

## **TRABAJO DE LABORATORIO 1**

### **AMPLIFICADORES OPERACIONALES: USOS Y LIMITACIONES**

**Objetivo:** Presentar a través de mediciones en laboratorio, la utilización de circuitos integrados analógicos y componentes asociados para la realización de distintas funciones. Observar las limitaciones que presenta el uso de los modelos representativos del funcionamiento de dichos circuitos integrados para predecir su comportamiento, como así también la influencia de las características del instrumental utilizado en la medición, en los valores obtenidos.

#### **Mediciones y fenómenos a observar:**

A partir de la exploración a realizar en el Laboratorio con circuitos analógicos simples, lineales y no lineales, se podrán observar distintas aplicaciones de un amplificador operacional integrado, AO, y las limitaciones que presenta para cumplir las relaciones  $v_o = f(v_i)$  obtenidas a partir de suponer que se trabaja con un modelo ideal.

Como introducción y sin intentar justificar las especificaciones indicadas, se incluye un ítem con las características básicas del AO real utilizado en el Trabajo de Laboratorio y se recomienda dar una lectura a las hojas de características del AO LM741 que se encuentran en la página Web [www.lace.fi.uba.ar](http://www.lace.fi.uba.ar) o <http://laceserver.fi.uba.ar> en el apartado de Características de Dispositivos.

En base a la formación que brinda el curso de CE I, se adquirirá un somero conocimiento de la constitución interna de los circuitos integrados – **CI** –, analógicos básicos, pero suficiente para comprender el principio de funcionamiento de la estructura interna del CI y justificar las limitaciones de su trabajo como elemento de circuito. Con esta base se podrá comprender el porqué de los datos proporcionados por el fabricante en las hojas de características de un determinado CI y cómo utilizarlos.

Ello permitirá **proyectar** un circuito en plaquetas con uno o mas CI y componentes externos asociados, garantizando sus características o parámetros de funcionamiento dentro de las tolerancias exigidas, con la menor probabilidad de destrucción ante las máximas exigencias para las que se diseñó. Asimismo también permitirá la reparación de circuitos ya construidos determinando la causa de la falla y garantizar dentro de lo posible que el reemplazo de componentes asegure el correcto funcionamiento dentro de las tolerancias de diseño.

#### **Presentación teórica del tema:**

Los CI son componentes, dispositivos o elementos de circuito compuestos por dos o más dispositivos activos elementales (transistores) y componentes pasivos en un mismo encapsulado, de donde se extraen los terminales necesarios para su conexión con elementos circuitales externos.

Los transistores y demás componentes de circuitos que forman el CI dentro de un mismo encapsulado, podrán estar contruidos en **un único sustrato semiconductor - un solo chip** – o sobre varios sustratos. Los CI contruidos en un solo sustrato se conocen como **circuitos integrados monolíticos – CIM** -.

Se encarará primeramente la consideración de CI de tipo monolítico destinados a realizar funciones analógicas, a los que llamaremos **CI analógicos** que normalmente poseerán un gran número de transistores de la misma o de diferentes tecnologías: TBJ, JFET de silicio, MOSFET, BICMOS y MESFET (JFET de arseniuro de galio).

La cantidad de funciones que pueden cumplir los CI analógicos de acuerdo con la finalidad con que han sido diseñados son ilimitadas, existiendo circuitos integrados planteados para uso general o para cumplir con propósitos específicos.

Como ejemplos simples utilizados hasta ahora podemos citar los CI de fuentes de tensión regulada o amplificadores que permiten construir filtros activos en el dominio de las frecuencias.

Hay un grupo relativamente pequeño de CI analógicos de uso general en que, el mismo CI, permite realizar un número muy amplio de aplicaciones en muchos sistemas circuitales, ya sea solo, o combinando dos o mas ejemplares de ese CI. En muchos casos vienen integrados varios de ellos en un mismo chip.

Los CI analógicos llamados **Amplificadores Operacionales – AO** – presentan una versatilidad tal que permiten, además de amplificar tensión, realizar circuitalmente la mayoría de operaciones matemáticas lineales y no lineales sobre señales analógicas, como ser: multiplicación de una señal por una constante (equivalente a amplificar linealmente con el mismo valor de amplificación a todas las componentes significativas de su espectro de frecuencias), suma algebraica de señales, producto de señales (que incluye obtener la señal elevada a un exponente), derivación e integración de señales u obtener el logaritmo o la exponencial de una señal. Para realizar estas funciones deberán conectarse en forma conveniente a los terminales de los **AO**, componentes exteriores – resistores, capacitores, diodos, transistores, etc. -.

La denominación de **AO** proviene justamente de su capacidad para realizar operaciones matemáticas, de acuerdo con los componentes exteriores que se coloquen y cómo se conectan. Los AO como componentes de circuito, se utilizaron inicialmente para resolver sistemas de ecuaciones integro-diferenciales en las computadoras analógicas, anteriores a la construcción de máquinas digitales de gran poder. Dado que los CIM surgen en la década de 1960, los primeros operacionales fueron construidos con dispositivos activos discretos, válvulas primero y transistores bipolares después.

