



Unidad Didáctica  
Operacionales

*FONDO  FORMACION*

---

# Programa de Formación Abierta y Flexible

*Obra colectiva de FONDO FORMACION*

**Coordinación** *Servicio de Producción Didáctica de FONDO FORMACION  
(Dirección de Recursos)*

**Diseño y maquetación** *Servicio de Publicaciones de FONDO FORMACION*

**© FONDO FORMACION - FPE**

*No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otro método, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.*

**Depósito Legal** *AS -1953-2001*

# Unidad Didáctica Operacionales

*Con la aparición en el mercado de los circuitos integrados, el avance tecnológico ha sido enorme, debido a las ventajas que supone de ahorro de espacio, que dispone, en una sola pastilla, de multitud de componentes discretos. Además, los procesos de fabricación en serie de grandes tiradas ha hecho que los circuitos integrados sean asequibles para el gran público, con lo cual se encuentran al alcance de cualquier diseñador particular.*

*El amplificador operacional es el circuito integrado más representativo de los circuitos lineales; cubre prácticamente la totalidad de las funciones analógicas y se puede decir que es un componente básico en electrónica.*

---

En esta unidad veremos los siguientes contenidos:

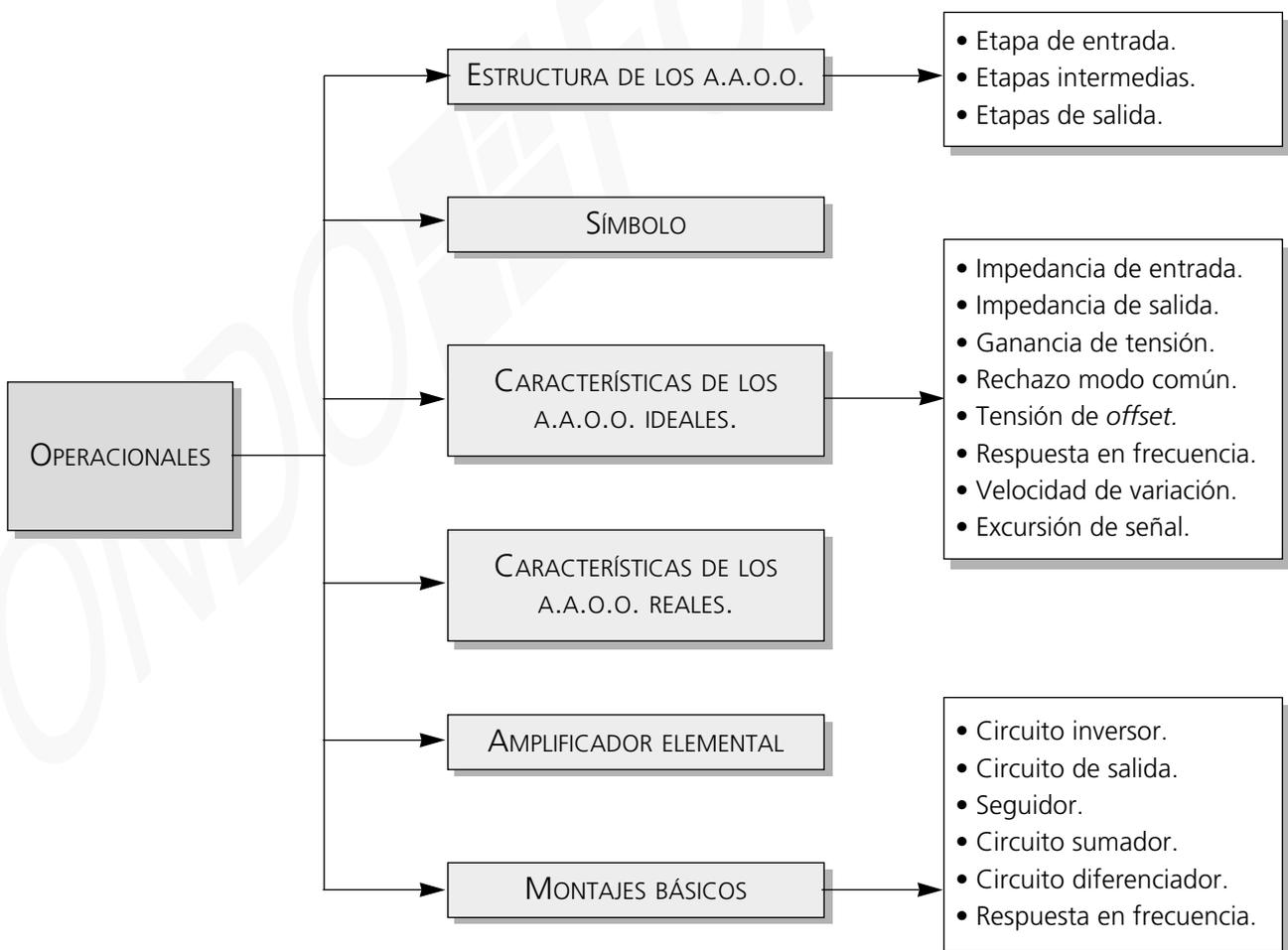
- Estructura de los A.A.O.O.
- Símbolo.
- Características de los A.A.O.O. reales.
- Características de los A.A.O.O. ideales
- Amplificador elemental.
- Montajes básicos con operacionales.

