

# PRÁCTICA DE LABORATORIO 1

Ignacio Nahuel Chantiri [69869/1]

Universidad Nacional De La Plata

—El informe presentado a continuación es un trabajo realizado en base a la primera práctica de laboratorio de la materia “Circuitos Electrónicos I” de la carrera Ingeniería Electrónica de la UNLP, y está orientado principalmente al estudio de la realimentación en circuitos electrónicos.

## I. INTRODUCCIÓN

La práctica tiene como objetivo el estudio en bajas frecuencias de dos topologías de amplificadores: inversora, y no inversora, que emplean la realimentación como método para lograr una mejora en la estabilidad y la linealidad de la ganancia del amplificador

Se disponen dos placas de ensayo distintas:

La primera se utilizará para armar cada topología y probar distintos valores de resistencias para cada una, afectando así su ganancia. Se realizará también un análisis de la respuesta en frecuencia.

La segunda placa consta de una configuración de dos transistores en par complementario, con la posibilidad de realimentar su salida a través de un amplificador operacional. Servirá para comparar y comprobar si existe una mejora en la linealidad de la respuesta del amplificador.

## II. MARCO TEÓRICO

Para el siguiente análisis y los posteriores, se considerará al amplificador operacional (AO) en condición de ganancia infinita.

Esto implica que en sus terminales de entrada:

- La diferencia de voltaje es 0,
- la corriente entrante al AO (por cualquiera de sus terminales) es 0.

De esta manera, podemos obtener la ganancia de una manera mucho más práctica mediante teoría de circuitos clásica.

La entrada del amplificador se considera la de los terminales de *SeñalIn*, y la salida, los de *SeñalOut*, quedando ambas referenciadas a tierra

### A. Topología Inversora:

Considerando la aproximación anterior, tenemos que el voltaje en el nodo de la terminal inversora es 0V. Además,  $i1$  e  $i2$  son iguales:

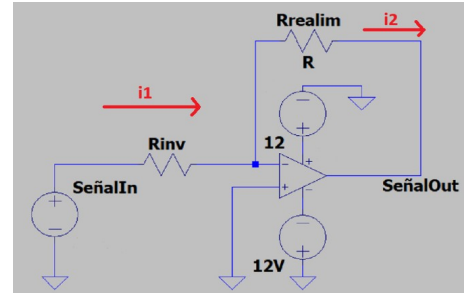


Diagrama 1: Amplificador tipo Inversor

$$i1 = i2 \Rightarrow \frac{SeñalIn}{R_{inv}} = - \frac{SeñalOut}{R_{realim}} \Rightarrow A_v = \frac{SeñalOut}{SeñalIn} = - \frac{R_{realim}}{R_{inv}}$$

La ganancia  $A_v$  será:

$$A_v = - \frac{R_{realim}}{R_{inv}}$$

Observamos que depende únicamente de los valores de resistencias, y no de la ganancia del AO.

Además, esta configuración invertirá siempre la señal de entrada.

### B. Topología No-Inversora

Considerando nuevamente la aproximación en condición de ganancia infinita, tenemos que el voltaje en el nodo de la terminal inversora es *SeñalIn* [V]. Además,  $i1$  e  $i2$  son iguales:

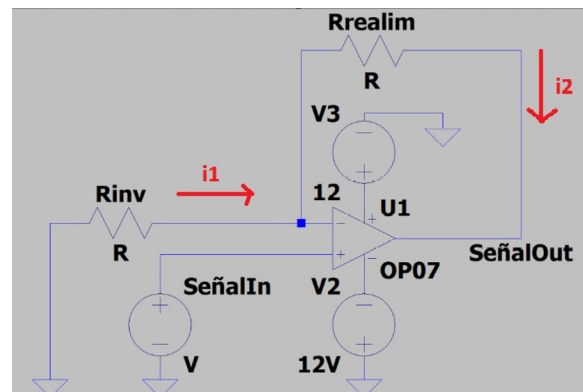


Diagrama 2: Amplificador tipo No-Inversor

$$i1 = i2 \Rightarrow \frac{-SeñalIn}{R_{inv}} = \frac{SeñalIn - SeñalOut}{R_{realim}}$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{SeñalOut}{SeñalIn} = \frac{R_{inv}}{R_{inv}} + \frac{R_{realim}}{R_{inv}} = 1 + \frac{R_{realim}}{R_{inv}}$$

Por lo que la ganancia será:

$$A_v = 1 + \frac{R_{realim}}{R_{inv}}$$

Nuevamente, la ganancia depende solo de las resistencias, pero en este caso la señal no se invierte.

