

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica

**Informe N° 3:
Aplicaciones no lineales del Amplificador
Operacional**

Emerson Warhman
C.I. 25.795.480
25 de marzo de 2025

Índice

1. Resumen	2
2. Introducción	2
3. Objetivos	2
4. Marco teórico	2
4.1. Osciladores	2
4.2. Oscilador de puente de Wien	4
4.3. Controles de amplitud	5
4.4. Comparadores	5
4.5. Comparador de lazo abierto	5
4.6. Comparador de lazo cerrado	6
4.7. Osciladores de relajación	7
4.8. Multivibradores	8
4.8.1. Multivibrador astable	8
4.8.2. Multivibrador monoestable	9
4.9. Generador de funciones	10
5. Metodología	11
5.1. Osciladores	11
5.1.1. Trabajo de preparación	11
5.1.2. Simulaciones	13
5.2. Multivibradores	15
5.2.1. Trabajo de preparación	15
5.2.2. Simulaciones	17
5.3. Generador de funciones	20
5.3.1. Trabajo de preparación	20
5.3.2. Simulación	21
6. Instrumentos y componentes	23
7. Presentación de resultados	23
7.1. Osciladores	23
7.2. Multivibradores	27
7.2.1. Multivibrador astable	27
7.2.2. Multivibrador monostable	27
7.3. Generador de funciones	29
8. Análisis de resultados	31
8.1. Análisis de los osciladores	31
8.1.1. Ganancias topologías clásicas	31
8.1.2. Efecto del integrador no inversor	31
8.1.3. Convertidor de tensión a corriente	31
8.2. Análisis de los multivibradores	32
8.2.1. Multivibrador astable	32
8.2.2. Multivibrador monoestable	32
8.2.3. Ganancias topologías clásicas	32
8.2.4. Efecto del integrador no inversor	32
8.2.5. Convertidor de tensión a corriente	33
8.3. Análisis del generador de funciones	33
9. Conclusiones	35
Bibliografía	35

1. Resumen

En este informe se estudian las características, aplicaciones y comportamiento práctico de los amplificadores operacionales (op-amps), componentes fundamentales en la electrónica analógica. Los op-amps son dispositivos versátiles y eficientes, utilizados en una amplia gama de circuitos para realizar operaciones como amplificación, filtrado, integración y regulación de señales.

A lo largo del trabajo, se analizaron configuraciones clásicas de amplificadores operacionales, como las topologías inversora y no inversora, las cuales demostraron un comportamiento cercano al ideal, con errores mínimos en sus ganancias. Sin embargo, al evaluar un amplificador operacional real ($\mu A741$), se observaron limitaciones significativas, como una tensión de offset y corrientes de bias con desviaciones considerables respecto a los valores teóricos. No obstante, el producto ganancia-ancho de banda (GBWP) se mantuvo relativamente constante, validando su importancia como parámetro clave en el diseño de circuitos.

En el ámbito de los filtros activos, se implementaron y evaluaron configuraciones como el filtro Sallen-Key y el filtro de realimentación múltiple. El primero mostró una excelente precisión en ganancia, mientras que el segundo presentó mayores desviaciones, atribuidas a las tolerancias de los componentes. Además, se identificaron desafíos en la medición del factor de amortiguamiento y en la implementación del filtro de variables de estado, lo que resalta la importancia de un diseño y ajuste cuidadoso en este tipo de circuitos.

Por otro lado, en el estudio de fuentes lineales y reguladores, se observó que el regulador de voltaje de salida fija ofreció una precisión excelente, mientras que la fuente de corriente ajustable presentó variaciones significativas en su precisión. También se destacó que el voltaje de rizado aumenta al disminuir la carga, un factor crítico a considerar en el diseño de circuitos con reguladores.

2. Introducción

Los amplificadores operacionales, comúnmente conocidos como op-amps, son dispositivos electrónicos ampliamente utilizados en circuitos analógicos debido a su versatilidad y eficiencia. Estos componentes son amplificadores de voltaje de alta ganancia, diseñados para realizar una variedad de operaciones matemáticas y de procesamiento de señales, como amplificación, filtrado, integración, diferenciación y sumación, entre otras.

Los amplificadores operacionales son componentes esenciales en la electrónica moderna, gracias a su flexibilidad y capacidad para realizar una amplia variedad de tareas. Su comprensión y manejo son fundamentales para el diseño y análisis de circuitos analógicos avanzados.

En este informe, se estudiarán las características y aplicaciones de los amplificadores operacionales, como pueden ser los filtros activos, así como los reguladores de voltaje y fuentes de corriente, que son dispositivos esenciales en la electrónica analógica.

3. Objetivos

Objetivo General

- Comprender los principios físicos que permiten el establecimiento de una oscilación sinusoidal.

Objetivos Específicos

- Reconocer las ventajas del uso del concepto de amplificador operacional en el diseño e implementación de sistemas analógicos.
- Reconocer la necesidad del uso de un control de amplitud como mecanismo para sostenimiento de la oscilación senoidal.

4. Marco teórico

4.1. Osciladores

Existen distintos sistemas capaces de generar señales por sí solas, tales como: triangulares, cuadráticas, sinusoidales, etc. Las dos categorías principales de generadores de señales son los osciladores sinusoidales y los osciladores de relajación [1]. El primero emplea un lazo de realimentación positiva compuesto por una red RC o RL, utilizando el fenómeno de resonancia. También se conoce como oscilador lineal. El segundo caso, se conoce como oscilador no lineal y emplean bloques conocidos como multivibradores [1].

Para el sistema de la ilustración 1, se tiene que la salida está dada por:

$$y = A(x + y\beta) \quad (1)$$

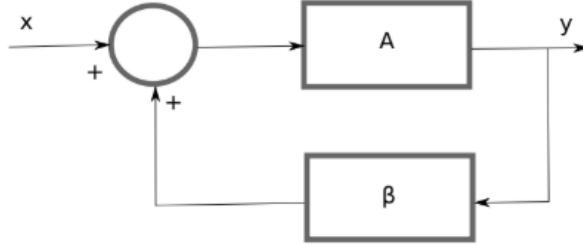


Ilustración 1: Circuito realimentado.

Donde:

- y es la salida del sistema
- x es la entrada del sistema
- A es la ganancia del amplificador
- β es el factor de realimentación

Por lo tanto, la ganancia del sistema realimentado está dada por:

$$A_{fb} = \frac{y}{x} = \frac{A}{1 - A\beta} \quad (2)$$

Cuando el resultado en el denominador es cero, entonces el sistema se encuentra en el límite de la estabilidad. Recordemos que un sistema con realimentación negativa es estable y el sistema con realimentación positiva es inestable [1].

Para que un sistema oscile, debe cumplirse la condición de Barkhausen [1]:

$$A(j\omega_o)\beta(j\omega_o) = 1 \quad (3)$$

Esta condición establece que para que exista oscilación, la ganancia de lazo debe ser unitaria a la frecuencia de oscilación ω_o . Esto significa que:

- La magnitud del producto $A\beta$ debe ser igual a 1
- El ángulo de fase del producto $A\beta$ debe ser 0° o un múltiplo entero de 360°

Por lo tanto,

$$A(s)\beta(s) = 1 + 0j \quad (4)$$

donde

$$\beta A = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0} \quad (5)$$

Sustituyendo $s = j\omega$, se puede deducir que los términos pares serían números reales y los términos impares serían imaginarios. Al agruparlos se puede simplificar en la siguiente ecuación.

$$\beta A = \frac{N_p(s) + jN_i(s)}{D_p(s) + jD_i(s)} \quad (6)$$

Donde $N_p(s)$ y $D_p(s)$ son los términos pares del numerador y denominador respectivamente, y $N_i(s)$ y $D_i(s)$ son los términos impares del numerador y denominador respectivamente.

Multiplicando numerador y denominador por el conjugado del denominador:

$$\beta A = \frac{N_p(s) + jN_i(s)}{D_p(s) + jD_i(s)} \cdot \frac{D_p(s) - jD_i(s)}{D_p(s) - jD_i(s)} \quad (7)$$

$$\beta A = \frac{N_p(s)D_p(s) + N_i(s)D_i(s) + j(N_i(s)D_p(s) - N_p(s)D_i(s))}{D_p(s)^2 - D_i(s)^2} \quad (8)$$

de manera que igualando con la ecuación 4 se tiene que:

$$\begin{cases} \frac{N_p(s)D_p(s)+N_i(s)D_i(s)}{D_p(s)^2-D_i(s)^2} = 1 \\ \frac{N_i(s)D_p(s)-N_p(s)D_i(s)}{D_p(s)^2-D_i(s)^2} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

resolviendo el sistema de ecuaciones 9 se tiene que:

$$\begin{cases} N_i = D_i \\ N_p = D_p \end{cases} \quad (10)$$

4.2. Oscilador de puente de Wien

Este circuito es uno de los osciladores más usados, por su sencillez y estabilidad [1]. Está realimentado negativamente por un circuito resistivo y positivamente por dos redes RC, en serie y paralelo.

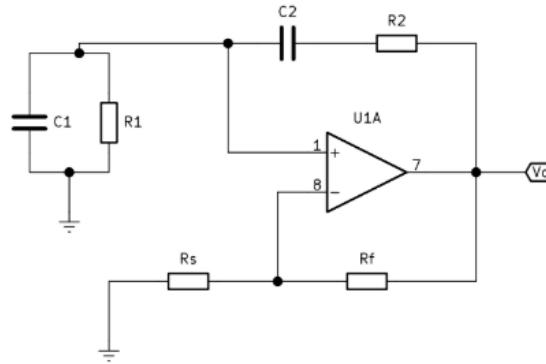


Ilustración 2: Oscilador de puente de Wien.

Simplificando el circuito, tomando la ganancia del amplificador no inversor, resulta el circuito de la ilustración 3

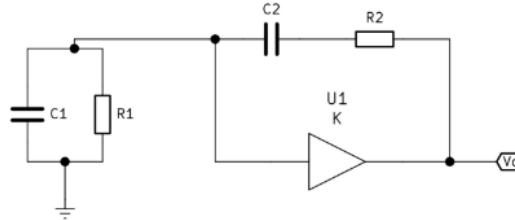


Ilustración 3: Oscilador de puente de Wien simplificado.

con

$$K = 1 + \frac{R_f}{R_s} \quad (11)$$

Ahora, utilizando el método del amplificador desvanecido para resolver el sistema,

$$x_{31} = \frac{Z_p}{Z_p + Z_s} \quad (12)$$

Donde, $Z_p = 1/sC_1 \parallel R_1$ y $Z_s = R_2 + sC_2$.

Por lo tanto, sustituyendo estos términos y simplificando la ecuación, se tiene:

$$\beta A = A \frac{R_1 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} \frac{s}{s^2 + s \frac{R_2 C_2 + R_1 C_1 + R_1 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (13)$$

Identificando los términos:

$$N_p(s) = 0 \quad (14)$$

$$N_i(s) = A \frac{R1C2}{R1R2C1C2} s \quad (15)$$

$$D_p(s) = s^2 + \frac{1}{R1R2C1C2} \quad (16)$$

$$D_i(s) = s \left(\frac{R2C2 + R1C1 + R1C2}{R1R2C1C2} \right) \quad (17)$$

Partiendo de la igualdad $N_p = D_p$

$$s^2 + \frac{1}{R1R2C1C2} = 0 \quad (18)$$

Se obtiene la frecuencia de oscilación del circuito,

$$\omega_o = \pm \sqrt{\frac{1}{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}} \quad (19)$$

Y de la igualdad $N_i = D_i$, se obtiene la ganancia del circuito

$$A = \frac{R2 \cdot C2 + R1 \cdot C1 + R1 \cdot C2}{R1 \cdot C2} \quad (20)$$

En la vida real, las variaciones de temperatura de los componentes dificulta mantener la estabilidad del puente de Wien [1]. Una manera de disminuir este efecto consiste en utilizar valores de resistencias iguales y de la misma tecnología, lo cual disminuye el efecto de oscilación debido a la temperatura.

Si $R_1 = R_2 = R$ y $C_1 = C_2 = C$, entonces la ganancia del circuito y su frecuencia de corte se vuelven:

$$A = 3 \quad (21)$$

$$\omega_o = \frac{1}{RC} \quad (22)$$

4.3. Controles de amplitud

Para un oscilador, no es posible garantizar que mantenga las características de oscilación durante toda su vida útil [1]. Para lograr esto, es necesario garantizar que la oscilación tenga un factor de amortiguamiento no nulo, $Ae^{\alpha t} \sin(\omega t)$, de manera que pueda crecer y decrecer en amplitud.

Se desea entonces que en el arranque, ese factor α sea mayor que cero, y que crezca en magnitud hasta lograr niveles utilizables. Cuando esta señal sea grande, entonces el factor de amortiguamiento será menor que cero, evitando que el oscilador llegue a la zona no lineal [1].

4.4. Comparadores

Un comparador no es mas que un dispositivo capaz de establecer una relación de orden, esto es, un dispositivo capaz de determinar su una señal V_a es por ejemplo mayor que V_b . El proceso de comparación puede ser reducido a una diferencia de señales ($V_a - V_b$) y a la verificación del signo de dicha diferencia, si $V_a > V_b$ entonces el signo será positivo, si por el contrario $V_a < V_b$ entonces el signo será negativo. Esta forma de concebir una comparación sugiere la posibilidad de utilizar un amplificador operacional para implementar el dispositivo comparador [2, pag. 2].

La salida del dispositivo comparador es básicamente una variable booleana, por lo que también puede concebirse el comparador como una interfaz entre el mundo analógico y sistemas digitales.

4.5. Comparador de lazo abierto

El comparador de lazo abierto es el más simple de los comparadores, su funcionamiento se basa en la saturación del amplificador operacional. La saturación se produce cuando la diferencia de potencial entre las entradas inversora y no inversora es suficientemente grande como para que el amplificador no pueda seguir amplificando la señal. En este caso, la salida del amplificador se satura a uno de los dos valores de alimentación, dependiendo de la polaridad de la señal de entrada. La ilustración 4 muestra este comportamiento.

