UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Circuitos con amplificadores operacionales

Tomás Ricardo Basile Álvarez
316617194

ASIGNATURA

Laboratorio de Electrónica. Grupo 8285

27 de diciembre de 2021

Introducción

Los amplificadores operacionales son circuitos electrónicos que se usan comúnmente en la instrumentación electrónica porque permite amplificar señales, acondicionarlas, filtrarlas o compararlas. Los amplificadores operacionales se utilizan principalmente para aplicar operaciones sobre señales de voltaje, como sumarlas, multiplicarlas por una constante, integrarlas o derivarlas.

En esta práctica aplicaremos estos dispositivos con el objetivo de realizar algunas operaciones específicas que involucran derivadas, integrales y sumas sobre señales de voltaje. Con ello mostramos la utilidad de estos dispositivos para realizar operaciones sobre señales.

Para llevarlo a cabo, simularemos circuitos que utilizan amplificadores operacionales usando TINA-TI y veremos que los circuitos actúan sobre las señales de entrada de la forma esperada por la teoría. Primero presentaremos la teoría de estos dispositivos en la sección de antecedentes.

Antecedentes

Primero resumimos algunos conceptos generales de los amplificadores operacionales. Ya hemos estudiado estos dispositivos en los trabajos anteriores, por lo que sólo veremos un resumen de las propiedades más importantes de estos.

El dispositivo posee dos entradas: la entrada no inversora (denotada con un $+$) y la entrada inversora (denotada con un $-$). Lo que hace un amplificador operacional es tomar las dos señales de entrada V_+ y V_- y amplificar su diferencia $V_+ - V_-$. Es decir, en la terminal de salida se crea un voltaje $V_o = A(V_+ - V_-) \quad (1)$ Donde A es una constante que representa la ganancia del amplificador y suele ser un número muy grande (del orden de 10^5).[1]

Sin embargo, los amplificadores operacionales usualmente no se usan de esta manera. Generalmente se les añade retroalimentación negativa, que se consigue conectando la salida del dispositivo de regreso a una de las entradas. Al realizar esto, como hemos visto en otras actividades de esta unidad, se puede estudiar sencillamente el funcionamiento de los amplificadores. Al tener la retroalimentación, los amplificadores cumplen las siguientes propiedades:[3]

1. La diferencia de tensión entre las dos entradas es insignificante $V_+ \simeq V_-$. El voltaje de salida V_o toma el valor necesario para que se cumpla esto.

2. No entra ni sale corriente sobre ninguna de las entradas del dispositivo.

Tomando en cuenta estas dos propiedades, se pueden utilizar los amplificadores operacionales para varias aplicaciones distintas:

Amplificar una señal

Es un circuito que dada una entrada de voltaje v_i produce un voltaje de salida $v_o = kv_i$. En la figura 1 se muestra un circuito que realiza esto.

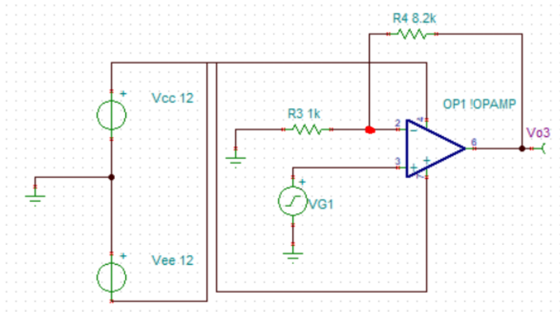

Figura 1: Circuito Amplificador no Inversor

Estudiemos cómo funciona este circuito. Como se dijo antes, en un amplificador operacional con retroalimentación negativa, el voltaje de ambas entradas v_+ y v_- son iguales. En el circuito de la figura 1 vemos que la entrada $+$ se encuentra con un voltaje V_{G1} (el voltaje de entrada v_i), lo que implica que la otra entrada también debe de estar a ese voltaje. Esto significa que el nodo marcado en rojo se encuentra a dicho voltaje.

Además, las entradas no toman ni expulsan corriente, por lo que la corriente I que fluye por R_3 es igual a la de R_4. Pero por lo mencionado en el párrafo anterior, el salto de voltaje de la resistencia R_3 es v_i, por lo que la corriente que pasa por ella es $I = v_i/R_3$. Dicha corriente también pasa por R_4, por lo que el salto de voltaje en la resistencia R_4 es de $IR_4 = \dfrac{R_4}{R_3}v_i$.

Entonces podemos calcular el voltaje de v_o tomando el voltaje del punto rojo, que es v_i y sumando el salto de voltaje de R_4 que es $\dfrac{R_4}{R_3}v_i$. Entonces el voltaje de salida es:

$$\begin{aligned} v_o &= v_i + \frac{R_4}{R_3}v_i \\ &= \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) v_i \qquad (1) \end{aligned}$$

Por lo que el factor de amplificación es $k = \left(1 + \dfrac{R_4}{R_3}\right)$.

Amplificar e invertir una señal

Es un circuito que dada una entrada de voltaje v_i, produce un voltaje de salida con valor $v_o = -kv_i$ con k una constante. En la figura 2 se muestra un circuito que realiza esto.

