

# Proyecto 1

## Calculadora Analógica

1<sup>st</sup> Acevedo Rodríguez Kevin  
*Instituto Tecnológico de Costa Rica*  
Taller de señales mixtas  
Cartago, Costa Rica  
kevinar51@estudiantec.cr

2<sup>nd</sup> Camacho Hernández José Julián  
*Instituto Tecnológico de Costa Rica*  
Taller de señales mixtas  
Cartago, Costa Rica  
jcamacho341@estudiantec.cr

3<sup>rd</sup> Araya Chacon Mario Alexis  
*Instituto Tecnológico de Costa Rica*  
Taller de señales mixtas  
Cartago, Costa Rica  
marioaraya1999@estudiantec.cr

**Resumen**—This report details the design and implementation of an analog signal processing calculator that harnesses the power of operational amplifiers and other linear integrated circuits. The primary goal of the project is to create a feature-rich calculator capable of performing a wide range of mathematical operations on signals, encompassing both constant and time-varying ones. The calculator's functionality extends from basic arithmetic operations (e.g., addition and subtraction) involving constant signals to more intricate manipulations of time-varying signals, such as sine, cosine, square, and sawtooth waves. Additionally, the system incorporates an electret microphone, enabling the processing of dynamic audio inputs.

The circuit design comprises several crucial stages. The signal source stage allows users to select between constant signals (via a voltage source) or time-varying signals (using a function generator or the electret microphone). The time-varying signals offer adjustable frequency and amplitude settings. Operator A and Operator B stages enable users to choose between constant signals and function generator outputs. Subsequently, mathematical operation selection stages facilitate tasks like addition, subtraction, integration (transforming square waves into triangular waves), and differentiation (transforming triangular waves into square waves). An amplitude control stage is integrated to fine-tune signal amplification.

A key feature is the power button, providing a convenient method to activate the system. By successfully implementing this versatile calculator, this project showcases the practical application of analog circuit concepts and operational amplifier configurations in creating an efficient and multifunctional signal processing platform.

**Index Terms**—Operational Amplifiers, Analog Calculator, Adder, Subtraction, Integrator, Differentiator.

### I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la electrónica analógica, la necesidad de realizar operaciones matemáticas con señales analógicas ha sido un desafío constante. A medida que la tecnología avanza, la demanda de sistemas electrónicos más eficientes y versátiles se vuelve fundamental en diversas aplicaciones, como sistemas de control, procesamiento de señales y comunicaciones. En este contexto, surge la oportunidad de desarrollar una calculadora analógica que pueda realizar operaciones matemáticas con dos tipos de señales: constantes y variables en el tiempo.

El uso de amplificadores operacionales como elementos clave en la implementación de esta calculadora analógica

ofrece una solución potencialmente efectiva y flexible para realizar una variedad de operaciones matemáticas en el dominio analógico. Los amplificadores operacionales son dispositivos ampliamente utilizados en el diseño de circuitos analógicos debido a su alta ganancia, impedancia de entrada elevada y versatilidad en la configuración de circuitos. En particular, se destacan sus aplicaciones en sumadores, restadores, integradores y derivadores, lo que brinda la capacidad de manipular señales analógicas de manera eficiente.

Un amplificador operacional es un dispositivo electrónico que amplifica la diferencia de voltaje entre dos entradas para producir una salida proporcional. Los amplificadores operacionales son elementos esenciales en el diseño de la calculadora analógica propuesta, ya que permiten realizar operaciones matemáticas fundamentales. A continuación, se presentan algunas topologías clave de amplificadores operacionales y su aplicación en las operaciones matemáticas requeridas:

- **Sumador/Restador:** La topología del amplificador operacional inversor y no inversor permite realizar operaciones de suma y resta de señales analógicas. El amplificador operacional inversor invierte y amplifica la señal de entrada, mientras que el no inversor amplifica la señal sin invertirla.
- **Integrador:** Un amplificador operacional configurado en la topología de integrador realiza la operación matemática de la integral de la señal de entrada. Esta configuración es útil para realizar operaciones de acumulación y filtrado de señales.
- **Derivador:** La topología de derivador, implementada con un amplificador operacional, permite obtener la derivada de la señal de entrada en función del tiempo. Esta configuración es útil para analizar la tasa de cambio de una señal.
- **Amplificación y Precisión:** La amplificación es un aspecto crítico en la implementación de la calculadora analógica, ya que determina la precisión y la resolución de las operaciones matemáticas realizadas. Se explorarán técnicas de amplificación utilizando amplificadores operacionales en cascada para lograr niveles de ganancia adecuados y minimizar errores de señal.