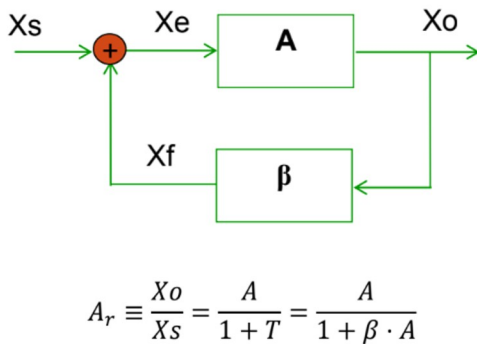
### C. Realimentación:

#### Efectos en las distorsiones

Un amplificador con un parámetro ganancia  $A$  no lineal puede linealizarse mediante la realimentación.

Se ha visto en los dos ejemplos anteriores que la ganancia realimentada de cada configuración es totalmente ajena al valor de ganancia del amplificador operacional, y solo depende de los valores de las resistencias.

Observando el siguiente diagrama, sabemos la ganancia de realimentación:



Entonces, para ganancias de lazo directo (en nuestro caso,  $A$ ) muy grandes, la ganancia de realimentación puede aproximarse como:

$$A_r \cong \frac{1}{\beta}$$

Donde  $\beta$  será un parámetro constante y muchísimo más estable, pues puede estar compuesto por elementos pasivos (resistencias). Esto otorga a nuestro amplificador una menor sensibilidad a cambios externos, que en consecuencia reduce la variación de la ganancia final.

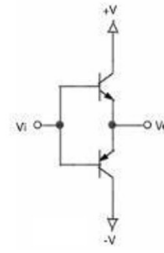
Pero lo más importante de esta observación, es justamente que la ganancia realimentada no depende de  $A$  en absoluto, sino de un valor prácticamente constante. Esta independencia de  $A$  es preferible, ya que en general los AO, al estar compuestos por elementos activos (transistores), suelen tener una ganancia muy variante ante distintos factores, como por ejemplo, la temperatura.

En la experiencia II se utilizará esta ventaja para linealizar la ganancia con distorsión provocada por una etapa de amplificación con transistores.

### D. Transistores en par complementario:

Este circuito consiste en una etapa de amplificación que emplea un transistor NPN y un PNP a modo de complemento,

de tal manera que la entrada-salida sea de base a emisor (con colector común) con los emisores y bases de cada transistor unidas.



Esta etapa tiene como principal desventaja una inconsistencia en su ganancia, pues existirán valores para la señal de entrada para los cuales ninguno de los dos transistores estarán polarizados en zona activa. Esto se traduce a una ganancia no lineal:

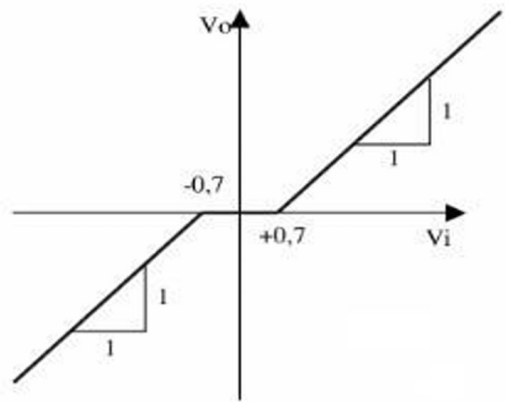


Gráfico 1: Ganancia del amplificador en par complementario

Se intentará corregir esta distorsión en la experiencia II mediante la realimentación de la salida, como se vió en la sección anterior.

