

Laboratorio 2 - Circuitos Electrónicos I - Ing. Electrónica

Ignacio Nahuel Chantiri 69869/1
Universidad Nacional De La Plata, Argentina.

Resumen—El laboratorio presentado a continuación describe el análisis del integrador operacional y del derivador operacional al inyectarse en su entrada ondas cuadradas y triangulares de distintas frecuencias, a modo de dejar en evidencia la ubicación de sus polos dominantes. Además, en una segunda parte, se incluyó el estudio de un amplificador de instrumentación compuesto por dos operacionales. Se realizó con él una compensación en frecuencia de cada AO, ya que el modelo utilizado (LM301) lo permite a través de dos terminales específicos. Para ello, se conectó a estos terminales capacitores de distintos valores y se observó el comportamiento frecuencial.

I. INTRODUCCIÓN

II. MARCO TEÓRICO

II-A. Integrador Operacional.

El Circuito Integrador que utilizaremos en el laboratorio es el mostrado a continuación:

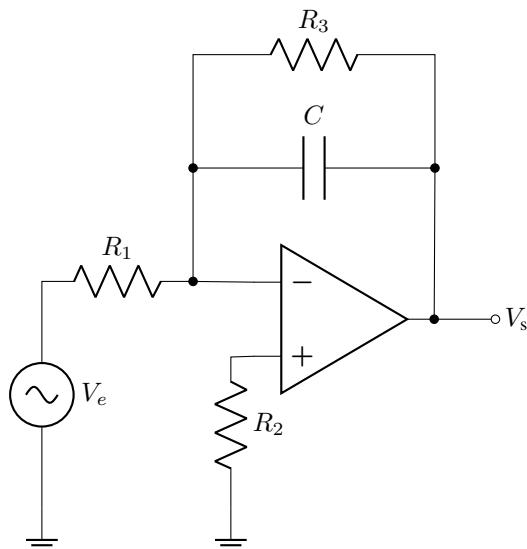


Fig. 1. Integrador Operacional

Se observa que el AO está en configuración inversora por lo que su ganancia es:

$$A_v = -\frac{Z}{R_1}, \text{ con } Z = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + sC} \quad (1)$$

Reemplazando, se obtiene una ecuación que pone en evidencia la ubicación del polo:

$$A_v = -\frac{-1}{CR_1(s + \frac{1}{CR_3})} \quad (2)$$

La ubicación del polo queda definida por los valores de C y R_3

Se puede realizar entonces un análisis frecuencial en dos zonas de importancia: a bajas frecuencias, cuando el capacitor se puede considerar como un circuito abierto, y a altas frecuencias, cuando el capacitor se comporta como un cortocircuito.

II-A.1. Integrador - Bajas Frecuencias: A frecuencias bajas (mucho menores que las del polo, al menos una década antes), la rama del capacitor se puede despreciar y la ganancia del circuito es:

$$A_v = -\frac{R_3}{R_1} \quad (3)$$

Se deduce entonces que el Circuito Integrador no está funcionando como tal

II-A.2. Integrador - Altas Frecuencias: A frecuencias altas (mucho mayores que las del polo, al menos una década después), la rama del capacitor se puede despreciar y la ganancia del circuito pasa a ser:

$$A_v = -\frac{1}{R_1 s C} \quad (4)$$

Se observa ahora que en este rango de frecuencias, la transferencia A_v es un integrador (junto con una ganancia asociada $-\frac{1}{R_1 C}$)

II-B. Derivador Operacional.

El Circuito Derivador que utilizaremos en el laboratorio es el mostrado a continuación:

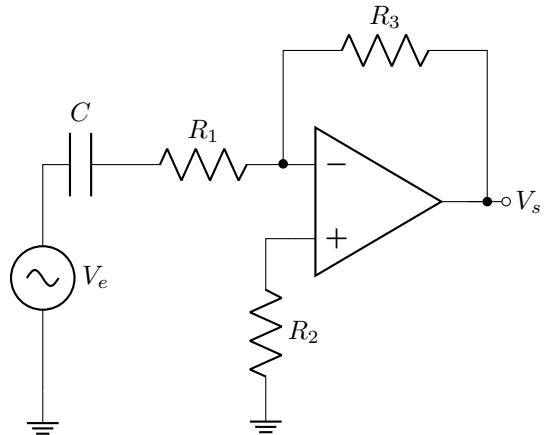


Fig. 2. Derivador Operacional

Se observa que el AO está en configuración inversora por lo que su ganancia es:

$$A_v = -\frac{R_3}{Z}, \text{ con } Z = R_1 + \frac{1}{sC} \quad (5)$$

Operando, se llega a la función de transferencia:

$$A_v = -\frac{-sR_3}{R_1(s + \frac{1}{CR_1})} \quad (6)$$

La ubicación del polo queda definida por los valores de C y R_1 .

La ubicación del cero está fija en el origen.

Para el análisis asintótico de la sección II-B.1 y II-B.2, resulta más cómodo escribir la transferencia del siguiente modo:

$$A_v = -\frac{-R_3}{(R_1 + \frac{1}{sC})} \quad (7)$$

Al igual que para el integrador, para el derivador se puede realizar también un análisis frecuencial en dos zonas de importancia: a frecuencia cero (continua), cuando el capacitor se puede considerar como un circuito abierto, y a altas frecuencias, cuando el capacitor se comporta como un cortocircuito.

