



Universidad  
de Alcalá

## *Práctica 2*

### *Circuitos con Amplificador Operacional*

**Grado en Ingeniería de Computadores**

**Departamento de Electrónica**

# Contenido

1. OBJETIVOS .....	3
2. RESUMEN .....	3
3. CONCEPTOS TEÓRICOS .....	3
3.1.O en zona lineal. Realimentación negativa. ....	4
3.2.AO ideal. Zona no lineal. ....	5
3.2.1.Circuito comparador simple. ....	5
3.2.2.Circuito comparador con histéresis. ....	6
3.3.Respuesta en Frecuencia. Diagrama de Bode.....	8
3.4.Filtros.....	9
3.4.1. Filtro paso bajo .....	9
3.4.2. Filtro paso-alto.....	10
4. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	11
4.1. Diseño y montaje de un NO INVERSOR: .....	11
4.2. Circuito comparador simple .....	13
4.3. Filtro paso alto .....	13
5. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS .....	15
I. APÉNDICE: TÉCNICAS DE MEDIDA .....	16
A.OBJETIVOS .....	16
B.MEDIDAS .....	16
1. Medida de la Ganancia de Tensión ( $G_v$ ) .....	16
2. Medida de la Diferencia de Fase .....	17
3. Medida de Impedancia de entrada ( $R_e$ ) .....	17
4. Medida de Impedancia de salida ( $Z_s$ ) .....	18
5. Medida de la frecuencia de corte .....	19

## 1. OBJETIVOS

El objetivo fundamental de los ejercicios contenidos en la presente práctica es proporcionar al alumno la comprensión del funcionamiento de diferentes circuitos que incluyen la utilización de un amplificador operacional (AO), que pueden estar configurados con realimentación positiva, negativa o sin realimentación.

Este estudio, requerirá del cumplimiento de ciertos objetivos parciales que se integran en las capacidades a adquirir por parte del alumno, y que pueden enumerarse en:

- Revisión de las técnicas de análisis de AOs ideales.
- Determinar la influencia de las propiedades no ideales de los AO en el funcionamiento de circuitos que los incluyen.

Para realizar este trabajo, el alumno debe de:

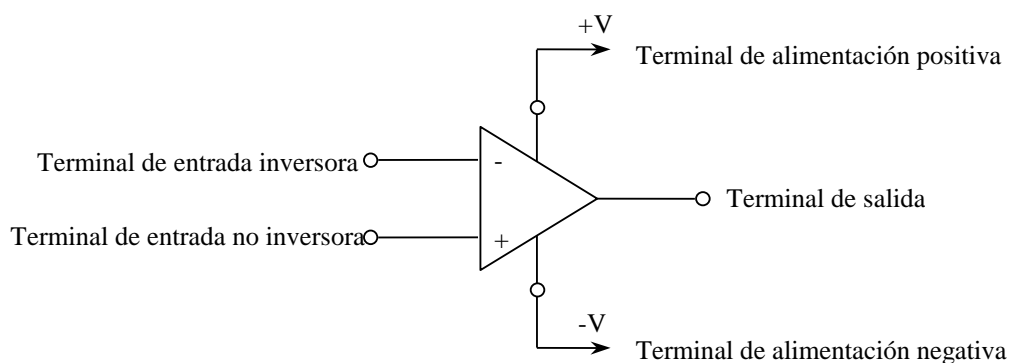
- Ser capaz de buscar información técnica proporcionada por los fabricantes, y comprender dicha información para utilizar en el montaje de la práctica.

## 2. RESUMEN

Como ya se ha dicho, el trabajo a realizar supone el diseño y montaje de diferentes circuitos que incluyen un amplificador operacional entre sus componentes. Estos circuitos pueden ser parte de desarrollos más complejos en los que es necesaria tanto la amplificación, la comparación o el seguimiento de señales eléctricas variables en el tiempo. En cada caso, las especificaciones de la aplicación concreta, incluyendo el nivel de la señal a tratar, conducirá a la selección de componentes pasivos.

## 3. CONCEPTOS TEÓRICOS

Un amplificador operacional se puede considerar como un dispositivo único con un conjunto simplificado de características terminales: un puerto de entrada (entrada no-inversora,  $v_+$ , y entrada inversora,  $v_-$ ), un puerto de salida ( $v_s$ ) y conexiones de alimentación (+V y -V) necesarias para situar a los componentes internos en el punto de trabajo. La Figura 1 representa el símbolo de un AO de propósito general donde puede verse la ubicación de cada uno de los terminales.



**Figura 1.** Símbolo de circuito para un operacional de propósito general.

Dependiendo de cómo sea el circuito externo que afecta a los contactos internos, el amplificador operacional puede estar realimentado o no.

Una posible clasificación divide las **aplicaciones de AOs en lineales y no lineales**. Se consideran lineales aquellas aplicaciones en que el AO trabaja en régimen de no saturación, con realimentación negativa: amplificadores lineales, filtros activos, operadores aritméticos o diferenciales. Mientras que las aplicaciones no lineales son aquellas en que el AO trabaja en régimen de saturación (realimentación positiva o nula): comparadores con histéresis, rectificadores, limitadores y osciladores (generadores de funciones).

### 3.1. AO en zona lineal. Realimentación negativa.

Un modelo ideal de AO supone las siguientes propiedades:

1. Sobre un rango limitado de valores, la tensión de salida  $v_s$  viene dada por:

$$v_s = A_o (v_+ - v_-), \quad (3.1)$$

donde  $A_o$  se conoce como **ganancia interna de tensión o ganancia de tensión en lazo abierto** del AO (sin ningún otro elemento conectado) y es muy grande (típicamente  $\sim 10^4$ – $10^6$  e idealmente infinita). Esto significa que bastarán pequeñas diferencias (de unos  $\mu\text{V}$ ) entre las entradas ( $v_+$  y  $v_-$ ) para llevar la salida a **saturación**.

Saturación significa que, por su construcción interna, la tensión de salida del operacional no puede rebasar los valores de las tensiones de alimentación (por tanto  $-V < v_s < +V$ ), de forma que si el análisis teórico predice una  $v_s > +V$  o  $v_s < -V$ , la salida se fijará en  $+V$  (saturación positiva) o en  $-V$  (saturación negativa), según corresponda. Por ello, el AO no suele utilizarse directamente como amplificador diferencial en lazo abierto.

2. La impedancia de entrada es infinita, lo cual implica que las corrientes en sus terminales de entrada son nulas.
3. La impedancia de salida es nula, lo cual implica que la salida del AO es un generador de tensión ideal de valor:  $A_o (v_+ - v_-)$ .
4. La frecuencia de funcionamiento está limitada entre otras cosas, por el efecto llamado *Slew-Rate*. Este parámetro se define como la máxima velocidad de variación que admite la señal de salida:

$$SR = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

el fabricante nos indica en las hojas características del AO el valor del SR para el componente en concreto. Esto tiene una influencia decisiva en la frecuencia máxima de trabajo de un determinado diseño, para obtener la salida sin distorsión. Así, si se trabaja con señales senoidales:

$$v_s = A \sin \omega t \rightarrow \frac{dv_s(t)}{dt} = A \omega \cos \omega t \rightarrow \left[ \frac{dv_s(t)}{dt} \right]_{\max} = SR = A \omega_{\max} = A 2\pi f_{\max} \rightarrow$$

$$f_{max} = \frac{SR}{2\pi A}$$

Para hacer más controlable el comportamiento del operacional se trabaja con REALIMENTACIÓN. La realimentación NEGATIVA (conexión de un componente pasivo entre la salida y la entrada inversora) tiene dos consecuencias fundamentales:

i) Principio de “cortocircuito virtual”,  $v_+ = v_-$ .