Si el comparador fuese ideal, su salida sería exclusivamente dependiente de la polaridad de V_i respecto a tierra tal como se muestra en la ilustración 4. Sin embargo debido a los desequilibrios de la etapa de entrada del comparador real (o del AO) se producirá una "tensión de offset de entrada", tensión que puede variar entre un dispositivo y otro

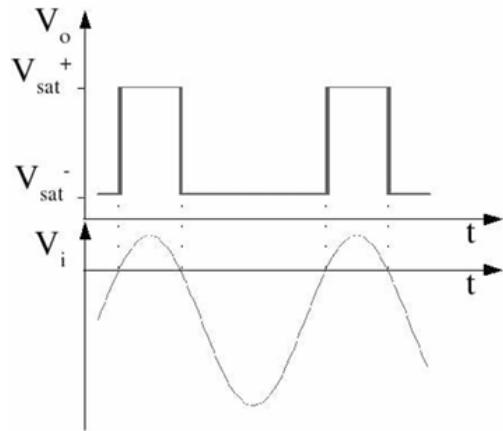


Ilustración 4: Comparador de lazo abierto.

y que además es afectado con la temperatura y por la deriva temporal. Así entonces la salida del comparador no conmutara exactamente cuando la señal cruce por cero sino para alguna tensión en el rango ($-V_{os}, V_{os}$) donde V_{os} no es mas que la máxima tensión de offset previsible.

Otro problema en la utilización de comparadores viene dado por el tiempo de respuesta, el cual puede determinarse como el tiempo transcurrido entre la aplicación de un flanco abrupto en la entrada diferencial y el momento en el cual la salida alcanza un alto porcentaje de su tensión en estado estacionario.

En la respuesta de salida que se muestra en la ilustración 5 pueden distinguirse dos comportamientos claramente diferenciados, el primero es que en el cual aun habiéndose producido un cambio en la entrada, la salida no cambia en lo absoluto durante un tiempo t_d (delay) o de retardo, pasado este tiempo la señal de salida cambia paulatinamente alcanzando una tasa de ascenso que viene dada por el Slewrate.

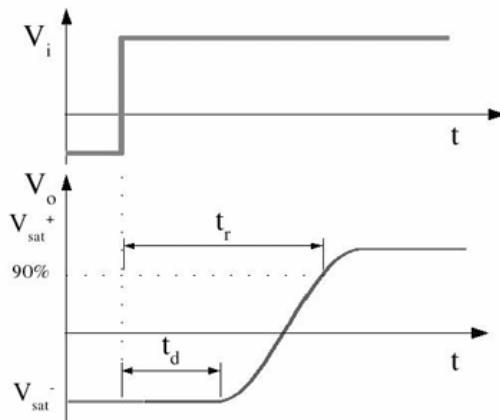


Ilustración 5: Respuesta de un comparador de lazo abierto a un flanco abrupto.

Otro problema inherente a los comparadores a lazo abierto es producido por el ruido que inevitablemente acompaña a la señal de entrada. Suponiendo una señal de entrada contaminada por ruido (aditivo) tal como la que se muestra en la ilustración 6, en este caso la salida del comparador no será una señal cuadrada sino que estará contaminada por el ruido.

4.6. Comparador de lazo cerrado

Los comparadores también pueden ser realimentados, solo que en su caso resulta mucho más beneficiosa la realimentación positiva en zona lineal, que la negativa como es usual en los A.O. Al practicar realimentación positiva en un comparador se obtiene fundamentalmente un nuevo comportamiento conocido como histéresis, en el cual los niveles de conmutación cambian con el estado (el nivel de tensión) en el que se encuentra el comparador. Ahora el circuito tiene dos niveles de umbral diferentes para la señal de entrada, uno para la transición de bajo a alto y otro para la transición de alto a bajo. Esta característica hace que el comparador de lazo cerrado sea muy útil para eliminar el ruido en las señales y para convertir una señal analógica en una señal digital. [2, pag.]

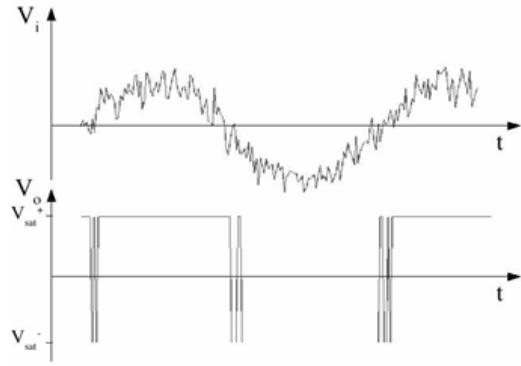


Ilustración 6: Respuesta de un comparador de lazo abierto a una señal de entrada contaminada por ruido.

4.7. Osciladores de relajación

Estos osciladores utilizan dispositivos biestables, como interruptores, disparadores Schmitt, compuertas lógicas y flip-flops, para cargar y descargar repetidamente un capacitor. Las formas de onda típicas que se pueden obtener con este método son las ondas triangular, de diente de sierra, exponencial, cuadrada y de pulso. A medida que avancemos, a menudo necesitaremos calcular el tiempo Δt que tarda en cargarse (o descargarse) un capacitor en una cantidad dada Δv . Las dos formas más comunes de carga/descarga son la lineal y la exponencial. [3, pag. 484]

Cuando se alimenta con una corriente constante I , un capacitor C se carga o descarga a una tasa constante, produciendo un transitorio lineal o rampa del tipo mostrado en la Ilustración 7. Los ingenieros suelen describir esta rampa mediante la relación fácil de recordar:

$$C\Delta v = I\Delta t \quad (23)$$

De donde se puede despejar el tiempo de carga o descarga:

$$\Delta t = \frac{C}{I} \Delta v \quad (24)$$

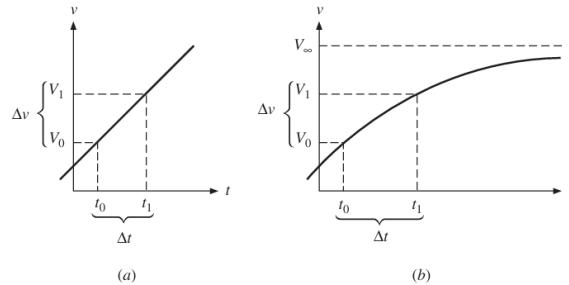


Ilustración 7: Carga y descarga lineal y exponencial de un capacitor.

Un *transitorio exponencial* ocurre cuando C se carga o descarga a través de una resistencia en serie R . Con referencia a la Fig. 10.1b, el voltaje instantáneo en el capacitor está dado por:

$$v(t) = V_\infty + (V_0 - V_\infty) \exp[-(t - t_0)/\tau]$$

donde:

- V_0 es el voltaje inicial,
- V_∞ es el voltaje en estado estacionario que se alcanzaría en el límite $t \rightarrow \infty$,
- $\tau = RC$ es la constante de tiempo que gobierna el transitorio.

Esta ecuación es válida independientemente de los valores y polaridades de V_0 y V_∞ . El transitorio alcanza un valor intermedio especificado V_1 en un instante t_1 tal que:

$$V_1 = V_\infty + (V_0 - V_\infty) \exp[-(t_1 - t_0)/\tau]$$

Tomando el logaritmo natural a ambos lados y despejando $\Delta t = t_1 - t_0$, podemos estimar el tiempo que tarda en cargarse o descargarse C desde V_0 hasta V_1 como:

$$\Delta t = \tau \ln \frac{V_\infty - V_0}{V_\infty - V_1} \quad (25)$$

4.8. Multivibradores

Los multivibradores son circuitos regenerativos diseñados especialmente para aplicaciones de temporización y generación de formas de onda. Los multivibradores pueden generar señales de salida que cambian entre dos estados, lo que los hace útiles para una variedad de aplicaciones, incluyendo osciladores, temporizadores, y flip-flops.

4.8.1. Multivibrator astable

El multivibrator astable conmuta espontáneamente entre un estado y otro, sin necesidad de comandos externos. También conocido como *multivibrator auto-oscilante*, su frecuencia está determinada por una red adecuada, que generalmente incluye:

- Un capacitor (para oscilaciones RC)
- Un cristal de cuarzo (para mayor precisión)

Características principales:

- No posee estados estables (de ahí el término “astable”)
- Genera ondas cuadradas continuamente
- La frecuencia depende de los valores de los componentes pasivos

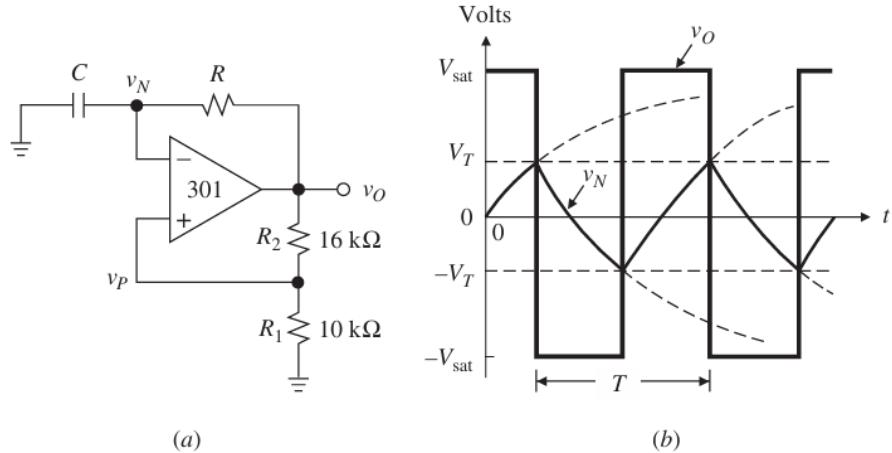


Ilustración 8: Multivibrator astable.

En el circuito de la ilustración 8-a, el comparador de amplificador operacional y las resistencias de retroalimentación positiva R_1 y R_2 forman un *disparador Schmitt inversor*. Asumiendo una saturación simétrica de salida en $\pm V_{\text{sat}}$, los umbrales del disparador Schmitt también son simétricos:

$$\pm V_T = \pm V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

La señal a la entrada inversora es provista por el propio amplificador operacional a través de la red RC.

Al encender la alimentación ($t = 0$), v_O cambiará a $+V_{\text{sat}}$ o $-V_{\text{sat}}$, ya que estos son los únicos estados estables permitidos por el disparador Schmitt. Suponiendo que cambia a $+V_{\text{sat}}$, se tendrá $v_P = +V_T$. Esto hará que R cargue C hacia V_{sat} , produciendo un aumento exponencial en v_N con constante de tiempo $\tau = RC$. Cuando v_N alcanza $v_P = V_T$, v_O cambia abruptamente a $-V_{\text{sat}}$, invirtiendo la corriente del capacitor y haciendo que v_P cambie a $-V_T$. Luego, v_N decréce exponencialmente hacia $-V_{\text{sat}}$ hasta alcanzar $v_P = -V_T$, momento en el que v_O vuelve a $+V_{\text{sat}}$,

repitiéndose el ciclo. Claramente, el circuito puede iniciar y mantener una oscilación, con v_O alternando entre $+V_{\text{sat}}$ y $-V_{\text{sat}}$, y v_N variando exponencialmente entre $+V_T$ y $-V_T$. Después del ciclo inicial, las formas de onda se vuelven periódicas. [3, pag. 492]

La frecuencia de oscilación f_0 se determina a partir del periodo T como $f_0 = 1/T$. Debido a la simetría de los niveles de saturación, v_O tiene un ciclo de trabajo del 50 %, por lo que solo es necesario calcular $T/2$. Aplicando la Ec. (10.3) con $\Delta t = T/2$ y $\tau = RC$:

$$\frac{T}{2} = \tau \ln \left(\frac{V_\infty - V_0}{V_\infty - V_1} \right)$$

donde:

- $V_\infty = V_{\text{sat}}$
- $V_0 = -V_T$
- $V_1 = +V_T$
- $\tau = RC$

Sustituyendo los valores simétricos:

$$\frac{T}{2} = RC \ln \left(\frac{V_{\text{sat}} - (-V_T)}{V_{\text{sat}} - V_T} \right) = RC \ln \left(\frac{V_{\text{sat}} + V_T}{V_{\text{sat}} - V_T} \right)$$

Finalmente, la frecuencia de oscilación es:

$$f_0 = \frac{1}{2RC \ln \left(\frac{V_{\text{sat}} + V_T}{V_{\text{sat}} - V_T} \right)}$$

4.8.2. Multivibrador monoestable

El multivibrador monoestable genera pulsos de ancho T al ser disparado, implementable con: (a) Contadores digitales o (b) Redes RC ($T \approx 1,1RC$ para CI 555). Aplicaciones incluyen generación de retardos, señales de habilitación y eliminación de rebotes en interruptores. [3, pag. 498]

El multivibrador monoestable tiene un estado estable en el que puede permanecer indefinidamente. También tiene un estado cuasiestable al que puede ser activado (o disparado) y en el que permanece durante un intervalo pre-determinado, igual al ancho deseado del pulso de salida. Cuando este intervalo termina, el multivibrador monoestable regresa a su estado estable y permanece allí, esperando otra señal de activación (o disparo). [4, pag. 1368]

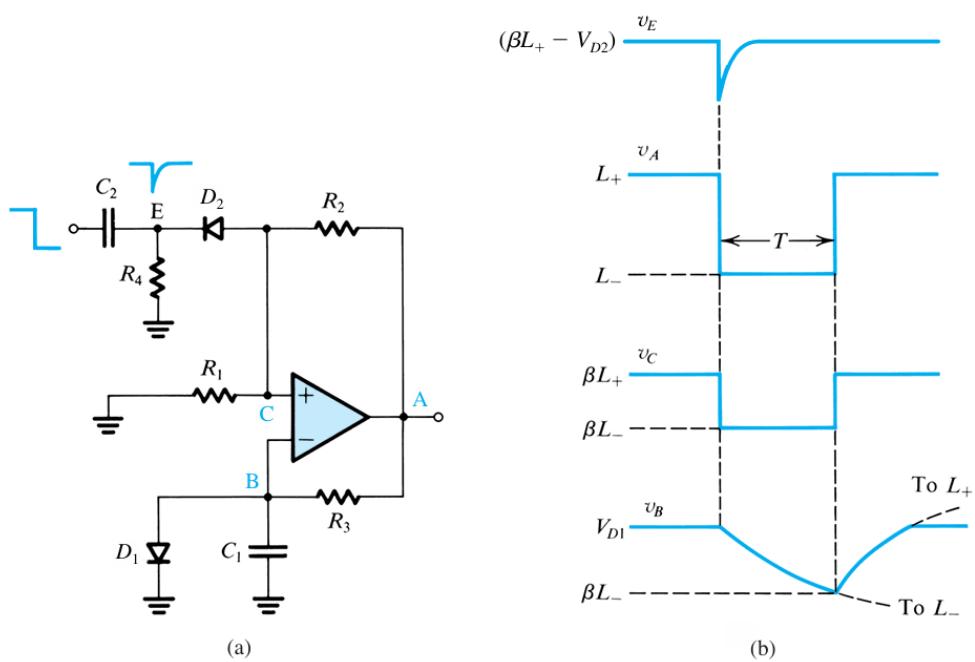


Ilustración 9: Multivibrador monoestable.