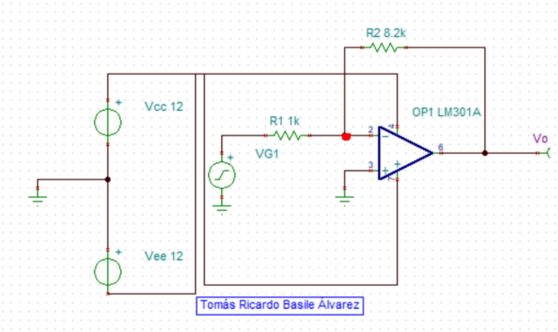

Figura 2: Circuito Amplificador Inversor

Estudiemos cómo funciona este circuito. Como se dijo antes, en un amplificador operacional con retroalimentación negativa, el voltaje de ambas entradas v_+ y v_- son iguales. En el circuito de la figura 2 vemos que la entrada + se encuentra a $0V$, lo que implica que la otra entrada también debe de estar a $0V$. Esto significa que el nodo marcado en rojo se encuentra a $0V$.

Además, las entradas no toman ni expulsan corriente, por lo que la corriente I que fluye por R_1 es igual a la de R_2. Por lo tanto, si aplicamos la ley de Ohm a la resistencia R_1 tenemos que $I = -v_i/R_1$. Y para la segunda resistencia tenemos que $I = v_o/R_2$. Igualando estas expresiones y despejando llegamos a que:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_i \qquad (2)$$

Por lo que el factor de amplificación es $k = -\frac{R_2}{R_1}$.

Integrador

El integrador es un circuito que dada una señal de entrada v_i, produce una señal de salida v_o dada por $v_o(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_i(t')dt' + v_c(0)$

Donde $v_c(0)$ es el voltaje del capacitor en tiempo $t = 0$. Por lo que vemos que el circuito integra la señal. En la figura 3 se muestra un circuito integrador.

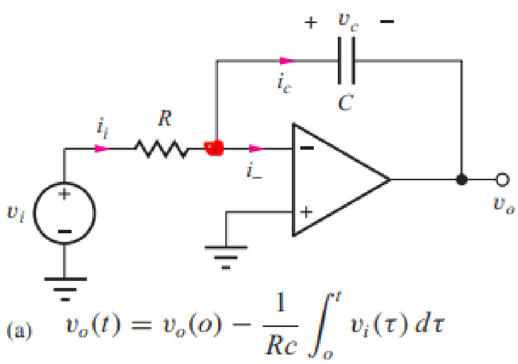

Figura 3: Circuito integrador. Obtenida de [2]

Como se ha dicho, los voltajes de las dos entradas del amplificador con retroalimentación son iguales. El de la entrada negativa es 0 por lo que ése voltaje tiene que ser también el de el nodo rojo. Entonces el salto en potencial de la resistencia R es $0 - v_i = -v_i$. Por lo que hay una corriente $I = v_i/R$ que recorre esta resistencia.

Por otro lado, la corriente no entra ni sale de las entradas del amplificador, por lo que esa misma corriente pasa por el capacitor. Dicho capacitor sigue la relación $I = -C\frac{dv_c}{dt}$ con v_c el voltaje entre sus placas. Integrando esto tenemos que $v_c = -\frac{1}{C}\int_0^t I(t')dt' + v_c(0) = -\frac{1}{C}\int_0^t \frac{v_i(t')}{R}dt' + v_c(0) = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_i(t')dt' + v_c(0)$.

Pero observando que el punto rojo se encuentra a 0V como mencionamos antes, vemos que el voltaje en el capacitor es igual al voltaje de salida, por lo que:

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_i(t')dt' + v_c(0) \qquad (3)$$

Con lo que probamos que el circuito efectivamente integra el voltaje de entrada.

Derivador

El derivador es un circuito que dada una señal de entrada v_i, produce una señal de salida v_o igual a $v_o(t) = -RC\frac{dv_i}{dt}$

Por lo que el circuito deriva la señal de entrada. En la figura 4 se muestra un circuito derivador.

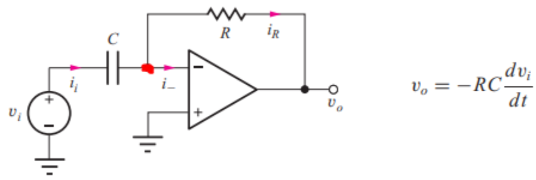

Figura 4: Circuito derivador. Obtenida de [2]

Como se ha dicho, los voltajes de las dos entradas del amplificador con retroalimentación son iguales. El de la entrada negativa es $0V$ por lo que ése voltaje tiene que ser también el de el nodo rojo de la figura. Entonces el salto en potencial del capacitor C es v_i. Por la ecuación que cumplen los capacitores, la corriente que pasa por él es de $I = C\frac{dv_i}{dt}$

Por otro lado, la corriente no entra ni sale de las entradas del amplificador, por lo que esa misma corriente pasa por la resistencia. Dicha resistencia sigue la ley de Ohm, por lo que $v_R = -RI$ es el salto de voltaje en la resistencia. Pero usando la expresión para I de antes, tenemos que $v_R = -RC\frac{dv_i}{dt}$

Finalmente recordamos que el punto rojo se encuentra a $0V$, por lo que vemos que el salto de voltaje de la resistencia es igual al voltaje de salida, por lo que:

$$v_o(t) = -RC\frac{dv_i}{dt} \qquad (4)$$

Con lo que probamos que el circuito efectivamente deriva el voltaje de entrada.