(Este principio deja de cumplirse si, por las circunstancias del circuito, el operacional pasa a estar en saturación.)

ii) La ganancia real del circuito amplificador (ganancia en lazo cerrado) está determinada por los componentes externos del circuito. Esta consecuencia es de la máxima utilidad, ya que, por el precio de obtener una ganancia menor, se consigue una mucho más estable y menos dependiente de las condiciones externas de temperatura o frecuencia.

### 3.2. AO ideal. Zona no lineal.

Hasta ahora los circuitos con operacionales vistos tienen una configuración de realimentación negativa. Nos ocupamos ahora de circuitos con operacionales sin realimentación o con realimentación positiva. Este tipo de circuitos sólo puede trabajar en las zonas de saturación del AO. Con estas configuraciones, tenemos únicamente dos valores de tensión en la salida del amplificador operacional, H o L.

La realimentación **positiva** se obtiene conectando la salida a la entrada no-inversora. En esta situación no son válidas las dos consecuencias mencionadas para la realimentación negativa. En este caso toda perturbación externa que produzca un aumento de la tensión de salida (ruido, cambios de temperatura, etc), tiende de forma natural a agrandarse, llevando inexorablemente al operacional a estado de saturación.

En algunos circuitos se puede utilizar la saturación a  $-V$  o  $+V$  del operacional para la carga y descarga de un condensador, de forma que esto obligue al operacional a saltar sucesivamente de un estado de saturación a otro, consiguiéndose osciladores de onda cuadrada (relajación). La realimentación positiva se considera, pues, la base de la **oscilación**.

#### 3.2.1. Circuito comparador simple.

El comparador simple es un circuito que trabaja sin realimentación y que una posible configuración se representa en la figura 2

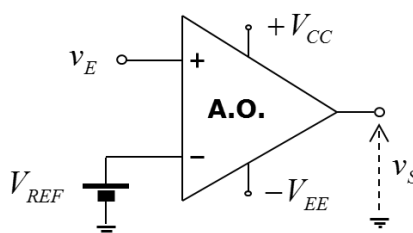
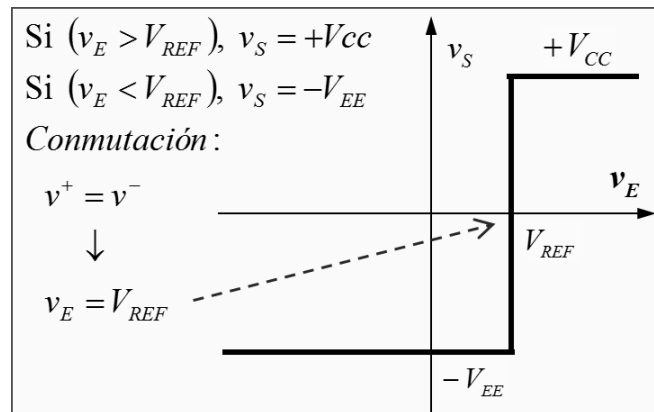


Figura 2. Circuito comparador simple

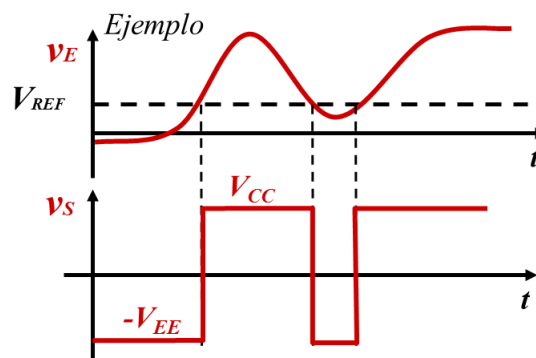
Su función de transferencia es:



**Figura 3.** Función de transferencia de un comparador sin histéresis

Se puede observar, que lo que hace este circuito es comparar las dos señales de sus entradas. Dependiendo de la entrada que tenga referencia, la señal de salida tomará los valores de la alimentación como indica su función de transferencia.

Por ejemplo, si en la entrada no inversora del esquema de la fig.2 se introduce una señal  $v_E$ , la salida será  $v_S$  como indica la fig. 4.



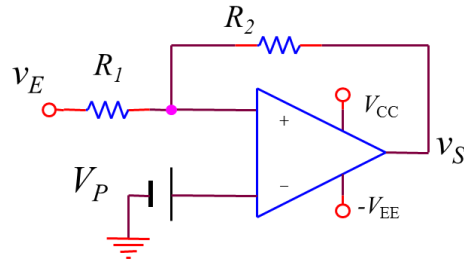
**Figura 4.** Señales de entrada y salida de un comparador simple con Vref

Este caso correspondería a un comparador no inversor. Se tendría el mismo caso si el comparador fuera inversor, con introducir la señal  $v_E$  en la entrada inversora y la señal de referencia en la entrada no inversora.

### 3.2.2. Circuito comparador con histéresis.

Debido a los problemas que pueden surgir con el ruido en los comparadores simples, se diseñan los comparadores con histéresis, de manera que cada conmutación de la salida a nivel H o al nivel L, ocurrirá a una tensión de entrada diferente, dependiendo del valor de salida anterior.

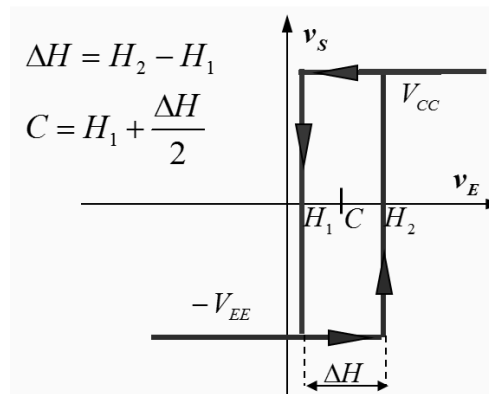
En la figura 5, se representa un circuito comparador con histéresis, no inversor.



**Figura 5.** Circuito comparador con histéresis no inversor

En este caso, la realimentación es positiva, y la señal de referencia para la comparación es  $V_p$ . Al ser no inversor, la señal de entrada se aplica en la entrada no inversora del amplificador operacional.

La conmutación de la señal de salida, se producirá cuando  $V^+ = V^-$ , y cada conmutación ocurrirá a una tensión de entrada diferente, dependiendo del valor de  $v_s$  anterior. Esto causa una histéresis en la función de transferencia, como se muestra en la fig. 6.



**Figura 6.** Función de transferencia de un comparador con histéresis

El análisis del circuito nos lleva a determinar los valores de  $H_1$  y  $H_2$  donde la señal de entrada hace que la señal de salida cambie. Hay que buscar las expresiones de  $V^+$  y  $V^-$ , del circuito de la fig. 5 obtenemos:

$$\left. \begin{aligned} V^- &= V_p \\ V^+ &= \frac{R_2 v_E}{R_1 + R_2} + \underbrace{\frac{R_1 v_S}{R_1 + R_2}}_{\text{depende de } v_S} \end{aligned} \right\}$$

Y partiendo de los valores de la señal de salida, y con la condición de conmutación  $V^+ = V^-$  se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Si } v_S = +V_{CC} &\Rightarrow v_{E1} = V_p \frac{R_1 + R_2}{R_2} - \frac{V_{CC} R_1}{R_2} = H_1 \\ \text{Si } v_S = -V_{EE} &\Rightarrow v_{E2} = V_p \frac{R_1 + R_2}{R_2} + \frac{V_{EE} R_1}{R_2} = H_2 \end{aligned}$$

El efecto sobre una señal con ruido que, aplicada a un comparador simple, produciría salidas indeseadas, se ve corregida con el comparador con histéresis, como puede verse en la fig. 7.