II-B.1. Derivador - Bajas Frecuencias: En frecuencia cero, es decir, con una señal continua en la entrada V_e , el capacitor C actúa como circuito abierto, de modo que la salida V_s es cero. En escencia, se está derivado una señal continua, por lo que es lógico que su derivada sea nula. A bajas frecuencias (distinta de cero), el comportamiento del capacitor C es predominante ante la resistencia R_1 , por lo que de (7) se puede aproximar:

$$A_v = -sCR_3 \quad (8)$$

Se concluye entonces que a bajas frecuencias, el circuito se comporta correctamente como un Derivador.

II-B.2. Derivador - Altas Frecuencias: A frecuencias altas (mucho mayores que las del polo, al menos una década después), el capacitor C se comporta prácticamente como un cable, de modo que la transferencia aproximada queda dada solo por las resistencias R_1 y R_3 , y el comportamiento capacitivo se ve reducido en su totalidad. Se aproxima entonces, nuevamente de (7), la siguiente transferencia:

$$A_v = -\frac{R_3}{R_1} \quad (9)$$

Por lo que queda en evidencia que para altas frecuencias se pierde el efecto Derivador del circuito, quedando simplemente una ganancia $-\frac{R_3}{R_1}$.

II-C. Amplificador de Instrumentación

A continuación se analizará el circuito específico que se utilizó en la segunda parte del laboratorio. El diagrama de la placa utilizada es el siguiente:

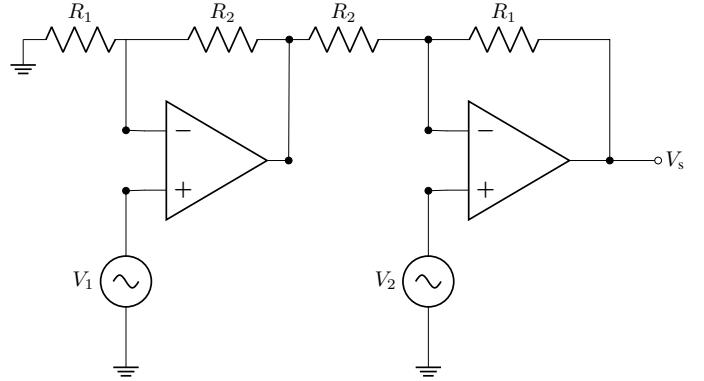


Fig. 3. Amplificador de Instrumentación. Se prescindió de las fuentes de polarización y de los terminales de compensación de frecuencia.

De la figura (3), se observan dos etapas:

- **Etapa 1: Seguidor** El primer AO se halla en configuración no-inversora, de modo que su ganancia está dada por:

$$A_{v1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

El nombre *Seguidor* se debe a que la ganancia es de aproximadamente 1 para la entrada V_1 , dado que se suelen trabajar valores de resistencias tales que $R_1 \gg R_2$.

- **Etapa 2: Amplificador y Comparador** El segundo AO se halla también en configuración no-inversora, y su ganancia está dada por:

$$A_v = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (11)$$

Las resistencias se eligen de modo que sí exista una ganancia en esta etapa.

Como entrada, se realiza una comparación entre la salida de la etapa 1, y una nueva señal de entrada V_2 .

Cuando se presentan ambas etapas juntas se tiene el Amplificador de Instrumentación, un circuito que resta sus dos entradas, V_1 y V_2 , y las multiplica por un factor, definido por la ganancia de la segunda etapa. El resultado es un circuito cuya principal característica es el *rechazo al modo común (CMRR)*.

II-D. Compensación de Amplificadores Operacionales

Algunos Amplificadores Operacionales, como el LM301 utilizado en este laboratorio, cuentan con dos terminales que permiten ubicar su polo dominante. Esto se logra mediante la conexión de un capacitor de compensación entre dichos terminales, de manera que el valor de capacitancia defina la ubicación.

La Datasheet del LM301 de Motorola, por ejemplo, propone dos valores distintos de Capacidad para el lazo de compensación: 3.0pF y 30pF, y su respuesta en frecuencia se encuentra graficada en la Figura 4.

Figure 8. Open Loop Frequency Response

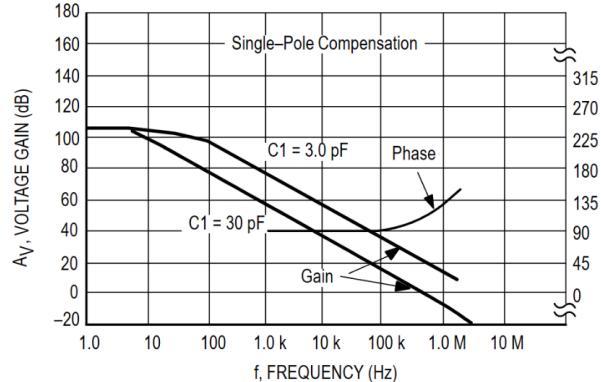


Fig. 4. Respuesta en frecuencia del AO LM301 a Lazo Abierto

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El laboratorio se dividió en el estudio de dos placas, la primera conteniendo dos circuitos: un Derivador Operacional y un Integrador Operacional.