Dada su **versatilidad** y facilidad de construir circuitos que lleven a cabo una gran variedad de funciones, se utilizarán AO para realizar esta **etapa exploratoria con circuitos amplificadores**.

Existen en el mercado distintos ejemplares de AO que se aproximan en su comportamiento, sin el agregado de elementos exteriores, a los cuatro tipos de amplificadores ideales que se definen con fines prácticos. Los mas comunes son los **amplificadores operacionales de tensión – AOV** – y los **amplificadores operacionales de transconductancia – AOT** –, siendo el de tensión el más utilizado para realizar distintas funciones en sistemas analógicos, tanto lineales como no lineales.

El **AOV** más simple posee tres terminales para tensión de señal y dos para conectar las tensiones continuas de alimentación para polarizar los transistores que conforman el CI.

De los tres terminales de señal, dos son de entrada o excitación y uno de salida. Las señales aplicadas a los dos terminales de entrada y la señal en el terminal de salida sobre la carga, están referidas a un punto o línea del circuito completo (el CI con los componentes externos asociados), que puede o no tener conexión directa con algún terminal del CI, que será lo que normalmente se conoce como terminal común, línea de común, masa o tierra del circuito.

Los otros dos terminales sirven para la conexión de una o dos fuentes de tensión continua de alimentación. De utilizarse una, positiva o negativa, el otro terminal de fuente de alimentación del CI irá conectado al punto común del circuito completo, y de utilizarse dos, una positiva y la otra negativa, el terminal opuesto de cada fuentes de tensión continua de alimentación irá conectado a ese punto común, como puede verse en la Fig. 1.

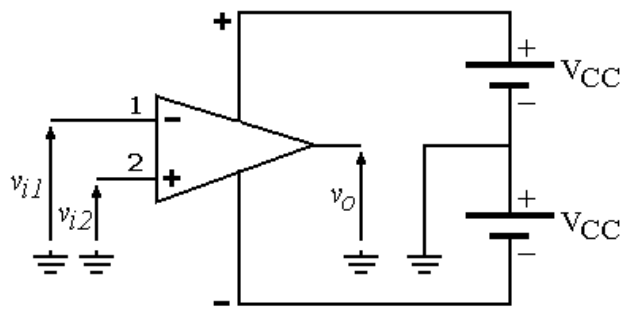


Figura 1

La utilización de dos fuentes de tensión continua de alimentación de distinto signo, permite que la tensión de polarización del terminal de salida respecto a común -  $V_{O0}$  - pueda ser nula. Este tipo de alimentación se conoce como de "fuente partida" o "fuente simétrica" en el caso de ser de igual valor.

La tensión en el terminal de salida de los amplificadores conocidos como AOV -  $v_o$  -, es función de la diferencia de la señal de tensión de las dos entradas. A esta diferencia de las dos señales de entrada las denominaremos **señal de excitación o entrada diferencial** y la distinguiremos con el subíndice "d" -  $v_{id}$  -. Si el AOV trabaja como amplificador lineal con valores de señales suficientemente pequeños como para admitir esta aproximación dentro de las tolerancias requeridas,  $v_o$  será proporcional a  $v_{id}$  resultando:

$$v_o = A_{vdo} (v_{i1} - v_{i2}) = A_{vdo} v_{id} \quad (1)$$

donde  $v_o$  es la tensión entre el terminal de salida y común,  $v_{id} = (v_{i1} - v_{i2})$  es la diferencia entre las señales aplicadas a los terminales de entrada referidas a común y la constante de proporcionalidad  $A_{vdo}$  es la amplificación de tensión con entrada diferencial o simplemente amplificación de tensión del AOV, que podrá ser un número complejo o real según existan o no efectos reactivos en el CI. El subíndice "0" de  $A_{vdo}$  indica que se ha supuesto que no hay ningún componente adicional conectado a los terminales del AOV, a excepción de los dos generadores de tensión de señal de excitación (considerados generadores ideales), la o las dos fuentes de alimentación de continua para polarizarlo y que el amplificador procesa la señal con su terminal de salida en vacío -  $R_L \rightarrow \infty$  -. De la expresión (1) surge que  $A_{vdo}$  se definirá como:

$$A_{vdo} = v_o / v_{id} \mid_{i_o=0} \quad (2)$$

Las dos entradas de señal de excitación del AOV presentan una característica particular en cuanto a la relación entre la polaridad de la señal de salida y la de cada terminal de entrada respecto a común. Los signos de los terminales de entrada colocados en el interior del triángulo representativo del CI en el AOV de la Fig. 1, tienen el siguiente significado:

Si se aplica una señal senoidal  $v_{i1}$  al terminal "1" de entrada indicado, con el terminal "2" conectado a común, se tiene una señal de salida  $v_o$  opuesta en fase a  $v_{i1}$  (signo - en el terminal "1" de entrada), en tanto que al aplicar la señal en el "2",  $v_{i2}$ , con el terminal "1" a común, la señal de salida  $v_o$  estará en fase con  $v_{i2}$  (signo + en el terminal "2" de entrada). Por este motivo se denomina **terminal de entrada inversor** al terminal denominado "1" en la figura, indicado con el signo "-" y **terminal de entrada no inversor** al terminal denominado "2" en la figura, indicado con el signo "+".

