

# Amplificador Operacional: caracterización y aplicación

E. de Barbará<sup>†</sup>, G. C. García<sup>\*</sup>, M. Real<sup>‡</sup> y B. Wundheiler<sup>\*\*</sup>

Laboratorio de Electrónica - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Física - Universidad de Buenos Aires - Argentina

**Resumen:** En el presente trabajo se realiza un estudio del comportamiento de amplificadores operacionales. En una breve introducción se destacan sus características y las aproximaciones utilizadas en el desarrollo de las experiencias. Posteriormente se detallan los resultados de su aplicación en circuitos amplificadores y amplificadores inversores así como también en circuitos seguidores.

## I. Introducción <sup>[1], [2]</sup>

Un amplificador operacional (*Opam*) es un circuito integrado constituido por semiconductores. Su estructura interna es compleja pero pueden ser diferenciadas tres etapas principales: a) amplificación diferencial, b) etapas de ganancia y c) seguidor por emisor en contrafase.

Durante el desarrollo de este trabajo pensaremos el *Opam* como una caja negra con terminales de entrada y salida, ignorando su composición interna, ya que las experiencias realizadas apuntan a su caracterización e implementación.

La presencia de transistores y diodos en la constitución interna del integrado hacen necesario que se polarice al *Opam*. El mismo se encuentra en *régimen de funcionamiento* si la tensión de salida ( $v_{out}$ ) y las tensiones de polarización del integrado ( $V_{CC+}$  y  $V_{CC-}$ ) cumplen la relación

$$V_{CC-} \leq v_{out} \leq V_{CC+} \quad (\text{ec. 1})$$

Siempre y cuando el integrado esté en régimen se pueden utilizar tres aproximaciones básicas que determinarán su comportamiento:

1. En todo momento, el amplificador operacional modificará la tensión de salida de manera que la *tensión diferencial*, diferencia entre la tensión de entrada inversora  $v_-$  y la tensión de entrada no inversora  $v_+$ , cumpla la relación

$$v_+ - v_- \approx 0 \quad (\text{ec. 2})$$

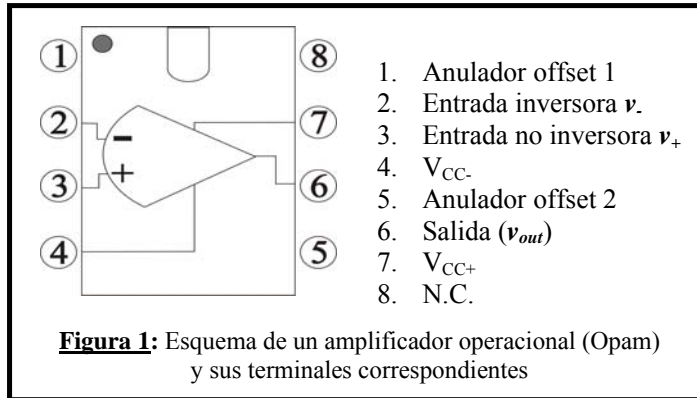
2. Los terminales de entrada no permiten el flujo de corriente, la misma es del orden de los nA y se puede despreciar, porque presentan una alta impedancia de entrada  $O(M\Omega)$ . Mientras los terminales de salida presentan una muy baja impedancia de salida.
3. La tensión de salida es proporcional a la tensión diferencial

$$v_{out} = A \cdot (v_+ - v_-) \quad (\text{ec. 3})$$

donde  $A \sim 100000$  es el factor de amplificación.

Estos tres principios nos permitirán explicar los procesos y resultados de los circuitos estudiados.

En la **figura 1** se muestra un esquema del *Opam* y sus terminales. Para que el amplificador funcione, es necesario polarizarlo a través de los terminales 4 y 7, correspondientes a  $V_{CC+}$  y  $V_{CC-}$ . Los terminales 2 y 3 corresponden a la señal de entrada, inversora  $v_-$  o no inversora  $v_+$ , según la conexión que se utilice. Del terminal 6 se obtiene la señal de salida mientras los terminales 1 y 5 sirven para regular el valor intrínseco de tensión continua (*offset*) donde se encuentra montada la señal de salida. El restante terminal no posee ningún fin.