## III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### EXPERIENCIA I: PRIMERA PLACA

Recordando el objetivo de este estudio, configuraremos la **placa 1**, que se presenta en el **Diagrama 3**. primero en topología inversora, y luego no inversora, y estudiaremos su comportamiento para distintos valores de resistencias. Para cada una de ellas esperamos que se comprueben los valores de ganancias hallados en la sección II. **MARCO TEÓRICO.**

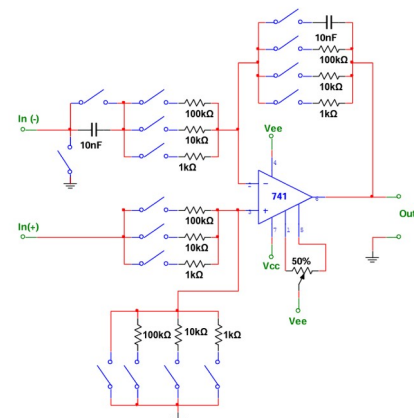


Diagrama 3: Placa 1 y sus posibles configuraciones

### A. Configuración Inversora:

Según visto anteriormente, la topología inversora tiene ganancia:

$$A_v = - \frac{R_{realim}}{R_{inv}}$$

Se tomó la **placa 1** y se colocaron jumpers de manera de formar la topología adecuada, colocando:

- El terminal “no inversora” del amplificador operacional a tierra,
- la señal de entrada a la terminal “inversora” a través de una resistencia “**R<sub>inv</sub>**”,
- realimentando el terminal “inversor” con la salida, a través de una resistencia “**R<sub>realim</sub>**”.

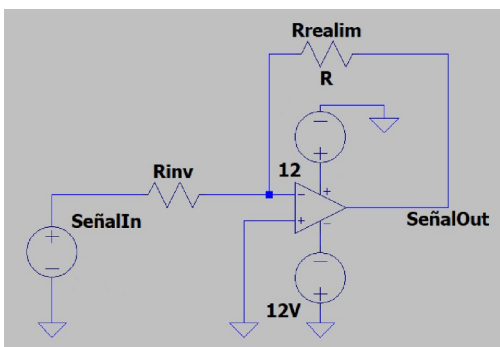


Diagrama 4

La **Imagen 1** muestra el resultado de dichas conexiones, superpuesto con el esquemático anterior. (las entradas utilizadas del amplificador operacional son a modo ilustrativo y no necesariamente corresponden a los terminales conectados realmente).

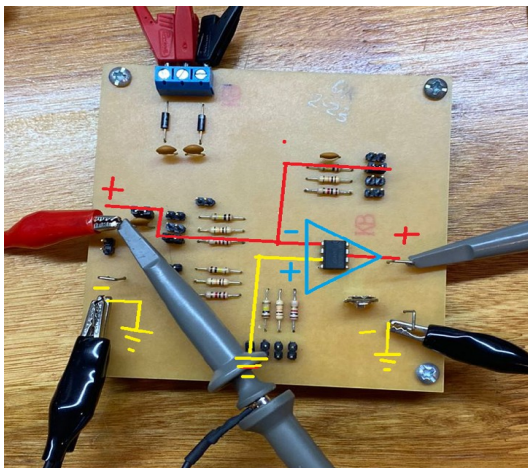


Imagen 1: Conexión de topología inversora. Para este ejemplo, se conectó la resistencia de 1k ohm para la entrada y la resistencia de 100k ohm para la realimentación, resultando en una ganancia de  $A_v = -100k/1k = -100$ .

Se observa en la parte superior de la imagen la conexión que alimenta al amplificador operacional con una tensión de +12v en el terminal positivo y -12v en el negativo.

A la izquierda, los conectores rojos y negros corresponden a la salida de un generador de funciones, conectados a la entrada del amplificador, es decir, entre **SeñalIn** y tierra. Entre los mismos terminales se haya conectada la pinza 1 de un osciloscopio.

A la salida, entre la salida del AO y tierra, se encuentra conectada la pinza 2 del osciloscopio.