Por lo indicado anteriormente, debe tenerse en cuenta que tal como ha sido definida, la tensión  $v_{id}$  indica la tensión del terminal "1" de entrada referida al terminal "2" y por lo tanto, de aplicar una señal senoidal entre "1" y "2", cuando  $v_{id}$  esté en su semiciclo positivo,  $v_o$  estará en el negativo, con lo que resulta evidente **la necesidad de indicar siempre en los esquemas circuitales los sentidos de referencia adoptados**. De acuerdo con esta particularidad del AOV se desprende que, si no existen efectos reactivos en el circuito, de acuerdo con los sentidos de referencia adoptados  $A_{vdo}$  será un número real negativo.

Como la construcción de capacitores de valores superiores a algunos cientos de pF o en casos especiales a algunos nF integrados en un sustrato resulta tecnológicamente muy difícil, no es posible integrar capacitores de acople o desacople de señal, por lo que los CIM son normalmente (salvo en aplicaciones especiales) **amplificadores de continua**, es decir, amplifican señales senoidales desde  $\omega = 0$  hasta una pulsación tal en que se hagan sentir los efectos reactivos parásitos de los transistores, componentes integrados asociados y conexiones internas. Si se utiliza el AOV como amplificador de continua resulta de inmediato que el análisis realizado con semiciclos positivos o negativos de ondas senoidales es equivalente a efectuarlo con incrementos positivos o negativos de una señal continua (en forma de escalón), tomando el signo de acuerdo al sentido de referencia adoptado.

Los AOV se utilizan siempre con alguna conexión (directa o a través de algún componente) entre su terminal de salida y uno o ambos terminales de entrada, lo que significa que existirá una realimentación entre la salida y la entrada del amplificador. En circuitos amplificadores esta realimentación será normalmente de tipo negativa, es decir, desde la salida se introducirá en la entrada una tensión o corriente de señal que se restará de la señal aplicada en la entrada y la diferencia entre ambas será procesada por el circuito. Cuando existe realimentación y por ende alguna conexión desde la salida a la entrada de un amplificador, significa que está trabajando con un **lazo cerrado** de realimentación y por contraposición, si no existe ninguna realimentación se dice que el amplificador trabaja a **lazo abierto**.

Por esta última razón, la amplificación de un AOV, tal como se muestra en la Fig. 1, sin ningún otro componente asociado que los que se muestran, será una **amplificación a lazo abierto y en vacío**, ya que la no existencia de ninguna impedancia de carga conectada al terminal de salida, implica que esta sea infinita. La amplificación de tensión definida en (2) se podrá indicar en este caso como:

$$A_{vd0} = A_{vdol} = A_{vol} = v_o / v_{id} = v_o / v_i \quad (3)$$

donde el subíndice "ol" significa lazo abierto y la "d" se ha eliminado en  $A_v$  y en  $v_i$  pues la **amplificación de tensión a lazo abierto** de un AOV se define directamente para entrada diferencial y con el AOV trabajando en vacío, por lo que tampoco se ha indicado que la relación entre las tensiones se obtiene con la condición  $i_o = 0$ .

Para el análisis del funcionamiento de un circuito con un AOV y componentes asociados, incluyendo la impedancia de carga, puede suponerse con suficiente aproximación en numerosas aplicaciones, que el AO se comporta como un AOV ideal.

El **AOV ideal** se **define** como un amplificador que posee las siguientes propiedades:

$$A_{vol} \rightarrow \infty \quad (4)$$

$$R_i \rightarrow \infty \quad (5)$$

$$R_o = 0 \quad (6)$$

$$\text{Ancho de banda AB} \rightarrow \infty \quad (7)$$

La condición (7) implica que se admite que el AO no posee efectos reactivos y por lo tanto el valor de  $A_{vol}$  se mantiene para frecuencias de onda senoidal comprendidas entre  $f = 0$  y  $f \rightarrow \infty$ , y las impedancias de entrada y salida son resistivas puras.  $R_i$  es la resistencia de Thevenin "vista" entre ambos terminales de entrada del AO y  $R_o$  la resistencia de Thevenin "vista" entre el terminal de salida del AO "mirando" hacia éste.

El modelo incremental o circuito equivalente de señal del AO ideal podrá representarse a la salida mediante un generador controlado ideal de tensión, dependiente de la tensión diferencial de entrada -  $v_i$  - y a la entrada, por dos terminales con una resistencia de valor infinito entre ellas, es decir

abiertas, tal como se muestra en la Fig. 2. Se ha supuesto que las fuentes de alimentación de continua se comportan como cortocircuitos para la señal (es decir, no presentan variaciones en sus valores de tensión) y como van conectadas a terminales del CI independientes de los terminales de entrada y salida, directamente no se han indicado en el modelo de señal.