El objetivo principal de este trabajo es presentar el di-

seño y la implementación de una calculadora analógica que aprovecha las capacidades de los amplificadores operacionales para realizar operaciones matemáticas con señales constantes y variables en el tiempo. Se abordará en detalle la teoría detrás del uso de amplificadores operacionales en diversas configuraciones, como sumadores, restadores, integradores y derivadores. Además, se explorarán conceptos de amplificación y su importancia en la realización de cálculos precisos en el dominio analógico.

El resto del paper se organizará de la siguiente manera: en la Sección II se describirá el diseño propuesto de la calculadora analógica, incluyendo la selección y conexión adecuada de los amplificadores operacionales para realizar operaciones matemáticas específicas. En la Sección III, se presentarán los resultados de la implementación, que incluirán mediciones de desempeño y precisión en la ejecución de las operaciones matemáticas. Finalmente, en la Sección IV se discutirán las conclusiones y se propondrán posibles direcciones futuras para la mejora y expansión de la calculadora analógica implementada.

## II. DISEÑO

A continuación, se presenta el diseño del funcionamiento general del sistema, para estos diseños se tomaron en cuenta las ecuaciones que modelan el comportamiento de los amplificadores operacionales obtenidos del material proporcionado por el profesor [1].

### II-A. Selección de señales

Para esta etapa, se utilizaron 3 *dip switches* de 4 puertos configurados de la manera que se visualiza en la figura 1.

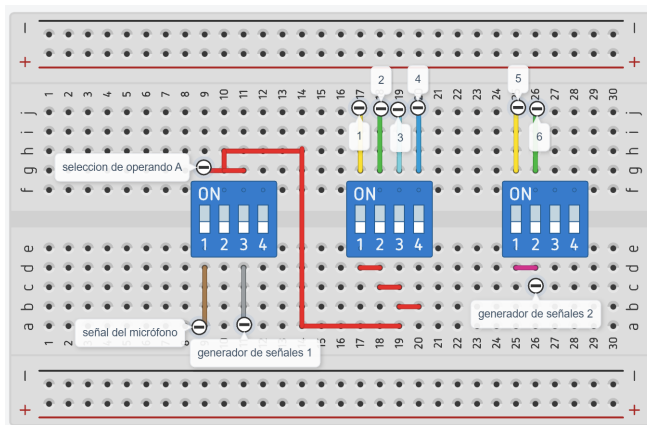


Figura 1. Diseño de la etapa de selección.

El detalle de su funcionamiento es el siguiente:

1. Se utiliza un *switch* (el de la izquierda) para seleccionar entre la señal proveniente del **micrófono** o el **generador de funciones 1**. Esta sería la señal para el **operando A**.
2. Se toma la señal del **operando A** y se hace un cortocircuito en los 4 pines de un segundo *switch* (el que se encuentra en el medio). Luego, se tienen 4 posibles salidas (las que se encuentran numeradas del 1 al 4),

que serían las que se conectan al **operando A** de los 4 posibles posibles circuitos operacionales (Sumador, Restador, Integrador, y Derivador).

3. Finalmente, se tiene un tercer *switch* (el que se encuentra a la derecha) que recibe una única señal perteneciente al **generador de funciones 2** y selecciona el circuito al que se le debe dar dicha señal (**operando B**). Es importante notar que este *switch* solo tiene dos salidas, esto se debe a que los únicos circuitos que utilizan el operando B son el Sumador y el Restador.

### II-B. Micrófono Electret

Para la etapa de amplificación del micrófono *electret* que será utilizado como una posible entrada A del sistema, se siguió la referencia explicada por John Salmon en un vídeo publicado en su canal de *YouTube*. [2] Esta etapa consiste en un circuito conformado por un condensador de  $0,1\mu F$  y una resistencia de  $1k\Omega$ . La configuración se detalla en la figura 2.