La segunda placa consiste en dos amplificadores operacionales conectados para conformar un Amplificador de Instrumentación.

En la siguiente sección (*III-A*) se desarrollará el análisis experimental de la primera placa. En la sección (*III-B*), la de la segunda.

III-A. Placa 1, Integrador y Derivador

Se propuso estudiar el rango de correcta operación del Circuito Integrador y del Derivador vistos en la *Sección II: Marco Teórico*. Se ignoró el análisis de ganancia/amplificación del circuito. Además, recordar que la configuración del circuito es del tipo inversora, por lo que la salida también se verá afectada por un desfase de 180 grados.

III-A.1. Construcción de la Placa 1: Consta de un Amplificador Operacional LM741 con terminales abiertas, de modo que se puedan realizar distintas configuraciones utilizando jumpers. El AO se alimentó con una tensión V_{cc} de 12V. El diagrama a continuación describe la Placa 1:

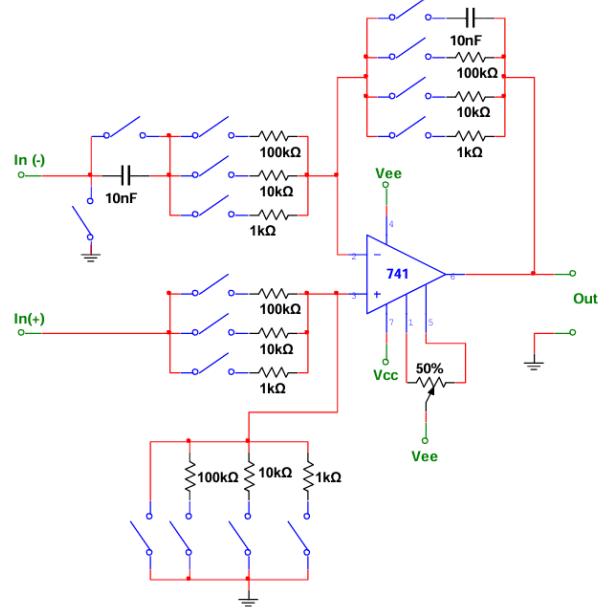


Fig. 5. Placa 1 y sus posibles configuraciones

III-A.2. Integrador Operacional: Se conectó, mediante jumpers, los correspondientes terminales para que se forme el circuito de la Figura 6. Se conectó a la entrada el generador de señales y un par de puntas del osciloscopio, y a la salida el otro par. La conexión resultante se observa la imagen de la Figura 7:

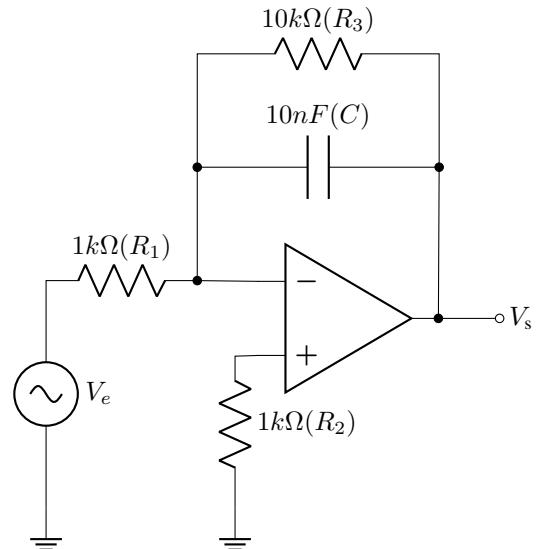


Fig. 6. Integrador Operacional, con los valores utilizados de la Placa 1.

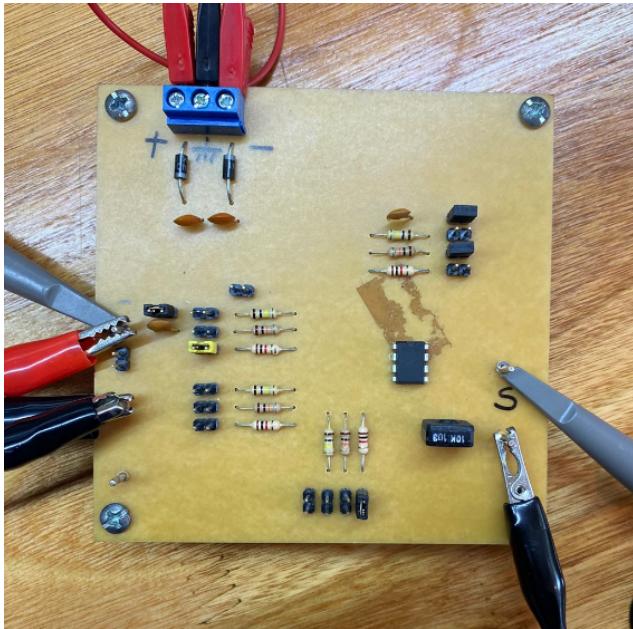


Fig. 7. Placa 1 en configuración de Integrador

El objetivo de este estudio es determinar el rango de correcta operación del Integrador Operacional propuesto, para ello se realizó un barrido de frecuencia y luego se comparó los resultados con lo esperado según lo visto en la Sección II: Marco Teórico.