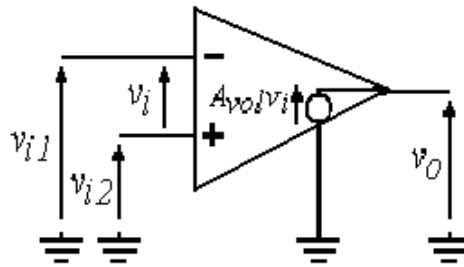


Figura 2

Utilizando este modelo ideal del AOV, resulta muy sencillo obtener los parámetros característicos de un circuito que lo utilice con componentes asociados y resistencia de carga. Por supuesto los valores o curvas que se obtengan, serán válidos con suficiente aproximación sólo para condiciones de señal que no invaliden, de acuerdo con el grado de tolerancias permitido, las hipótesis realizadas al asumir el comportamiento ideal de un AOV real.

**Estudio del funcionamiento de circuitos con un AOV considerado ideal:** En esta etapa exploratoria utilizaremos un AO de tensión, supuesto ideal, con el terminal de entrada no inversor conectado al punto común y con la señal de excitación, proveniente de un generador de tensión ideal, aplicada al terminal de entrada inversor a través de un componente de circuito. El otro terminal del generador de excitación se conectará a común.

### Amplificador de tensión o multiplicador por una constante

Se utilizará el circuito de señal, sin reemplazar al AO por su modelo, que se muestra en la Fig. 3. Se puede observar que la resistencia  $R_2$  establece un camino de realimentación y que ésta será negativa por la inversión del signo de las tensiones entre la salida y el terminal inversor:

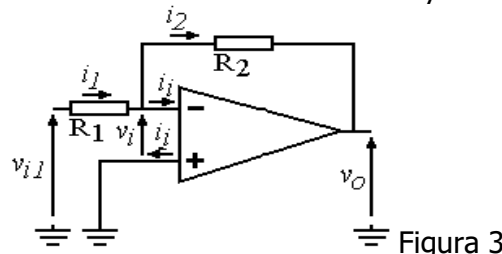


Figura 3

Resulta de inmediato que por la condición (4) del AOV ideal,  $A_{vol} \rightarrow \infty$ , cualquier valor finito de la tensión de salida  $v_o = f(t)$  correspondiente a cualquier instante, exigirá una tensión de entrada  $v_i$  que tienda a cero en todo momento:

$$v_i = (v_o / A_{vol}) \rightarrow 0 \quad (8)$$

Este valor de  $v_i$  indica que para todo instante la tensión de la entrada inversora coincidirá con la de la no inversora. Esta condición permite decir que existe un **cortocircuito virtual** entre los dos terminales de entrada del AO.

Con  $R_i \rightarrow \infty$  por la condición (5) del AOV ideal, se deduce que su corriente de entrada,  $i_i$ , deberá ser nula, a menos que  $v_i \rightarrow \infty$ , cosa que no ocurrirá por (8). Siendo  $v_i$  nula, las corrientes por  $R_1$  y  $R_2$  serán:

$$i_1 = (v_{i1} - v_i) / R_1 = v_{i1} / R_1 \quad (9)$$

$$i_2 = (v_i - v_o) / R_2 = -v_o / R_2 \quad (10)$$

Dado que  $i_i$  es nula resulta:  $i_1 - i_i = i_1 = i_2$

con lo que, igualando (9) y (10) se obtiene:

$$v_{i1} / R_1 = - v_o / R_2 \quad (11)$$

La amplificación de tensión entre el terminal de salida  $v_o$  y la tensión aplicada proveniente del generador de excitación  $v_{i1}$  será una **amplificación de tensión a lazo cerrado** o **amplificación de tensión del circuito realimentado**, que se define como:

$$A_v = v_o / v_{i1} \quad (12)$$

resultando la expresión de la amplificación de tensión del circuito de la Fig. 3:

$$A_v = v_o / v_{i1} = - R_2 / R_1 \quad (13)$$

La inclusión de una resistencia de carga  $R_L$ , conectada entre el terminal de salida y común, no influirá en el valor de la amplificación de tensión dado por la expresión (13) en un AOV ideal, por poseer éste  $R_o = 0$ , razón por la cual no se aclaró la condición de  $i_o = 0$  en dicha expresión.

Por la misma condición, la corriente  $i_2$  proveniente a través de  $R_2$ , entra por el terminal de salida al AO en vacío, sin alterar la tensión de salida  $v_o = A_v \cdot v_{i1}$ .