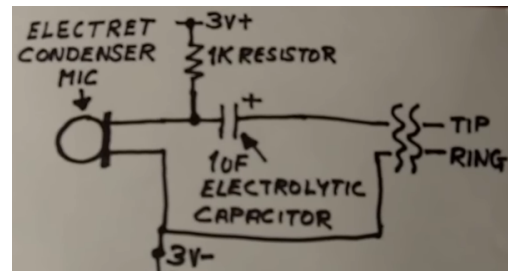


Figura 2. Diagrama del circuito amplificador del micrófono *electret*. [2]

Posteriormente, se simuló, por medio de *Tikercad*, el armado del circuito de la manera en que será construido físicamente. Esto se aprecia en la figura 3.

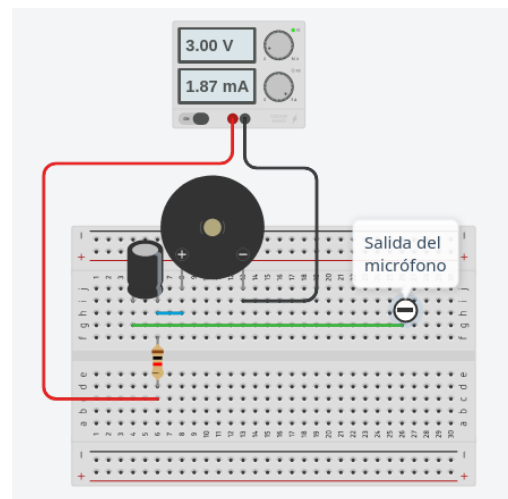


Figura 3. Diseño del circuito amplificador del micrófono *electret*.

### II-C. Sumador no inversor

A continuación se presentan las ecuaciones que relacionan la entrada y salida del circuito sumador no inversor.

$$v_o = R_f \left( \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} \right) \quad (1)$$

$$v_o = \frac{R_f}{R} (v_1 + v_2) \quad (2)$$

$$v_o = v_1 + v_2 \quad (3)$$

Como podemos apreciar en las ecuaciones anteriores, si  $R_1$  y  $R_2$  tienen el mismo valor de resistencia, estas permitirían la simplificación de la ecuación para obtener  $V_0$ . Además, si  $R_f$  tiene el mismo valor que estas, nos permite simplificar la fracción que escala el resultado final, de forma que obtenemos  $\frac{R_f}{R} = 1$ .

Lo anterior permite realizar una suma sencilla como se muestra en la figura 4, donde es posible observar que se todas las resistencias tienen el mismo valor para lograr dicho comportamiento.

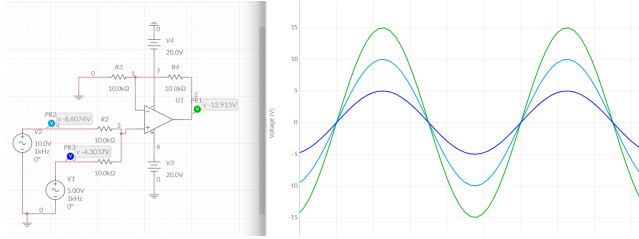


Figura 4. Diseño del amplificador sumador.

#### II-D. Restador

Para la configuración del amplificador operacional diferencial se tienen en consideración las siguientes ecuaciones teóricas:

$$v_o = v_2 \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - v_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4)$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) \quad (5)$$

$$v_o = v_2 - v_1 \quad (6)$$

Si aplicamos el mismo razonamiento que en el sumador, se pueden simplificar los valores de las resistencias, esto se logra si los valores de  $R_1 = R_3$  y si  $R_2 = R_4$ . Si se quiere simplificar más, se utilizan todas las resistencias con el mismo valor para simplificar la fracción resultante de  $\frac{R_2}{R_1}$ , por lo que se plantea el diseño de esta manera para evitar producir un escalado distinto de 1 en el valor final  $V_0$ . El diseño final de este circuito se puede observar en la figura 5.

Una vez que se cuenta con el diseño del sumador y el restador, se plantea un diseño en una *protoboard* con ayuda de la herramienta *Tinkercad*, donde se pueden acomodar los componentes y los cables para verificar el correcto funcionamiento en una simulación del circuito físico final como se muestre en la figura 6.