Un *Opam* se utiliza como elemento activo en la construcción de circuitos, en particular, como su nombre lo indica, es de especial interés en el diseño de amplificadores ya que generan una enorme ganancia en la tensión de salida (i.e. la señal de salida suele utilizarse como retroalimentación de forma tal de cancelar efectos indeseados como ruido).

Dos circuitos básicos se destacan sobre los demás: ***inversor y no inversor***, la ganancia de tensión de salida en ambos casos es casi idéntica sin embargo el primero no invierte la señal de entrada, mientras que el segundo sí.

• **Circuito No Inversor**

El esquema del circuito no inversor se muestra en la **figura 2**. Suponiendo que el amplificador se encuentra en régimen podemos decir que la tensión en el terminal no inversor será la misma que en el terminal inversor, según lo dictamina la aproximación (ec. 2). Planteando las ecuaciones para este circuito se deduce que

$$V_{out} = \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \cdot V_{in} = A \cdot V_{in} \tag{ec. 4}$$

Por lo tanto, el término entre paréntesis determina la amplificación de tensión ( $A$ ) otorgada por el circuito No Inversor.

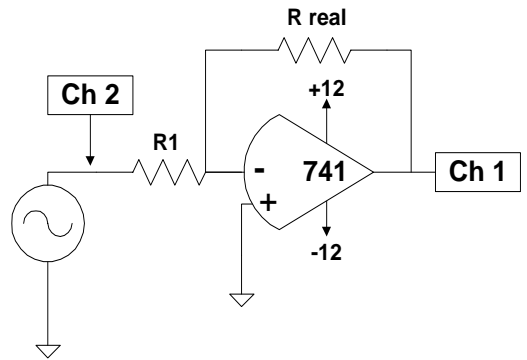
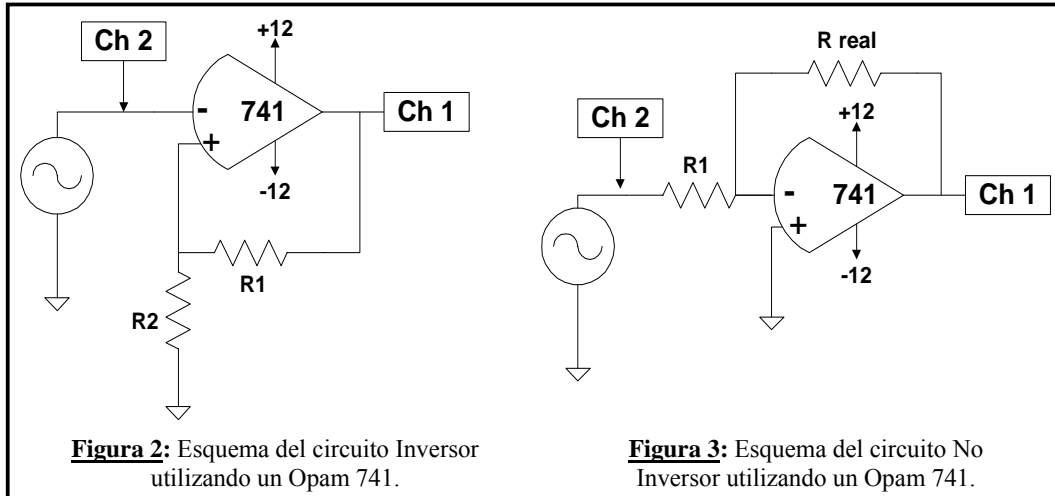
• **Circuito Inversor**

En la **figura 3**, se muestra un esquema del circuito inversor. La  $R_{real}$  es una resistencia de realimentación. Nuevamente, planteando las ecuaciones del circuito y utilizando la aproximación (ec. 2) se obtiene

$$V_{out} = -\frac{R_{real}}{R_1} \cdot V_{in} = -A \cdot V_{in} \tag{ec. 5}$$

donde el cociente de resistencias determina nuevamente la amplificación del circuito y el signo menos aparece debido al cambio de la señal de salida ( $V_{out}$ ). Podemos decir que es multiplicada por  $-1$ , o más adecuadamente que posee un desfase de  $180^\circ$  respecto de la señal de entrada ( $V_{in}$ ). Obsérvese que la amplificación difiere en una unidad de la del circuito anterior, pudiendo desprejarse si se elijen resistencias de forma tal que la amplificación sea mucho mayor a uno.