Una vez establecido el circuito, se inyectó a la entrada una señal de frecuencia 1khz y amplitud 100mV (200mV pp) con el generador de funciones, y se procedió a evaluar mediciones con el osciloscopio para los distintos valores de resistencias

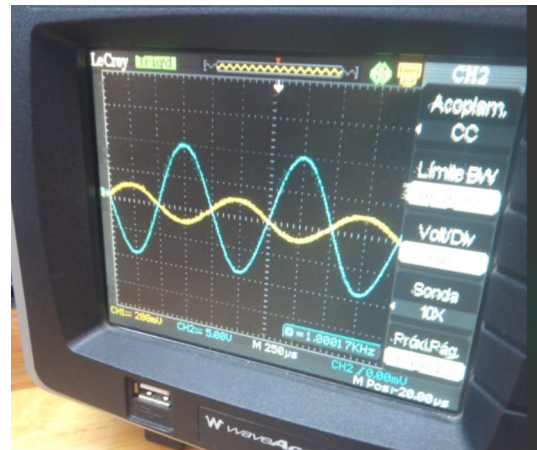


Imagen 2: Lectura del osciloscopio a entrada (amarillo) y la salida (celeste) del amplificador.

La primer lectura del osciloscopio se presenta en la **Imagen 2** y corresponde a los mismos valores de resistencias elegidos en la **Imagen 1**. ( $R_{inv}=1k\text{ ohm}$ ,  $R_{realim}=100k\text{ ohm}$ ).

Para el caso específico con dichos valores de resistencias, la ganancia teórica esperada era:

$$A_v = (-100k/1k) = -100.$$

Según se observa, se obtuvo ese mismo resultado, pues la señal de entrada, de amplitud 100mV, se vió amplificada a la salida hasta llegar a un valor de 10V, es decir, ganó 100 veces. Se manifiesta también la inversión esperada como un desfase de 180 grados.

Seguidamente se probó con los siguientes valores de resistencias:

R <sub>inv</sub> (kΩ)	R <sub>realim</sub> (kΩ)	A <sub>v</sub> teórica (-R <sub>realim</sub> /R <sub>inv</sub> )
1	1	-1
1	10	-10



En las siguientes imágenes se muestran las mediciones del osciloscopio para estas ultimas configuraciones:

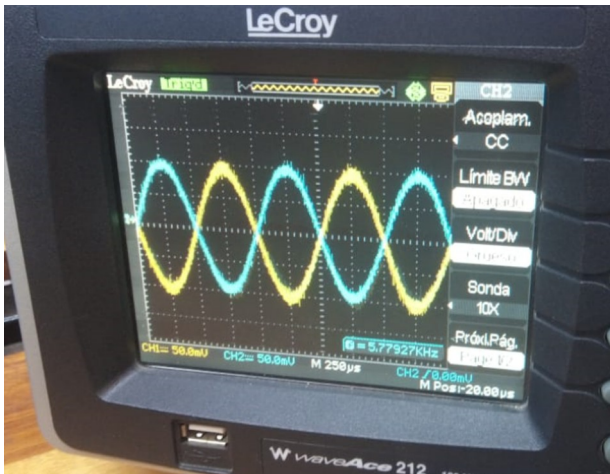


Imagen 3: Lectura del osciloscopio para entrada (amarillo) y salida (celeste), con ganancia -1 ( $R_{inv}=R_{realim}=1k\Omega$ )

### B. Configuración No-Inversora:

Según visto anteriormente, la topología no-inversora tiene ganancia:

$$A_v = 1 + \frac{R_{realim}}{R_{inv}}$$

Se tomó la placa 1 y se colocaron jumpers de manera de formar la topología adecuada, colocando:

- El terminal "inversor" del amplificador operacional a tierra, a través de una resistencia " $R_{inv}$ ",
- la señal de entrada al terminal "**no-inversor**",
- realimentando el terminal "**inversor**" con la salida, a través de una resistencia " $R_{realim}$ ".

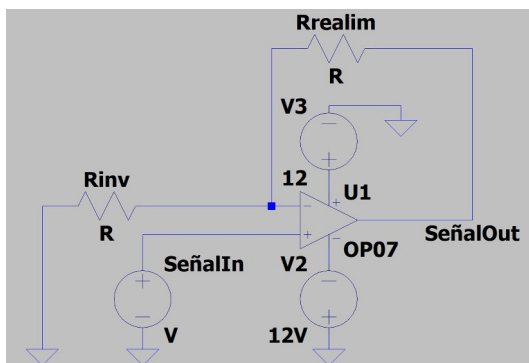


Diagrama 5

Por lo tanto, el circuito quedó conectado de la siguiente manera:

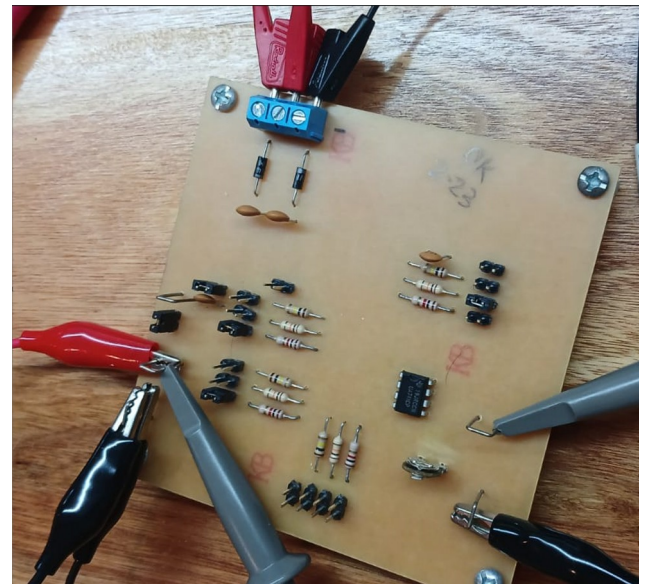


Imagen 4: En el ejemplo de la foto, se conectó la resistencia de  $R_{inv}=1k\Omega$  para la entrada y la resistencia  $R_{realim}=100k\Omega$  para la realimentación, resultando en una ganancia de  $A_v = 1 + 100k/1k = -101$ .

Una vez establecido el circuito, se volvió a inyectar una señal de frecuencia 1kHz y amplitud 100mV (200mV pp) con el generador de funciones, y a evaluar mediciones con el osciloscopio para los distintos valores de resistencias.

La primer lectura del osciloscopio corresponde a los mismos valores de resistencias elegidos en la imagen anterior. ( $R_{inv}=1k\Omega$ ,  $R_{realim}=100k\Omega$ ).

Para el caso específico con dichos valores de resistencias, la ganancia teórica esperada era:

$$A_v = 1 + 100k/1k = 101.$$

Se obtuvo ese mismo resultado empíricamente según la medición hecha con el osciloscopio.

Seguidamente se probó con los siguientes valores de resistencias:



Imagen 5: La señal amarilla corresponde a la entrada, la celeste a la salida. Se observa ambas señales coincidiendo gráficamente, pero con una escala de 1:100. La señal de entrada se amplificó aproximadamente 100 veces (101). No se advierte ningún desfase.

Rinv (kΩ)	Rrealim (kΩ)	Av teórica (-Rrealim/Rinv)
1	1	2
1	10	11

En las siguientes imágenes se muestran las mediciones del osciloscopio para estas últimas configuraciones:

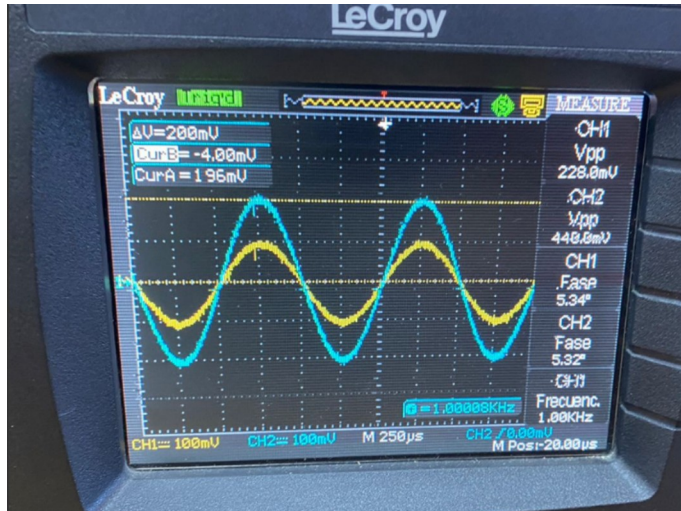


Imagen 6:  $A_v = 2$   
Entrada en amarillo, Salida en celeste.



Imagen 7:  $A_v = 11$ . Entrada en amarillo, salida en celeste. Se llega a apreciar que la ganancia no es exactamente de 10 veces, sino un poco más.