La ilustración 9-a muestra un circuito monoestable basado en un amplificador operacional (op-amp). Se observa que este circuito es una versión modificada del circuito astable de la ilustración 8. En concreto, se ha añadido un diodo de sujeción D_1 en paralelo con el capacitor C_1 , y un circuito de disparo compuesto por el capacitor C_2 , la resistencia R_4 y el diodo D_2 se conecta a la entrada no inversora del op-amp. [4, pag. 1368]

El circuito opera de la siguiente manera:

- **Estado estable:** En ausencia de una señal de disparo, la salida del op-amp está en L_+ , y el diodo D_1 conduce a través de R_3 , fijando el voltaje v_B a una caída de diodo por encima de tierra. Se elige R_4 mucho mayor que R_1 , de modo que D_2 conduzca una corriente muy pequeña y el voltaje v_C quede determinado principalmente por el divisor de tensión R_1, R_2 . Así, $v_C = \beta L_+$, donde $\beta = \frac{R_1}{R_1+R_2}$. Este estado se mantiene porque βL_+ es mayor que V_{D1} .
- **Disparo:** Al aplicar un flanco negativo en la entrada de disparo (ver formas de onda en ilustración 9-b), este acopla un voltaje negativo al cátodo de D_2 a través de C_2 , haciendo que D_2 conduzca fuertemente y lleve el nodo C a un nivel bajo. Si la señal de disparo es suficientemente grande para que v_C caiga por debajo de v_B , el op-amp detectará una tensión negativa neta en su entrada y su salida cambiará a L_- . Esto, a su vez, hará que v_C pase a βL_- , manteniendo el op-amp en este nuevo estado. En este punto, D_2 se corta, aislando el circuito de cambios posteriores en la entrada de disparo.
- **Estado cuasiestable:** El voltaje negativo en A corta D_1 , y C_1 comienza a descargarse exponencialmente hacia L_- con una constante de tiempo $C_1 R_3$. El multivibrador permanece en este estado hasta que v_B cae por debajo de βL_- . En ese instante, la salida del op-amp vuelve a L_+ , y v_C retorna a βL_+ . El capacitor C_1 se recarga entonces hacia L_+ hasta que D_1 conduce nuevamente, restaurando el estado estable.

4.9. Generador de funciones

La onda exponencial generada en un circuito astable puede ser cambiada a un una onda triangular reemplazando el circuito RC con un integrador como se muestra en la ilustración . El integrador ocasiona que el capacitor se cargue y descargue de manera lineal, obteniendo de esta forma una onda triangular. [4, pag. 1366]

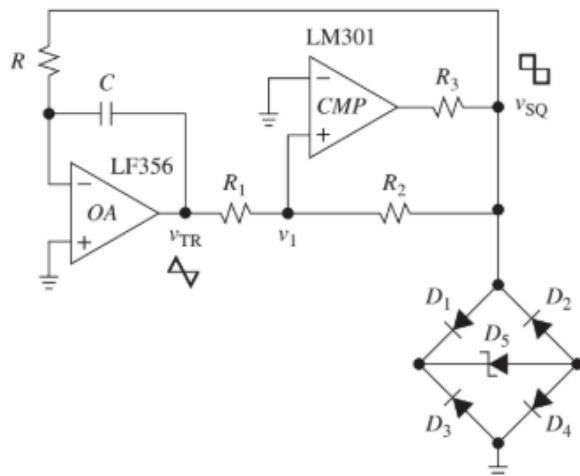


Ilustración 10: Generador de funciones

Supongamos que en la salida V_{SQ} del circuito tenemos valores máximos V_{SQ+} y mínimos V_{SQ-} , Cuando el valor de la salida es V_{SQ+} una corriente es V_{SQ+}/R va a pasar a través de la resistencia y del condensador, causando que en la salida del integrador decrezca linealmente con una pendiente $-V_{SQ+}/RC$, Esto va a ocurrir hasta que la salida del integrador alcance el límite inferior del circuito astable, punto en el cual el circuito astable cambiará de estado, volviéndose la salida del astable igual a V_{SQ-} . En este momento la corriente a través de R y C cambiará de dirección y su valor se volverá $-V_{SQ-}/R$, causando que la salida del integrador aumente linealmente con una pendiente V_{SQ-}/RC hasta que alcance el límite superior del circuito astable, punto en el cual el circuito astable cambiará de estado, volviéndose la salida del astable igual a V_{SQ+} , una vez alcanzado este punto el circuito cambiará de estado nuevamente, haciendo que el voltaje en su salida sea V_{SQ+} y repitiendo el ciclo.

De lo dicho anteriormente se puede deducir una expresión para el periodo T de la onda triangular y la onda cuadrada. Durante el intervalo T_1 tenemos

$$\frac{V_{TH} - V_{TL}}{T_1} = \frac{V_{SQ+}}{RC}$$

de donde podemos despejar T_1

$$T_1 = \frac{V_{TH} - V_{TL}}{V_{SQ+}} RC \quad (26)$$

De manera similar, durante T_2 tenemos

$$\frac{V_{TH} - V_{TL}}{T_2} = \frac{-V_{SQ-}}{RC}$$

de donde podemos despejar T_2

$$T_2 = \frac{V_{TH} - V_{TL}}{-V_{SQ-}} RC \quad (27)$$

5. Metodología

5.1. Osciladores

5.1.1. Trabajo de preparación

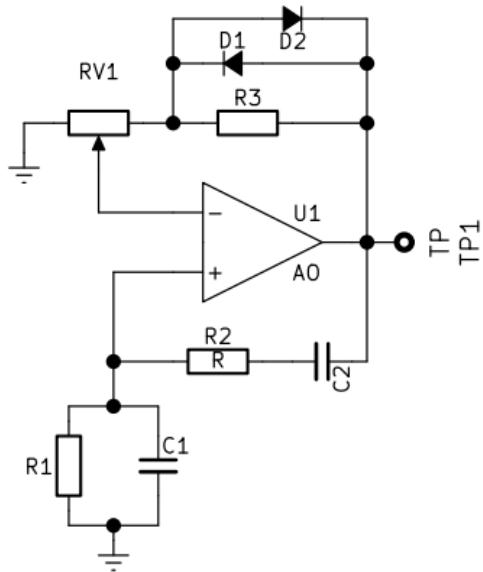


Figura 1: Oscilador de puente de Wien con control de amplitud

Para el circuito de la figura 1, determinar la frecuencia de oscilación.

Si se toma $R_1 = R_2 = R$ y $C_1 = C_2 = C$ La frecuencia de oscilación del circuito viene dada por la ecuación 22.

$$\omega_o = \frac{1}{R \cdot C}$$

Diseñar (utilizando valores comerciales) el oscilador de la figura 1 con una frecuencia de oscilación de 5.0 kHz.

Partiendo de la ecuación 22 primero fijamos el valor de los condensadores C ya que se fabrican con mucho menos variedad de valores que las resistencias, En este caso se seleccionará

$$C = C_1 = C_2 = 10nF \quad (28)$$

Ahora hallamos el valor de la resistencia:

$$R = \frac{1}{C\omega_o} \quad (29)$$

$$R = \frac{1}{10nF \cdot 2\pi \cdot 5,0kHz} \quad (30)$$

$$R = 3183\Omega \quad (31)$$

Un valor comercial cercano sería:

$$R = R_1 = R_2 = 3,3k\Omega \quad (32)$$

Ahora debemos cumplir con la condición $A = 3$, partiendo de la ecuación 11 y tomando en cuenta que para este circuito:

$$R_f = R_3 + xR_{v1} \quad (33)$$

$$R_s = (1 - x)R_{v1} \quad (34)$$

tenemos

$$A = 3 = 1 + \frac{R_3 + xR_{v1}}{(1 - x)R_{v1}} \quad (35)$$

Si decimos que el potenciómetro tiene el valor

$$R_{v1} = 10k\Omega \quad (36)$$

y que $x = 0,5$, entonces tenemos

$$\begin{aligned} 3 &= 1 + \frac{R_3 + 5k\Omega}{5k\Omega} \\ 2 &= \frac{R_3 + 5k\Omega}{5k\Omega} \\ 10k\Omega &= R_3 + 5k\Omega \\ R_3 &= (10 - 5)k\Omega \\ R_3 &= 5k\Omega \end{aligned}$$

usando un valor comercial

$$R_3 = 5,1k\Omega \quad (37)$$

Determinar la amplitud de la señal de salida cuando está presente el control de amplitud

Ahora, conectando los diodos al circuito en un principio no estarán funcionando, pero cuando el voltaje sea suficiente para polarizar los diodos estos entrarán en funcionamiento y toda la corriente pasará a través de ellos en vez de por la resistencia R_1 , por tanto la ecuación 35 se vuelve

$$A = 1 + \frac{xR_{v1}}{(1 - x)R_{v1}} \quad (38)$$

si decimos que $x = 0,5$

$$\begin{aligned} A &= 1 + \frac{0,5R_{v1}}{0,5R_{v1}} \\ A &= 1 + 1 \\ A &= 2 \end{aligned}$$

Queremos encontrar la expresión de la tensión en la entrada negativa del amplificador V_N , para ello aplicamos un divisor de tensión desde V_o

$$V_N = \frac{(1-x)R_{v1}}{(1-x)R_{v1} + xR_{v1}}(V_o - V_{Don})$$

$$V_N = \frac{(1-x)R_{v1}}{(1-x+x)R_{v1}}(V_o - V_{Don})$$

$$V_N = \frac{(1-x)R_{v1}}{R_{v1}}(V_o - V_{Don})$$

$$V_N = (1-x)(V_o - V_{Don})$$

$$V_N = (1-x)V_o - (1-x)V_{Don}$$

Recordando que

$$\frac{V_o}{V_N} = 3 \quad (39)$$

$$\frac{V_o}{3} = (1-x)V_o - (1-x)V_{Don}$$

despejamos V_o

$$V_o = \frac{(1-x)V_{Don}}{1-x-\frac{1}{3}} \quad (40)$$

5.1.2. Simulaciones

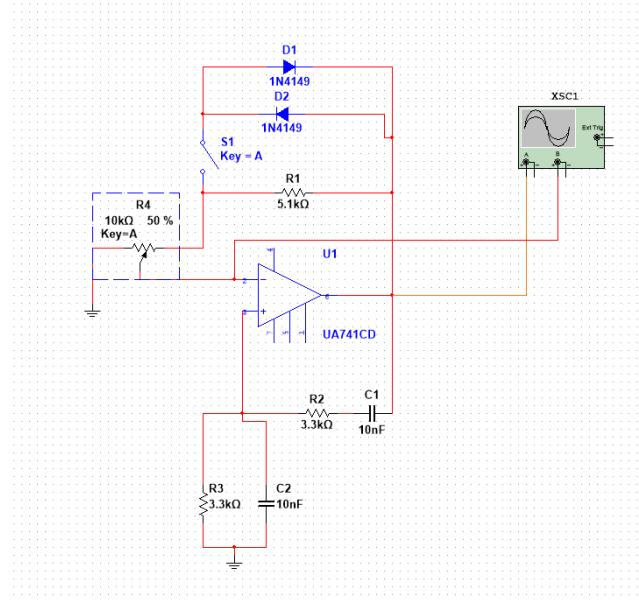


Ilustración 11: Circuito oscilador en el simulador

En la ilustración 11 se muestra el montaje del circuito oscilador en el programa Multisim.

La ilustración 12 muestra la forma de onda de la señal de salida del oscilador sin control de amplitud y con $x = 0,5$. Podemos observar que la ganancia es 3.02 y la frecuencia de la señal es 4.76 kHz.

La ilustración 13 muestra la forma de la onda del circuito oscilador con control de amplitud cuando $x = 0,5$, podemos observar que la ganancia es 2.98 y la frecuencia es 4.76 kHz.

En la ilustración 14 se observa que la onda se empieza a saturar y que la frecuencia se empieza a alejar de la condición $f = 5\text{kHz}$.

En la ilustración 15 podemos ver que la onda se atenúa y la frecuencia se hace 4.34 kHz, alejándose de la frecuencia deseada de 5kHz.