Es importante destacar que en la conexión a “***lazo cerrado***” la tensión en la entrada inversora vendrá regulada por la señal en el terminal no inversor.



Un efecto no lineal que presentan los amplificadores y adquiere importancia en muchas aplicaciones (por ejemplo: sistemas de audio) es el *slew rate* o tasa de cambio de la señal de salida en función de la señal de entrada. Más precisamente, se define como el tiempo que le demanda al amplificador en cambiar su señal de salida del 10% a 90% de su estado final para una señal de entrada ascendente. El efecto es intrínseco del amplificador y en general se expresa en  $V/\mu s$ . En el caso del Opam LM741 el *slew rate* es de  $0,5 V/\mu s$  [3]. Se puede interpretar como el límite de velocidad del integrado.

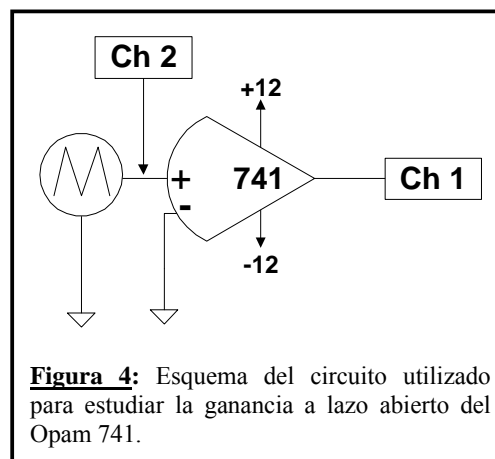
## II. Desarrollo Experimental

El presente trabajo se realizó utilizando un amplificador operacional tipo 741 [3]. A continuación se describen los diferentes circuitos montados para estudiar la respuesta y aplicación de dicho Opam.

### A. Ganancia a lazo abierto

Utilizando el circuito de la *figura 4*, se estudió la respuesta del Opam para una señal de entrada ( $V_{in}$ ), compuesta por una señal triangular de 2V “montada” sobre una tensión continua de -2 V, 0 V y 2 V, introducida en el terminal no inversor. Además, el terminal inversor se conecta a tierra. Se polarizó el Opam con tensiones de  $V_{CC+} = 12 V$  y  $V_{CC-} = -12 V$ .

En principio, se esperaría que la tensión de salida sea amplificada siguiendo la ecuación (ec. 3), sin embargo no debe perderse de vista que los Opam amplifican la diferencia de tensión entre los terminales inversor y no inversor siempre y cuando la misma no supere la tensión de polarización. Como la ganancia del Opam es del orden de cien mil, la región en la cual el circuito trabaja en régimen es tan pequeña que no puede ser medida y el integrado se encuentra saturado para todo tiempo, i.e. la señal de salida es igual a la tensión de polarización ( $\pm 12 V$ ).



### B. Circuito No Inversor

Se realizó un estudio del circuito inversor a partir del arreglo experimental de la **figura 2**.

Se midió la respuesta en la tensión de salida  $V_{out}$  (Ch 1) en función de la tensión de entrada  $V_{in}$  (Ch 2) siendo ésta una señal sinusoidal con  $V_{pp} = 1,2$  V. Los valores de resistencia utilizados fueron de:  $R_1 = 5,44$  k $\Omega$ ,  $R_2 = 0,974$  k $\Omega$ .

Puede determinarse por medio de la ecuación (ec. 4) el factor de amplificación del circuito de dos formas: a- midiendo las resistencias; b- por el cociente entre la tensión de entrada y salida.

Además se realizaron mediciones a diferentes de frecuencias de la señal de entrada con el fin de determinar la región de respuesta lineal del circuito. Los valores de frecuencia utilizados fueron 5,4 Hz, 10,9 Hz, 110 Hz, 1,075 KHz, 107 KHz y 1,096 MHz