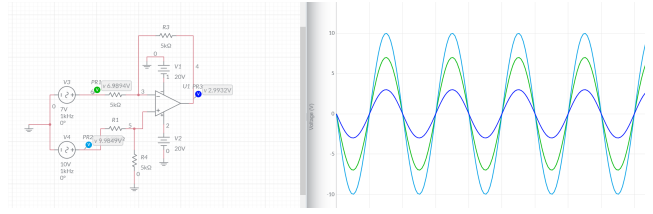


Figura 5. Diseño del amplificador diferencial.

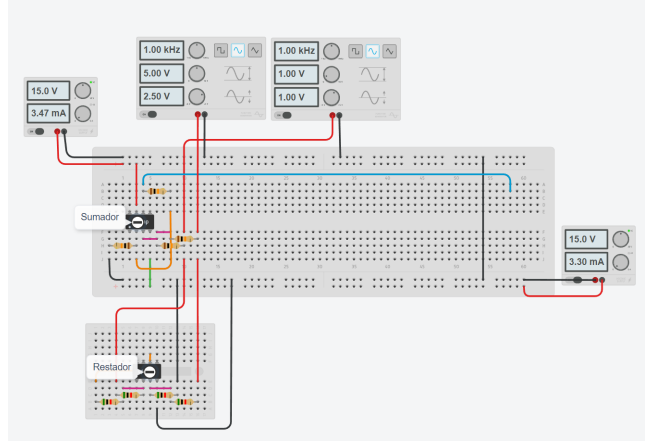


Figura 6. Diseño del circuito físico en tinkercad para el sumador y restador.

#### II-E. Integrador

A continuación se presenta el modelo teórico del comportamiento de un amplificador integrador:

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{in} dt \quad (7)$$

Para el diseño del integrador, la teoría nos dice que el escalado final que tendría  $V_0$  va a depender tanto de  $R$  como de  $C$  según la ecuación  $\frac{1}{RC}$ , por lo que el escalado del valor de salida se puede manipular aumentando o disminuyendo estos valores según se desee. En el circuito final, se utilizó la combinación de  $R = 5,1k\Omega$  y  $C = 0,1\mu F$  que fue la que realmente arrojó los mejores resultados.

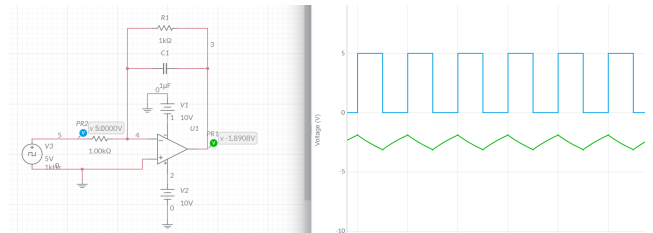


Figura 7. Diseño del amplificador integrador.

Una vez que se tiene el comportamiento deseado en la simulación, se procede a diseñar circuito físico del integrador en un simulador como *Tinkercad*, como se muestra en la figura 8. De esta manera nos aseguramos que el circuito no presente

fallos a la hora de implementarlo y se obtenga una señal de salida triangular a partir de una señal de entrada cuadrada.

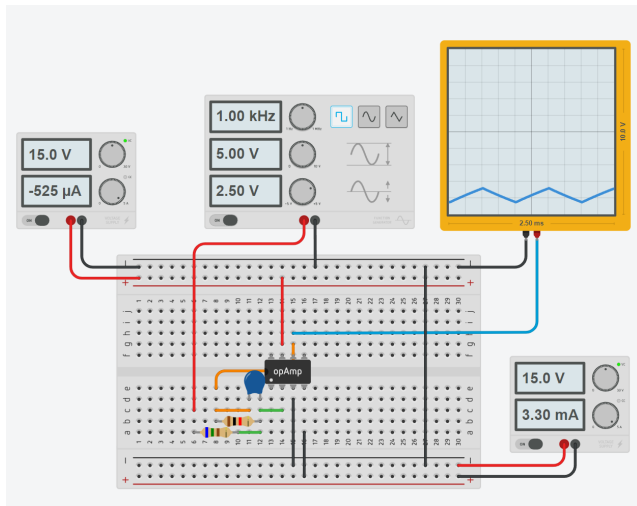


Figura 8. Diseño del circuito físico del integrador en tinkercad

## II-F. Derivador

La ecuación de salida de un amplificador derivador es la siguiente:

$$v_o = -RC \frac{dv_{in}(t)}{dt} \quad (8)$$

Para el derivador, como se aprecia en la ecuación anterior, el escalado esta vez se da en función de  $RC$ , lo cual nos permite variar los valores tanto del capacitor como de la resistencia para ajustar la salida, por lo que se procede a diseñar el circuito mostrado en la figura 9. Finalmente, se utilizó una  $R = 3,3k\Omega$  y un  $C = 100\mu F$ .

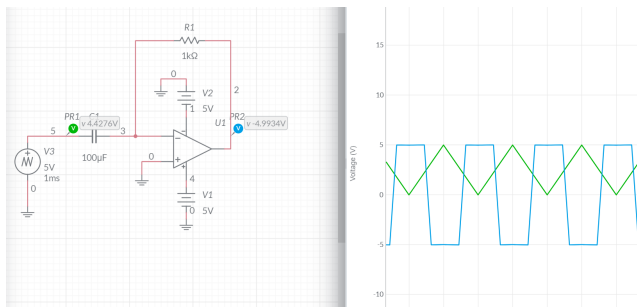


Figura 9. Diseño del amplificador derivador.

A partir del circuito anterior, se simula su implementación para el circuito físico final como se muestra en la figura 10, para asegurarnos que se esté realizando correctamente la derivada de la función triangular a una cuadrada.

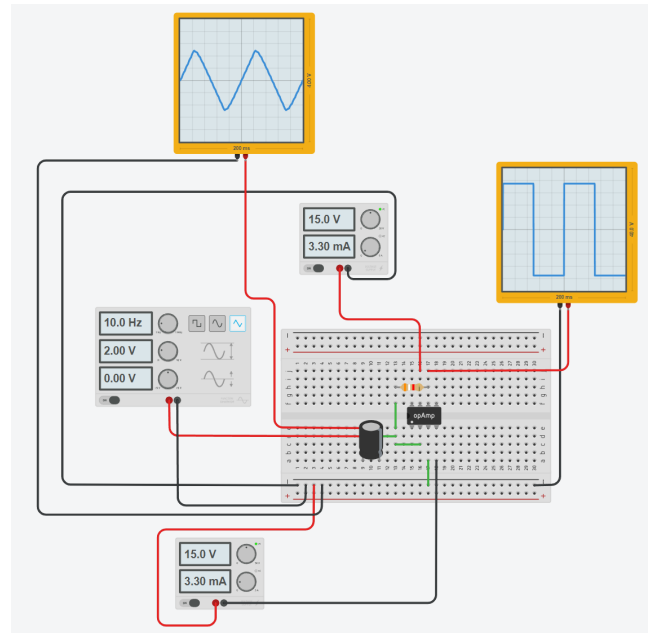


Figura 10. Diseño del circuito físico del derivador en tinkercad

## II-G. Etapa de amplificación

Para esta etapa se utilizó un *switch* de 4 puertos, un amplificador operacional y un potenciómetro (ver figura 11).

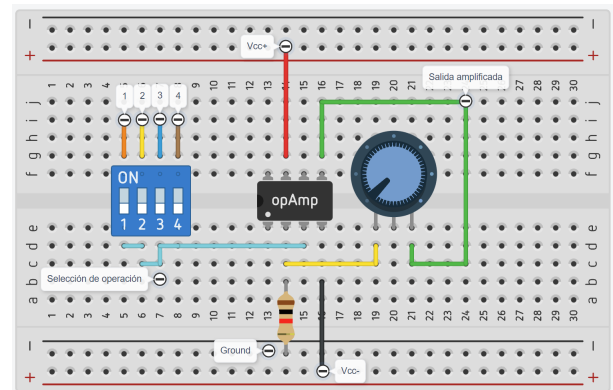


Figura 11. Etapa de amplificación de la salida.