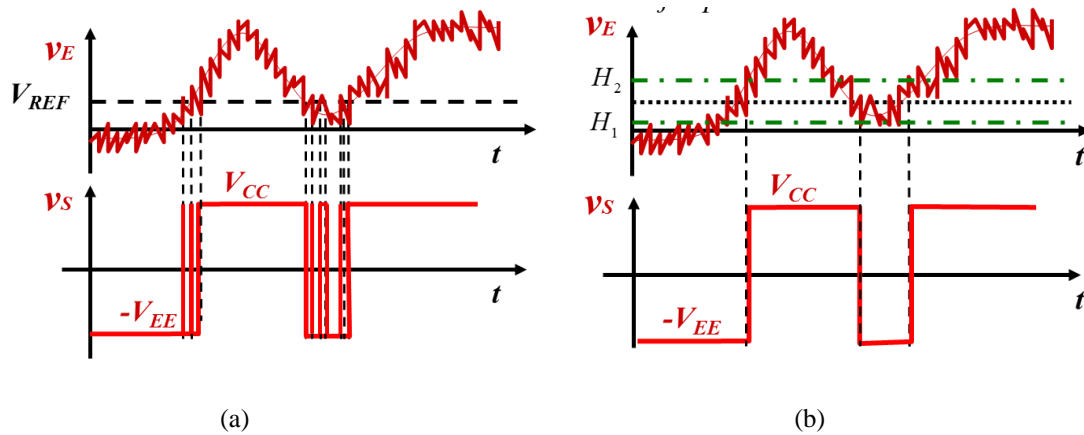


Figura 7. Comparador sin histéresis (a), comparador con histéresis (b).

### 3.3. Respuesta en Frecuencia. Diagrama de Bode.

La respuesta en frecuencia de un sistema en pequeña señal viene determinada por su función de transferencia  $A(j\omega)$ .

$$A(j\omega) = \frac{V_s}{V_e} = K \cdot \left( \frac{j\omega}{\omega_x} \right) \cdot \frac{\left( 1 + \frac{j\omega}{\omega_0} \right)}{\left( 1 + \frac{j\omega}{\omega_p} \right)} \cdot \left( \frac{\dots}{\dots} \right) \dots$$

El comportamiento del circuito se estudia sobre un diagrama de Bode, analizando los ceros y los polos. Se representan de forma separada el módulo y la fase de la función de transferencia ( $|A(j\omega)|$  y  $\phi(A(j\omega))$ ).

En un diagrama de Bode en el eje vertical se representan el módulo, en unidades logarítmicas ( $20 \log|A(j\omega)|$ ) y la fase, en grados. En el eje horizontal se representa la frecuencia en décadas.

Cada cero introduce en la representación del módulo una subida de 20 dB/década y en la fase una subida de 45°/década. Los polos introducen una caída de 20 dB/década y en la fase una caída de 45°/década.

Los ceros y polos determinan así mismo, la posición de las frecuencias de corte superior ( $f_{CH}$ ) e inferior ( $f_{CL}$ ). En estas frecuencias, la ganancia se reduce 3 dB (0.7 en valores de tensión) respecto a la ganancia para frecuencias medias.

$$|G_V(f_{CH})| = \frac{|G_{VM}|}{\sqrt{2}} = 0.7 |G_{VM}|$$

El diagrama de Bode es una representación gráfica que sirve para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema. Normalmente consta de dos gráficas separadas, una que corresponde con la magnitud de dicha función y otra que corresponde con la fase.

Es una herramienta muy utilizada en el análisis de circuitos en electrónica, siendo fundamental para el diseño y análisis de filtros y amplificadores.

El diagrama de magnitud de Bode, dibuja el módulo de la función de transferencia (ganancia) en decibelios en función de la frecuencia (o la frecuencia angular) en escala logarítmica.

Se suele emplear en señal, para mostrar la respuesta en frecuencia de un sistema lineal e invariante en el tiempo.



El diagrama de fase de Bode, representa la fase de la función de transferencia en función de la frecuencia (o frecuencia angular) en escala logarítmica. Se puede dar en grados o en radianes. Permite evaluar el desplazamiento en fase de una señal a la salida del sistema respecto a la entrada para una frecuencia determinada.

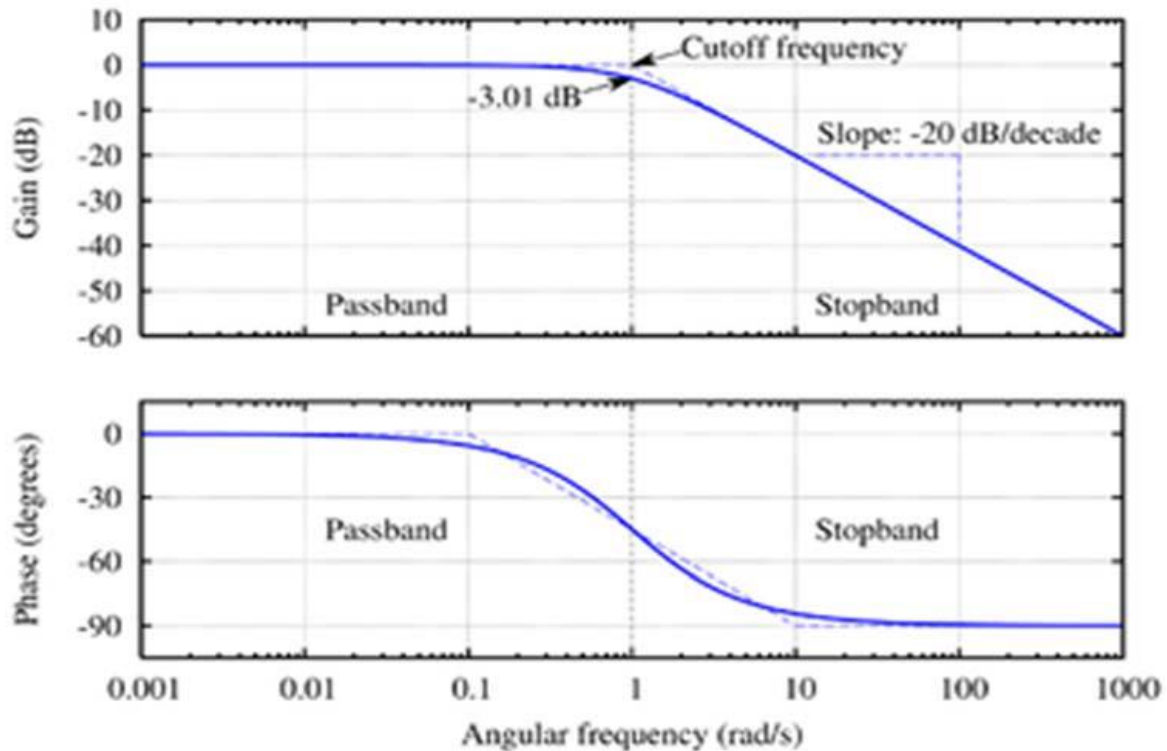


Figura 8. Diagrama de Bode filtro paso bajo de primer orden (con un polo).