### C. Análisis en frecuencia:

#### CONFIGURACIÓN INVERSORA y NO-INVERSORA

Se presenta el análisis del caso de ganancia  $A_v = 2$  ( $R_{realim} = R_{inv} = 1k$ ) para la configuración **No-Inversora** y luego solamente las mediciones para el resto de los casos ( $A_v = 11$ ,

$A_v = 101$ ,  $A_v = -1$ ,  $A_v = -10$ ,  $A_v = -100$ ) y , ya que el procedimiento es similar.

#### Ancho de Banda

Mediante el uso del generador de funciones, se realizó un barrido de frecuencia con la señal de entrada hasta hallar una atenuación de 3db.

La aproximación utilizada fue 0.7 veces la señal de entrada.

Para la entrada de 226 Vpp [mV], esto es:

$$0.7 \cdot 226 \text{ [mV]} = 158.2 \text{ Vpp [mV]}$$

Para una mayor precisión, se utilizó las mediciones de Vpp que provee el osciloscopio, en el costado izquierdo de la pantalla. Entonces se barrió la frecuencia de entrada hasta hallar 158.2 mV Vpp en la salida, el cuál coincidió con una frecuencia de 381kHz. Esta frecuencia entonces es el ancho de banda para  $A_v = 2$ , configuración no inversora.

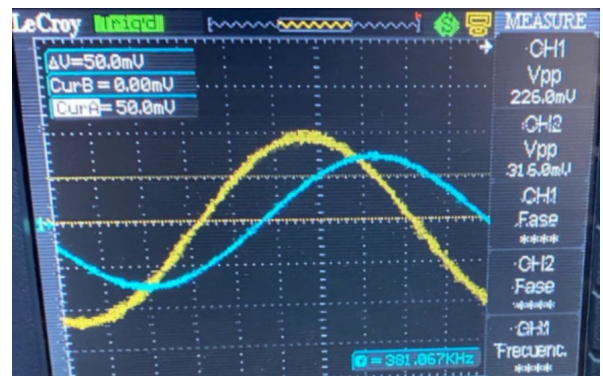


Imagen 8: Mediciones efectuadas. El valor Vpp del canal de salida (CH2) no se aprecia claramente, pero la imagen fue tomada a un valor de alrededor 158mV

Los resultados para las demás ganancias se obtuvieron de esta misma manera y se encuentran presentados de forma mas completa más adelante, al final de la sección D, para facilitar la comparación.

#### Polo dominante

Este valor de atenuación corresponde con un desfase en la salida de 45 grados con respecto a la entrada, y sucede una década antes del polo dominante. De esta manera deducimos la ubicación de este polo, una década después de 381kHz, en 3.81MHz



Imagen 9: Generador de funciones inyectando una señal de 381kHz



Producto Ganancia-Ancho de Banda

Este valor impone un compromiso entre el factor de amplificación y el ancho de banda total en el que opera el sistema.  
Para este caso:

$$G \cdot \Delta f = 2 \cdot 381 \text{ kHz} = 762 \text{ kHz}$$

Se realizó sucesivamente el mismo proceso para el resto de ganancias. Los resultados se presentan en *Tabla 1* y *Tabla 2*, a continuación.

A continuación se detallan las frecuencias medidas, la ubicación de los polos dominantes, y el producto Ganancia-Ancho de banda para cada ganancia y configuración.

TABLA I. Resultados de la topología inversora

$R_1$ (k $\Omega$ )	$R_f$ (k $\Omega$ )	$G$ (veces)	$f_{-3dB}$ (kHz)	$ G \cdot f_{-3dB} $
1	1	-1	800	800
1	10	-10	78	780
1	100	-100	8	800

TABLA II. Resultados de la topología no inversora

$R_1$ (k $\Omega$ )	$R_f$ (k $\Omega$ )	$G$ (veces)	$f_{-3dB}$ (kHz)	$ G \cdot f_{-3dB} $
1	1	2	381	762
1	10	11	75	825
1	100	101	8	808

Se observa que a mayor ganancia, menor es la banda en la que opera correctamente el amplificador, debido a esto, el producto ganancia ancho de banda se mantiene casi constante para los distintos ensayos.  
De esta manera concluye el estudio de la primera placa.