Su funcionamiento se describe a continuación:

1. Se utiliza un *switch* para seleccionar una de las 4 salidas (resultado) de los circuitos operacionales, es decir, el resultado de la suma, resta, integración o derivación.
2. La señal proveniente del *switch* es pasada a la terminal no inversora del amplificador operacional.
3. Se usa una resistencia de  $1k\Omega$  conectada a la terminal inversora del amplificador operacional, y entre una de las terminales del potenciómetro.
4. Se conecta la otra terminal del potenciómetro con la salida del amplificador operacional.

De esta manera, se puede controlar la ganancia de la señal de salida mediante la variación en el valor de la resistencia variable, según la siguiente ecuación referente a la figura 12:

$$v_o = v_{in} \left( 1 + \frac{R_{variable}}{R} \right) \quad (9)$$

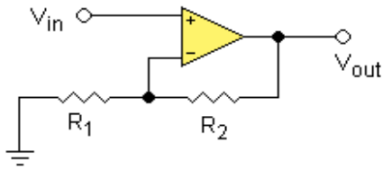


Figura 12. Diagrama de amplificador no inversor. [1]

### II-H. Etapa de encendido y apagado

Esta configuración solo hace uso de un botón (ver figura 13) y funciona de la siguiente manera:

1. La señal de alimentación del circuito ( $V_{cc+}$ ) es conectada a una terminal del botón.
2. Una de las terminales del botón es conectada a tierra común.
3. La otra terminal del botón es dirigida a la línea principal de alimentación del circuito.
4. El botón permite abrir o cerrar el paso a la señal de  $V_{cc+}$ .

Con este arreglo, la alimentación de la calculadora es permitida o denegada. De esta manera, se tiene un sistema de encendido y apagado ya que los circuitos operacionales dependen del valor de  $V_{cc+}$  para su funcionamiento.

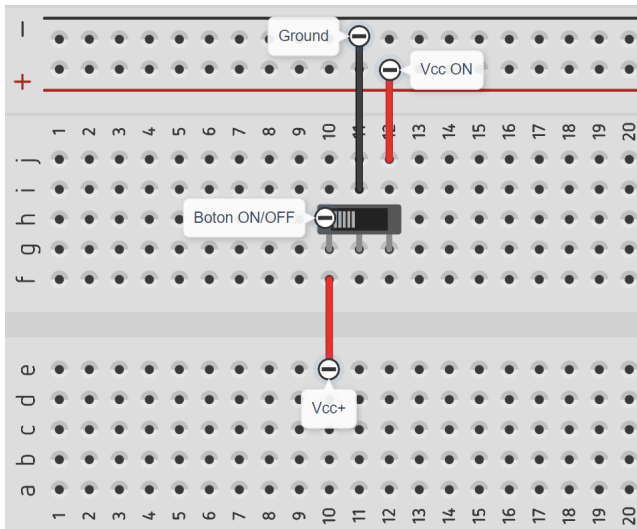


Figura 13. Diseño del sistema de encendido y apagado.

## III. RESULTADOS

A partir de los diseños realizados anteriormente, se procede a ensamblar los circuitos respectivos para realizar cada operación como muestra a continuación. Además, para todos los circuitos se utilizaron valores de alimentación para los

amplificadores de  $+15V$  y  $-15V$  como lo muestra la figura 14.



Figura 14. Fuentes de alimentación para los amplificadores

El circuito final donde se puede apreciar la implementación de todos los amplificadores se muestra en la figura 15. Es importante apreciar que esta implementación cuenta con un potenciómetro y un amplificador no inversor, que como se vio en la teoría en clase, nos permite variar el escalado de las salidas al variar el valor de la resistencia del potenciómetro. Es por esto que en algunas imágenes como la del circuito sumador, la salida presenta un escalado distinto de 1.