Sumador

Un sumador es un circuito que suma varias señales de voltaje y las combina en una sola. En la figura 5 se muestra el diseño del circuito sumador.

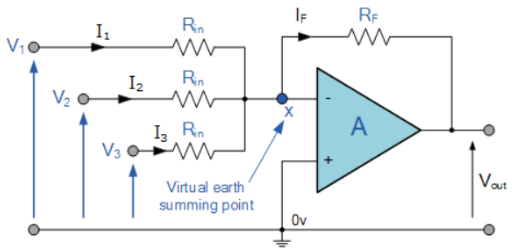

Figura 5: Sumador. Obtenida de [4]

El circuito tiene tres señales de entrada (podría ser cualquier número mayor o igual a 2). Como las dos entradas del amplificador tienen que estar al mismo voltaje y la no inversora está a $0V$, entonces la inversora tiene que estar a $0V$ también, por lo que el punto x está a $0V$.

Además, como la corriente no entra ni sale de las entradas del amplificador, tenemos que $I_F = I_1+I_2+I_3$ (aplicando la ley de Kirchoff de corrientes al punto x). Pero como el punto x está a $0V$, en cada una de las resistencias R_{in} se cumple por la ley de Ohm que $I_1 = -v_1/R_{in}$, $I_2 = -v_2/R_{in}$, $I_3 = -v_3/R_{in}$. Por lo que tenemos que:

$$I_F = I_1 + I_2 + I_3 = -\frac{v_1}{R_{in}} - \frac{v_2}{R_{in}} - \frac{v_3}{R_{in}}$$

Además, aplicando la ley de Ohm para la resistencia R_F, tenemos que $v_{out} = R_F I_F$. Por lo tanto, tenemos que:

$$v_{out} = R_F I_F = -\frac{R_F}{R_{in}}\left[v_1 + v_2 + v_3\right] \qquad (5)$$

Por lo que el voltaje de salida es la suma de los tres voltajes, multiplicada por una constante negativa $-\dfrac{R_F}{R_{in}}$

Amplificador Instrumental

El amplificador instrumental es un circuito que toma dos entradas v_1 y v_2 y produce una salida igual a su diferencia multiplicada por una constante, es decir $v_o = k(v_2 - v_1)$ con k alguna constante. En la figura 6 se muestra un circuito de un amplificador instrumental.

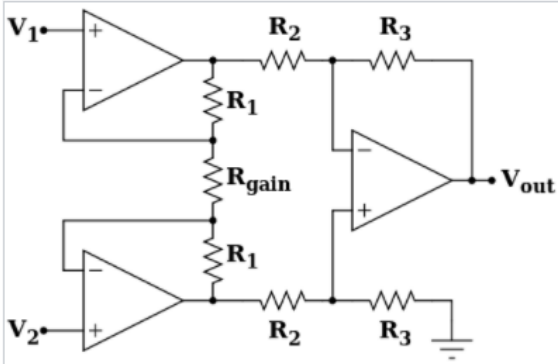

Figura 6: Amplificador instrumental. Obtenida de [3]

En este circuito se usan 4 valores de resistencias distintos R_1, R_2, R_3, R_{gain}. Usando las mismas reglas que hemos utilizado antes para analizar amplificadores operacionales con retroalimentación, se puede llegar a que el voltaje de salida es igual a:[3]

$$v_o = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right)\frac{R_3}{R_2}(v_2 - v_1) \qquad (6)$$

Como dijimos antes, la diferencia $v_2 - v_1$ es amplificada. Una de las aplicaciones de estos circuitos es que se utilizan para amplificar señales biológicas (como en electrocardiogramas) para poder así estudiarlas con mayor detalle.

Circuito 1

Un circuito cuya señal de salida sea $v_o(t) = k_p v_i(t) + k_i \int v_i(t)dt + k_d \frac{dv_i(t)}{dt}$. donde k_p, k_i, k_d son constantes.

Desarrollo

Para realizar esta operación, proponemos el circuito de la figura 7.