## Tus objetivos

Al final de esta unidad deberás ser capaz de:

- Enumerar las características de los amplificadores operacionales.
- Conocer el principio de la tierra virtual.
- Explicar el término *offset*.
- Identificar el patillaje de un circuito integrado.
- Elegir el modelo de operacional más apropiado para una aplicación.
- Analizar circuitos básicos con operacionales.
- Realizar diferentes montajes con operacionales.

## Esquema de estudio



## Estructura de los amplificadores operacionales

Podemos dividir la estructura de un operacional en tres partes:

### 1. Etapa de entrada

Básicamente se compone de un amplificador diferencial. El **amplificador diferencial** es un circuito que proporciona una tensión de salida que es igual a la diferencia entre las tensiones aplicadas a sus dos entradas. En la figura 1, puedes ver un esquema sencillo de un amplificador diferencial.

Como puedes apreciar, hay dos puntos de entrada y la tensión de salida depende de la diferencia de las tensiones de entrada. Esto es importante porque vale para detectar pequeñas variaciones de grandes tensiones o para amplificar una señal rechazando el ruido de entrada.

La estructura del amplificador diferencial es siempre similar pero hay distintos tipos que darán al operacional unas características diferentes.

La etapa de entrada es la etapa amplificadora más importante, y sus cualidades se fundamentan en el buen apareamiento de los transistores.

Puede haber varios amplificadores diferenciales formando la etapa de entrada y los acoplos entre etapas son directos, por lo que pueden amplificar tensiones continuas.

### 2. Etapas intermedias

Proporcionan una ganancia adicional y sirven como preamplificador para la etapa de salida. Incorporan además circuitos cambiadores de nivel.

### 3. Etapas de salida

Actúan como separador y han de poder manejar señales grandes sin introducir distorsión. Además, deben proporcionar una salida en corriente grande a la carga. Pueden llevar protección contra sobrecargas y la respuesta en frecuencia debe ser buena.

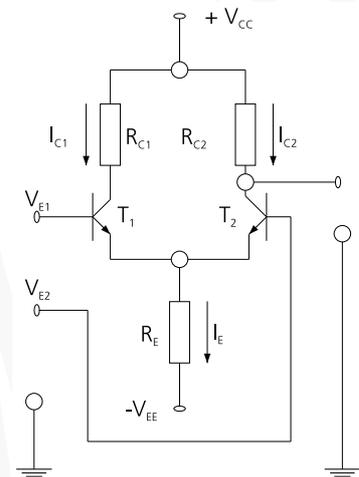


Fig. 1  
Amplificador diferencial.

## Símbolo

En la figura 2, puedes ver el símbolo del amplificador operacional que presenta dos patillas de entrada –una inversora y otra no inversora– y una sola patilla de salida.