De las simulaciones podemos observar que para el circuito sin control de amplitud el rango efectivo del potenciómetro es muy reducido, x debe ser muy cercano a 0.5, mientras que para el circuito con control de amplitud el rango de x aumenta hasta casi $x = \pm 0,65$. En la práctica de laboratorio se desea comprobar si el rango efectivo de x aumenta cuando se implementa el control de amplitud.

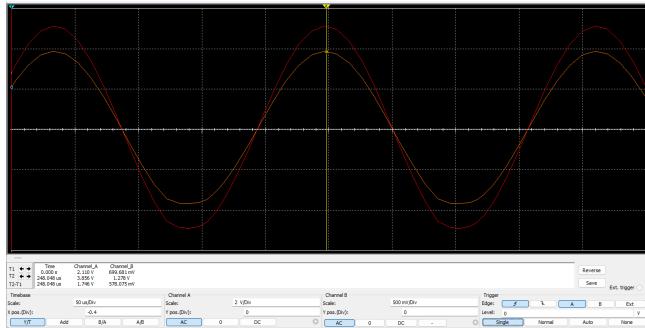


Ilustración 12: Forma de onda circuito oscilador sin control de amplitud

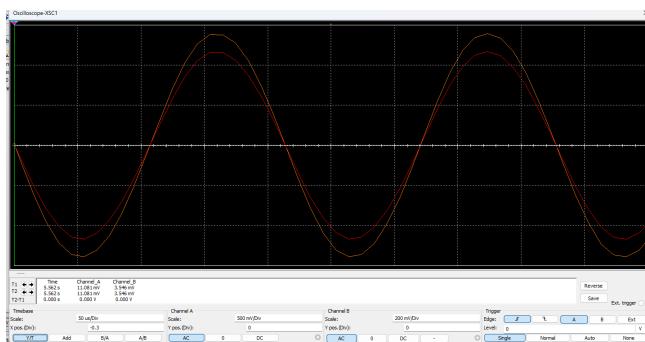


Ilustración 13: Forma de onda circuito oscilador con control de amplitud

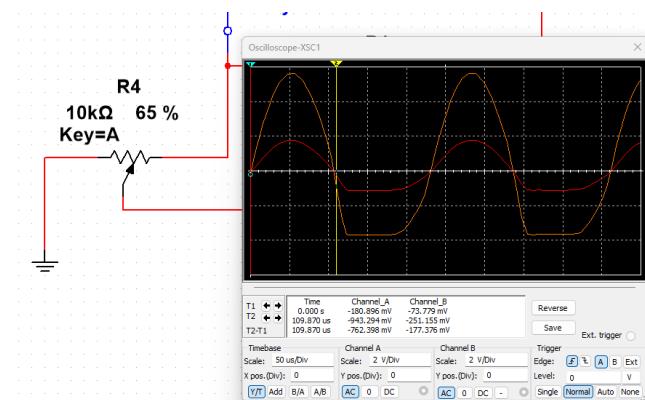


Ilustración 14: Forma de onda circuito oscilador con control de amplitud cuando $x=0.65$

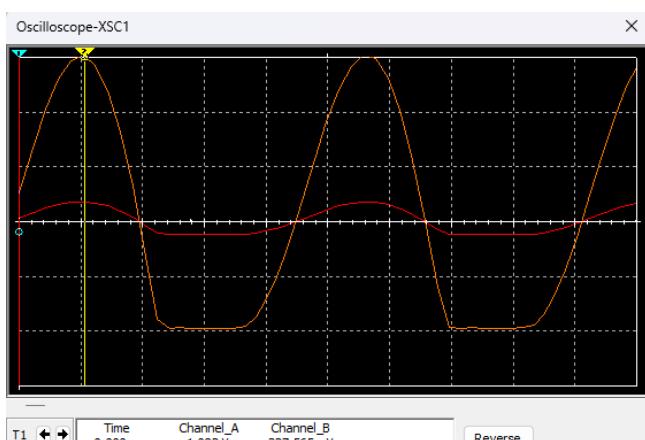


Ilustración 15: Forma de onda circuito oscilador con control de amplitud cuando $x=0.55$

5.2. Multivibradores

5.2.1. Trabajo de preparación

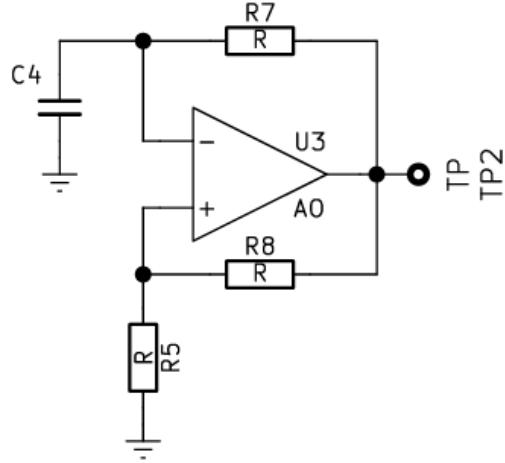


Figura 2: Multivibrator Astable con base en A.O

Para el circuito de la figura 2, diseñar con el fin de obtener una oscilación de frecuencia 5.0kHz y amplitud 2V.

Al usar un amplificador operacional UA741 alimentado con voltajes $+VCC=10\pm 1V$ y $VEE=-10\pm 1V$ este tendrá tensiones de saturación $+Vs_{sat}=8,005 V$ y $-Vs_{sat}=-8,005 V$, dichos valores fueron estudiados y comprobados en prácticas anteriores por lo cual serán utilizados como datos para esta práctica y para la práctica 3.3 del capítulo siguiente.

$$Vp = \frac{R_5}{R_5 + R_8} \cdot V_{o_{max}} \quad (41)$$

Sustituyendo $Vp = 2V$ y $V_o = Vs_{sat+} = 8V$ se tiene

$$2 = \frac{R_5}{R_5 + R_8} 8,1$$

$$2R_5 + 2R_8 = 8,1R_5$$

$$2R_8 = (8,1 - 2)R_5$$

$$R_8 = 3,05R_5$$

si $R_5 = 3,3k$
entonces

$$R_8 = 10k$$

La frecuencia requerida es de 5,0kHz, es decir:

$$T = \frac{1}{f} = 0,2ms \quad (42)$$

El periodo de un semi ciclo de la señal está dado por la carga exponencial del condensador (ecuación 25).

$$t1 = -R_7 C_4 \ln \left(\frac{V_0 - V_{p_{max}}}{V_o - V_{p_{min}}} \right)$$

$$t1 = -R_7 C_4 \ln \left(\frac{\left(1 - \frac{R_5}{R_5 + R_8}\right)V_p}{\left(1 + \frac{R_5}{R_5 + R_8}\right)V_p} \right)$$

de donde tenemos:

$$t_1 = -R_7 C_4 \ln \left(\frac{R_8}{2R_5 + R_8} \right)$$

al ser el circuito simétrico, tenemos que

$$T = 2t_1 = -2R_7 C_4 \ln \left(\frac{R_8}{2R_5 + R_8} \right)$$

Asumiendo que $C_4 = 10nF$ se tiene

$$R_7 = -\frac{T}{2C_4 \ln \left(\frac{R_8}{2R_5 + R_8} \right)} = -\frac{0,2 \times 10^{-3}}{2(100 \times 10^{-9}) \ln \left(\frac{1500}{2 \times 510 + 1500} \right)}$$

$$R_7 = 22k\Omega$$

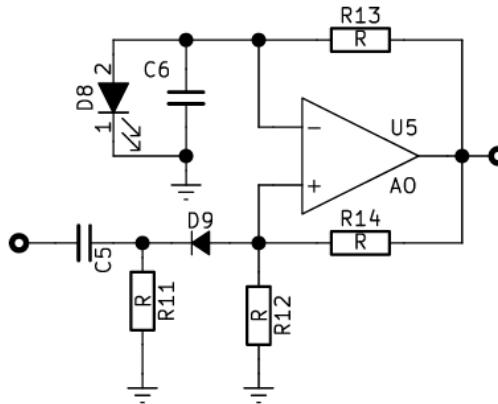


Figura 3: Multivibrador Monostable con base en A.O

Para el circuito de la figura 3, diseñar con el fin de obtener un tiempo de pulso de 10ms. El voltaje en la salida no inversora del amplificador (V_p), en el momento que ocurre el pulso negativo y $D9$ no conduce, está dado por la siguiente expresión:

$$V_{p3} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{14}} V_{o\min}$$

No hay condiciones de ganancia o de amplitud de las señales por lo que se tomarán valores arbitrarios para R_{12} y R_{14} :

$$R_{12} = 5,1k \quad (43)$$

$$R_{14} = 10k \quad (44)$$

$$V_{p3} = \frac{5,1k}{10k + 5,1k} (-8,005) = -6,38V$$

$$V_p = 2,9$$

R_{11} tiene que ser bastante mayor que R_{12} para que el diodo se mantenga polarizado y también para que el paralelo $R_{11} \parallel R_{12}$ no altere el comportamiento del circuito. Se tomará

$$R_{11} = 100k$$

Para hallar el valor de R_{13} se vuelve a usar la ecuación 25 de carga exponencial del condensador. Despejando R_{13} se tiene:

$$R_{13} = -\frac{t_c}{C_a \ln \left(\frac{V_{P3}-V_{SAT}}{V_{DB}-V_{SAT}} \right)} = -\frac{10 \cdot 10^{-3}}{(100 \cdot 10^{-9}) \ln \left(\frac{-6,38-(-8,005)}{1,5-(-8,005)} \right)} = 160k\Omega$$

usando un valor comercial

$$R_{13} = 150k\Omega$$

5.2.2. Simulaciones

La ilustración 16 muestra la construcción del multivibrador astable en Multisim. En la ilustración 17 se observa la forma de onda de la señal de salida V_o y la señal en el condensador V_p la cual tiene una forma parecida a una senoidal en vez de la forma exponencial de carga y descarga esperada.

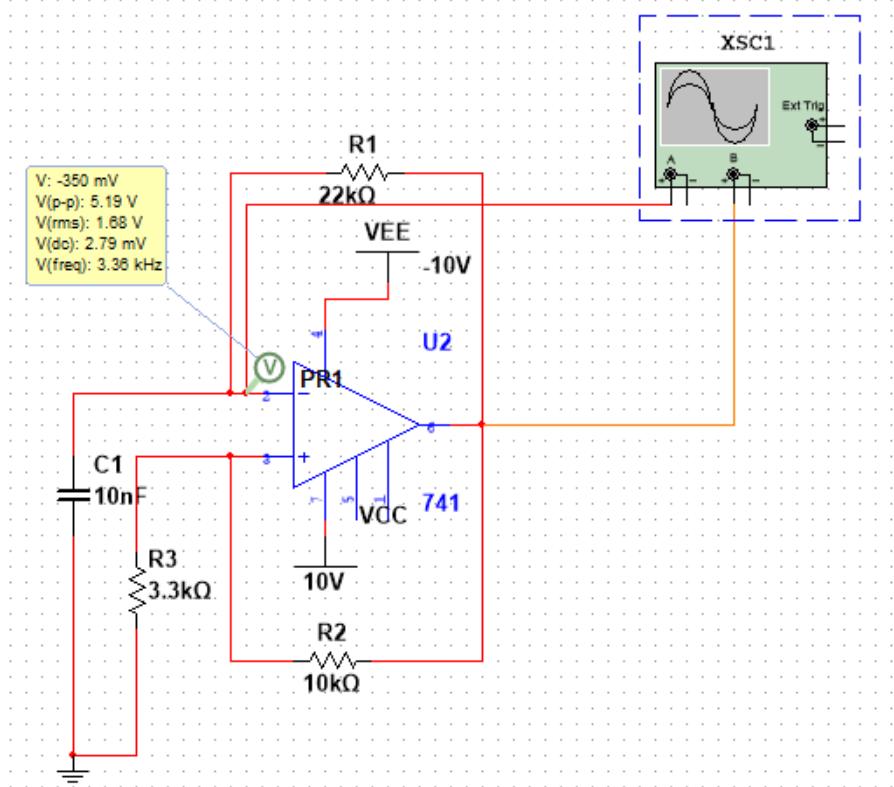


Ilustración 16: Simulación montaje del multivibrador astable en Multisim.

La ilustración 18 muestra la construcción del multivibrador monoestable en Multisim.

En la ilustración 19 se observa la forma de onda de la señal de salida V_o la cual es cuadrada, la señal de pulso V_g con un periodo mayor a 10ms y la señal de carga del condensador, la cual tiene la forma exponencial esperada. Se puede observar V_c se mantiene en un estado estable ($V_o = V_{SAT+} = 8,005V$) hasta que ocurre un flanco ocasionado por el generador, el condensador se descarga y carga rápidamente a través de R_{13} y D_9 en un tiempo de 11ms para luego volver a su zona estable.

En la ilustración 20 se observa la forma de onda de la señal de salida V_o y la señal de pulso V_c en el condensador, esta vez se puede observar mientras el condensador está en su estado de carga y descarga a pesar de que ocurra otro pulso debido al generador, esto no altera el comportamiento de la carga, sino que espera a que el circuito vuelva a su estado estable para volver a descargarse cuando ocurra otro flanco.