Siendo  $A_v = v_o / v_{i1} = - (R_2 / R_1)$  una constante, si lo son  $R_1$  y  $R_2$ , resulta de inmediato que el amplificador de tensión con un AOV ideal, realiza la operación matemática de multiplicar por una constante a la señal de entrada, entregando a la salida una tensión:

$$v_o = k \cdot v_{i1} = A_v \cdot v_{i1} \quad (14)$$

### Sumador de tensiones

En base a la explicación desarrollada para el amplificador de tensión, se observa que en la Fig. 4, teniendo en cuenta las condiciones con las que se define un AOV ideal será:

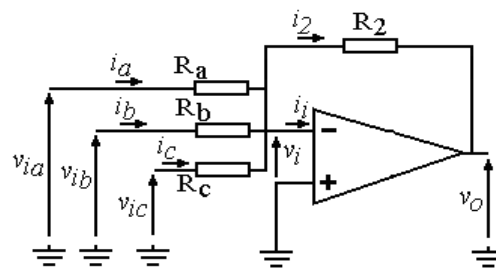


Figura 4

$$i_a + i_b + i_c = i_2 \quad (15)$$

obteniéndose en consecuencia:

$$v_o = k_1 v_{ia} + k_2 v_{ib} + k_3 v_{ic} \quad (16)$$

$$\text{con:} \quad k_1 = - R_2 / R_a ; \quad k_2 = - R_2 / R_b \quad \text{y} \quad k_3 = R_2 / R_c \quad (17)$$

Si  $R_a = R_b = R_c = R_1$  se obtendrá directamente:

$$v_o = k (v_{ia} + v_{ib} + v_{ic}) \quad (18)$$

con:

$$k = - R_2 / R_1 \quad (19)$$

y si  $R_2 = R_1$ , resultará:

$$v_o = - (v_{ia} + v_{ib} + v_{ic}) \quad (20)$$

### Circuito integrador

De la Fig. 5, dado que para  $v_i$  nula resulta:

$$\begin{aligned} i_1 &= v_{i1} / R_1 \\ i_2 &= -C_2 dv_o / dt \end{aligned} \quad (21)$$

al ser  $i_1 = i_2$  se tiene:

$$v_{i1} / R_1 = -C_2 dv_o / dt \quad (22)$$

en consecuencia:

$$v_o = - (1 / R_1 C_2) \int v_{i1} dt = - (1/\tau) \int v_{i1} dt \quad (23)$$

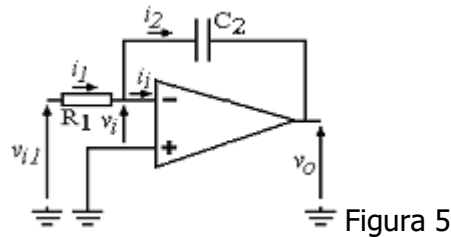


Figura 5

### Circuito diferenciador

De la Fig. 6, mediante el mismo procedimiento y con las mismas consideraciones se obtiene:

$$v_o = -C_1 R_2 (dv_{i1} / dt) = -\tau (dv_{i1} / dt) \quad (24)$$

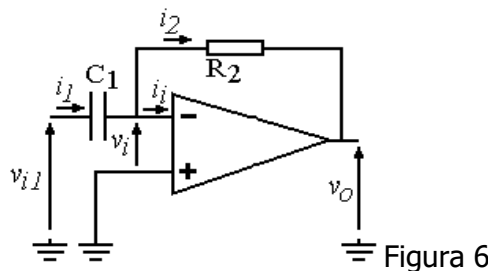


Figura 6

### Amplificador logarítmico

De la Fig. 7, con  $v_i$  nula resulta:

$$\begin{aligned} i_1 &= v_{i1} / R_1 \\ i_2 &= I_{S2} e^{-v_o/V_T} \end{aligned} \quad (25)$$

Por lo que, al igualar las corrientes y despejar  $v_o$  se obtiene:

$$v_o = -V_T \ln (v_{i1} / I_{S2} R_1) \quad (26)$$

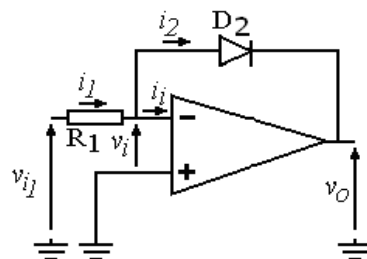


Figura 7

## Trabajo de Laboratorio:

(Texto en negro: mediciones obligatorias. *Texto en verde: Preguntas obligatorias*)

(*Texto en azul: mediciones complementarias.*)

Se utilizará la plaqueta que se muestra en la Fig. 8, vista desde el lado de los componentes, donde se ha colocado en un zócalo apropiado un AO LM741 con un encapsulado del tipo dual-in-line-package con cuatro terminales por lado – DIP 8-, que se muestra en la Fig. 9.