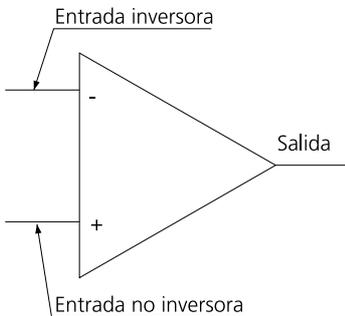


Fig. 2  
Símbolo del operacional.

En la figura 3, puedes ver el aspecto físico de dos circuitos integrados en el encapsulado más común. Uno tiene ocho patillas y otro catorce. La muesca que aparece en la parte superior indica que esa es la patilla 1 y, siguiendo en sentido contrario a las agujas del reloj, están las demás patillas.

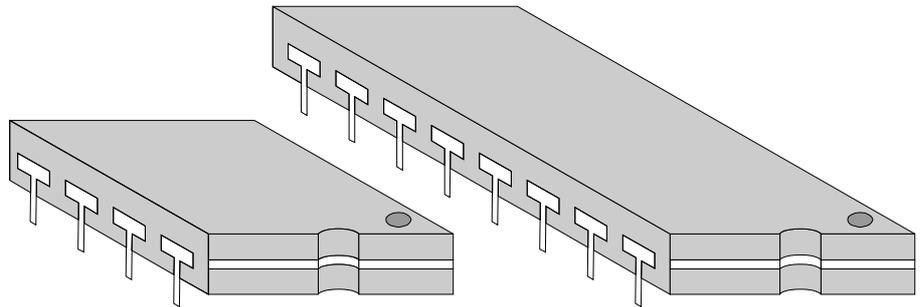


Fig. 3: Encapsulado de circuitos integrados.

En la figura 4 puedes ver diferentes modelos de circuitos integrados, donde puedes apreciar el patillaje y su composición interna con uno, dos y hasta cuatro operacionales dentro de una misma pastilla.

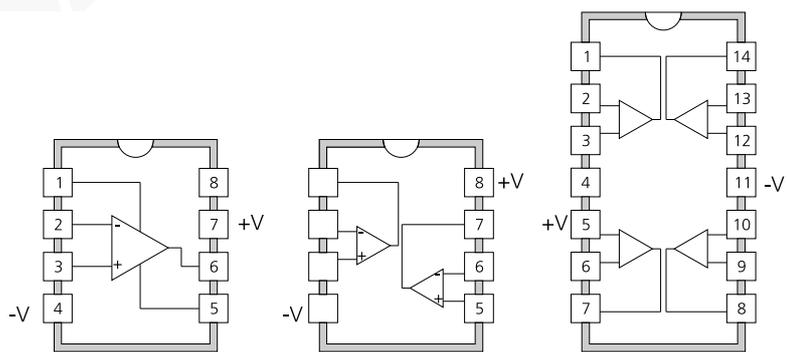


Fig. 4: Diferentes operacionales integrados en una sola pastilla.

## Características de los A.A.O.O. reales

En el mercado hay una gran variedad de amplificadores operacionales por lo que podemos escoger, entre los diferentes modelos, aquél que mejor se adapte para las características particulares de la aplicación que queremos. Esta elección la haremos atendiendo a una serie de características que nos vienen dadas por los fabricantes.

Para poder evaluar la "calidad" de un amplificador operacional es necesario conocer sus características.

### 1. Impedancia de entrada

Es la impedancia del amplificador operacional en bucle abierto vista desde los terminales de entrada; es decir, es la resistencia diferencial de entrada.

### 2. Impedancia de salida

Es la impedancia del amplificador operacional en bucle abierto vista desde el terminal de salida.

### 3. Ganancia de tensión en bucle abierto

Es la relación entre la tensión de salida y la de entrada con el amplificador operacional sin red de realimentación.

### 4. Rechazo del modo común\*

Indica la relación entre la ganancia para una entrada diferencial y la ganancia para la entrada común.

### 5. Tensión de *offset*\* de entrada

Es la tensión que hay que aplicar a una de las entradas del operacional para que cuando éstas estén a un potencial cero la tensión en salida sea cero.