Se muestran a continuación tres mediciones de osciloscopio para una función Cuadrada de frecuencias 1kHz, 5kHz y 20kHz como entrada:

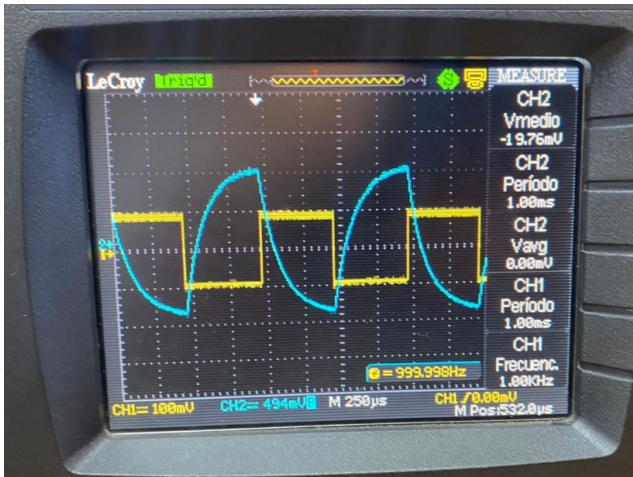


Fig. 8. Medición de Osciloscopio del Integrador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una función Cuadrada de frecuencia 1kHz



Fig. 9. Medición de Osciloscopio del Integrador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una función Cuadrada de frecuencia 5kHz



Fig. 10. Medición de Osciloscopio del Integrador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una función Cuadrada de frecuencia 20kHz

Pasemos a analizar los resultados. El integrador deberá tener como salida una función Triángulo para la entrada de la función Cuadrada.

Se observa que esto no es cierto para el caso de la entrada de baja frecuencia de 1kHz, pero sí lo es para la entrada de alta frecuencia de 20kHz, mientras que para una frecuencia media-baja, de 5kHz, se obtiene un resultado casi correcto, pues la salida no es un Triángulo perfecto.

Esto se corresponde con lo visto en previamente en la Sección II: Marco Teórico acerca de la existencia de un polo. De (2), se tiene:

$$A_v = -\frac{-1}{(10nF)(1k\Omega)(s + \frac{1}{(10nF)(10k\Omega)})} \quad (12)$$

$$A_v = -\frac{-100k}{(s + 10k)} \quad (13)$$

Por lo que la ubicación del polo es en

$$s = -10k \rightarrow f \approx 1591.54Hz$$

Es por ello que para frecuencias cercanas a 1591Hz (1kHz , 5kHz), el funcionamiento del Circuito Integrador no es el deseado, pero sí lo es para frecuencias mucho mayores (20kHz).

Tener en cuenta que este comportamiento quedó determinado por la ubicación del polo, que está en función de los valores de R_3 y C .

Por último, se realizó un barrido de frecuencia, pero esta vez con una función Triangular en la entrada. Los valores de frecuencia analizados, el proceso y la conclusión es similar al caso de la función cuadrada, por lo que solo se incluirán las imágenes de las tres medidas del osciloscopio. La diferencia notable es que la integración de la función Triángulo da como resultado una función parábola.

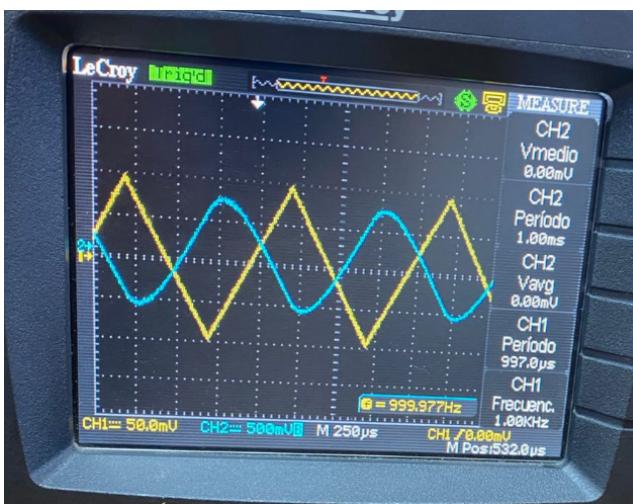


Fig. 11. Medición de Osciloscopio del Integrador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una función Triángulo de frecuencia 1kHz . La salida no es la Parábola esperada.

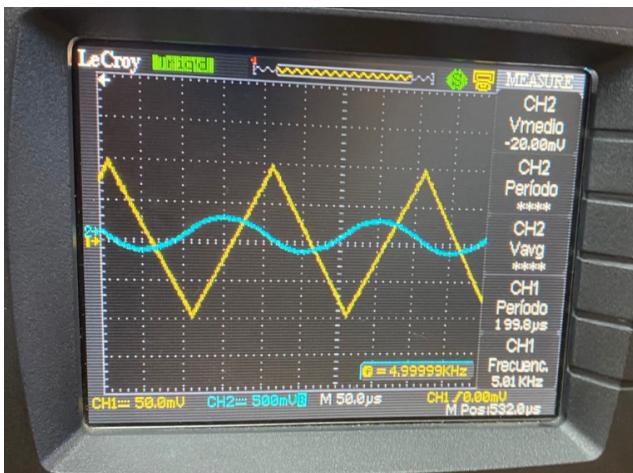


Fig. 12. Medición de Osciloscopio del Integrador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una función Triángulo de frecuencia 5kHz . La salida se asemeja mucho a la Parábola.