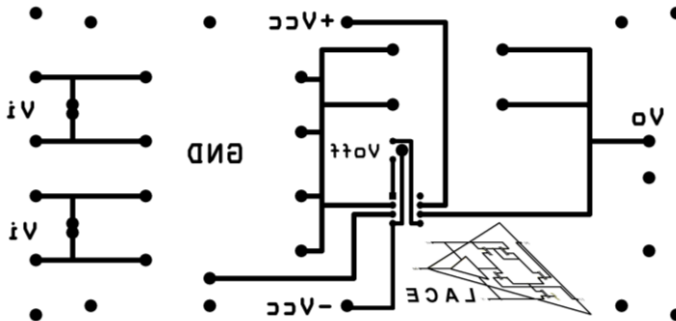


Figura 8

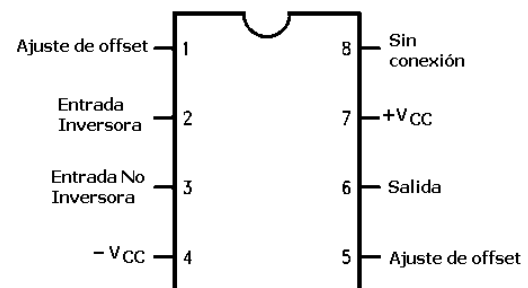


Figura 9

Se lo alimentará con dos fuentes simétricas de  $\pm 12\text{ V}$ , y se ha agregado en la plaqueta un resistor ajustable – preset - preajustado, cuyo valor no debe modificarse, con el objeto de obtener  $V_{OQ} = 0$  para  $V_{IQ} = 0$ , por motivos que se comprenderán oportunamente al considerar que el AO es real.

Al solo efecto de poner en evidencia los valores que limitan el funcionamiento del AO LM741 utilizado para realizar el Trabajo de Laboratorio, se resumen las siguientes características básicas de su funcionamiento. Dada la dispersión de sus valores, se han considerado los que resultan ser los más probables de encontrar en un determinado ejemplar de este CI (valores típicos):

### A) Amplificador de tensión o multiplicador por una constante

Se utilizará la plaqueta colocando los elementos externos al CI que se muestran en el circuito de la Fig. 10. Para este circuito, se admite el modelo de señal que se ha analizado anteriormente (Fig. 3.).

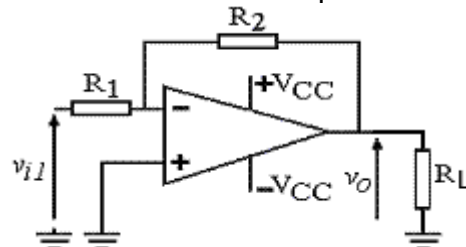


Figura 10

<b>LM741</b>	$R_i = 2\text{ M}\Omega$	$I_{\text{bias}} = 80\text{ nA}$	$V_{\text{off}} = 2\text{ mV}$
$A_{\text{vol}} = 200.000$	$R_o = 75\text{ }\Omega$	$I_{\text{os}} = 25\text{ }\mu\text{A}$ (corriente de salida en cortocircuito)	$I_{\text{off}} = 10\text{ nA}$

1. Obtener el valor de la tensión pico de salida del circuito y su forma de variación temporal para una entrada senoidal de  $1\text{ KHz}$  y  $\hat{V}_{i1} = 0,2\text{ V}$ , con los siguientes valores de  $R_1$ ,  $R_2$ : y  $R_L = 1\text{ K}\Omega$ .

- a)  $R_1 = 1\text{ K}\Omega$ ;  $R_2 = 10\text{ K}\Omega$
- b)  $R_1 = 1\text{ M}\Omega$ ;  $R_2 = 10\text{ M}\Omega$
- c)  $R_1 = 1\text{ K}\Omega$ ;  $R_2 = 1\text{ M}\Omega$

Utilizar puntas de prueba directa (1X).

- ✓ **Observar que en el caso b) su valor se aparta más que en a) del predicho por el modelo ideal, al comenzar a influir el valor de la  $R_i$  del AO.**
- ✓ **Para el caso b), modificar la base de tiempo hasta determinar cuál es la fuente de ruido que enmascara el valor útil a medir.**



- ✓ *Observar que en el caso c) es imposible amplificar la señal a los valores que predice el modelo ideal, al alcanzarse los niveles de tensión máximos de funcionamiento, determinados por los valores de las tensiones de alimentación.*
- ✓ *Para el caso a), reemplazar la carga por otra de  $10\ \Omega$  y ver que, si  $R_L$  se hace comparable con la  $R_o$  del AO, el valor de la amplificación de tensión se aparta del predicho por el modelo ideal.*

2. Obtener el valor de la  $\hat{V}_o$  en vacío para una entrada senoidal con  $\hat{V}_{il}$  entre 50mV y 100mV para:  $R_1 = 1\ K\Omega$  ;  $R_2 = 10\ K\Omega$ , variando la frecuencia del generador de señal de 0 Hz a 10 MHz.

Graficar el módulo de la amplificación de tensión medida en función de la frecuencia en un diagrama logarítmico. Encontrar el valor de frecuencia  $f_c$  para la que la amplificación cae 3dB del valor máximo (*frecuencia de corte*). Utilizar punta de prueba compensada (10X).

- ✓ *¿Se esperaría medir el mismo valor de  $f_c$  de utilizar un tester digital?*
- ✓ *Aumentar la tensión de entrada a más de 0,4V. Verificar que a partir de una frecuencia dada, cambia la forma de la señal de salida. Es decir que para esos niveles de tensión de entrada y frecuencia, el modelo del amplificador dejaría de predecir correctamente la forma de la tensión de salida (Slew rate).*

## B) Circuito integrador

Para el circuito de la Fig. 5, observar la forma de la señal de salida y medir su tiempo de crecimiento si se aplica una señal de entrada cuadrada de  $f = 1/10\tau$  y amplitud de 0,2V, con  $R_1 = 1\ K\Omega$  y  $C_1 = 100\ nF$ . Comparar con la obtenida al considerar el AO ideal de la expresión (23).