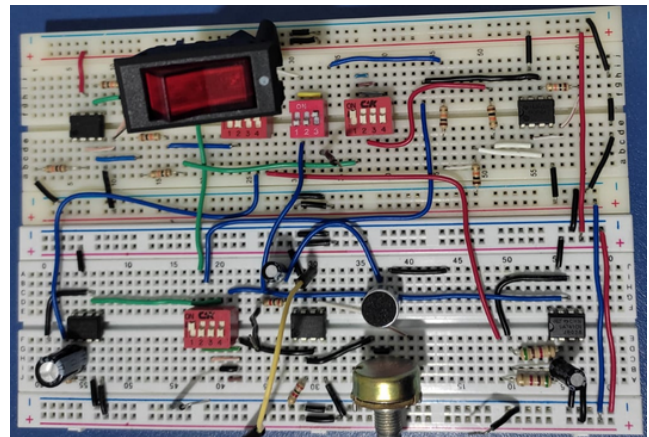


Figura 15. Circuito final

### III-A. Sumador no inversor

En la figura 16, podemos apreciar como la señal de entrada (verde) de  $10V$  se suma con otra señal de  $10V$ , lo que debería resultar en una salida de  $20V$ , sin embargo la señal de salida (amarilla) de  $V_0$  es de  $8V$ , esto se debe a que el potenciómetro de  $10k\Omega$  está alterando el escalado de esta para apreciar mejor el resultado final en el osciloscopio.



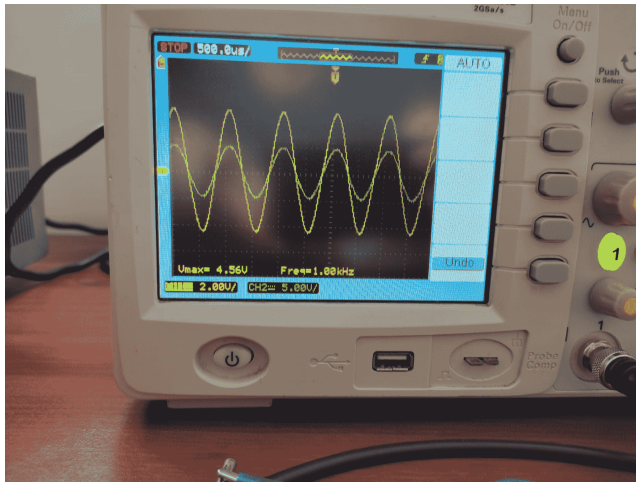


Figura 16.  $V_0$  del circuito sumador

### III-B. Restador

En la figura 17, podemos apreciar como al sumar 2 señales de entrada (verde) de 10V, obtenemos una señal de salida (amarilla) de 0V, en este caso no afecta el escalado del potenciómetro ya que el valor de salida es 0.

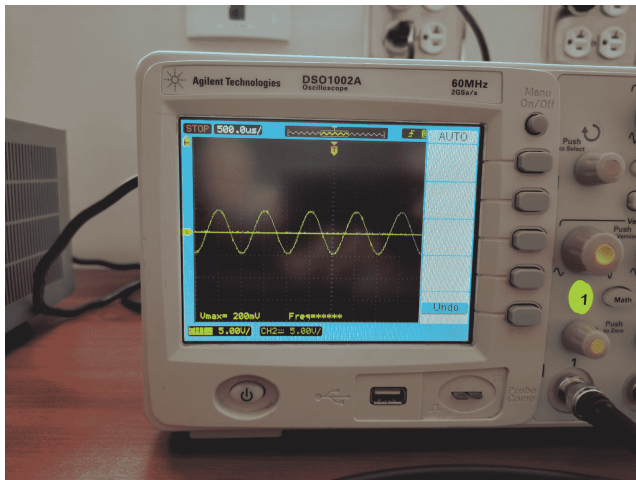


Figura 17.  $V_0$  del circuito restador

### III-C. Integrador

Como podemos apreciar en la figura 18, la señal de entrada es cuadrada y al realizar la integral estamos obteniendo una señal triangular en la salida. Sin embargo, factores como los valores de resistencias utilizados y del capacitor junto con el amplificador en la salida, producen un escalado que se considera adecuado para apreciar el comportamiento final de este circuito.

Estos valores fueron ajustados durante la construcción del circuito debido a que estaban entre los materiales disponibles en la elaboración del laboratorio y producen un comportamiento similar al de la teoría. Como se vio en la teoría, el comportamiento práctico es el mismo, donde en el inicio del pulso positivo de la señal cuadrada, se da el pico de la señal

triangular, mientras que en el inicio del pulso negativo, se da la base de la señal triangular.