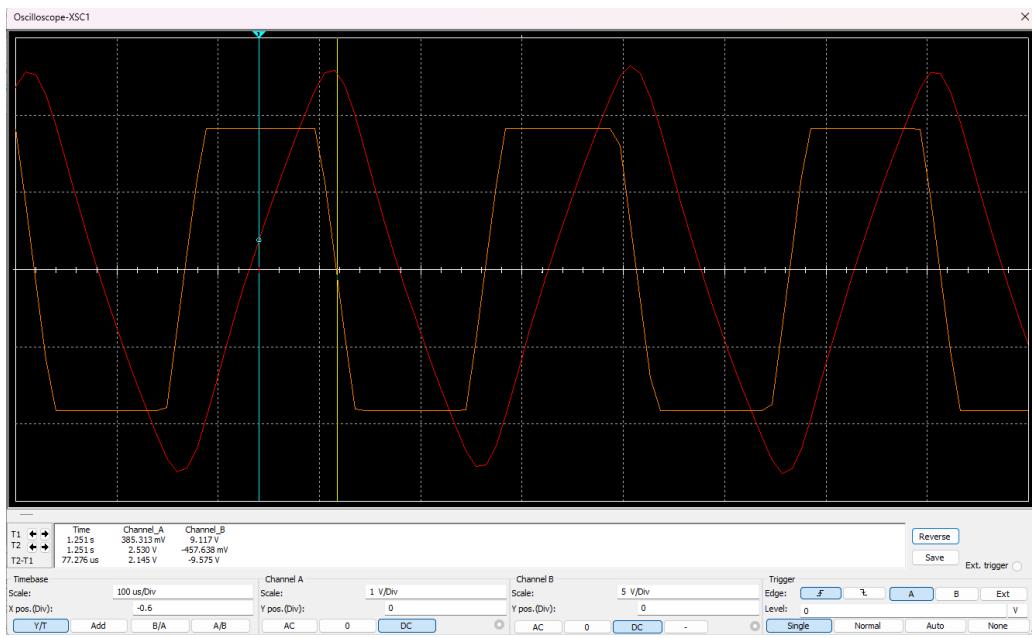


Ilustración 17: Simulación formas de onda (V_o , V_p) del multivibrador astable en Multisim.

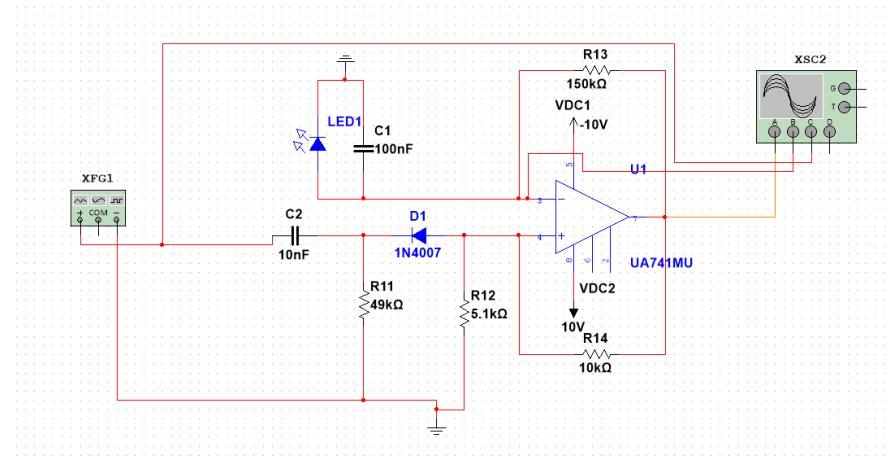


Ilustración 18: Simulación montaje del multivibrador monoestable en Multisim.

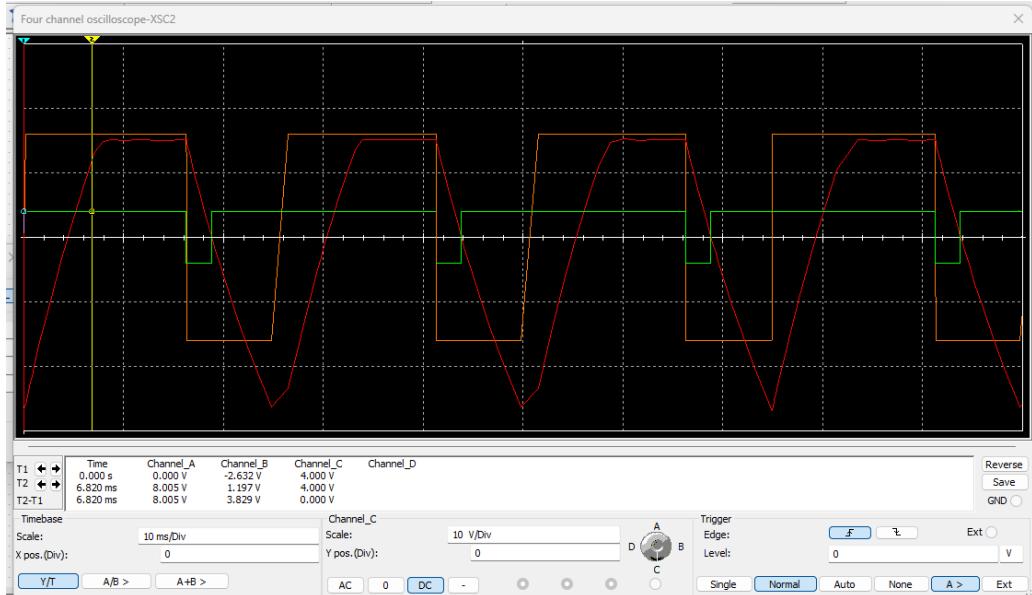


Ilustración 19: Simulación formas de onda (V_g , V_c , V_o) del multivibrador monoestable cuando el periodo de la señal V_g es menor a 10ms.

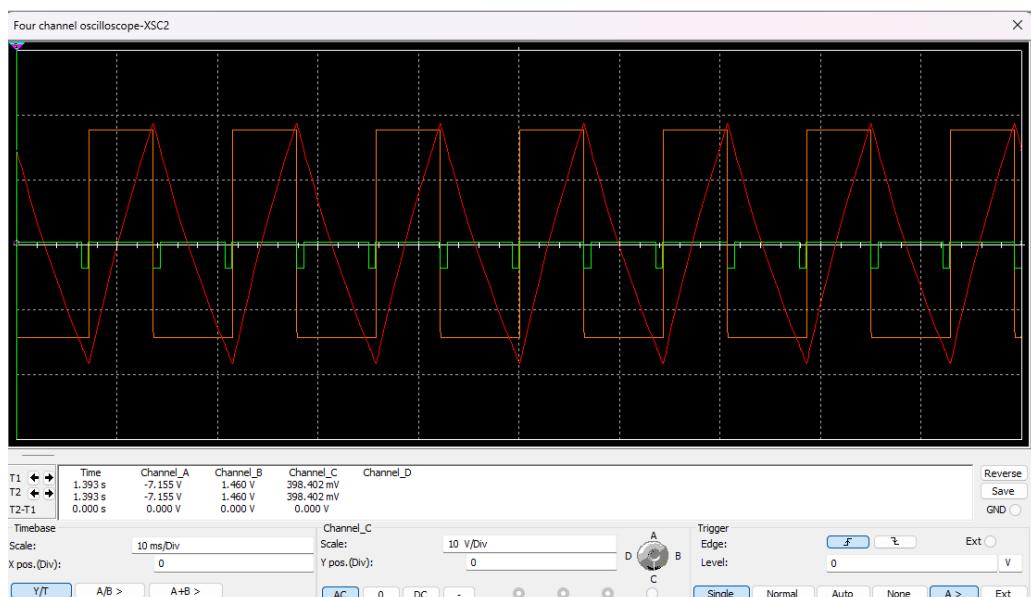


Ilustración 20: Simulación formas de onda (V_g , V_c , V_o) del multivibrador monoestable cuando el periodo de la señal V_g es mayor a 10ms.

5.3. Generador de funciones

5.3.1. Trabajo de preparación

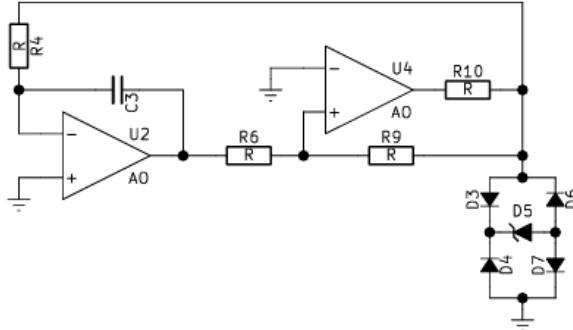


Figura 4: Generador de funciones

Para el circuito de la figura 4, diseñar con el fin de obtener una oscilación de frecuencia 5.0kHz.

Llamaremos a la salida del astable V_C , a la entrada positiva del astable V_p y a la salida del integrador V_T . Tenemos que la salida V_C viene dada por los valores de los diodos y del zener, de modo que

$$V_C = V_Z + 2V_D \quad (45)$$

Llamaremos a las entradas del amplificador U4 V^- y V^+ , el voltaje en V^+ viene dado por

$$V^+ = \frac{R_6}{R_6 + R_7} V_C + \frac{R_7}{R_6 + R_7} V_T$$

Despejando V_T de la ecuación

$$V_T = \frac{R_6 + R_7}{R_7} V^+ - \frac{R_6}{R_7} V_C$$

Pero el voltaje $V^- = 0$ ya que está conectado a la referencia y $V^+ = V^-$ por lo tanto

$$V_T = -\frac{R_6}{R_7} V_C \quad (46)$$

Se utilizarán el diodo zener 1N4734A y los diodos 1N4007, por lo que

$$V_Z = 5,80V$$

$$V_D = 1,00V$$

Por tanto

$$V_C = \pm 7,80V$$

Para el diseño no se pide ningún valor específico para la magnitud de la señal triangular en el diseño, por lo tanto se puede escoger cualquier valor para R_6 y R_7 siempre y cuando V_T no alcance el voltaje de saturación del amplificador. Por simplicidad se utilizará $R_6 = R_7$

por tanto

$$V_T = -V_C$$

$$V_C = 6,9V \rightarrow V_T = -7,8V \quad (47)$$

$$V_C = -6,9V \rightarrow V_T = 7,8V \quad (48)$$

Para cumplir con la condición de frecuencia primero hay que tomar en cuenta el tiempo de retardo de la señal debido al slew rate, el cual viene dado por la expresión

$$T_{SR} = \frac{2(V_Z + 2V_D)}{SR}$$

De la hoja de datos del amplificador $\mu A741$ tenemos que $SR = 0,5V\mu s$, por tanto

$$T_{SR} = \frac{2 \cdot 6,9}{0,5} = 27,6\mu s$$

Y tenemos que el periodo viene dado por

$$T = T_1 + T_2 + T_{SR}$$

Para este caso $T_1 = T_2$ por tanto la expresión se vuelve

$$T = 2 \cdot T_1 + T_{SR}$$

despejando T_1

$$T_1 = \frac{T - T_{SR}}{2} = \frac{200 - 27,6}{2}\mu s = 86,2\mu s$$

Entonces de la ecuación 26 tenemos

$$86,2\mu s = \frac{2 \cdot V_T}{V_C} RC$$

despejando R

$$R = 86,2 \times 10^{-6} \frac{V_C}{2 \cdot V_T \cdot C} \quad (49)$$

Si $C = 10nF$ entonces

$$R = 4,3k\Omega \quad (50)$$

La resistencia R_{10} es para proteger al amplificador debido a que los diodos fijan el voltaje de salida y se debe asegurar que la corriente en la salida sea lo suficientemente pequeña, por lo tanto se escogerá un valor de

$$R_{10} = 1k\Omega \quad (51)$$

5.3.2. Simulación

Simular el circuito diseñado y verificar las especificaciones, reportar las formas de ondas de interés para evidenciar el funcionamiento del circuito La ilustración 21 muestra la construcción del circuito generador de funciones utilizando los valores calculados.

La ilustración 22 muestra las formas de onda triangular y cuadrada generadas por el circuito en la simulación. Se puede observar que la frecuencia de las ondas es de aproximadamente 5kHz y que ambas ondas tienen magnitudes casi idénticas, sin embargo las magnitudes son de máximo de 6V mientras que en los cálculos la magnitud era de 7.8V. También se puede observar que la señal V_c no es del todo cuadrada y que la señal V_t tampoco es del todo triangular.