- ✓ *Observar que la integración se ve limitada por los niveles máximos de funcionamiento dados por las tensiones de alimentación.*
- ✓ *Agregar un resistor  $R_2 = 10\ K\Omega$  en paralelo con  $C_2$  y observar que la descarga de  $C_2$  a través de  $R_2$  permite un funcionamiento cercano al predicho en el modelo ideal, evitando alcanzar los límites de niveles de tensión de funcionamiento.*

Observar si hay diferencia al utilizar puntas de prueba directa (1X) y compensada (10X).

## C) Circuitos Rectificadores

### Desarrollo:

El circuito rectificador de media onda que se muestra en la Fig. 12a, implementado con un diodo 1N4001/07 y un resistor  $R_L = 10\ K\Omega$ , se conecta a un banco de medición como el indicado en la Fig. 12b. Se lo excitará con una señal senoidal de frecuencia 50 Hz y amplitud 5 volts pico.

- ✓ *¿Por qué se utiliza una amplitud pico de 5V en la excitación y no de 50mV?*

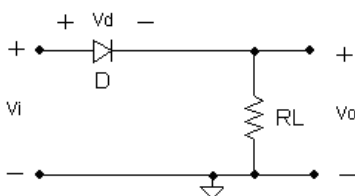


Figura 12a

Observar  $v_o(t)$ , y medir  $\hat{V}_o$ , obtener su valor medio.

Recordar que el valor medio de una onda  $v_x(t)$  periódica, de período "T", se define como:  $\bar{V}_x = \frac{1}{T} \int_0^T v_x(t) dt$ ,

que en el caso de la media senoide rectificada da como resultado  $\bar{V}_x = \hat{V}_x / \pi$ .

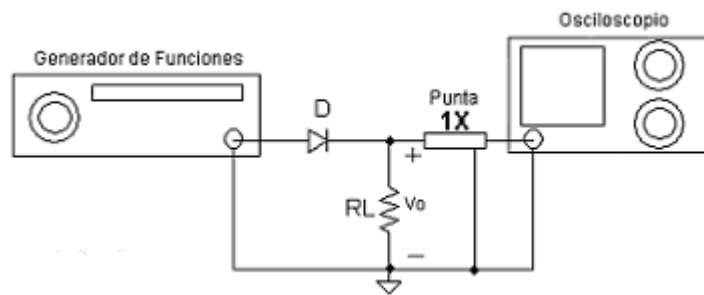


Figura 12b

- ✓ *¿Qué forma de onda de  $v_o$ , valores extremos y medio se esperaría medir si se aumenta la frecuencia de excitación a 50kHz?. Simular este caso y justificar los resultados.*

Seguidamente, se conecta un capacitor  $C = 47 \mu\text{F}$  en paralelo con  $R_L$ , tal como se muestra en la Fig. 13a y se arma el banco de medición de la Fig. 13b. Se lo excitará con una señal senoidal de frecuencia 50 Hz y amplitud 5 volts pico.

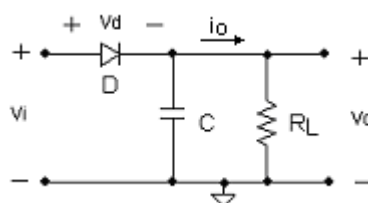


Figura 13a

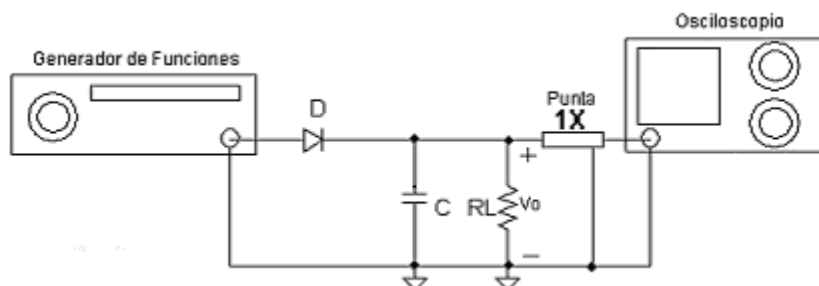


Figura 13b

Se define como **porcentaje de ripple o rizado**,  $z\%$ , al valor porcentual del cociente entre el valor eficaz de las componentes senoidales del desarrollo de Fourier de la onda de salida y el valor medio de la onda completa:

$$z\% = 100 \cdot V_{\text{ripple (ef)}} / V_o \text{ (medio)} \quad (27)$$

siendo:  $V_{\text{ripple (ef)}} = (V_{o1(\text{ef})}^2 + V_{o2(\text{ef})}^2 + \dots)^{1/2}$

donde:  $V_{o1(\text{ef})}$ ,  $V_{o2(\text{ef})}$ , etc. Son los valores eficaces de las componentes de Fourier de la onda  $v_o$ .