### 3.4. Filtros

La función principal de un filtro, es procesar una señal analógica para mejorar la relación señal-ruido. En esta práctica se utilizará un AO para construir un filtro paso alto. Además, con esta práctica se pretende que el alumno entienda que la configuración utilizada para los filtros se corresponde también con un circuito integrador (filtro paso bajo) o un circuito diferenciador (filtro paso alto). Estos circuitos se suelen utilizar como un bloque en la construcción de filtros. Se verá también la ventaja de utilizar un integrador frente a un diferenciador en la construcción de filtros. El diferenciador se descarta debido a su mala respuesta al ruido en altas frecuencias.

#### 3.4.1. Filtro paso bajo

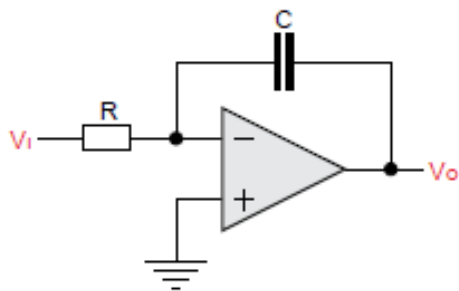


Figura 9. Circuito integrador

En la figura 9 se puede ver cómo puede implementarse un filtro paso bajo básico con un A.O.

Analizando el circuito en  $j\omega$ , la ecuación que lo define es:

$$V_0 = -\frac{1}{j\omega RC} \cdot V_i(t)$$

Donde  $V_0$  es una constante  $1/RC$  veces la integral de tensión de entrada  $V_i$  con respecto al tiempo. El signo (-) indica un cambio de  $180^\circ$  de fase, debido a la configuración inversora del operacional.

Si se aplica una tensión constante en  $V_i$ , la tensión de salida aumenta constantemente (creando una rampa). Se puede predecir la tensión de la rampa en cualquier momento “t” con la siguiente ecuación:

$$V_0 = -\frac{1}{C} \cdot \frac{V_i}{R} \cdot t$$

Esta respuesta del circuito también se puede escribir de la siguiente manera:

$$V_0 = -\frac{1}{RC} \cdot \int_0^t V_i(t) dt$$

En la práctica este diseño tiene algunos inconvenientes. Incluso cuando  $V_i$  no tiene offset, las corrientes de fuga en las entradas del amplificador operaciones pueden agregar una tensión de offset inesperada a  $V_i$ , que hace que la salida se desvíe. Equilibrando corrientes de entrada y colocando una resistencia en la entrada no inversora, puede reducirse el problema. Debido a que este circuito no proporciona ninguna realimentación de CC, ya que el condensador aparece como un circuito abierto para CC, el offset de la salida puede que no sea nulo. Muchos de estos problemas pueden solucionarse, si **se añade una resistencia grande  $R_f$  en paralelo con el condensador**. A frecuencias altas esta resistencia tendrá un efecto despreciable. Sin embargo, a bajas frecuencias, donde existe deriva y problemas de offset, la resistencia proporciona la realimentación necesaria para mantener la salida constante en el valor correcto. Esta resistencia reduce la ganancia DC del integrador a un valor finito.

### 3.4.2. Filtro paso-alto

En la figura 10, se puede ver un filtro paso alto básico implementado con un A.O.

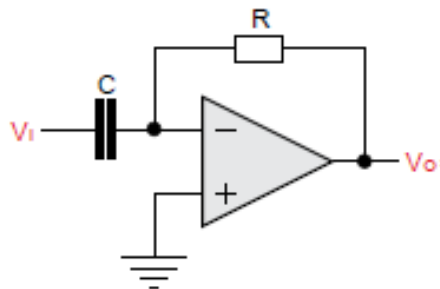


Figura 10. Circuito diferenciador

La tensión de salida tendrá la siguiente expresión:

$$V_0 = -RC \cdot \frac{dV_i(t)}{dt}$$

La magnitud de su salida se determina por la velocidad a la que se aplica el voltaje a los cambios de la entrada. Cuanto más rápido se produzcan los cambios en la entrada, mayor será la tensión de salida.

Este circuito también realiza la operación matemática de derivación, de modo que la salida de este circuito es proporcional a la derivada en el tiempo de la señal de entrada. En otras palabras, la salida es proporcional a la velocidad de variación de la señal de entrada.

Este diseño básico de un diferenciador, tiene dos inconvenientes principalmente. Uno es que sufre inestabilidad a altas frecuencias, provocando una resonancia en el circuito a la frecuencia  $\omega_0$ . El otro es que la entrada capacitiva hace que sea posible que señales de ruido aleatorio y cualquier tipo de ruido o armónicos presentes en el circuito, se amplifiquen más que la señal de entrada. Esto ocurre porque la salida es proporcional a la pendiente de la entrada, por lo que se requiere algún tipo de filtro.

Una modificación del circuito para evitar estos inconvenientes, podría ser **colocar en la entrada inversora una resistencia  $R_{in}$  (en serie con el condensador) y se agrega un condensador  $C_f$  en paralelo con la resistencia de realimentación  $R$** . De esta manera, a bajas frecuencias, el circuito actuará con realimentación resistiva, proporcionando un rechazo mejor ante el ruido. Sin embargo, tanto  $R_{in}$ , como  $C_f$  reducen la capacidad de derivación del circuito, pero sólo lo hacen hasta la frecuencia que determinan las resistencias y condensadores.

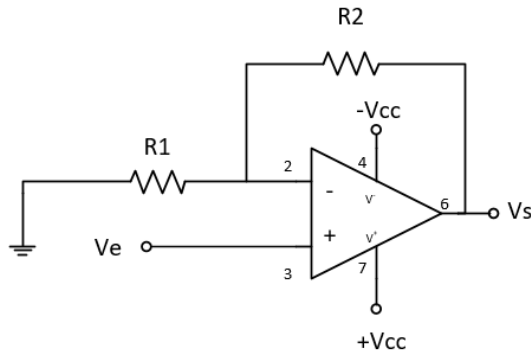
## 4. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En esta práctica se van a realizar diferentes configuraciones de amplificadores operacionales. Cada una tiene unas aplicaciones y características propias, sin embargo las técnicas de medida de ganancias, desfases, etc...son las mismas para todos los montajes. Estas técnicas están descritas en el anexo al final del guion. Para el correcto desarrollo de la práctica, se recomienda leer con detenimiento la práctica completa ANTES de acudir al laboratorio y realizar el análisis teórico necesarios para comprender el funcionamiento de cada circuito, y obtener los valores necesarios de resistencias para cada aplicación.

Los resultados a conseguir se describen en cada apartado, y cada alumno deberá entregar la memoria en el plazo dado por el profesor.