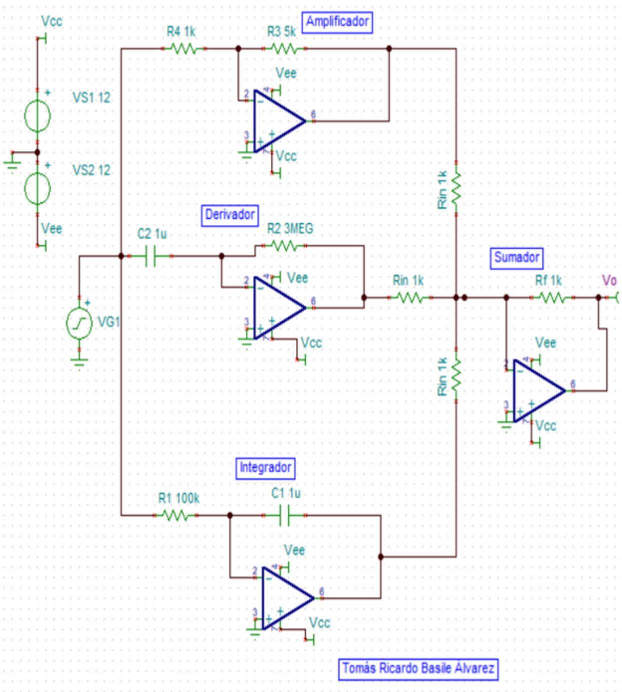

Figura 7: Circuito 1

Podemos ver ahora cómo funciona este circuito. Para empezar, del lado izquierdo están colocadas las fuentes V_{cc} y V_{ee} que se conectan por medio de jumpers a cada las entradas de fuente DC negativa y positiva de todos los amplificadores utilizados.

El generador V_{G1} crea la señal de entrada v_i y luego transmitimos esta señal en tres secciones para aplicarle cada una de las tres operaciones que le queremos realizar. La sección superior es un circuito amplificador inversor como el que vimos en los antecedentes, que como dice la ecuación (2), crea un voltaje de salida $v_{o1} = -\frac{R_3}{R_4} v_i$

La parte central del circuito es el derivador que estudiamos en la sección de antecedentes. Según la ecuacón (4), esto crea el voltaje $v_{o2} = -R_2 C_2 \frac{dv_i}{dt}$

Luego, la parte inferior del circuito es el integrador como el que estudiamos en antecedentes. Según la ecuación (3), esto crea el voltaje dado por $v_{o3}(t) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t v_i(t')dt'$

Finalmente, unimos estos tres voltajes v_{o1}, v_{o2}, v_{o3} en un sumador como el de la figura 5, donde $R_{in} = 1k$ y $R_F = 1k$. El voltaje de salida de este sumador (que es el voltaje de salida de todo el circuito) se obtiene según la ecuación (5):

$$\begin{aligned} v_o(t) &= -\frac{R_F}{R_{in}}[v_{o1} + v_{o2} + v_{o3}] \\ &= -\frac{1k\Omega}{1k\Omega}[-\frac{R_3}{R_4}v_i - R_2C_2\frac{dv_i}{dt} - \frac{1}{R_1C_1}\int_0^t v_i(t')dt'] \\ &= \frac{R_3}{R_4}v_i + R_2C_2\frac{dv_i}{dt} + \frac{1}{R_1C_1}\int_0^t v_i(t')dt' \end{aligned}$$

Que es la señal que buscábamos crear en el enunciado del ejercicio, con:

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_4} &= k_p \\ R_2C_2 &= k_d \\ \frac{1}{R_1C_1} &= k_i \end{aligned} \qquad (7)$$

Resultados

En esta sección, para un conjunto de constantes seleccionadas, simularemos la respuesta del circuito ante una señal senoidal, un escalón y un tren de pulsos. Para cada uno de estos casos, veremos si la respuesta del circuito efectivamente crea la señal

$$v_o(t) = k_p v_i(t) + k_i \int_0^t v_i(t')dt' + k_d \frac{dv_i(t)}{dt}$$

Primero elegimos los valores de las variables k_p, k_i, k_d. En este caso escogeremos lo siguiente:

$$k_p = 5\ ,\ k_i = 10\ ,\ k_d = 3$$

Para implementar esta operación con estas variables, escogeremos los siguientes valores de las resistencias y las capacitancias, de forma que las ecuaciones 7 den los valores propuestos de k_i, k_p, k_d. Escogemos lo siguiente:

$$R_3 = 5\ k\Omega \ \ ,\ \ R_4 = 1\ k\Omega \ \ \Rightarrow\ \ k_p = \frac{R_3}{R_4} = 5$$
$$R_2 = 3 \times 10^6 \Omega, C_2 = 1 \times 10^{-6} F \Rightarrow k_d = R_2C_2 = 3Vs$$
$$R_1 = 1 \times 10^5\ \Omega, C_1 = 1 \times 10^{-6} F \Rightarrow k_i = \frac{1}{R_1C_1} = 10V/s$$

En la figura 7 ya se muestra el circuito 1 con estos valores de resistencias y capacitancias.

Ahora simularemos el circuito para cada una de las entradas que queremos estudiar y compararemos con el valor que buscábamos obtener.

Senoidal

Aplicamos una señal de entrada senoidal con amplitud 0,1V y frecuencia de 1Hz, es decir, la función

$v_i(t) = 0{,}1\sin(2\pi t)$.