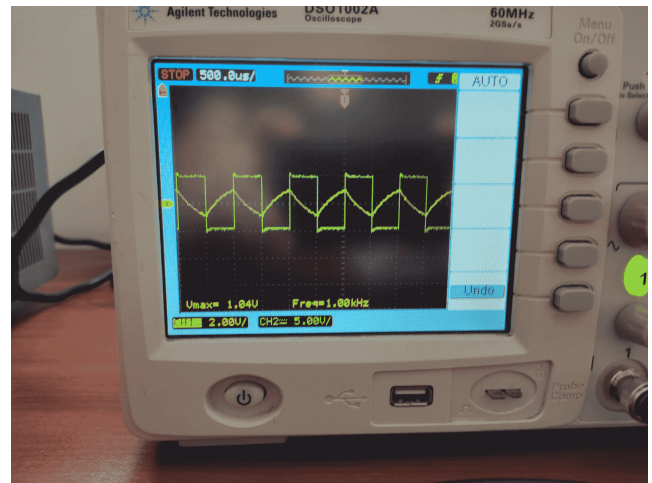


Figura 18.  $V_0$  del circuito integrador

### III-D. Derivador

En la figura 19, podemos apreciar como la señal de entrada (celeste) es cuadrada y al realizar la derivada de esta, se obtiene una señal de salida (amarilla)  $V_0$  con una forma triangular, donde al igual que en la simulación, a la mitad del nivel bajo de la señal cuadrada se produce el pico de la señal triangular y el comportamiento se invierte con el nivel alto de la señal cuadrada. De esta manera podemos apreciar como se realiza correctamente la derivada de esta función.

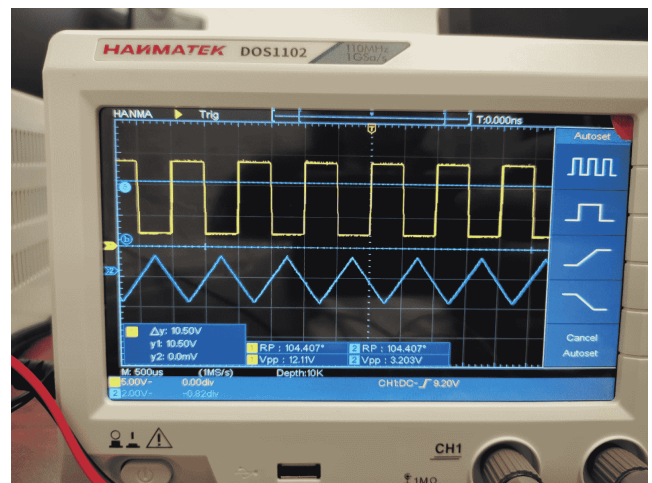


Figura 19.  $V_0$  del circuito derivador

## IV. CONCLUSIONES

A partir de la experimentación, nos damos cuenta de que al realizar diagramas detallados e individuales de los circuitos, se facilita la detección de errores como en el caso de una mala conexión en la alimentación negativa de los amplificadores. Este error es importante detectarlo ya que produce que un

amplificador no se comporte como debería, alterando los resultados de salida.

Al llevar a cabo el proceso de diseñar y construir la calculadora analógica, fue posible tener la oportunidad de profundizar en el aprendizaje de la teoría vista en clase sobre los conceptos de señales y sistemas, operaciones matemáticas con amplificadores operaciones y demás circuitos electrónicos.

Una vez se realizaron las pruebas y se llevó a cabo el análisis de los resultados, fue posible validar la teoría matemática en las ecuaciones de los circuitos y su aplicación práctica en la ingeniería electrónica. De esta manera se comprobó el correcto funcionamiento general del sistema según los requerimientos establecidos.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Tacsan. Amplificadores operacionales. [Online]. Available: [https://tecdigital.tec.ac.cr/dotlrn/classes/IDC/CE1112/S-2-2023/CA.CE1112.1/file-storage/view/Apuntes%2FAMPLIFICADORES\\_OPERACIONALES.pdf](https://tecdigital.tec.ac.cr/dotlrn/classes/IDC/CE1112/S-2-2023/CA.CE1112.1/file-storage/view/Apuntes%2FAMPLIFICADORES_OPERACIONALES.pdf)
- [2] J. Salmon. (2013) Electret condenser microphone wiring. [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=FYFapDVOFHg&ab\\_channel=JohnSalmon](https://www.youtube.com/watch?v=FYFapDVOFHg&ab_channel=JohnSalmon)