### 4.1. Diseño y montaje de un NO INVERSOR:

En este apartado se trata de diseñar un amplificador no inversor de acuerdo al esquema de la Figura 12, de tal forma que cumpla los requisitos que se muestran en los datos



**Figura 12.**  
Circuito A.O.  
No inversor y  
especificaciones  
de diseño

Datos:

$$G_V = +11$$

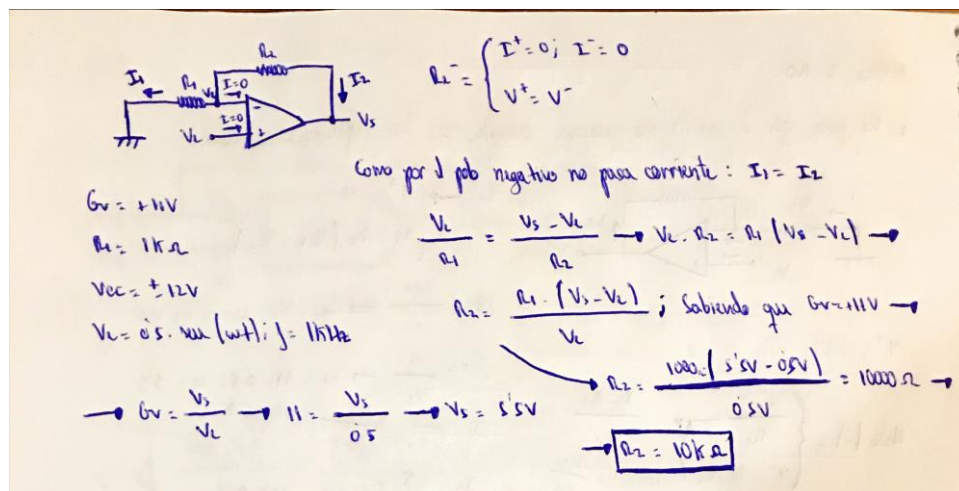
$$R_1 = 1k\Omega$$

$$V_{CC} = \pm 12V$$

$$V_e = 0.5 \sin(\omega t), f = 1KHz,$$

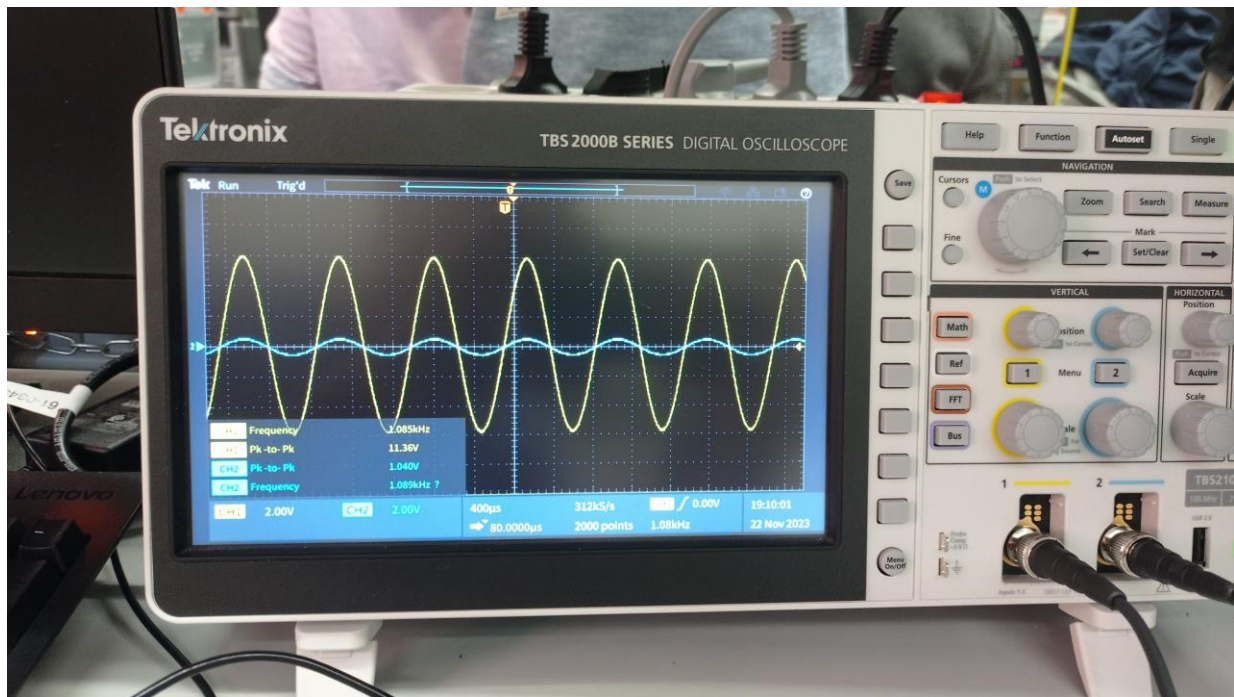
### Cuestión 1

Calcule  $R_2$ , para que el circuito No inversor cumpla con las especificaciones dadas.

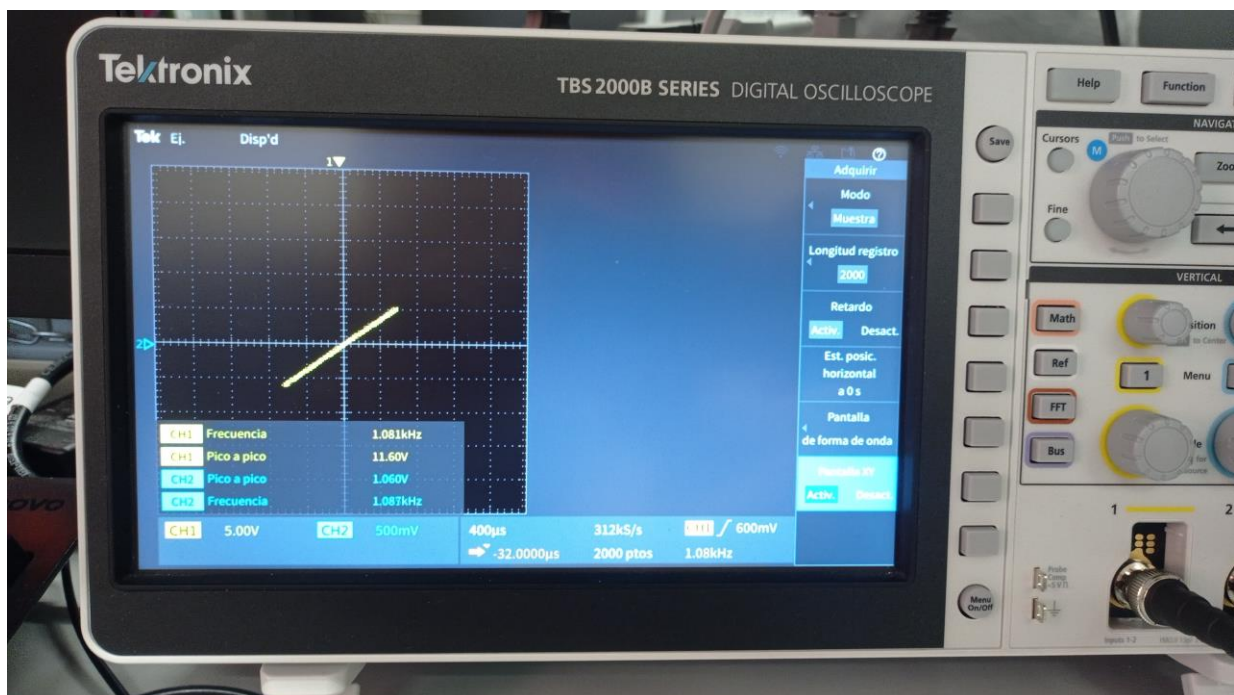


**4.2.1. Ganancia en tensión:** Represente en la pantalla del osciloscopio las señales de entrada y salida, con al menos dos periodos de la señal y sin distorsión. Mida la ganancia en tensión. Adjunte una captura de pantalla, incluya el panel de medidas de los canales.