---

Se puede minimizar en algunos amplificadores operacionales mediante unos terminales a los que se les pone unas resistencias para que produzcan un desequilibrio de signo contrario que anule el *offset*.

## 6. Respuesta en frecuencia

El ancho de banda es la banda de frecuencias para las que la ganancia en bucle cerrado es máxima y se mantiene constante. A medida que la frecuencia aumenta, la ganancia disminuye hasta que, a una frecuencia determinada, la ganancia se hace la unidad.

## 7. Velocidad de variación

Es la máxima velocidad de cambio de la tensión de salida cuando se aplica a la entrada una tensión en escalón. También se le denomina *slow-rate*.

Esta característica es muy importante en aplicaciones de conmutación rápida y se expresa en unidades de tensión dividida por tiempo.

## 8. Excursión\* de la señal de salida

También denominado *margen dinámico*, es el nivel máximo de señal de salida que puede proporcionar el operacional sin llegar a saturarse.

## Características del A.A.O.O. ideal

Para utilizar correctamente cualquier circuito integrado es necesario atender a las características proporcionadas por los fabricantes, que suelen ser bastante extensas y con todo tipo de gráficos y curvas.

Los amplificadores operacionales son **amplificadores universales ideales**, es decir, el modelo ideal se aproxima bastante al real para la mayoría de las aplicaciones.

Las características del amplificador operacional ideal son:

- Impedancia de entrada: infinita.  $Z_e = \infty$
- Impedancia de salida: cero.  $Z_s = 0$
- Ganancia de tensión en bucle abierto: infinita.  $A = \infty$
- Rechazo del modo común: infinito.  $CMRR = \infty$
- Excursión de la señal de salida: la alimentación.  $MD = \pm V_{CC}$
- Respuesta en frecuencia: infinita.  $\Delta B = \infty$

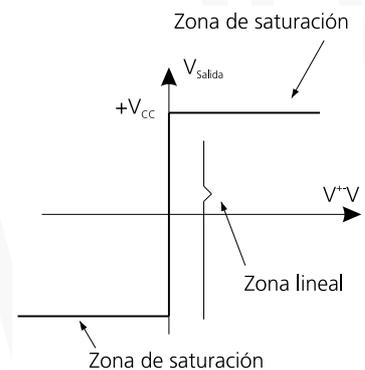


Fig. 5  
Característica de transferencia del operacional ideal.

En la figura 5 puedes ver la característica de transferencia del amplificador operacional.

### ACTIVIDAD 1

Completa el texto con las siguientes palabras:

*encapsulado, operacional, offset, varios, entrada, inversora, elección*

Un ..... presenta una patilla de entrada inversora y otra no ..... En un solo ..... puede haber uno o ..... operacionales. Los operacionales presentan una serie de características que han de tenerse en cuenta a la hora de la ..... del operacional. Una de las características es la tensión de ..... de ..... que se puede minimizar mediante resistencias en algunos operacionales.

## Amplificador elemental

Una vez vistas las características de los amplificadores operacionales, vamos a ver cómo trabajan. Los análisis que realicemos se basarán en el operacional ideal trabajando en la zona lineal con alimentación simétrica.

En la figura 6, puedes ver el montaje de un amplificador elemental con operacional. Observa que la realimentación es negativa, es decir, trabaja en la zona lineal.

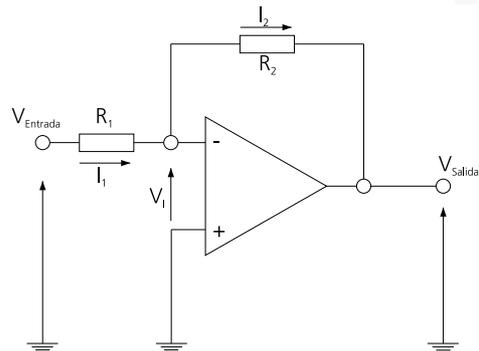


Fig. 6: Amplificador elemental.