Simulamos el circuito 1 con esta señal de entrada en una simulación transitoria de $4s$ de duración y se obtiene el siguiente resultado:

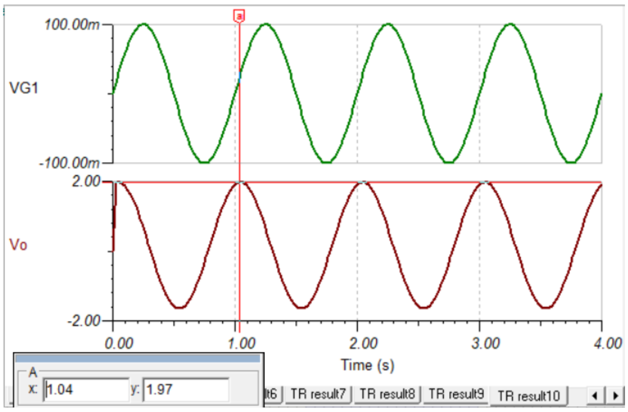

Figura 8: Simulación del circuito 1 senoidal

La curva verde es la señal de entrada y la curva roja es la señal de salida v_o.

Para ver si el circuito funcionó correctamente, calculamos ahora el valor de $v_o(t) = k_p v_i(t) + k_i \int_0^t v_i(t')dt' + k_d \dfrac{dv_i(t)}{dt}$ para la señal de entrada sinoidal.

$$
\begin{aligned}
v_o(t) &= k_p v_i(t) + k_i \int_0^t v_i(t')dt' + k_d \frac{dv_i(t)}{dt} \\
&= 5 \cdot 0{,}1\sin(2\pi t) + 10 \int_0^t 0{,}1\sin(2\pi t')dt' + 3\frac{d[0{,}1\sin(2\pi t)]}{dt} \\
&= 0{,}5\sin(2\pi t) + \frac{1}{2\pi}\left[-\cos(2\pi t')\right]_0^t + 0{,}3(2\pi)\cos(2\pi t) \\
&= 0{,}5\sin(2\pi t) - \frac{1}{2\pi}\cos(2\pi t) + \frac{1}{2\pi} + 0{,}3(2\pi)\cos(2\pi t)
\end{aligned}
$$

Esta función se puede graficar con un graficador y obtenemos la curva de la figura 9.

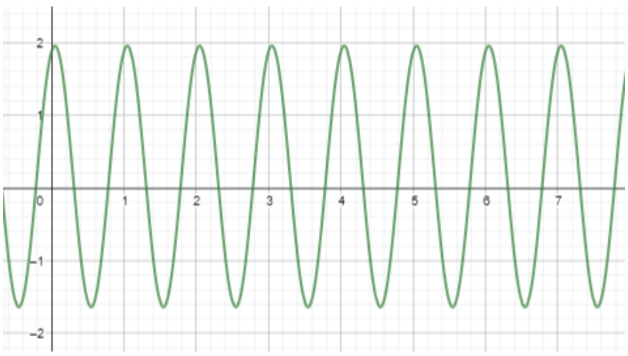

Figura 9: Resultado teórico circuito 1 senoidal

Vemos que el resultado teórico de la figura 9 se parece mucho al simulado de la figura 8. Vemos que andas curvas tienen una frecuencia de aproximadamente 1Hz (pues se repiten una vez por segundo), que llegan a un máximo de casi $2V$ y un mínimo algo por debajo de $-2V$. De hecho, con los cursores de Tina en la figura 8 se puede ver que el primer máximo de la señal se obtiene en $(1{,}04, 1{,}97)$, mientras que el graficador de la figura 9 indica un máximo ubicado en $(1{,}0449, 1{,}956)$. Lo que nos convence aún más que la curva de la simulación y la teórica son prácticamente iguales.

Escalón

Aplicamos una señal de entrada en forma de escalón que tiene un valor de $0V$ antes del tiempo $1s$ y un valor de $1mV$ después de este tiempo.
Simulamos el circuito 1 con esta señal de entrada en una simulación transitoria de $4s$ de duración y se obtiene el siguiente resultado:

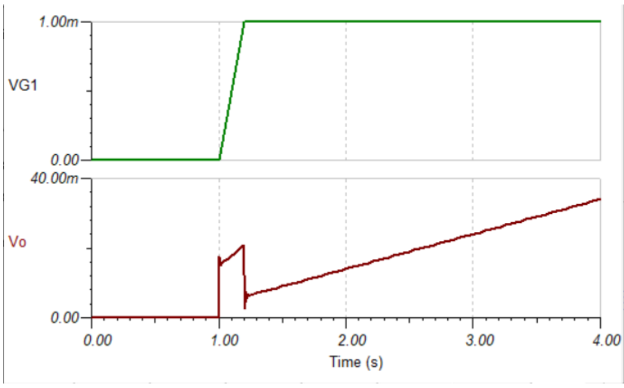

Figura 10: Simulación del circuito 1 escalón

La curva verde es la señal de entrada $v_i(t)$ y la curva roja es la señal de salida v_o.