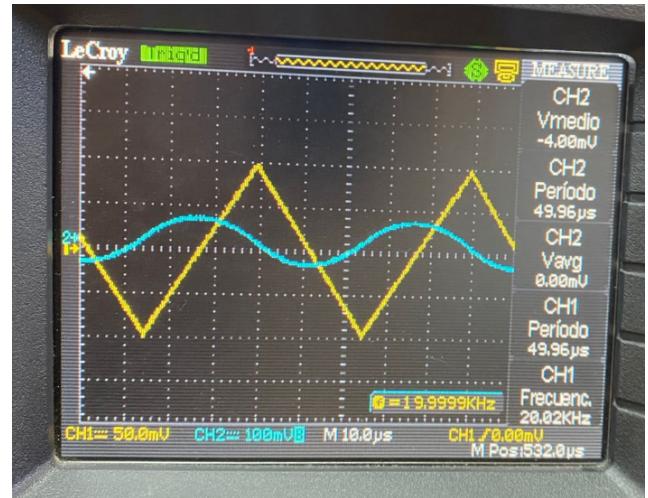


Fig. 13. Medición de Osciloscopio del Integrador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una función Triángulo de frecuencia 20kHz . La salida es una Parábola.

III-A.3. Derivador Operacional: Se utilizó nuevamente la *Placa 1* para el estudio del Derivador Operacional, esta vez conectada según la configuración y los valores mostrados en la *Figura 14*. El resultado se observa en la imagen de la *Figura 15*.

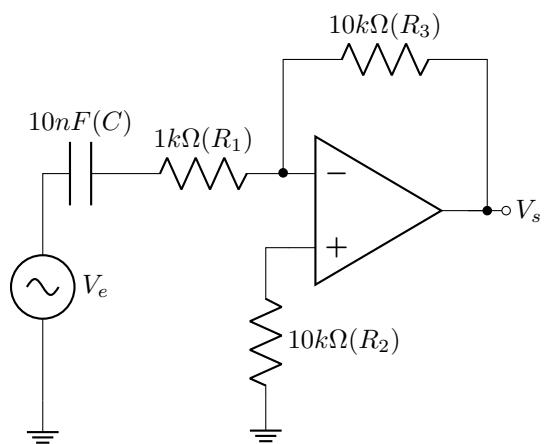


Fig. 14. Derivador Operacional

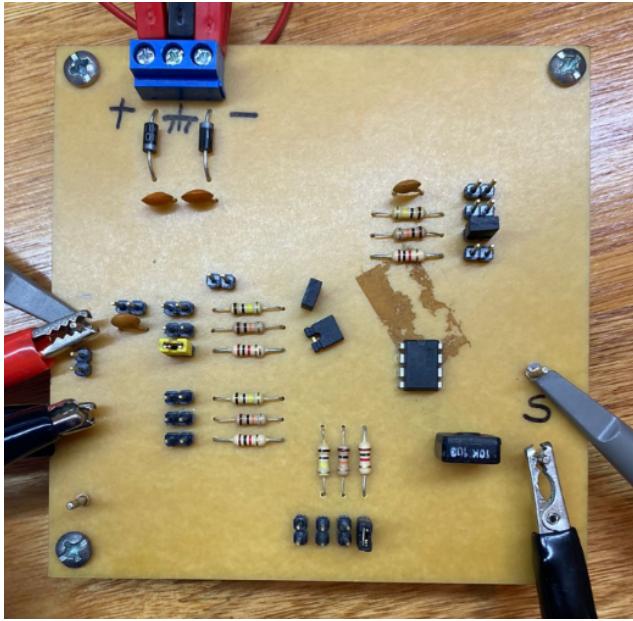


Fig. 15. Placa 1 en configuración de Derivador.

Se propuso determinar el rango de operación mediante un barrido de frecuencia y observando la salida.

Se inyectó una señal Triángulo a la entrada, variando su frecuencia. A continuación se muestran tres mediciones de osciloscopio, para entradas de 100Hz , 1kHz y 20kHz .



Fig. 16. Medición de Osciloscopio del Derivador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una señal Triangulo de frecuencia 100Hz .



Fig. 17. Medición de Osciloscopio del Derivador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una señal Triangulo de frecuencia 1kHz .

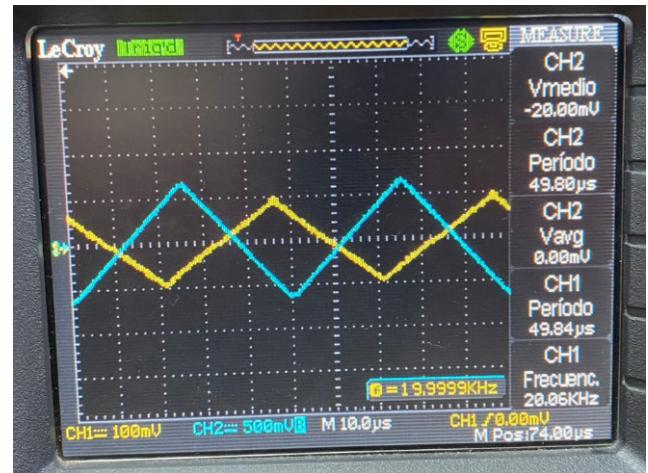


Fig. 18. Medición de Osciloscopio del Derivador Operacional. Entrada en Amarillo, corresponde a una señal Triángulo de frecuencia 20kHz .