$$G_{vmedida} = V_o / v_i = 11V$$



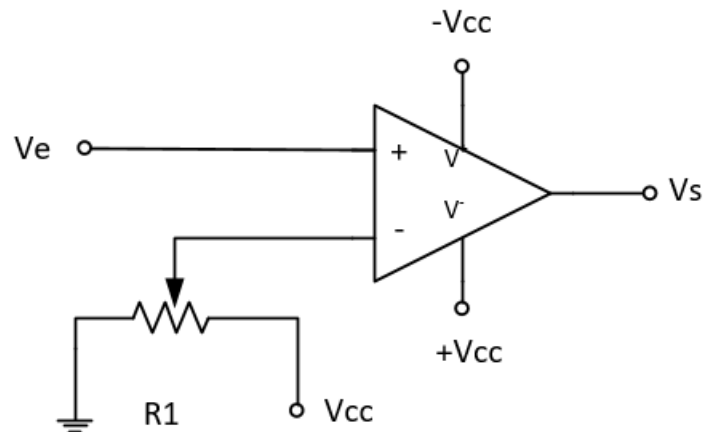
4.2.2. Obtenga la función de transferencia usando el osciloscopio en modo XY. Adjunte una captura de la pantalla.



## 4.2. Circuito comparador simple

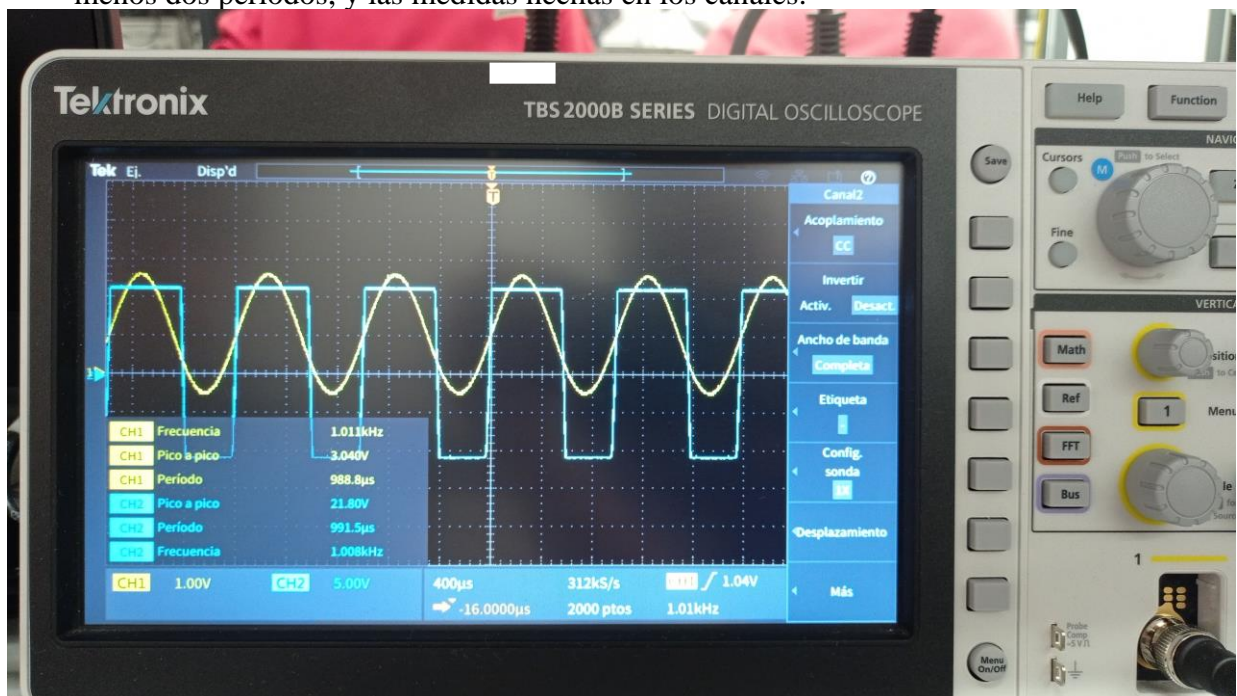
Como se ha explicado anteriormente, el circuito comparador simple, se implementa con un AO operacional sin realimentación. Monte el circuito de la figura 13. Utilice un potenciómetro R1, como se indica en el esquema para generar la tensión de referencia.



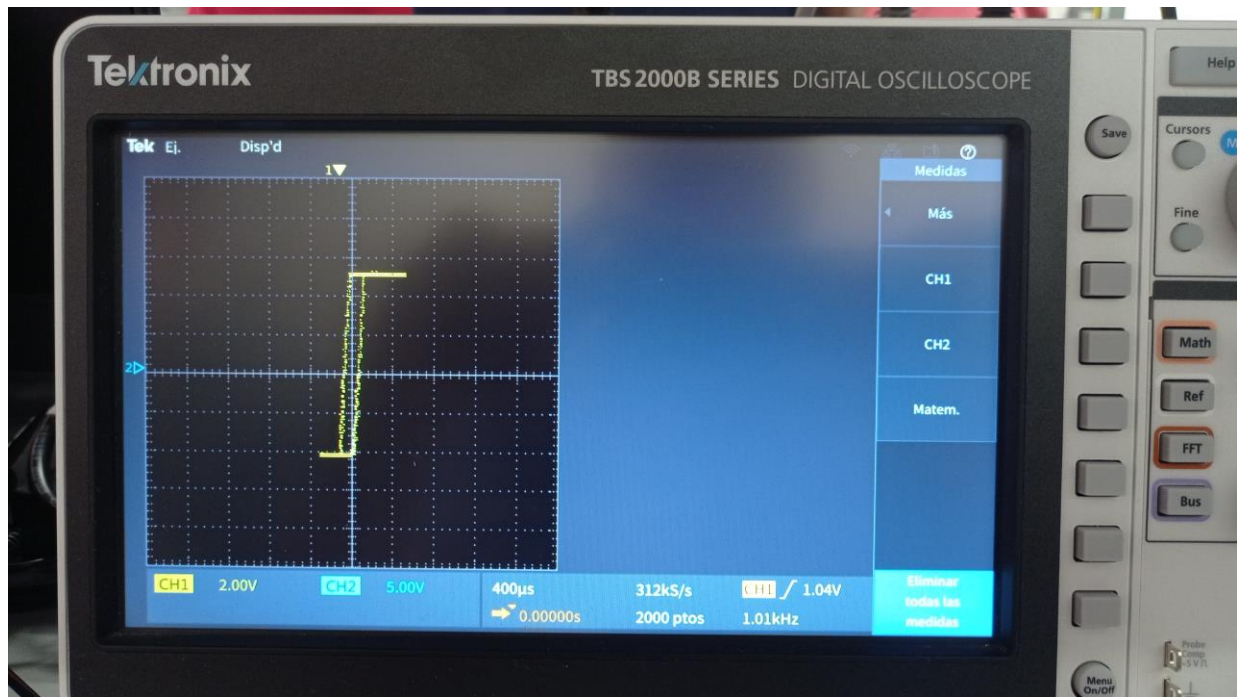


**Figura 13.** Circuito comparador simple

- a) Introduzca una señal  $V_e = 1,5 \sin(2\pi 10^3 t) + 1$  (V) en la entrada  $V^+$ , y 0,5V en continua en la entrada  $V^-$ . Adjunte una captura de pantalla con las señales de entrada y salida, con al menos dos periodos, y las medidas hechas en los canales.