Para ver si el circuito funcionó correctamente, calculamos ahora el valor de $v_o(t) = k_p v_i(t) + k_i \int_0^t v_i(t')dt' + k_d \dfrac{dv_i(t)}{dt}$ para la señal de entrada escalón. La función de entrada v_i se puede escribir usando la función Heaviside theta $\Theta(t)$ (que vale 0 para $t < 0$ y vale 1 para $t > 0$). Con ella, la función de entrada es igual a $v_i(t) = 0{,}001 \cdot \Theta(t-1)$. Entonces la función de salida debería de ser:

$$
\begin{aligned}
v_o(t) &= k_p v_i(t) + k_i \int_0^t v_i(t')dt' + k_d \frac{dv_i(t)}{dt} \\
&= 5(0{,}001 \cdot \Theta(t-1)) + 10 \int_0^t (0{,}001 \cdot \Theta(t'-1))dt' + \\
&\quad + 3\frac{d\,(0{,}001 \cdot \Theta(t-1))}{dt}
\end{aligned}
$$

Podemos graficar este voltaje de salida obtenido teóricamente usando Mathematica como se ve en la figura 11.

```
vi[t_] := 0.001 * HeavisideTheta[t - 1]
vo[t_] = 5 * vi[t] + 3 * D[vi[t], t] + 10 * Integrate[vi[tau], {tau, 0, t}];
Plot[vo[t], {t, 0, 4}]
```

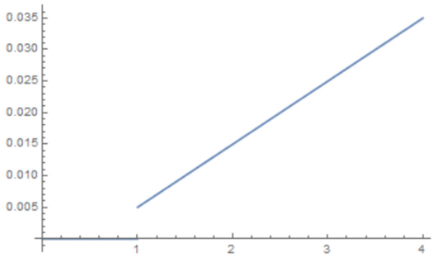

Figura 11: Resultado teórico circuito 1 escalón

Vemos que el resultado teórico de la figura 11 se parece mucho al simulado de la figura 10. Ambas curvas para $v_o(t)$ empiezan valiendo $0V$ hasta un tiempo de $1s$. Luego suben a un valor de aproximadamente $5mV$ y posteriormente suben con una pendiente constante hasta el tiempo final $t = 4s$, en donde llegan a un valor de aproximadamente $36mV$

Por lo que el voltaje v_o teórico y el simulado se parecen mucho. La mayor diferencia es que a tiempo $t = 1s$ el simulado de la figura 10 aumenta rápidamente de valor y se ve algo diferente al teórico, lo que se debe a que en ese punto la función de entrada hace un salto y por tanto tiene una derivada infinita.

Tren de pulsos

Aplicamos una señal de entrada en forma de tren de pulsos con amplitud de $0{,}1V$ y frecuencia de $1Hz$. Simulamos el circuito 1 con esta señal de entrada en una simulación transitoria de $4s$ de duración y se obtiene el siguiente resultado:

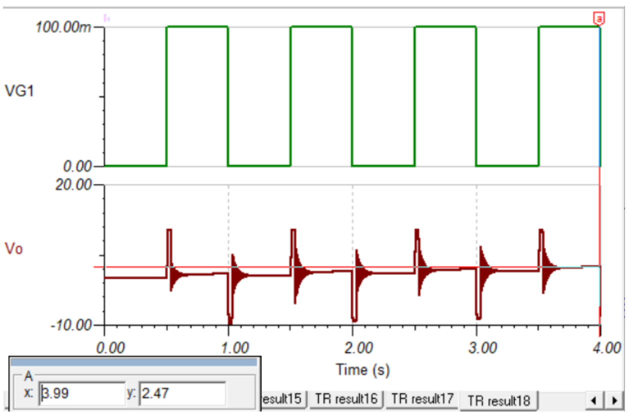

Figura 12: Simulación del circuito 1 Pulsos

La curva verde es la señal de entrada $v_i(t)$, que como se ve consiste de pulsos de amplitud $0{,}1V$ y frecuencia $1Hz$, mientras que la curva roja es la señal de salida v_o.
Para ver si el circuito funcionó correctamente, calculamos ahora el valor de $v_o(t) = k_p v_i(t) + k_i \int_0^t v_i(t')dt' + k_d \dfrac{dv_i(t)}{dt}$.

$$\begin{aligned} v_o(t) &= k_p v_i(t) + k_i \int_0^t v_i(t')dt' + k_d \frac{dv_i(t)}{dt} \\ &= 5v_i(t) + 10 \int_0^t v_i(t')dt' + \\ &+ 3 \frac{d\, v_i(t)}{dt} \end{aligned}$$

Esta función $v_o(t)$ obtenida teóricamente se puede graficar usando Mathematica. Definimos $v_i(t)$ como la señal cuadrada que queremos utilizar usando al función de Mathematica llamada 'SquareWave'.

```
Vi[t_] := SquareWave[{0.1, 0}, t]
vo[t_] = 5 * Vi[t] + 3 * D[Vi[t], t] + 10 * Integrate[Vi[tau], {tau, 0, t}];
Plot[vo[t], {t, 0, 4}]
```

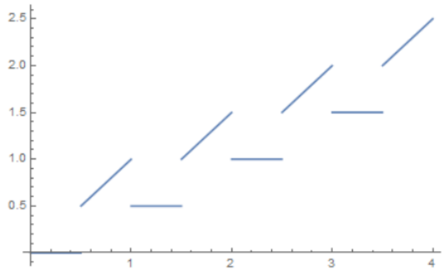

Figura 13: Resultado teórico circuito 1 Pulsos

Vemos que el resultado teórico v_o de la figura 13 crece linealmente a cachos y luego da saltos a valores constantes. Además vemos que en $t = 0s$ tiene un valor de $V = 0$ y en $t = 4s$ llega a un máximo de $2{,}5V$.