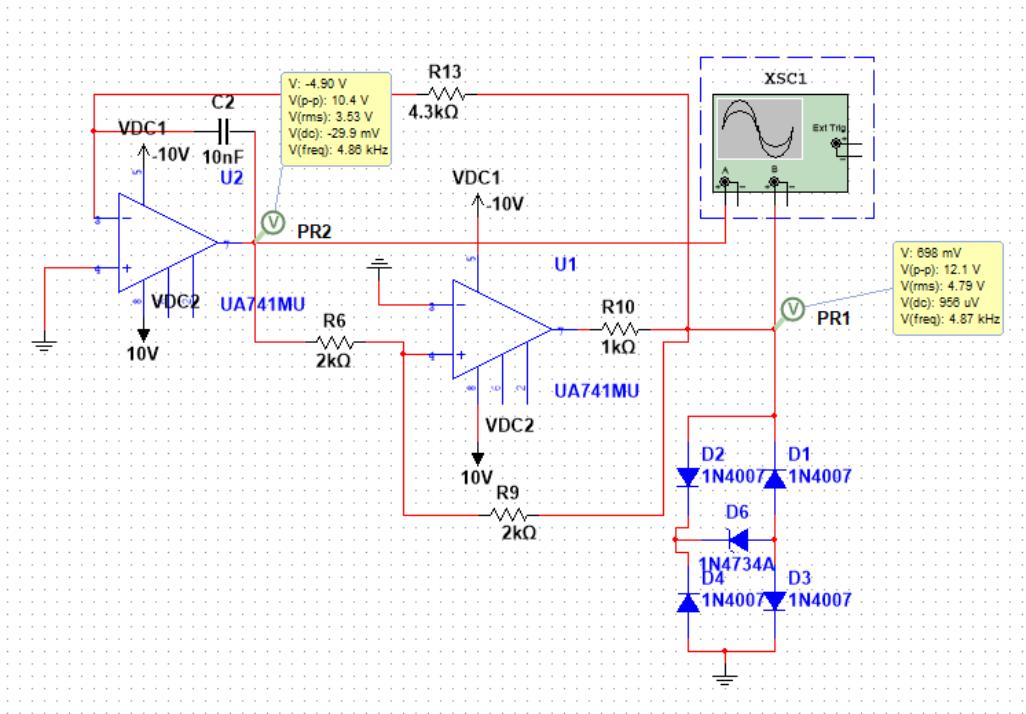


Ilustración 21: Montaje del circuito generador de funciones en multisim

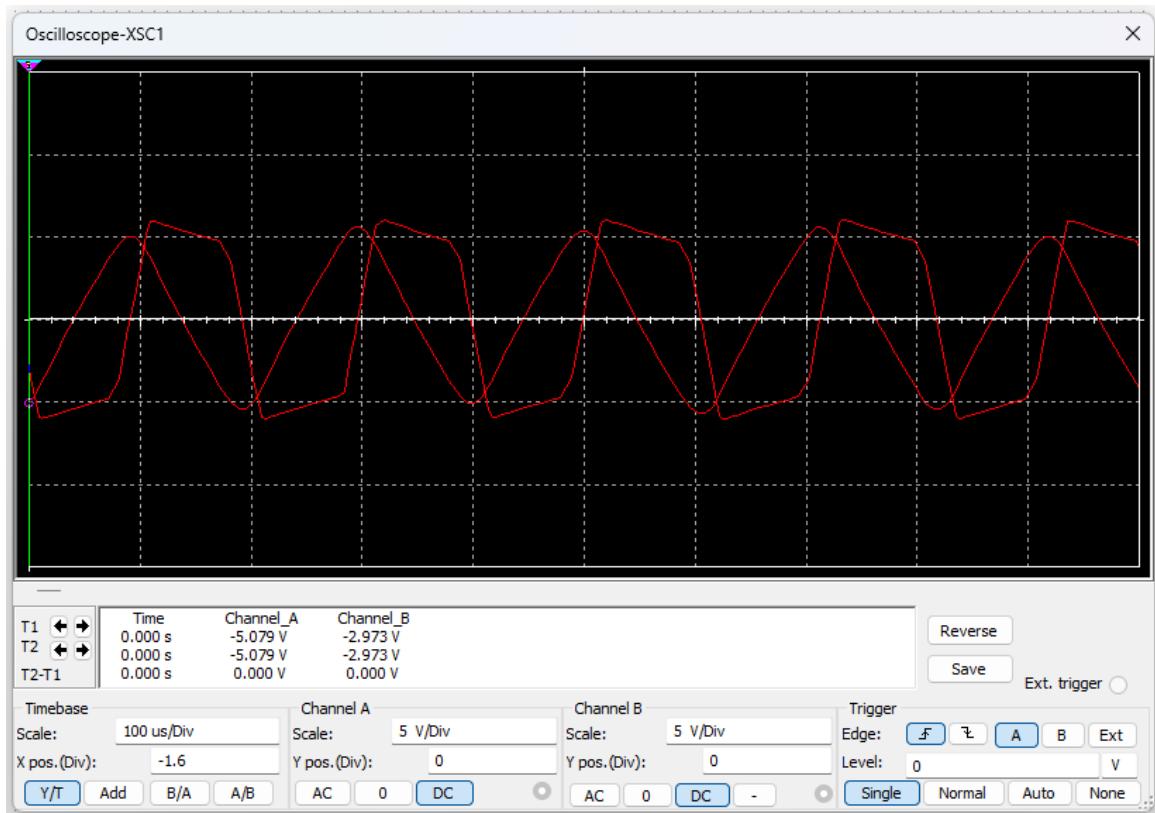


Ilustración 22: Formas de ondas triangular y cuadrada del generador de funciones en la simulación

6. Instrumentos y componentes

A continuación se listan los instrumentos y componentes utilizados en la práctica de laboratorio.

- Generador de ondas N°7 del laboratorio.
- Fuente DC N°1 del laboratorio
- Osciloscopio N°7 del laboratorio
- Resistencias con tolerancia del 5 % y potencia de 1/4 W de valores: 150k, 22k, 39k, 3.3k, 5.1k, 10k, 4.3k y 2k
- Condensadores de 10nF y 100nF
- Potenciómetro de 10k.
- Amplificadores $\mu A741$, $lm741$ y $mc1741$
- Dos protoboard.
- Diodo Zener 1N4734A y 4 diodos 1N4007

7. Presentación de resultados

7.1. Osciladores

Descripción	V_o [V]	ΔV_o [V]	T [ms]	ΔT [ms]	f [kHz]	Δf [kHz]
Oscilando	9.00	1.00	0.20	0.01	5.00	0.25
Saturado	9.00	1.00	0.45	0.01	2.22	0.05

Cuadro 1: Mediciones de voltaje, periodo y frecuencia del oscilador sin control de amplitud.

Descripción	R_x [k Ω]	ΔR_x [k Ω]	$RV1$ [k Ω]	$\Delta RV1$ [k Ω]	X	ΔX
Oscilando	4.82	0.01	10.00	0.50	0.482	0.025
Saturado	8.00	0.01	10.00	0.50	0.800	0.040

Cuadro 2: Mediciones del potenciómetro en el oscilador sin control de amplitud.

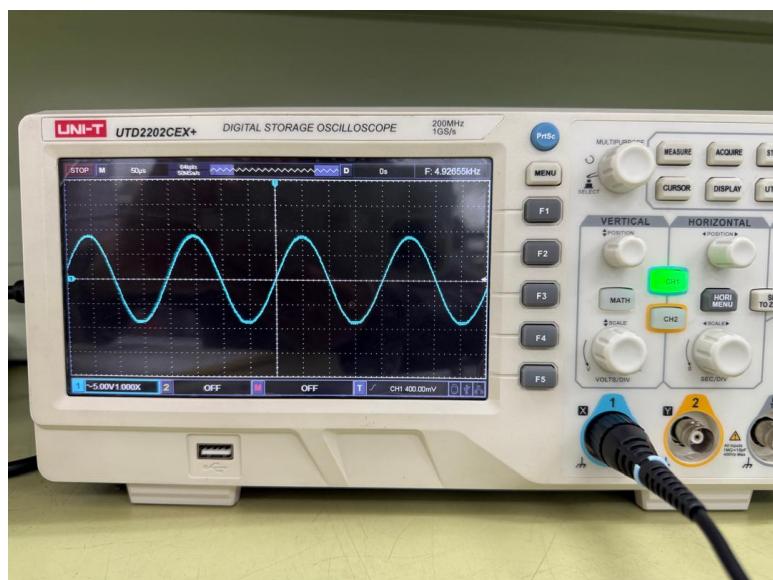


Ilustración 23: Medición Oscilador sin control de amplitud funcionando.

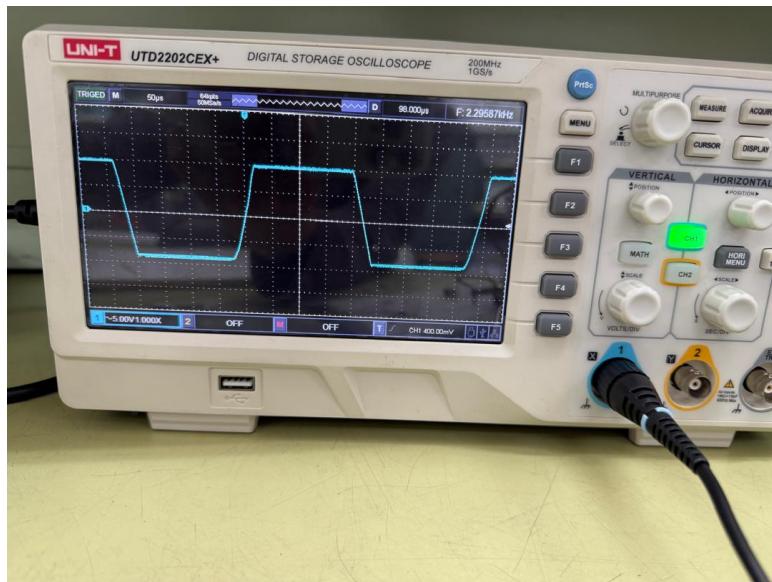


Ilustración 24: Oscilador sin control de amplitud saturado.

Descripción	V_o [V]	ΔV_o [V]	T [ms]	ΔT [ms]	f [kHz]	Δf [kHz]
Excursión máxima	10.00	1.00	0.22	0.01	4.55	0.21
Excursión mínima	0.72	0.04	0.20	0.01	5.00	0.25
Saturada	3.40	0.20	0.20	0.01	5.00	0.25

Cuadro 3: Mediciones de voltaje, periodo y frecuencia del oscilador con control de amplitud.

Descripción	R [$k\Omega$]	ΔR [$k\Omega$]	$RV1$ [$k\Omega$]	$\Delta RV1$ [$k\Omega$]	X	ΔX
Excursión máxima	6.50	0.01	10.00	0.50	0.65	0.03
Excursión mínima	4.84	0.01	10.00	0.50	0.48	0.03
Saturada	5.81	0.01	10.00	0.50	0.581	0.03

Cuadro 4: Mediciones de resistencia del oscilador con control de amplitud.

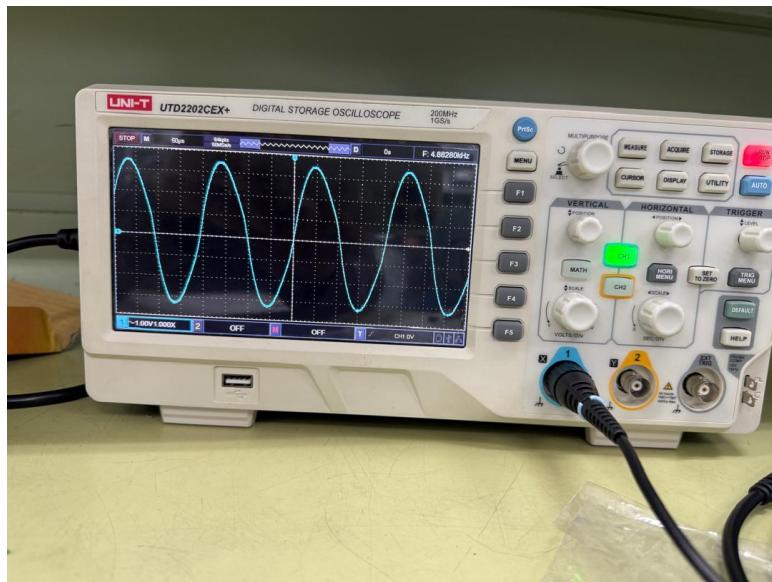


Ilustración 25: Oscilador con control de amplitud en excursión máxima.

Descripción	V_o [V]	ΔV_o [V]	V_i [V]	ΔV_i [V]	A	ΔA
Ganancia oscilador	5.6	0.4	1.9	0.1	2.95	0.25

Cuadro 5: Mediciones de ganancia del oscilador con control de amplitud.

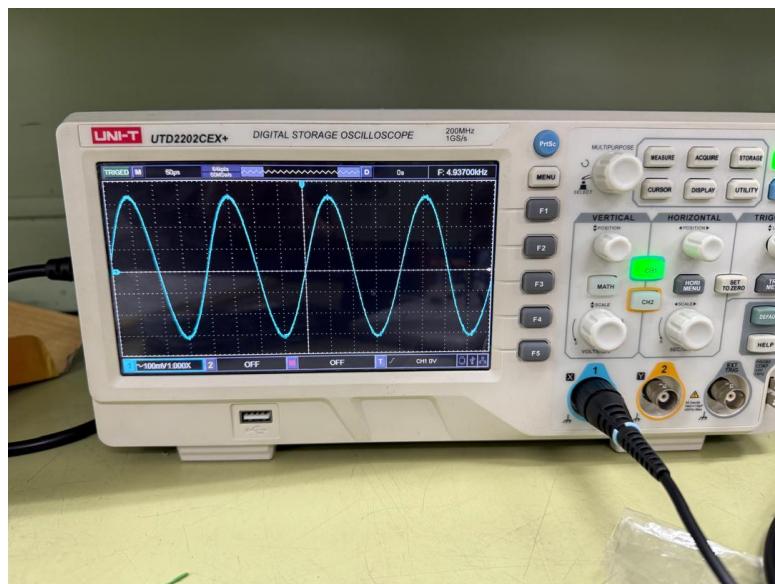


Ilustración 26: Oscilador con control de amplitud en excursión mínima.

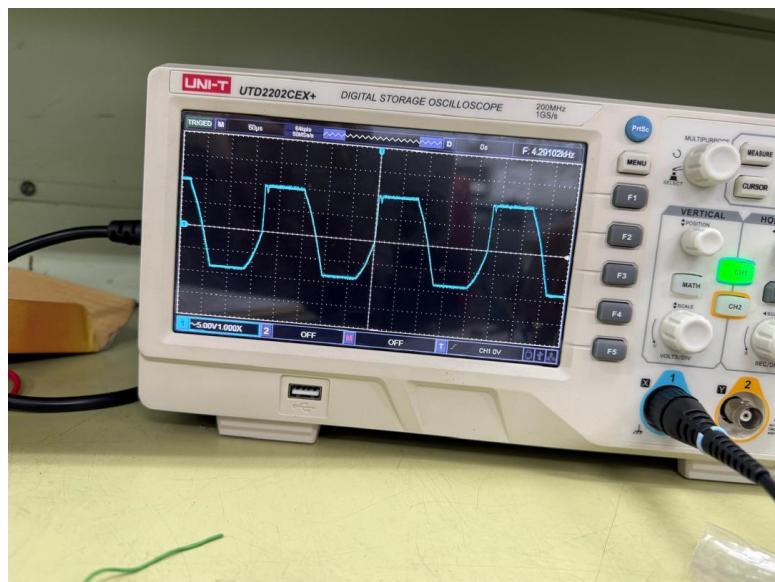


Ilustración 27: Oscilador con control de amplitud saturado.