Para este análisis se utilizó una señal Triángulo, siendo su derivada una señal Cuadrada.

Para el caso de baja frecuencia, de 100Hz , la salida del circuito se corresponde perfectamente con lo esperado: una señal Cuadrada.

Para una frecuencia un poco mayor, de 1kHz (1 década después), se sigue conservando la forma Cuadrada pero levemente distorsionada, por lo que 1kHz no es una frecuencia de operación demasiado deseable.

Finalmente, para una frecuencia mayor, de 20kHz , la operación de derivación falla en su totalidad.

Esto se corresponde con la ubicación del polo del derivador; según visto en la Sección II: Marco Teórico, II-B y reemplazando los valores de resistencias y capacitores en la ecuación (6), se tiene:

$$A_v = -\frac{-s10k\Omega}{1k\Omega(s + \frac{1}{(10nF)(1k\Omega)})} \quad (14)$$

$$A_v = -\frac{-s10k\Omega}{(s + 100k)} \quad (15)$$

Este derivador tiene un cero en el origen (lo cuál es correcto, pues la derivada de una señal constante es cero) y un polo en:

$$s = -100k \rightarrow f \approx 15,915 \text{ kHz}$$

Es por ello que a frecuencias como mínimo una década menos que las del polo (100Hz , 1kHz), el derivador opera correctamente, mientras que a frecuencias cercanas o posteriores a las del polo (20kHz), la salida ya no es la adecuada.

III-B. Placa 2, Amplificador de Instrumentación

Para el armado y conexión de la placa 2, se procedió según el esquema de la *Figura 20*. La polarización de los AO es de $12V$.

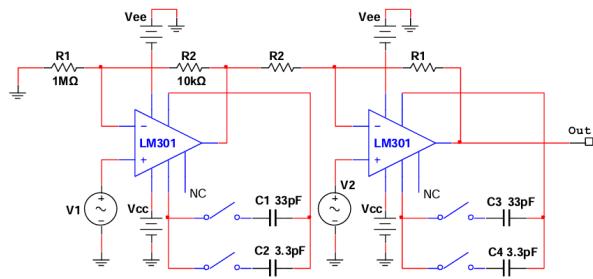


Fig. 19. Diagrama Completo de la Placa 2.

Como se observa en la *Figura 20*, los valores de resistencias son fijos.

Existen también dos pares de capacitores de compensación. Para los primeros estudios, se utilizó el par de capacitores de 3.3pF para todas las pruebas. Para los estudios posteriores, se pretende variar los valores de capacitancia para observar el comportamiento en frecuencia de los AO.

Nuevamente, se conectó un par de pinzas del osciloscopio a la entrada V_1 , junto con el generador de funciones; mientras que a la salida se conectó el otro par de pinzas.

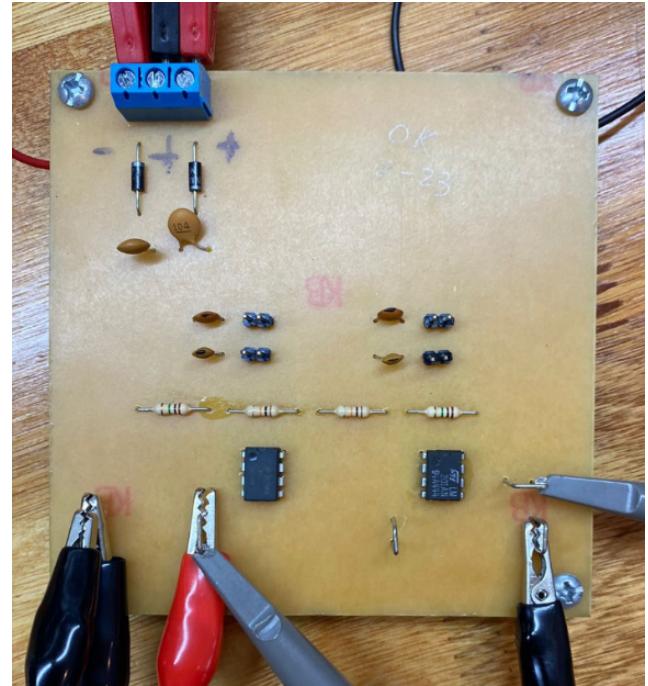


Fig. 20. Imagen de la Placa 2. No se encuentran colocados los jumpers aún.

III-C. Placa 2, Entrada V_1

Se inyectó con el generador de señal una onda sinusoidal a la entrada V_1 , con una amplitud V_{pp} de 20mV , de manera que no haya saturación en la salida, y de frecuencia 100Hz . La entrada V_2 se conectó a tierra.

Según la *Figura 19*, la señal deberá pasar por la etapa 1 sin modificación de amplitud ni fase, y luego entrar tal cual a la etapa 2 por el terminal inversor. En esta etapa, la señal se verá amplificada y desfasada 180 grados.