La ganancia del circuito sabemos que es:

$$G = \frac{V_S}{V_E}$$

Planteamos las ecuaciones del circuito:

$$I_1 = \frac{V_E - V_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_1 - V_S}{R_2}$$

$$V_S = -A \cdot V_1$$

Donde  $A$  es la ganancia del operacional en bucle abierto.

Si te fijas en las características ideales, la impedancia de entrada es infinita, por tanto:

$$I_1 = I_2$$

Además, por ser la ganancia del operacional infinita y la tensión de salida finita, tenemos que la tensión de entrada del operacional debe ser cero. Esto se conoce con el nombre de **principio de la tierra virtual**. Es como si la patilla inversora estuviera conectada a masa, es decir, un cortocircuito pero por el que no circula corriente.

Por tanto, tenemos:

$$\frac{V_E}{R_1} = \frac{-V_s}{R_2}$$

y la ganancia será:

$$G = \frac{-R_2}{R_1}$$

Para compensar en cierta medida los *offset* de entrada se pone una resistencia entre la patilla no inversora, y masa de valor, el paralelo de  $R_1$  y  $R_2$ .

## Montajes básicos con operacionales

Vamos a ver unos montajes elementales para comprender el funcionamiento del amplificador operacional.

### 1. Amplificador inversor

El circuito es similar al anterior, al que le hemos añadido la resistencia de compensación. Puedes verlo en la figura 7.

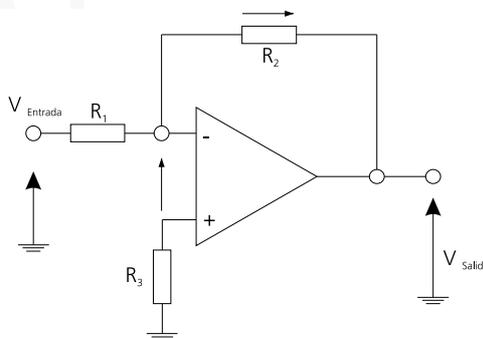


Fig. 7: Amplificador inversor.

La ganancia del circuito, como vimos anteriormente, es:

$$G = \frac{V_S}{V_E} = \frac{-R_2}{R_1}$$

El valor de  $R_3$  sabemos que es:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Se le llama inversor porque la salida sale invertida respecto a la entrada, de ahí el signo menos. Fíjate además que la señal de entrada se hace por la patilla inversora.

## 2. Amplificador no inversor

En la figura 8, puedes ver el circuito. Observa que la señal de entrada ahora se hace por la patilla no inversora.

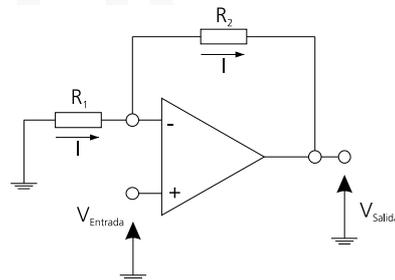


Fig. 8: Amplificador no inversor.

Teniendo en cuenta el principio de la tierra virtual y considerando el operacional ideal hacemos el planteamiento de ecuaciones:

$$V_S = -I \cdot (R_1 + R_2)$$

$$V_E = -I \cdot R_1$$

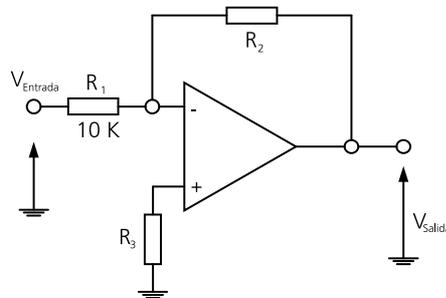
por tanto, tenemos que la ganancia del circuito es:

$$G = \frac{V_S}{V_E} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Fíjate que ahora la salida no sale invertida (no aparece el signo menos).

## ACTIVIDAD 2

En el circuito de la figura, calcular el valor de la resistencia  $R_2$  para que la señal de salida del circuito sea veinte veces mayor que la señal de entrada.



### 3. Seguidor

A este circuito se le denomina así porque la tensión de salida es igual a la de entrada. Puedes ver el circuito en la figura 9. Se suele emplear como adaptador de impedancias.