EXPERIENCIA II:  
MEJORA DE NO-LINEALIDADES (PLACA 2)

La siguiente placa a utilizar se encuentra esquematizada en el *Diagrama 6*.

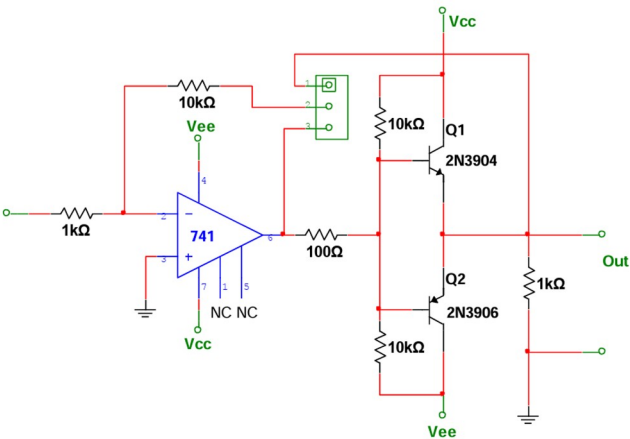


Diagrama 6: La placa 2 posee dos etapas: una por medio del AO, y la otra compuesta por los transistores en par complementario

Consiste de dos etapas de amplificación, con la posibilidad de realimentar la salida *Out* con la entrada

- Jumper conectando (2-3): Se realimenta (en configuración inversora) el amplificador operacional con su salida. Esta etapa gana  $A_v = -10\text{k}/1\text{k} = -10$ . La salida es la entrada de la etapa de amplificación de los transistores Q1 y Q2, dispuestos en par complementario.
- Jumper conectando (1-2): Se realimenta el amplificador (en configuración inversora) con la salida “Out” del circuito, luego de la etapa de los transistores.

Mediciones previas

Primeramente, se analizó la respuesta de la primer etapa, inyectándole una señal de 100mV Vpp, f=1kHz. Se corroboró que su salida sea efectivamente de 2V Vpp

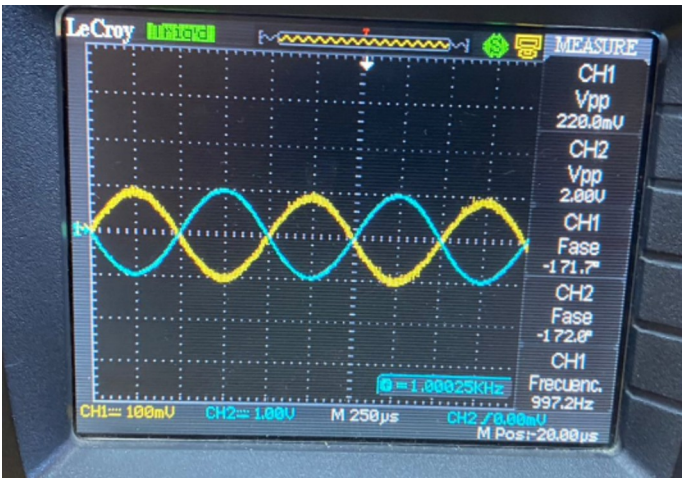


Imagen 10: Entrada (amarillo) - salida (celeste) del AO. Se observa la ganancia esperada de -10

De ahora en adelante, todas las mediciones de osciloscopio son entre la entrada *In* y la salida *Out*, es decir, a través de ambas etapas (AO y transistores).

Realimentando solo el amplificador operacional (jumper 2-3):

Considerando lo visto en el marco teórico *sección C*, la disposición en par complementario nos ocasiona una no-linealidad en la ganancia, ya que para valores entre -0.7 y 0.7, la salida es 0v.

Se conectó entonces el jumper 2-3, de manera tal que la única realimentación que existe es la del AO desde su propia salida, configurado para una ganancia  $A_v = -10$ . De esta manera, la entrada a la segunda etapa llega a 0.7V cuando la entrada a la placa es 70mV.

Es decir, la salida será 0v cuando la entrada esté en el rango -0.07V / 0.07V .