Según lo visto en la Sección II-C, de la *ecuación (11)*, la ganancia esperada es:

$$A_v = 1 + \frac{1M\Omega}{10k\Omega} = 101 \quad (16)$$

Mientras que la lectura del osciloscopio marca:

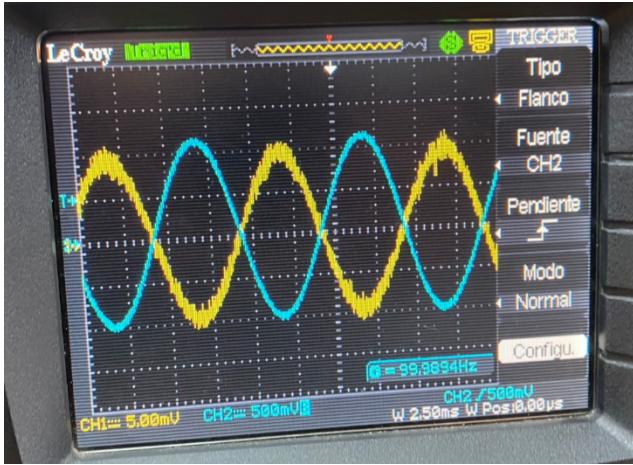


Fig. 21. Lectura del osciloscopio. Entrada en Amarillo, muestra una ganancia aproximada de 100 veces y un desfasaje de 180 grados. Compensación con capacitores de 3.3pF

La ganancia medida es de aproximadamente 100 veces y se corresponde con la ganancia esperada.

El desfasaje observado es de 180 grados, y se corresponde con lo esperado..

III-D. Placa 2, Entrada V_2

A continuación se conectó el generador de funciones y se inyectó nuevamente una señal de $20\text{mV}V_{pp}$ y frecuencia 100Hz , esta vez en la entrada V_2 , mientras que la entrada V_1 se conectó a tierra.

Nuevamente la ganancia esperada es la de la etapa 2:

$$A_v = 1 + \frac{1M\Omega}{10k\Omega} = 101 \quad (17)$$

Esta vez y a diferencia del caso anterior, la señal se inyecta por la entrada no inversora, por lo que se espera un desfasaje nulo.

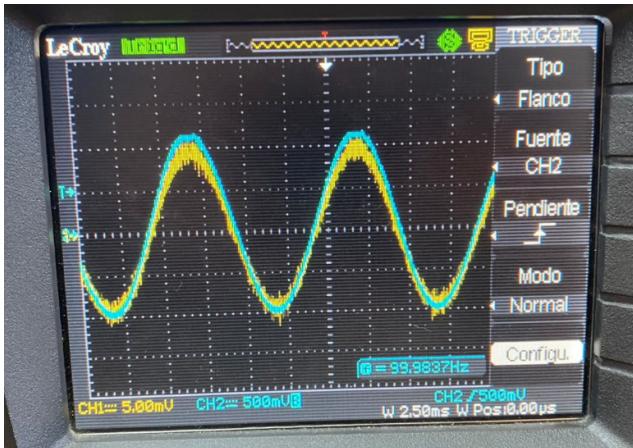


Fig. 22. Lectura del osciloscopio. Entrada en Amarillo, muestra una ganancia aproximada de 100 veces. El desfasaje es nulo. Compensación con capacitores de 3.3pF

Las lecturas de osciloscopio se corresponden con lo esperado.

III-E. Compensación en Frecuencia

El objetivo de esta sección es conocer la ubicación del polo dominante, en función de los capacitores utilizados para su compensación.

Para ello se realizó un barrido de frecuencia con una señal sinusoidal de $V_{pp} 20\text{mV}$ inyectada en V_1 .

Con el barrido de frecuencias se pretendió encontrar una atenuación de 3dB en la salida, indicando así la existencia del polo.

III-E.1. Capacitores de 33pF : Se colocaron jumpers en la Placa 2, de manera que queden conectados los capacitores de 33pF .

A continuación se realizó el barrido de frecuencia. El valor que corresponde a una atenuación de 3db para la señal de 20mV es:

$$\frac{20\text{mV}}{\sqrt{2}} \approx 14.14\text{mV} \quad (18)$$

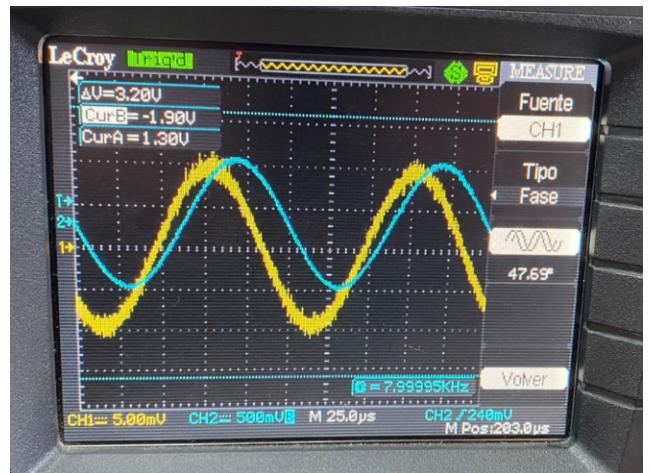


Fig. 23. La frecuencia medida para la atenuación de 3dB fue de 8.5kHz . Compensación con capacitores de 33pF

La ubicación del polo, y por lo tanto la frecuencia de corte superior, es 8.5kHz utilizando los capacitores de 33pF . Tener en cuenta que para una medición más clara con el osciloscopio, se eligió una escala adecuada para ignorar la ganancia de 101 veces producto de la etapa 2.