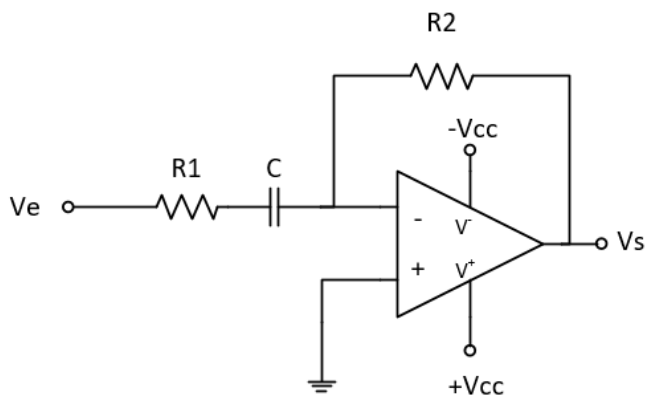


- b) Visualice en la pantalla del osciloscopio la función de transferencia, usando el modo XY. Adjunte una captura de pantalla.



### 4.3. Filtro paso alto

Utilizando el mismo AO, montar el circuito de la figura 14

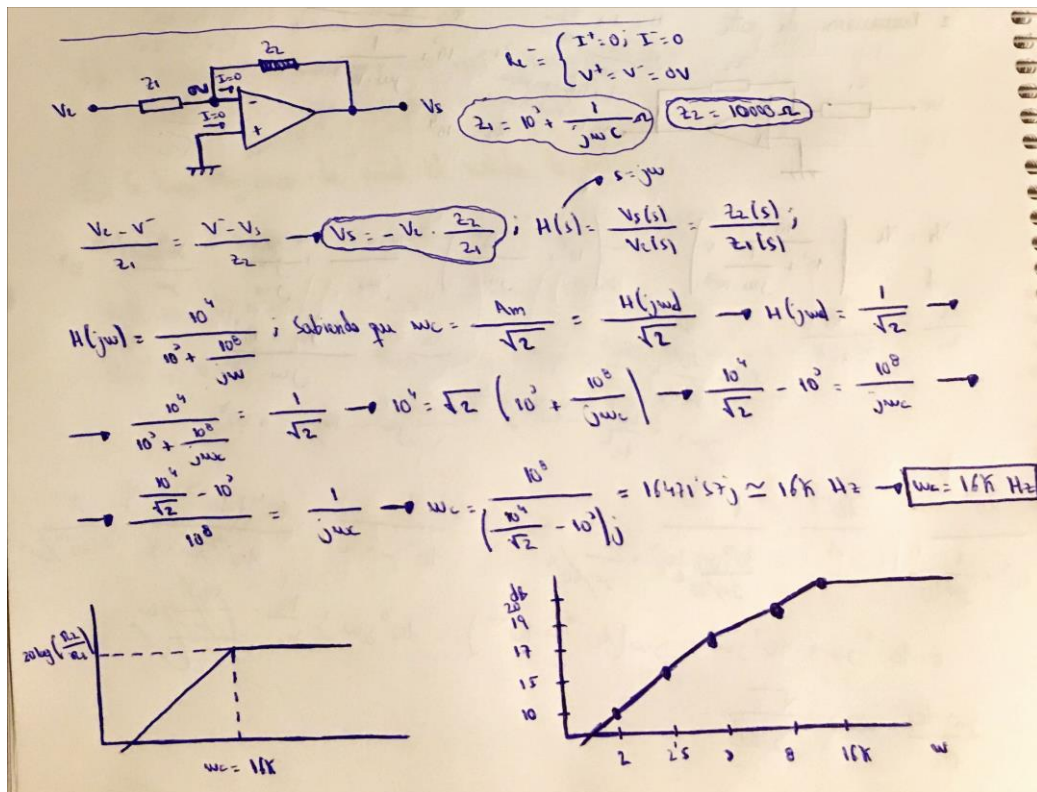


Datos:  
 $R1=1\text{k}\Omega$   
 $R2=10\text{k}\Omega$   
 $C=0,01\mu\text{F}$

**Fig. 14.**  
Filtro paso  
alto básico.

### Cuestión 2

Calcule la frecuencia de corte del circuito y dibuje el diagrama de Bode del módulo de la ganancia teórica.



- a) Introduzca a la entrada del circuito una señal sinusoidal de amplitud 1V y con una frecuencia a la cual, la ganancia del circuito sea máxima. **Anote** el rango de frecuencias en las cuales la ganancia es máxima y permanece constante. **Adjunte una captura de pantalla a una de estas frecuencias**, con las señales de entrada y salida, con al menos dos periodos, y las medidas hechas en los canales.
- b) Disminuya ahora la frecuencia hasta obtener la **frecuencia de corte inferior** del filtro. **Anote** la frecuencia de corte, y comente las diferencias con la calculada teóricamente. **Adjunte una captura de pantalla con las señales de entrada y salida**, con al menos dos periodos de señal, y las medidas hechas en los canales.



## 5. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

A continuación, se detallan algunas consideraciones que deberían tenerse en cuenta en el trabajo en el laboratorio:

- ▶ Debe realizarse el montaje con las fuentes de alimentación apagadas.
- ▶ No excederse en la longitud de cables y conectores (atención al ruido).
- ▶ Compruébese que las conexiones a masa coinciden en un punto común de unión: el neutro de la fuente de alimentación (masa en estrella).
- ▶ A la hora de conectar las fuentes, la primera de todas ha de ser la de alimentación. ¡No equivocar la polaridad!
- ▶ Asimismo, debe recordarse que las señales de entrada nunca deberán exceder los límites impuestos por dichas alimentaciones.
- ▶ Conéctese el generador de señal sólo después que el circuito esté convenientemente alimentado.
- ▶ Al desconectar, debe seguirse el orden inverso al de la conexión: primero quítese el generador de señal y después la alimentación  $+V$  y  $-V$ .

# I. Apéndice: Técnicas de Medida

## A. OBJETIVOS

El objetivo de este anexo se centra en facilitar algunas de las técnicas necesarias para las medidas más comunes que se realizarán en el laboratorio, así como algunas consideraciones prácticas útiles para el trabajo experimental.

## B. MEDIDAS

### 1. Medida de la Ganancia de Tensión ( $G_v$ )

Los pasos que se deben seguir para la realización de la medida de una ganancia de tensión son los siguientes:

- Excítese el circuito con una señal senoidal, sin componente continua, en la banda de frecuencias que se estén estudiando.
- Acóplese el generador al circuito utilizando los elementos que sean necesarios en cada caso. Por ejemplo, al estudiar un amplificador con transistores, se debe utilizar condensador electrolítico ( $10\mu\text{F}$ ) que aisle la polarización.

NOTA.- Recuérdese que los condensadores electrolíticos tienen polaridad, por lo que deben ser conectados de manera correcta, atendiendo a la tensión continua en bornas del mismo.