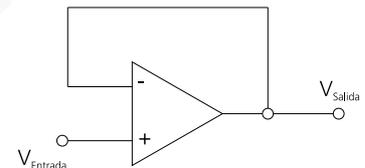


Fig. 9: Circuito seguidor.

### 4. Sumador

El circuito de la figura 10 representa un sumador, ya que la señal de salida va a ser la suma ponderada de las señales de entrada.

Haciendo el planteamiento de las ecuaciones del circuito tenemos:

$$\frac{V_{E_1}}{R_1} + \frac{V_{E_2}}{R_2} + \frac{V_{E_3}}{R_3} = -\frac{V_S}{R_4}$$

Por tanto:

$$V_S = -\frac{R_4}{R_1} \cdot V_{E_1} - \frac{R_4}{R_2} \cdot V_{E_2} - \frac{R_4}{R_3} \cdot V_{E_3}$$

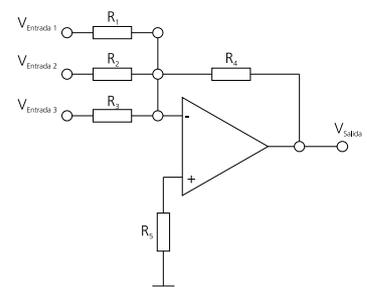


Fig. 10  
Amplificador sumador.

Si ahora ponemos las resistencias de igual valor:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

tedremos que:

$$V_s = -(V_{E_1} + V_{E_2} + V_{E_3})$$

Con lo cual vemos que la salida es la suma de las señales de entrada.

El valor de  $R_5$  será:

$$R_5 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4$$

## 5. Amplificador diferencia o restador

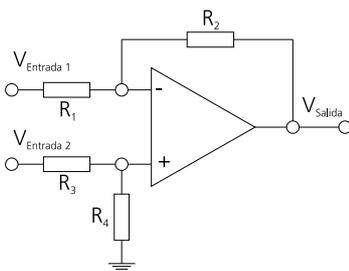


Fig. 11:  
Amplificador diferencia o restador.

En la figura 11 puedes ver el circuito. Observa que la realimentación es negativa.

Se suele hacer que:  $R_1 = R_3$  y  $R_2 = R_4$

Con lo cual tenemos:

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{E_2} - V_{E_1})$$

Vemos que la salida es la diferencia entre las dos señales de entrada multiplicada por la ganancia.

Como has visto a lo largo de la unidad, con los amplificadores operacionales se pueden realizar múltiples funciones de una forma realmente simple. Has de saber que su nombre deriva del hecho de que fueron concebidos para la realización de operaciones matemáticas. Así, con ellos se pueden hacer multiplicaciones, divisiones, logaritmos, derivadas, integrales y un largo etcétera.

---

Si consideras que has concluido el estudio de esta unidad, intenta responder a las siguientes cuestiones de autoevaluación.

## Cuestiones de autoevaluación

**1**

Dibuja un circuito que no realice la suma de dos niveles de entrada sin ampli-ficación.

**2**

Explica el concepto de *tierra virtual*.

**3**

Dibuja un circuito que amplifique tres veces la señal de entrada sin desfase.

### R

#### ACTIVIDAD 1

Un **operacional** presenta una patilla de entrada **inversora** y otra **no inversora**. En un solo **encapsulado** puede haber uno o **varios** operacionales. Los operacionales presentan una serie de características que han de tenerse en cuenta a la hora de la **elección** del operacional. Una de las características es la tensión de **offset** de **entrada** que se puede minimizar mediante resistencias en algunos operacionales.

### R

#### ACTIVIDAD 2

Sabemos que el circuito es un amplificador inversor y la fórmula de la ganancia es:

$$G = \frac{V_S}{V_E} = -\frac{R_2}{R_1},$$

donde el signo *menos* nos dice que hay un desfase entre la entrada y la salida; por tanto, no lo tendremos en cuenta para calcular el valor de la resistencia  $R_2$ .

