salida ( $V_{out}$ ) del amplificador y anotarlos en la tabla. Luego para cada medición deberán calcular la ganancia.

$v_{in}$ [V]	$v_{out}$ [V]	Ganancia [V/V]
0.5		
1		
1.5		
2		
2.5		
3		

Figura 17: Tabla para anotar voltajes de entrada, salida y ganancia.

5. Obtener el voltaje necesario en la entrada para que exista saturación. Esto puede lograrse variando el voltaje a la entrada observando el voltaje en la salida. Cuando éste no cambie más quiere decir que el amplificador está saturado (Ver sección 1.3).
6. Comparar los resultados de las ganancias obtenidas mediante el procedimiento teórico y el práctico. ¿Qué diferencias / similitudes se pueden apreciar, y a qué pueden deberse?
7. Realicen una simulación transiente (como la de la experiencia 1) en LTSpice del circuito empleado, usando los valores de resistencias de la experiencia y el Opamp real LT1001. En vez del potenciómetro usar una fuente sinusoidal de 1 V de amplitud, una componente continua DC de 2.5 V (esta se puede fijar en los parámetros de la fuente) y una frecuencia adecuada (esto es, de unos pocos kHz). ¿Qué se puede observar? ¿Existe saturación?.