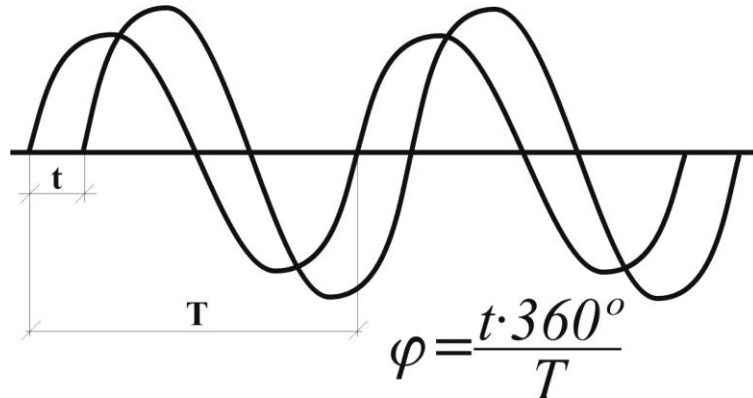
- Fíjese un valor de amplitud de la señal de entrada, observando que la señal de salida no esté distorsionada (empieza a recortar en las zonas de valor máximo). Es muy importante que la señal de salida no esté distorsionada cuando se realice la medida. En caso contrario, por ejemplo por distorsión debida al *slew rate* de un amplificador operacional, la ganancia medida no será válida.
- Si se han seguido estos pasos, ya se está en condiciones de medir los valores de las señales de entrada y salida para el cálculo de la ganancia.
- El valor de la ganancia puede obtenerse a partir de la relación entre los valores de la tensión de salida y la de entrada:

$$G_v = \frac{V_s}{V_e}$$

- Otra forma de observar la ganancia consiste en representar las señales de entrada y salida con el modo X-Y del osciloscopio. Para ello, se introduce la tensión de salida por el canal que corresponde al eje Y del osciloscopio y la señal de entrada en el canal que corresponde al eje X. Representando  $V_s$  en función de  $V_e$  mediante la selección del punto X-Y en el selector de la base de tiempos del osciloscopio, el resultado, en aquellas frecuencias a las cuales la ganancia es máxima, será una recta cuya pendiente corresponde directamente al valor de la ganancia.

## 2. Medida de la Diferencia de Fase

La medición del desfase entre dos señales se puede calcular midiendo el tiempo de retardo entre dos máximos o dos mínimos. Sin embargo, se obtiene mayor exactitud centrando ambas señales y midiendo el retardo sobre el eje horizontal.



**Figura II.1** Medida de la diferencia de fase

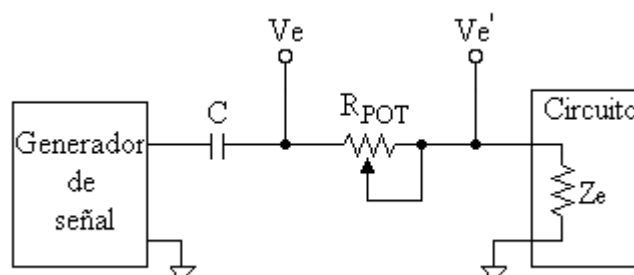
## 3. Medida de Impedancia de entrada (Re)

Existen dos opciones, basadas en el mismo principio teórico, que permiten la realización de la medida de la impedancia de entrada en el laboratorio.

A) Medida a través de un potenciómetro auxiliar.

Se intercala entre la excitación y la entrada del circuito un potenciómetro de valor aproximado al valor de impedancia de entrada calculado de forma teórica. Como puede verse en la Figura II.2, el potenciómetro y la impedancia de entrada forman un divisor de tensión que responde a:

$$V_e' = V_e \frac{Z_e}{Z_e + R_{POT}}$$



**Figura II.2** Esquema para el cálculo de  $Z_e$

Colocando ambos canales del osciloscopio sobre las bornas del potenciómetro, se varía el cursor hasta que la señal  $V_e'$  sea la mitad de  $V_e$ . En ese momento, como puede

obtenerse a partir de la ecuación, el valor de ambas impedancias, el potenciómetro y la impedancia de entrada real, se habrán igualado. Bastará con medir la impedancia del potenciómetro para saber el valor de  $Z_e$ .

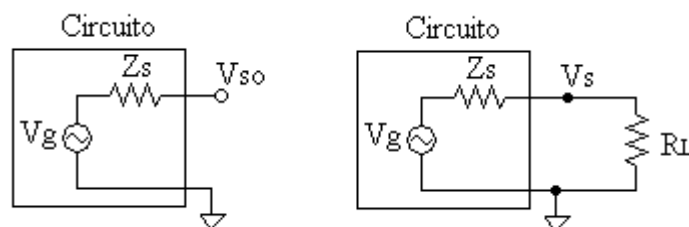
#### B) Medida con resistor fijo

En caso de no disponer de un potenciómetro, puede utilizarse el mismo método de medida sustituyendo el potenciómetro por una resistencia fija. Utilizando la misma ecuación de un divisor de tensión que se ha expuesto en el apartado anterior, y puesto que se conocen el valor de todas las variables excepto  $Z_e$ , puede despejarse este para su cálculo numérico.

**NOTA.-** En ningún caso la salida del amplificador debe estar distorsionada

### 4. Medida de Impedancia de salida ( $Z_s$ )

Para la medida de la impedancia de salida de un circuito se emplea una resistencia de carga auxiliar que recibirá el nombre de  $R_L$  y cuyo valor debe de estar próximo al del valor teórico de dicha impedancia. El método es similar al del caso anterior con alguna diferencia que se comenta a continuación. En este caso el esquema del circuito es el mostrado en la Figura II.3.



**Figura II.3** Esquema para el cálculo de  $Z_s$

En primer lugar es necesario medir la tensión de salida en vacío,  $V_{so}$ , que será igual a la tensión  $V_g$ , es decir, la tensión del generador equivalente del circuito. A continuación se mide la tensión de salida colocando una carga de valor próximo al valor teórico de la impedancia de salida. Como puede observarse en la Figura II.3, se forma un divisor de tensión que responde a la siguiente ecuación:

$$V_s = V_g \frac{R_L}{Z_s + R_L}$$

De donde puede despejarse el valor de la impedancia de salida ya que el resto de las variables son conocidas.

Recuérdese que la medida únicamente será válida si la señal de salida no presenta ningún tipo de distorsión.

## 5. Medida de la frecuencia de corte

La medida de la frecuencia de corte tanto superior como inferior consiste en buscar aquella frecuencia a la cual el módulo de la ganancia es el módulo de la ganancia máxima por  $\sqrt{2}$ .

Para ello es necesario conocer previamente cuál es la ganancia máxima. De forma experimental, debe buscarse el rango de frecuencias donde la ganancia es máxima y se mantiene constante para una determinada señal de entrada. A continuación se debe variar la frecuencia, en ambos sentidos, hasta encontrar los puntos en los cuales la ganancia se reduce hasta el valor citado previamente. Es necesario tener en cuenta que puede no ser necesaria la búsqueda de las frecuencias de corte superior e inferior.

Para simplificar la búsqueda de estas frecuencias suele fijarse el valor de la amplitud de la señal de entrada para todo el estudio. Si llamamos a este valor  $V_e$ , localizar la frecuencia de corte es equivalente a encontrar aquel punto en el que la tensión de salida,  $V_s$ , sea:

$$V_s = \frac{|G_{\max}|}{\sqrt{2}} \cdot V_e$$

Donde  $G_{\max}$  es la ganancia máxima. Este método es válido siempre y cuando la señal de entrada al circuito se mantenga constante al variar la frecuencia. En caso contrario no se puede aplicar la ecuación anterior, sino que debe irse realizando el cálculo de la ganancia para cada cambio de frecuencia hasta encontrar el valor deseado. Este efecto aparece sobre todo en la medición de la frecuencia de corte inferior y puede observarse en el osciloscopio que, aun manteniendo la configuración del generador de señal constante, la señal de entrada al circuito varía en amplitud.