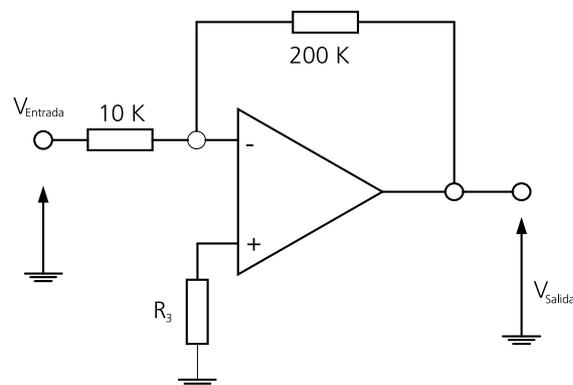
Tenemos:

$$20 = \frac{R_2}{10 \text{ k}\Omega}$$

con lo cual,

$$R_2 = 2.000 \text{ k}\Omega$$

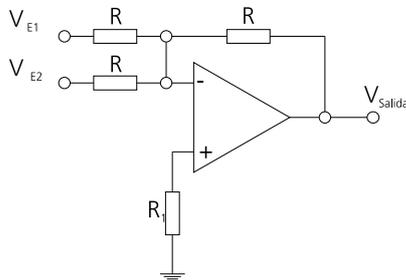
y el circuito será el siguiente:



## Respuestas a las cuestiones de autoevaluación

Un circuito que realiza la suma de dos niveles de entrada sin amplificación tiene los valores de resistencia iguales.

1

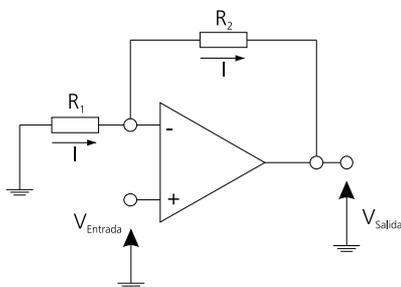


El concepto de **tierra virtual** significa que las patillas inversora y no inversora de entrada de un operacional se encuentran al mismo potencial como si de un cortocircuito se tratara, pero por el que no pasa corriente.

2

El circuito será un amplificador no inversor con los valores de resistencia indicados en la figura.

3



---

# Resumen de Unidad

**Amplificador Operacional** Es el integrado más representativo de los circuitos lineales y cubre un amplio abanico de funciones, tanto es así que podemos decir que es un componente básico en electrónica.

**Estructura** La estructura de un amplificador operacional se compone de tres bloques diferentes:

- **Etapas de entrada**, compuesta básicamente de un amplificador diferencial.
- **Etapas intermedias**, que sirven como preamplificador para la etapa de salida.
- **Etapas de salida**, que actúan como separador y tienen que manejar señales grandes.

**Características** A la hora de seleccionar el integrado adecuado para una aplicación se hace necesario conocer las características más relevantes de los operacionales. Dichas características son:

- Impedancia de entrada.
- Impedancia de salida.
- Ganancia de tensión en bucle abierto.
- Rechazo del modo común.
- Tensiones de *offset*.
- Respuesta en frecuencia.
- Velocidad de variación.
- Excursión de la señal de salida.

**Aplicaciones** Con los operacionales se pueden realizar múltiples circuitos de aplicación, como pueden ser: amplificadores, adaptadores de impedancias, fijadores, convertidores analógico-digitales y digital-analógicos, operaciones matemáticas y lógicas, filtros activos, circuitos de muestreo, etcétera.

## Notas



## Vocabulario

**Rechazo del modo común:** Es la capacidad que tiene un operacional de ignorar las señales comunes a ambas entradas. En manuales de características de operacionales aparece con las siglas CMRR.

**Tensión de offset de entrada:** Aun cuando un operacional tenga sus dos terminales de entrada a masa, aparece una pequeña tensión en la salida denominada *offset* debido a los procesos de fabricación del propio operacional.

**Excursión:** se dice así para indicar el margen de valores de tensión entre los que se puede mover una señal sin variar con ello el funcionamiento del circuito. Si decimos "la excursión de la señal de salida es la alimentación" estamos indicando que la amplitud máxima de la señal de salida es la de alimentación.



*FONDO  FORMACION*