Por otro lado, el resultado simulado v_o de la figura 12 parece crecer linealmente pero tiene problemas cuando la señal de entrada da saltos, esto debido al valor infinito de la derivada de ésta. Además, vemos que el resultado simulado llega a un valor de 2,47 al final de los $4s$.

El voltaje v_o teórico y el simulado no se parecen tanto debido a los problemas que tiene la simulación en los puntos de derivada infinita. Sin embargo, ambos crecen linealmente (pero dando saltos) y llegan a valores similares en el tiempo $4s$.

Circuito 2

Un circuito que realice la siguiente operación matemática: $v_o(t) = k_m(v_1(t) - v_2(t)) + k_c$ donde k_m y k_c son constantes y v_1, v_2 son dos señales.

Desarrollo

Para realizar esta operación, proponemos el circuito de la figura 14.

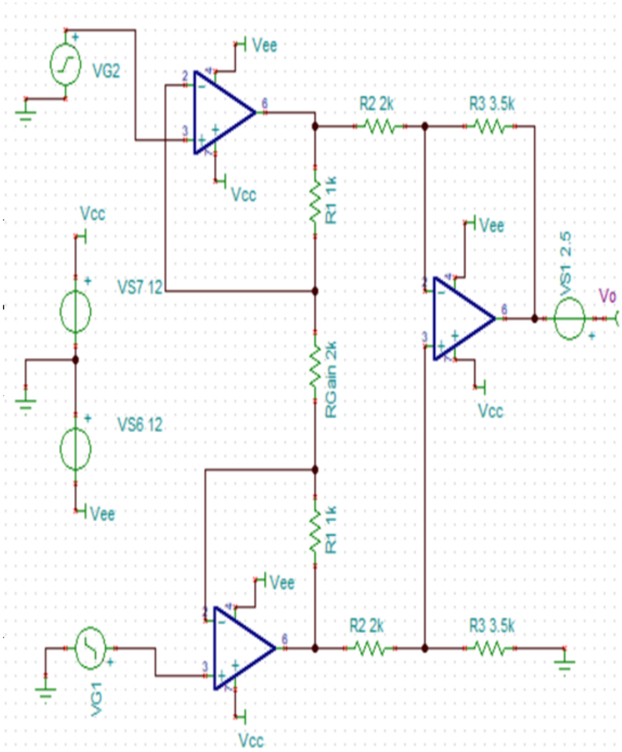

Figura 14: Circuito 2

Este circuito toma dos señales de entrada con voltaje $v_1(t)$ y $v_2(t)$ producidas por las fuentes de voltaje v_{G1} y v_{G2}. Luego el circuito crea la señal de salida $v_o = k_m(v_1(t) - v_2(t)) + k_c$.

Para su funcionamiento, el circuito toma las dos señales v_1 y v_2 y las hace pasar por un amplificador instrumental. Como vimos en la ecuación (6) en los antecedentes, este amplificador crea el siguiente voltaje (tomar en cuenta que con respecto a la figura 6, las fuentes de voltaje v_1 y v_2 están volteadas):

$$\left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right)\frac{R_3}{R_2}(v_1 - v_2)$$

Posteriormente, se agrega una fuente de voltaje DC llamada $VS1$. Por lo que el voltaje final generado por el circuito 2 es:

$$v_o(t) = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right)\frac{R_3}{R_2}(v_1 - v_2) + VS1$$

Este resultado tiene la forma del voltaje que queremos crear $k_m(V_1(t) - V_2(t)) + k_c$ donde:

$$\begin{aligned} k_m &= \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right)\frac{R_3}{R_2} \\ k_c &= VS1 \end{aligned} \tag{8}$$

Resultados

En esta sección simularemos el circuito para $v_1(t)$ y $v_2(t)$ señales senoidal y trinagular respectivamente y con valores de k_m y k_c escogidos. Lo haremos con los siguientes valores y señales:

$$\begin{aligned} v_1(t) &: \text{ señal senoidal de amplitud 2 y frecuencia 4Hz} \\ v_2(t) &: \text{ señal triangular de amplitud 1.2 y frecuencia 8Hz} \\ k_m &= 3{,}5 \\ k_c &= 2{,}5V \end{aligned}$$

Para hacerlo, escogemos las resistencias con los siguientes valores:

$$R_1 = 1k\Omega\ ,\ R_{Gain} = 2\ k\Omega\ ,\ R_2 = 2k\Omega\ ,\ R_3 = 3{,}5\ k\Omega$$

Con lo que tenemos que $k_m = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right)\frac{R_3}{R_2} = 3{,}5$

Ahora hacemos un análisis transitorio de 1 segundo de duración del circuito con estas características. Al hacer esto, se obtienen como resultados las gráficas de la figura 15.