III-E.2. Capacitores de 3.3pF : Se colocaron jumpers en la Placa 2, de manera que queden conectados los capacitores de 3.3pF .

A continuación se realizó el barrido de frecuencia. El valor que corresponde a una atenuación de 3db para la señal de 20mV es:

$$\frac{20\text{mV}}{\sqrt{2}} \approx 14.14\text{mV} \quad (19)$$

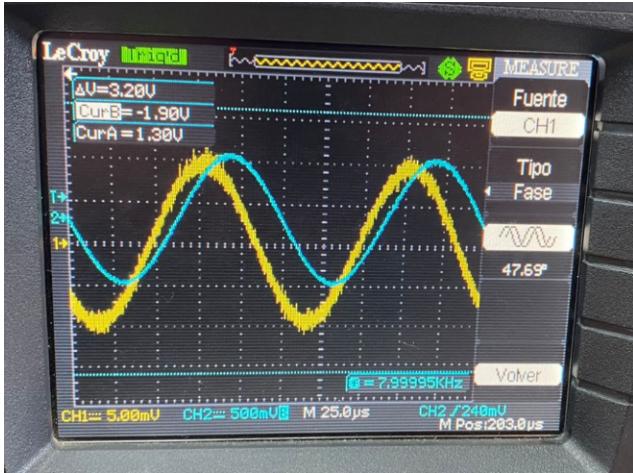


Fig. 24. Se observa una amplitud aproximada de 15. La frecuencia medida para la atenuación de $3dB$ fue de $27kHz$. Compensación con capacitores de $3.3pF$

La ubicación del polo, y por lo tanto la frecuencia de corte superior, es $27kHz$ utilizando los capacitores de $3.3pF$. Tener en cuenta que para una medición más clara con el osciloscopio, se eligió una escala adecuada de modo que se pueda ignorar gráficamente la ganancia de 101 veces producto de la etapa 2.

| Capacitores | Frecuencia de corte |
|-------------|---------------------|
| $3.3pF$ | $27kHz$ |
| $33pF$ | $8.5kHz$ |

TABLA I. Mediciones de compensación

III-F. Modo Común - Ganancia

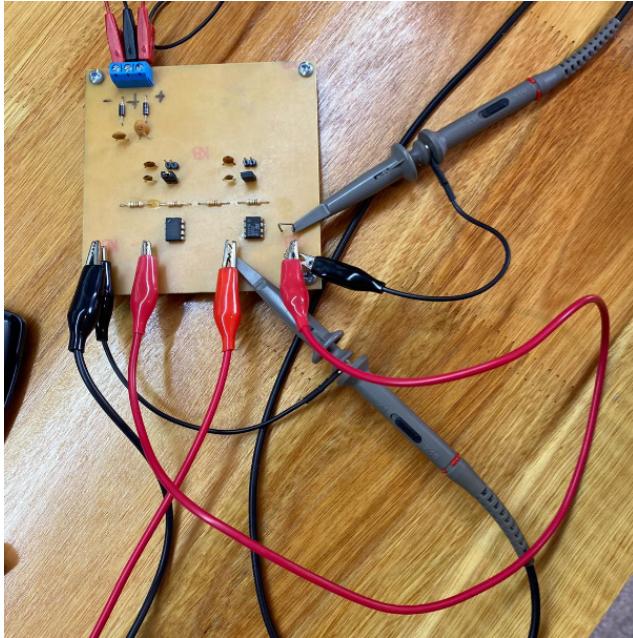


Fig. 25. La fuente de señal está conectada a V_1 y V_2 en simultáneo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mediciones realizadas en la práctica se corresponden a las estimaciones teóricas realizadas previamente. En general,

| Datos | |
|-----------|-----------------|
| Propiedad | Valor |
| t_1 | Corriente 5.3 A |
| | Tensión 220 V |
| t_2 | Corriente 4.9 A |
| | Tensión 218 V |

TABLA II. Valores observados de corriente y voltaje en distintos instantes de tiempo t_i .

V. CONCLUSIONES

Los experimentos realizados permitieron verificar el comportamiento teórico de los circuitos integrador y derivador operacionales. Se comprobó que ambos circuitos tienen un rango de operación adecuado, determinado por la ubicación de sus polos. En el caso del integrador, se obtuvo una salida triangular perfecta a frecuencias altas, mientras que para el derivador, la salida cuadrada se mantuvo en frecuencias bajas. El amplificador de instrumentación demostró ser versátil y ajustable según las necesidades del diseño, lo cual es crucial para aplicaciones prácticas en instrumentación.

REFERENCES

- [1] J. Millman and A. Grabel, "Microelectrónica," McGraw-Hill, New York, 6ta edición, pp. 631, 1993.
- [2] P. R. Gray and R. G. Meyer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits," John Wiley Sons, New York, 4th edition, pp. , 2001