- 1) Observar y medir la tensión de salida sobre  $R_L$ ,  $v_o$ , su valor medio, la variación máxima de la tensión de salida (ripple) de  $v_o$ ,  $v_{\text{ripple}} = \Delta v_o$ , y calcular el  $z\%$  para los siguientes valores de la resistencia de carga " $R_L$ ": 10 K $\Omega$ , 4,7 K $\Omega$ , y 1 K $\Omega$ .

- ✓ *Si en lugar de un rectificador de media onda se tuviese un puente rectificador de onda completa, ¿se esperaría un  $z\%$  mayor o menor?.*

### Mediciones complementarias:

- 2) Construir la gráfica de  $V_o \text{ (medio)} = f(I_o \text{ (medio)})$ , llamada "*característica de regulación*" - también se indica como  $V_o \text{ (medio)} = f(1 / R_L)$  -.

- ✓ *¿Para qué sirve?.*

- 3) Se reemplaza el generador de funciones por un transformador de  $220V_{ef}/6V_{ef}$ , como se indica en la Fig. 14. Anotar sus especificaciones en cuanto a potencia máxima (o corriente máxima). Medir la tensión del secundario en vacío usando un tester y observar su forma de onda. Repetir los puntos 1 y 2.

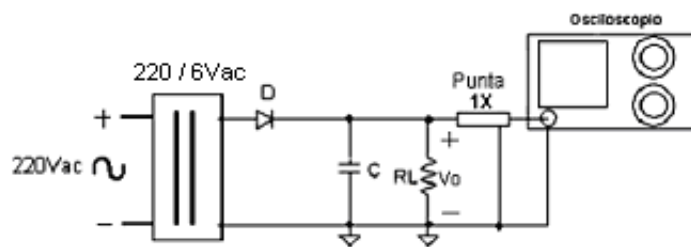


Figura 14

**Nota:** El transformador es un elemento circuital eléctrico que traslada la potencia recibida en su bobina primaria (o inductor primario) a una bobina secundaria (o inductor secundario) a través del flujo concatenado por ambas bobinas en un núcleo que puede ser aire, ferrite (alta frecuencia) o hierro (como es este caso de los llamados “transformadores de poder” o de línea de 50Hz).

Es decir, despreciando las pérdidas en el núcleo y en el alambre del bobinado, puede aceptarse que el producto de los valores eficaces entre tensión y corriente del primario y secundario se mantiene constante:  $V_{primario} \cdot I_{primario} \cong V_{secundario} \cdot I_{secundario}$ .

✓ *¿Por qué en las especificaciones del transformador figura su potencia en V.A y no en Watts?*

- 4) Se arma el circuito como el indicado en la Figura 15, conocido como rectificador de media onda de precisión. Repetir las mediciones realizadas para el rectificador simple. Extraer conclusiones.

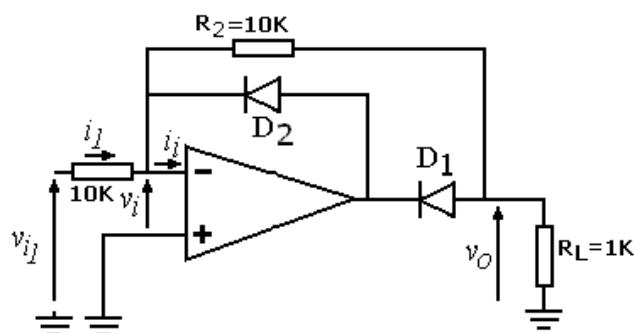


Figura 15

- ✓ *¿Qué sucede si se reemplaza  $R_2 = 10K\Omega$  por un resistor de  $22K\Omega$ ?*  
 ✓ *¿Qué sucede si se invierte la conexión de cada diodo?*

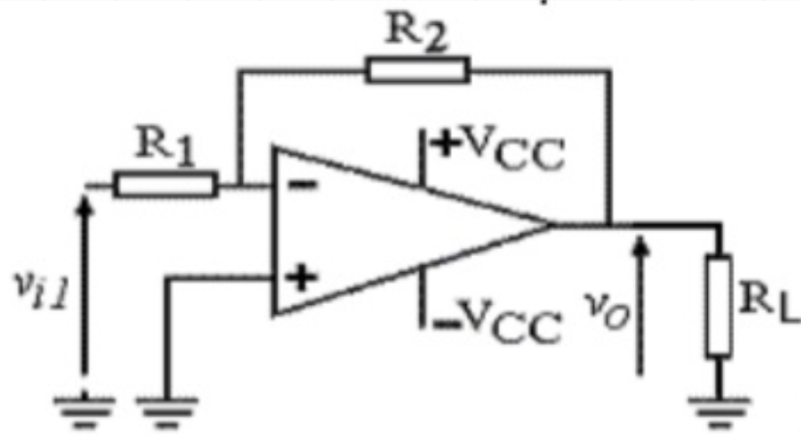


Figura 10

1)

$$\hat{v}_{i1} = 0,2V$$

$$\hat{v}_o = \frac{R_2}{R_1} v_{i1} = 2V$$

Idealmente en todos los casos debería ser así!