### C. Circuito Inversor

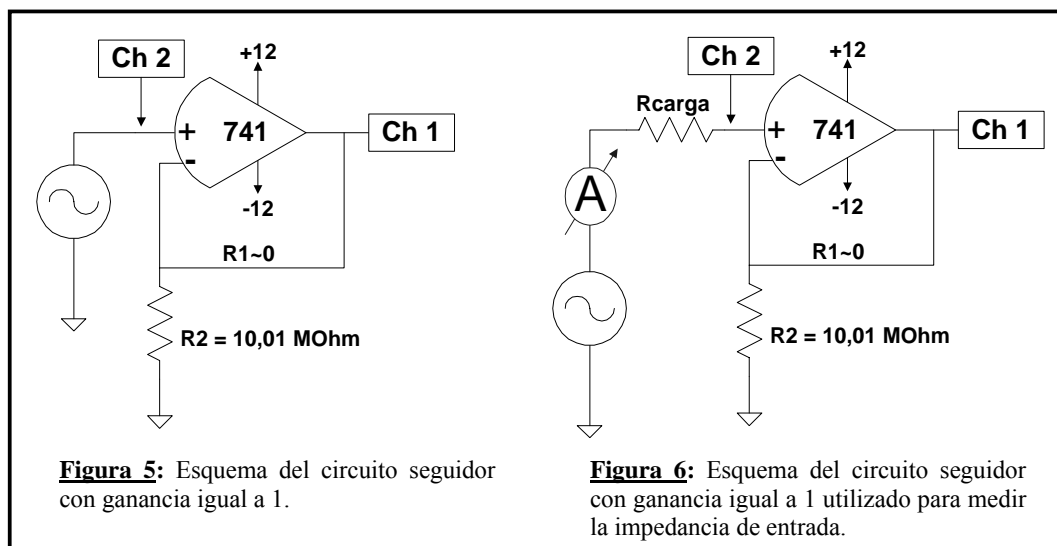
Utilizando el arreglo de la **figura 3**, se realizaron mediciones similares a las del circuito anterior. La señal de entrada utilizada fue sinusoidal ( $V_{pp}$ ) de 1,2 V sin *offset* y las resistencias fueron  $R_1 = 0,974$  k $\Omega$  y  $R_{Real} = 5,44$  k $\Omega$ . Con estos valores de resistencia se espera que la diferencia en el factor de amplificación con respecto al circuito no inversor difiera en una unidad (ec. 5). Además, se realizaron varias mediciones modificando la frecuencia de la señal de entrada con valores de 0,951 KHz, 4,94 KHz, 50,3 KHz, 101,4 KHz, 403,2 KHz y 714 KHz.

Utilizando una señal de entrada triangular de 6,84 V se midió el cambio en el valor de saturación del circuito al modificar las tensiones de polarización ( $V_{CC+}$  y  $V_{CC-}$ ) entre +12 V y +5 V.

### D. Seguidor

El concepto de un circuito seguidor es que otorgue la misma tensión en la salida que en la entrada sin retardar la señal pero, además, que genere una ganancia de corriente (y por lo tanto de potencia). Suelen ser utilizados, por ejemplo, para lograr que la pequeña señal del circuito de una radio tenga suficiente corriente para traducirse en sonido en un parlante.

Entonces, si tomamos un circuito no inversor, como el descrito en la **figura 3**, y logramos que la amplificación tienda a 1 obtendremos un circuito seguidor. Se busca entonces que la resistencia  $R_1$  tienda a cero mientras que la  $R_2$  tienda a infinito. Para lograrlo se suplantó la resistencia  $R_1$  por un cable (cuya resistencia podemos despreciar) y se usó una resistencia  $R_2$  de 10,01 M $\Omega$ . Puede suponerse así que el factor de amplificación es igual a la unidad. El arreglo experimental se esquematiza en la **figura 5**.



**Figura 5:** Esquema del circuito seguidor con ganancia igual a 1.

**Figura 6:** Esquema del circuito seguidor con ganancia igual a 1 utilizado para medir la impedancia de entrada.

Se intentó además medir la impedancia de entrada de este circuito, para lo cual se agregó un amperímetro y una resistencia de carga entre la fuente y el circuito seguidor como se muestra en la **figura 6**. Sin embargo esta impedancia no pudo ser determinada con los elementos de adquisición disponibles.

Para ambas configuraciones se utilizaron tensiones de polarización ( $V_{CC+}$  y  $V_{CC-}$ ) de  $\pm 12$  V y una tensión de entrada de 15 V<sub>PP</sub> con diferentes frecuencias (13,97 Hz, 1,07 KHz, 10,65 KHz, 81,3 KHz, 107,2 KHz y 1,093 MHz).