A	ΔA	Valor Teórico	% Error
2.95	0.25	3.00	1.67

Cuadro 6: Mediciones de ganancia del oscilador con control de amplitud y su error porcentual.

descripción	f [KHz]	Δf [kHz]	Valor Teórico [kHz]	% Error
Excusión máxima	4.55	0.21	5.00	9.00
Excusión mínima	5.00	0.25	5.00	0.00
Saturada	5.00	0.25	5.00	0.00

Cuadro 7: Mediciones de frecuencia del oscilador con control de amplitud y su error porcentual.

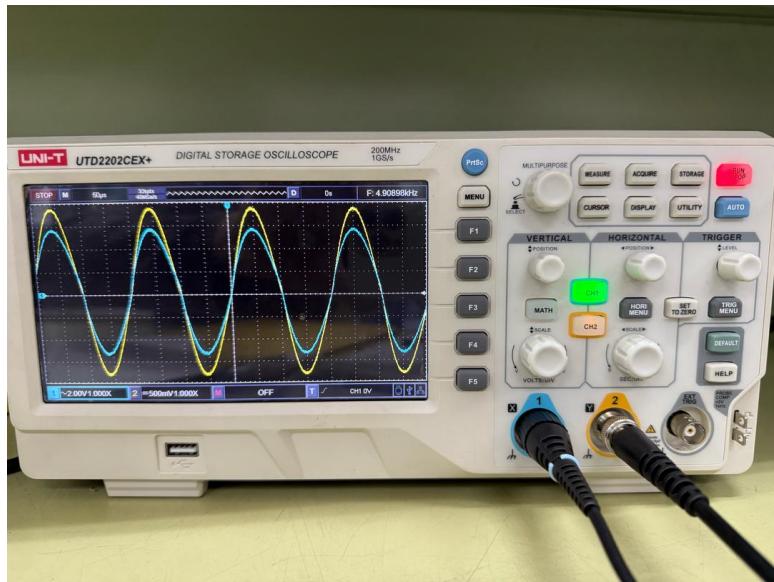


Ilustración 28: Medición de la ganancia del oscilador con control de amplitud.

7.2. Multivibradores

7.2.1. Multivibrator astable

La tabla 8 muestra las mediciones del multivibrator astable.

$V_c[V]$	$\Delta V_c[V]$	$V_o[V]$	$\Delta V_o[V]$	$T[\mu s]$	$\Delta T[\mu s]$
2.60	0.20	9.00	1.00	230	10

Cuadro 8: Mediciones del multivibrator astable.

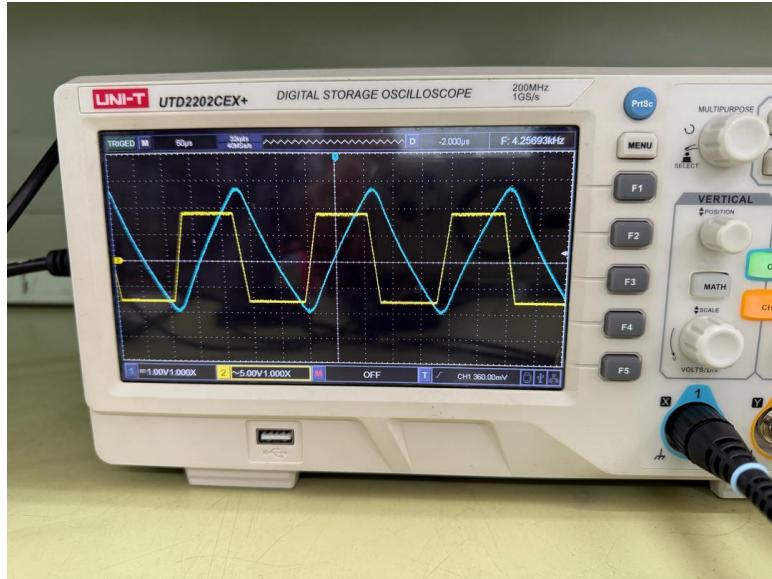


Ilustración 29: Medición de voltajes del multivibrator astable (canal 1 V_o , canal 2 V_c).

La tabla 9 muestra las mediciones del tiempo de retardo del Slewrate el cual se tomo al medir la distancia en el eje X entre los valores máximo y mínimo de V_o y la medición indirecta de restar dos veces V_{sr} al periodo T de la onda.

$T_{sr}[\mu s]$	$\Delta T_{sr}[\mu s]$	$T - 2T_{sr}[\mu s]$	$\Delta(T - 2T_{sr})[\mu s]$
20	10	190	10

Cuadro 9: Medición de $T - 2T_{sr}$ para el multivibrator astable.

7.2.2. Multivibrator monostable

La tabla 10 muestra las mediciones DC del multivibrator monoestable antes de conectar el generador. V_c es el voltaje en el condensador C_6 y V_p es el voltaje en la salida del amplificador operacional.

La ilustración 30 muestra la tensión en el condensador y el voltaje del generador con un periodo de 13ms y un duty cycle de 90 %.

La tabla 11 muestra las mediciones adicionales del multivibrator monoestable a partir de la ilustración 32.

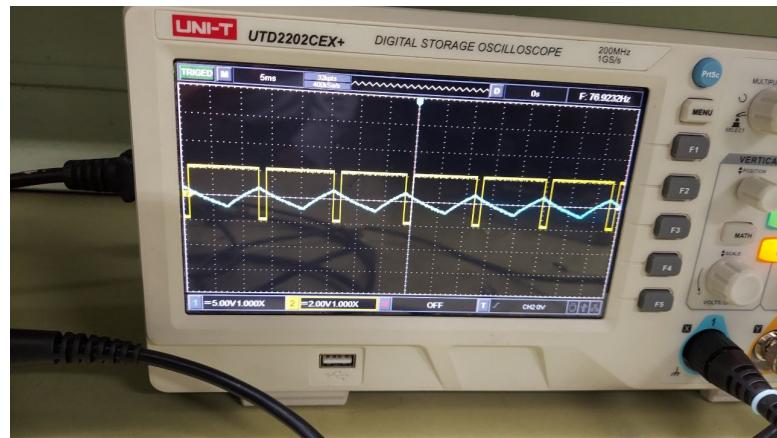


Ilustración 30: Medición de voltajes del multivibrador monoestable (canal 1 V_c , canal 2 V_c). con un duty cycle del 90 % y $T=13\text{ms}$.

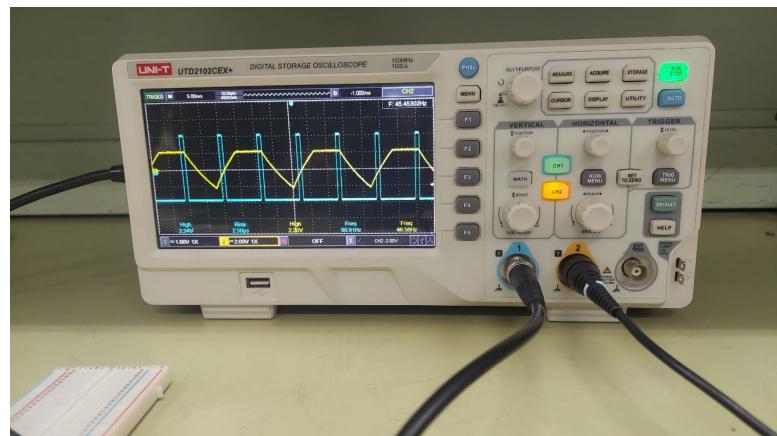


Ilustración 31: Medición de voltajes del multivibrador monoestable (canal 1 V_c , canal 2 V_c). con un duty cycle del 10 % y $T=11\text{ms}$.

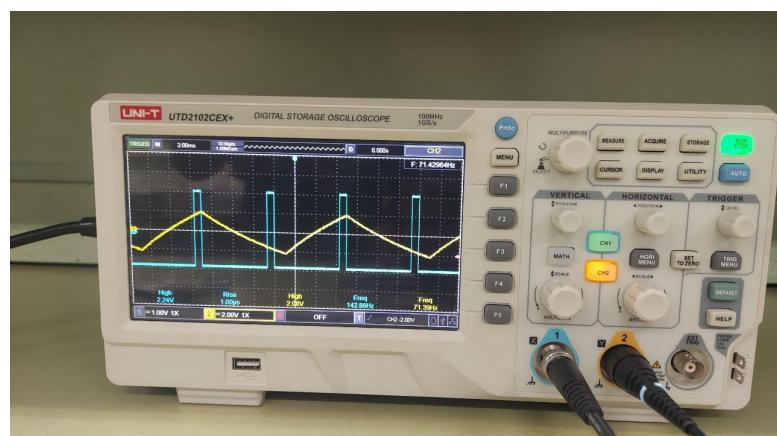


Ilustración 32: Medición de voltajes del multivibrador monoestable (canal 1 V_c , canal 2 V_c). con un duty cycle del 10 % y $T=7\text{ms}$.

V_c	ΔV_c	V_p	ΔV_p
3.00	0.20	5.20	0.40

Cuadro 10: Mediciones voltaje DC del multivibrador monoestable.

V_t [V]	ΔV_t [V]	T [ms]	ΔT [ms]
2.00	0.40	13.60	0.40

Cuadro 11: Mediciones del multivibrador monoestable con el generador conectado.

7.3. Generador de funciones

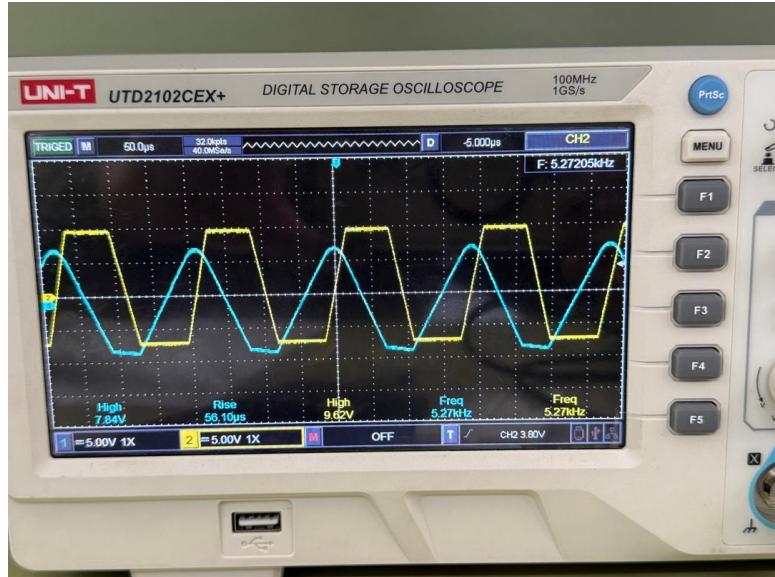


Ilustración 33: Medición de voltajes del generador de funciones.

Descripción	V_C (V)	ΔV_C (V)	V_P (V)	ΔV_P (V)	V_T (V)	ΔV_T (V)	T (s)	ΔT (s)
Generador funciones	10.00	1.00	6.40	0.40	7.60	0.40	192.00	4.00

Cuadro 12: Resultados obtenidos del generador de funciones

Descripción	V_C (Vpp)	ΔV_C (Vpp)	V_P (Vpp)	ΔV_P (V)	V_T (V)	ΔV_T (V)	T (s)	ΔT (s)
Generador funciones	17.00	1.00	13.60	0.40	7.60	0.40	192.00	4.00

Cuadro 13: Resultados obtenidos del generador de funciones midiendo voltaje pico-pico

T_{sr} [μ s]	ΔT_{sr} [μ s]
32	4

Cuadro 14: Medición del tiempo de respuesta debido al Slewrate

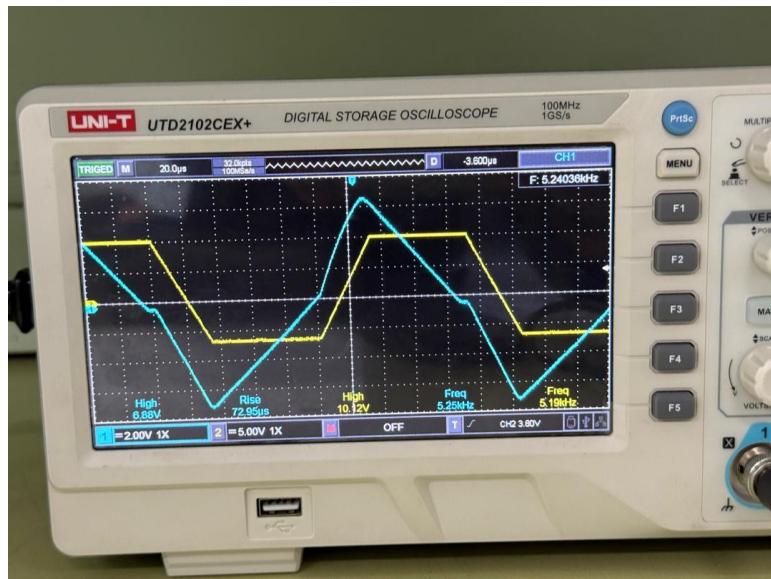


Ilustración 34: Medición de V_p en el generador de funciones.

8. Análisis de resultados

8.1. Análisis de los osciladores

8.1.1. Ganancias topologías clásicas

A partir de los resultados obtenidos, se presenta el siguiente análisis de las ganancias medidas para cada topología:

Topología	Ganancia	Δ Ganancia	Ganancia teórica	Error (%)
Inversor	-2.00	0.45	-2	0
No Inversor	3.00	0.63	3	0
Restador	4.00	1.77	2	100

Cuadro 15: Comparación de ganancias medidas vs teóricas

Del análisis de los resultados se puede observar que:

- Para el amplificador inversor, se obtuvo una ganancia de -2.00 ± 0.45 , lo cual coincide exactamente con la ganancia teórica esperada de -2, resultando en un error del 0 %.
- En el caso del amplificador no inversor, se midió una ganancia de 3.00 ± 0.63 , que también coincide perfectamente con el valor teórico de 3, presentando un error del 0 %.
- Para el amplificador restador, se obtuvo una ganancia de 4.00 ± 1.77 . Este valor difiere significativamente del valor teórico esperado de 2, presentando un error del 100 %. Esta discrepancia se debe a un error cometido al momento de tomar la medición, ya que se consideró que el voltaje de entrada era V_1 cuando realmente es la resta $V_2 - V_1$, esto llevó a una mala interpretación de los valores observados en el oscilloscopio.