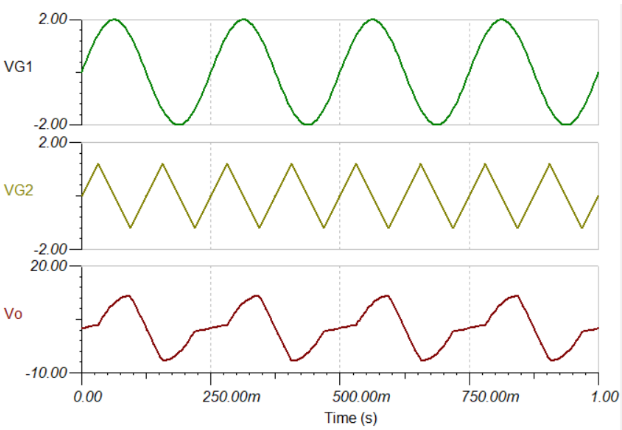

Figura 15: Análisis Circuito 2

La curva verde representa el voltaje v_1, que es senoidal, con amplitud $2V$ y una frecuencia de 4Hz. La curva amarilla representa al voltaje v_2, que es triangular, con amplitud 1.2 y frecuencia 8Hz. Por último, la curva roja representa el voltaje de salida v_o, que como vimos, es igual a $k_m(v_1 - v_2) + k_c$

Conclusiones

Se lograron construir circuitos que realicen las operaciones buscadas sobre señales de voltaje. Para el primer circuito, fue necesario utilizar el conocimiento formado en los antecedentes para utilizar un integrador, un derivador y un amplificador de señales con el objetivo de crear la señal

$$v_o(t) = k_p v_i(t) + k_i \int v_i(t)dt + k_d \frac{dv_i(t)}{dt}$$

Es importante notar que este circuito se realizó por secciones, con una sección encargándose de integrar, otra de derivar, otra de amplificar y finalmente una para sumar todos los resultados. De este forma modular es como se trabajan la mayoría de los circuitos con amplificadores operacionales.

Se pudo comprobar que dicha señal fue creada exitosamente al poner a prueba al circuito 1 con tres señales de entrada distintas y comparar el resultado simulado con el esperado teóricamente.

Para la señal senoidal, se probó teóricamente y se grafica en la figura 9, que la señal de salida debería de tener una amplitud de $1{,}956V$. El valor obtenido en el simulado fue de $1{,}97V$, por lo que se tiene un error del 0,71 %.

En la señal escalón se notó que tanto la salida simulada de la figura 10 como la esperada teóricamente de la figura 11 tienen básicamente el mismo comportamiento. Al final del tiempo (en $t = 4s$) la señal teórica de la figura 11 tiene un valor de $36{,}11mV$, mientras que la señal simulada en TINA llega a un valor final de $35{,}6mV$, lo que corresponde a una diferencia de 0,86 %.

Finalmente, en la señal de tren de pulsos de este circuito se observan comportamientos algo distintos en la señal de salida teórica y la simulada en TINA. Esto se explica como se mencionó en el apartado de resultados debido a los saltos súbitos que tiene la señal de pulsos que hacen que su derivada tome valores infinitos. Sin embargo, tanto la señal de salida teórica como la simulada siguen a grandes rasgos un crecimiento lineal, que en el caso de la teórica culmina en un voltaje de $2{,}5V$ al final de los $4s$ y en el caso de la simulada llega a un valor de $2{,}47V$. Esto marca una diferencia de 1,2 % entre el valor teórico y el simulado.

Además, este circuito 1 tiene un nombre especial, se conoce como controlador PID (controlador proporcional integral y derivativo). Éste es un mecanismo de control que permite controlar las variables de un proceso en general. Se utiliza para calcular la diferencia entre nuestra variable real y una variable deseada a la que queremos llegar. Se aplica por ejemplo para mantener regulada la temperatura de un laboratorio por medio de un proceso de retoralimentación.[3]

Posteriormente se utilizó un amplificador de instrumentación para construir el circuito 2, el cual es capaz de restar dos señales de voltaje y amplificar esta diferencia. Nuevamente se cumplió con el objetivo de simular el circuito y obtener la señal de salida.

Los circuitos simulados y sus resultados muestran nuevamente la utilidad de los amplificadores operacionales para realizar operaciones sobre señales de voltaje.

Bibliografía

1. Rashid, Muhammad H. Microelectronic Circuits Analysis and Design Second edition. Cengage Learning, 2011

2. Jaeger, Richard C., and Travis N. Blalock. Microelectronic circuit design. New York: McGraw-Hill, 2010.

3. Horowitz, Paul and Hill Winfield. The art of electronics - 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

4. “Summing Amplifier Is an Op-Amp Voltage Adder.” Basic Electronics Tutorials, 29 Apr. 2021, https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp-4.html.