Con el fin de medir el *slew rate* del amplificador se utilizó un arreglo similar al de la **figura 6**. Se buscó medir entonces la diferencia en la tasa de cambio de la señal de entrada respecto de la señal de salida del amplificador, tanto para una señal ascendente, como para una descendente. Se realizaron mediciones utilizando una señal cuadrada de  $\pm 7,5$  V con diferentes frecuencias como señal de entrada.

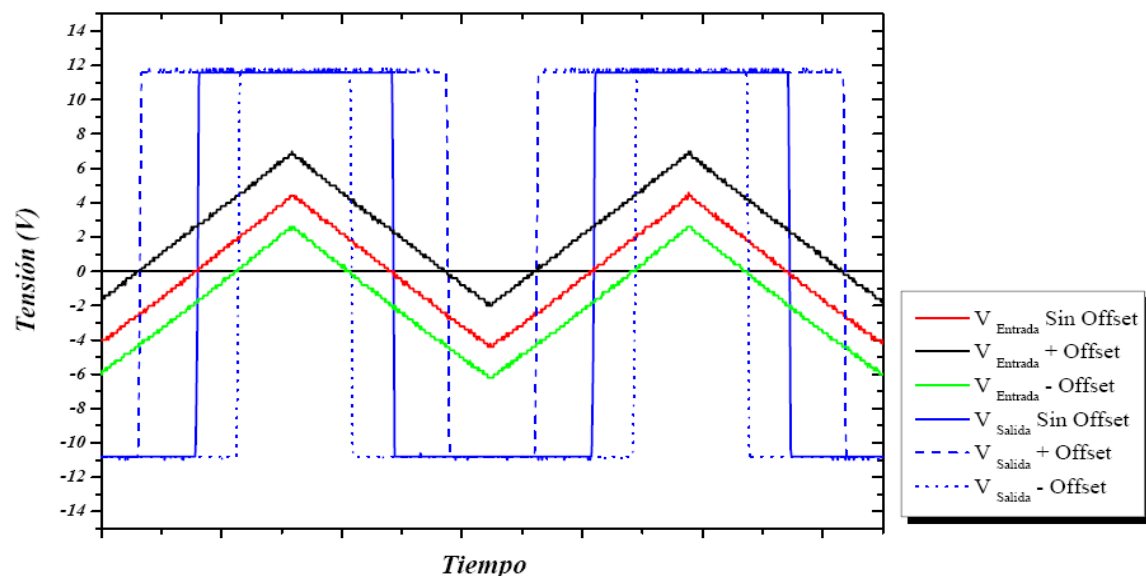
### III. Resultados Experimentales

#### A. Ganancia a lazo abierto

Como el factor de amplificación del amplificador operacional es del orden de 200 V/mV<sup>[3]</sup>, una diferencia de apenas 60  $\mu$ V entre las tensiones de entrada diferenciales ( $v_-$  y  $v_+$ ) provocará que se sature la tensión de salida del integrado. Dicha diferencia es tan pequeña que no hay forma de observarla con el osciloscopio y, por lo tanto, se genera una onda cuadrada que pasa de máximo a mínimo según el signo de la tensión de entrada.

El tiempo en que este circuito está en régimen es tan pequeño que no puede ser detectado. Esto se confirma mediante la **figura 7** ya que la zona en que el circuito está en régimen es para tensiones cercanas al milivolt y resulta imposible de detectarla con los componentes y el arreglo experimental utilizado. Sin embargo este circuito es interesante como generador ya que, por ejemplo, se puede producir fácilmente una señal cuadrada a partir de una tensión de entrada sinusoidal. De esta forma se puede aprovechar este tipo de comportamiento como un traductor analógico-digital.

En la **figura 7** se muestra la respuesta del amplificador para tres señales triangulares con diferente *offset* (+ 2 V, 0 V y - 2 V). Claramente el amplificador está saturado: la señal pasa de + 12 V para voltajes positivos del generador a - 12 V si la tensión del generador es menor que el cero de potencial.



**Figura 7:** Generación de una señal cuadrada de 12V a partir de una señal triangular con diferentes *offset* utilizando un Opam 741.