Los amplificadores inversor y no inversor mostraron un comportamiento muy cercano al ideal, mientras que el restador presentó desviaciones significativas debido a un error humano.

8.1.2. Efecto del integrador no inversor

La ilustración ?? muestra que al pasar una señal cuadrada al amplificador integrador no inversor, la señal de salida es una señal triangular cuya pendiente positiva coincide con el semicírculo positivo de la señal cuadrada, mientras que la pendiente negativa coincide con el semicírculo negativo de la señal cuadrada, este es el comportamiento que se esperaba observar.

8.1.3. Convertidor de tensión a corriente

A continuación se presentan los resultados de la corriente medida para cada valor de resistencia, junto con el error porcentual respecto al valor teórico.

I (mA)	ΔI (mA)	I Teórica [mA]	Error (%)
50.00	10.30	52	3.85
45.50	9.370	52	12.59
45.50	5.080	52	12.59
51.30	5.730	52	1.38
48.10	4.420	52	7.41

Cuadro 16: Porcentaje de error del convertidor tensión-corriente.

I (mA)	ΔI (mA)	I Teórica [mA]	Error (%)
48.07	6.982	52	7.56

Cuadro 17: Porcentaje de error promedio del convertidor tensión-corriente.

De los cuadros 22 y 23 se observa que la corriente medida se mantiene relativamente constante alrededor de los 48 mA, con una desviación promedio del 7.56 % respecto al valor teórico de 52 mA. y una desviación máxima del 12.59 %. Esto puede ser debido a que R_1 (100k) no era significativamente grande en comparación con R_2 (40k). Las incertidumbres en las mediciones son significativas, especialmente en las primeras mediciones. Esto puede ser debido a que para las primeras mediciones los valores medidos de voltaje fueron bajos, o que las primeras resistencias fueron de un valor bajo, siendo su incertidumbre baja y al ser una división la incertidumbre de la corriente fue alta.

El valor teórico de la corriente se obtuvo de la fórmula ?? con $R_1 = 100k\Omega$ y $V_i = 5.2V$.

8.2. Análisis de los multivibradores

8.2.1. Multivibrador astable

V_C [V]	ΔV_C [V]	Valor teórico [V]	Error %
2.60	0.20	2.00	30.00

Cuadro 18: Comparación de mediciones y valores teóricos de la amplitud V_c del multivibrador astable.

Descripción	T [μs]	ΔT [μs]	Valor teórico [μs]	Error %
Sin tomar en cuenta el SR	230	10	200	15.00
Tomando en cuenta el SR	190	10	200	5.00

Cuadro 19: Comparación de mediciones y valores teóricos de tiempo del multivibrador astable.

Del cuadro 18 se observa un error del 30 % para el valor de la amplitud de la onda V_c , lo cual es algo elevado. Este error puede ser ocasionado porque durante el tiempo de respuesta debido al Slewrate el circuito deja de comportarse adecuadamente y el condensador se sigue cargando o descargando por encima del valor esperado, esto hace que la amplitud medida sea algo mayor a la esperada.

El cuadro 19 muestra un error del 15 % en el valor del periodo con respecto al valor teórico esperado cuando no se toma en cuenta el tiempo de retardo del Slewrate, cuando tomamos en cuenta el retardo del Slewrate el error es de tan solo 5 %, lo cual es aceptable.

8.2.2. Multivibrador monoestable

T [ms]	ΔT [ms]	Valor teórico [ms]	Error %
13.60	0.40	10.00	36.00

Cuadro 20: Comparación de mediciones y valores teóricos del multivibrador monoestable.

Viendo el cuadro 20 obtenemos que el error del periodo de la onda V_c es de 36,00 es bastante elevado, sin embargo es poco probable a que este error sea debido al Slewrate ya que para esta configuración T_{sr} tiene un valor aproximado de $20\mu s$ lo cual es insignificante comparándolo con el periodo $T = 10ms$. Esto también se hace evidente debido al hecho de que la forma de onda de V_t es exponencial, y de que la onda V_o tiene forma cuadrada. No hubo distorsión debido al Slewrate. El error observado puede ser debido a que el valor comercial de una de las resistencias $150k$ es algo distinto al valor teórico ($160k$), además de los errores debidos a los elementos como las resistencias y el condensador.

8.2.3. Ganancias topologías clásicas

A partir de los resultados obtenidos, se presenta el siguiente análisis de las ganancias medidas para cada topología: Del análisis de los resultados se puede observar que:

- Para el amplificador inversor, se obtuvo una ganancia de $-2,00 \pm 0,45$, lo cual coincide exactamente con la ganancia teórica esperada de -2 , resultando en un error del 0 %.
- En el caso del amplificador no inversor, se midió una ganancia de $3,00 \pm 0,63$, que también coincide perfectamente con el valor teórico de 3 , presentando un error del 0 %.
- Para el amplificador restador, se obtuvo una ganancia de $4,00 \pm 1,77$. Este valor difiere significativamente del valor teórico esperado de 2 , presentando un error del 100 %. Esta discrepancia se debe a un error cometido al momento de tomar la medición, ya que se consideró que el voltaje de entrada era V_1 cuando realmente es la resta $V_2 - V_1$, esto llevó a una mala interpretación de los valores observados en el osciloscopio.

Los amplificadores inversor y no inversor mostraron un comportamiento muy cercano al ideal, mientras que el restador presentó desviaciones significativas debido a un error humano.

8.2.4. Efecto del integrador no inversor

La ilustración ?? muestra que al pasar una señal cuadrada al amplificador integrador no inversor, la señal de salida es una señal triangular cuya pendiente positiva coincide con el semicírculo positivo de la señal cuadrada, mientras que la pendiente negativa coincide con el semicírculo negativo de la señal cuadrada, este es el comportamiento que se esperaba observar.

Topología	Ganancia	Δ Ganancia	Ganancia teórica	Error (%)
Inversor	-2.00	0.45	-2	0
No Inversor	3.00	0.63	3	0
Restador	4.00	1.77	2	100

Cuadro 21: Comparación de ganancias medidas vs teóricas

8.2.5. Convertidor de tensión a corriente

A continuación se presentan los resultados de la corriente medida para cada valor de resistencia, junto con el error porcentual respecto al valor teórico.

I (mA)	ΔI (mA)	I Teórica [mA]	Error (%)
50.00	10.30	52	3.85
45.50	9.370	52	12.59
45.50	5.080	52	12.59
51.30	5.730	52	1.38
48.10	4.420	52	7.41

Cuadro 22: Porcentaje de error del convertidor tensión-corriente.

I (mA)	ΔI (mA)	I Teórica [mA]	Error (%)
48.07	6.982	52	7.56

Cuadro 23: Porcentaje de error promedio del convertidor tensión-corriente.

De los cuadros 22 y 23 se observa que la corriente medida se mantiene relativamente constante alrededor de los 48 mA, con una desviación promedio del 7.56 % respecto al valor teórico de 52 mA. y una desviación máxima del 12.59 %. Esto puede ser debido a que R_1 (100k) no era significativamente grande en comparación con R_2 (40k). Las incertidumbres en las mediciones son significativas, especialmente en las primeras mediciones, Esto puede ser debido a que para las primeras mediciones los valores medidos de voltaje fueron bajos, o que las primeras resistencias fueron de un valor bajo, siendo su incertidumbre baja y al ser una división la incertidumbre de la corriente fue alta.

El valor teórico de la corriente se obtuvo de la formula ?? con $R_1 = 100k\Omega$ y $V_i = 5,2V$.

8.3. Análisis del generador de funciones

De los datos obtenidos en la sección 7.3 se obtienen los errores porcentuales mostrados en las siguientes tablas

De la tabla 24 se observa que el error porcentual del voltaje pico V_C con respecto a su valor teórico es de 26.90 %, mientras que con respecto a V_{sat+} el error es de 19.05 %, estos errores son algo altos. Sin embargo al observar la ilustración 33 se tiene que la forma de onda está levantada con respecto al eje horizontal por lo cual se tomaron los valores pico a pico de la señal, obteniendo un error de 7.87 % con respecto a V_C y 1.19 % con respecto a V_{sat} . Estos errores son mucho más aceptables que los obtenidos con los valores pico.

Al observar la tabla 25 se tiene que el error porcentual de la tensión V_t con respecto a su valor teórico es de 8.57 %. Este error es aceptable ya que se encuentra dentro del rango de error esperado.

De la ilustración 33 se observa que la onda V_t no es completamente triangular, esto es debido a que durante el tiempo de retraso del Slewrate, el condensador se sigue cargando y descargando por encima del pico esperado con un comportamiento exponencial, cambiando así la forma de la onda a algo parecido a una senoidal, es también por esta razón que la onda triangular también se satura la onda triangular para valores mínimos, mientras se encuentra en la transición debida al slewrate.

De la tabla 26 se observa que el error porcentual del periodo T con respecto a su valor teórico es de 4.00 %, mientras que el error porcentual del retraso debido al Slewrate es de 18.52 %. El error del periodo es aceptable ya que se encuentra dentro del rango de error esperado, sin embargo el error del retraso es bastante alto, esto puede ser debido a la construcción del amplificador y las condiciones de funcionamiento como la temperatura, el error de 18.52 % también puede ser debido a que se tomó la medición con una escala del osciloscopio demasiado grande en comparación con el valor medido.

Descripción	V_C (V)	ΔV_C (V)	Valor teórico (V)	Error %
V_C	10	1	7.88	26.93
V_{sat+}	10	1	8.4	19.05
V_C V[pp]	17	1	15.76	7.87
V_{sat} V[pp]	17	1	16.8	1.19

Cuadro 24: Comparación Resultados experimentales con valores teóricos del voltaje V_c

Descripción	V_t (V)	ΔV_t (V)	Valor teórico (V)	Error %
Tensión	7.6	0.4	7.0	8.57

Cuadro 25: Resultados experimentales de la tensión V_t y comparación con el valor teórico

Descripción	T (μs)	ΔT (μs)	Valor teórico (μs)	Error %
Periodo T	192.00	4	200.00	4.00
Retraso SR	32.00	4	27	18.52

Cuadro 26: Resultados experimentales de tiempos y comparación con valores teóricos

9. Conclusiones

A lo largo de este trabajo de laboratorio, se estudiaron diferentes aspectos de los amplificadores operacionales y sus aplicaciones, llegando a las siguientes conclusiones:

- Las topologías clásicas (inversor y no inversor) mostraron un comportamiento muy cercano al ideal, con errores del 0 % en sus ganancias. Esto demuestra la fiabilidad de estas configuraciones básicas cuando están correctamente implementadas.
- El amplificador operacional real $\mu A741$ mostró limitaciones importantes en comparación con el modelo ideal:
 - La tensión de offset medida fue significativamente mayor que la especificada (error del 700 % respecto al valor típico), posiblemente debido a las diferentes condiciones de operación.
 - Las corrientes de bias mostraron una gran desviación (99.09 % de error), evidenciando la sensibilidad de estos parámetros a las condiciones de operación.
 - El producto ganancia-ancho de banda (GBWP) se mantuvo relativamente constante con errores menores al 13 %, validando esta característica fundamental del dispositivo.
- Los filtros activos implementados demostraron ser efectivos en el procesamiento de señales:
 - El filtro Sallen-Key mostró una excelente precisión en ganancia (0 % error) aunque con un error del 12.23 % en frecuencia.
 - El filtro de realimentación múltiple presentó mayores desviaciones (10 % en ganancia, 27.10 % en frecuencia), probablemente debido a las tolerancias de los componentes.
 - No fue posible medir el filtro de variables de estado debido a un error en el circuito implementado.
 - No se pudo medir el factor de amortiguamiento, por lo cual es necesario realizar más mediciones en las zonas de interés al realizar el barrido.
 - Por un lado el filtro de realimentación múltiple fue el más difícil de diseñar debido a la fuerte dependencia de sus parámetros de ganancia, frecuencia de corte y factor de amortiguamiento, esto se vio reflejado en los resultados, donde cambios en los componentes utilizados tuvieron un impacto significativo en los parámetros del filtro.
- En cuanto a las fuentes lineales y reguladores:
 - El regulador de voltaje de salida fija demostró excelente precisión con 0 % de error.
 - La fuente de corriente ajustable mostró variaciones significativas en su precisión (errores entre 0.74 % y 36.48 %), evidenciando la dificultad de ajuste preciso.
 - Se observó que el voltaje de rizado aumenta a medida que disminuye la carga, lo cual es un factor importante a considerar en el diseño de cualquier circuito que use reguladores.

Estas observaciones demuestran la importancia de considerar las no idealidades y limitaciones prácticas al trabajar con circuitos analógicos reales, así como la necesidad de seleccionar cuidadosamente los componentes y condiciones de operación para obtener los resultados deseados.

Bibliografía

- [1] A. Herrera, «Osciladores,» Electrónica II, Departamento de Electrónica Computación y Control, Universidad Central de Venezuela, 2020.
- [2] R. Rivero, «Aplicaciones no lineales del AO,» Electrónica II, Departamento de Electrónica Computación y Control, Universidad Central de Venezuela, 2006.
- [3] K. C. S. Adel Sedra, *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits* (McGraw-Hill series in electrical and computer engineering), 4th, M.-H. Education, ed. McGraw-Hill Education, 2015.
- [4] K. C. S. Adel Sedra, *Microelectronic Circuits* (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering), 6th, O. U. Press, ed. Oxford University Press, 2009.