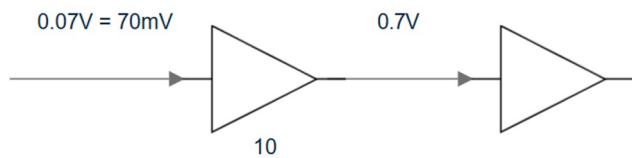


Diagrama 7

Para corroborar lo anterior, se midió entonces este rango. En la imagen siguiente se observa que la salida deja de ser 0V cuando la señal de entrada es aproximadamente 70mV.

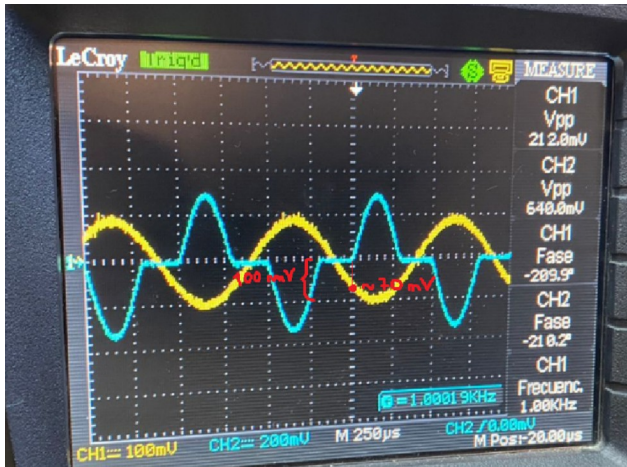


Imagen 11: Medición con el AO realimentado desde su salida. El rango de no linealidad se encuentra ahora entre -70mV y 70mV.

De esta manera, la ganancia sigue siendo claramente no lineal para los voltajes con los que estamos trabajando, ya que gran parte del tiempo, la señal de entrada se encuentra por debajo de los 70mV.

#### Realimentando desde Out (1-2):

En configuración de realimentación desde la salida final hacia la entrada inversora del AO, estamos realimentando según lo visto en el marco teórico.

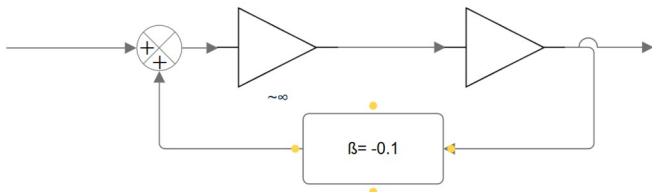


Diagrama 8

El amplificador operacional otorga una ganancia muy alta al circuito amplificador a lazo directo, por lo que la ganancia es simplemente  $A_{vr} = 1/\beta = -10$ .

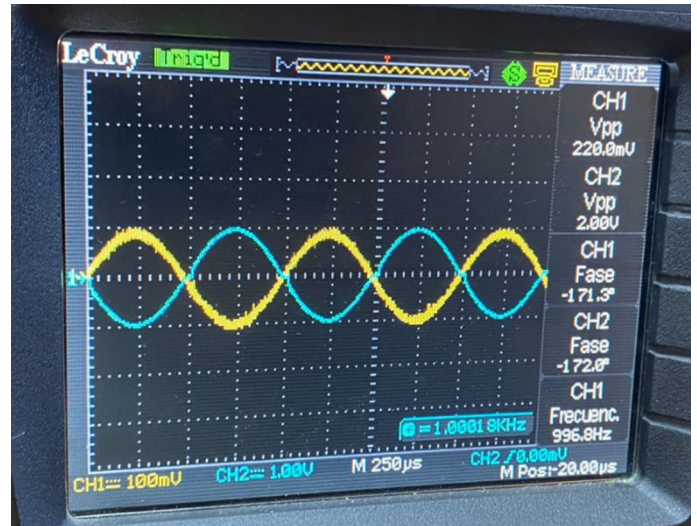


Imagen 12: La distorsión prácticamente se elimina.



Imagen 13: Distorsión vista a una escala más pequeña.

#### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este laboratorio son acordes a lo estudiado teóricamente y proporcionó una forma muy intuitiva y práctica de ver los efectos de realimentación en distintos circuitos.

#### BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

- Paul R. Gray, Paul J. Hurst, Stephen H. Lewis, Robert G. Meyer - Analysis and Design of Analog Integrated Circuits (2001, Wiley)
- Microelectronics - Millman - Solution Manual.
- Apuntes de la materia.