

## 0.1. Introducción

Un oscilador es un circuito electrónico capaz de producir una señal oscilante periódica, a menudo senoidal o cuadrada. Existen dos tipos de osciladores: los osciladores armónicos y los osciladores de relajación. Los primeros producen una señal sinusoidal a la salida y se rigen por el criterio de Barkhausen. En cambio, los osciladores de relajación u osciladores no lineales, producen una señal no sinusoidal, como por ejemplo una triangular, un diente de sierra o un tren de pulsos. Básicamente consisten de dos partes: un elemento que almacena energía (por lo general un capacitor) y un dispositivo de switching no lineal, ambos conectados por algún tipo de realimentación. El dispositivo switching se encarga de cargar y descargar el capacitor periódicamente, ocasionando cambios abruptos en la salida del circuito.

## 0.2. Oscilador controlado por tensión

Un tipo especial de osciladores de relajación son los VCO u osciladores controlados por voltaje por sus siglas en inglés. La función principal de los mismos es la de convertir una señal DC de entrada a una frecuencia de señal a la salida, por lo general sinusoidal o triangular. Al ser un tipo de osciladores los VCOs poseen dos partes, una activa que actúa como amplificador y una red de retroalimentación que provee retroalimentación positiva al sistema. Esta red de retroalimentación contiene por lo general un elemento de reactancia variable, el cual controla la frecuencia de salida del circuito. Los VCOs poseen infinitas aplicaciones, entre ellas son componentes fundamentales de los circuitos amarradores de fase (PLL), sirven de sintetizadores de frecuencia controlables, son usados también como entrada de frecuencia de la portadora para moduladores, etc.

Existen dos parámetros que definen el funcionamiento correcto de un VCO: la distorsión armónica y el jitter o fluctuación del retardo. La distorsión armónica es una medida de cuánto se distorsiona o cambia la forma de una onda de su forma convencional debido a los diferentes componentes en frecuencia de la misma. Por otro lado, se define al jitter como la desviación en la periodicidad de una señal, con respecto a una referencia fija.

En la siguiente figura puede verse un diagrama del circuito utilizado:

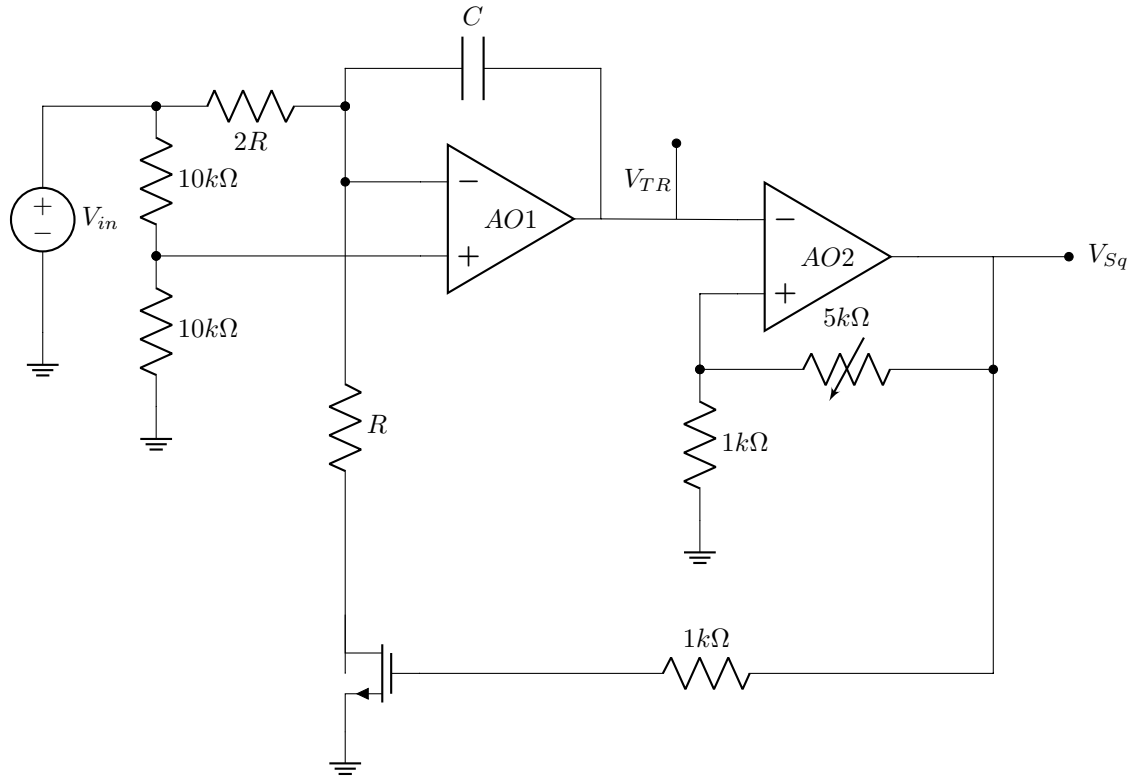


Figura 1: VCO implementado

Como se mencionó anteriormente el circuito consta de dos partes que logran tener una señal triangular a la salida con frecuencia dependiente de la tensión  $V_{in}$ . Más precisamente la frecuencia final de la señal de salida se comportará de la siguiente manera:

$$f_0 = kV_{in} \quad V_{in} > 0 \quad (1)$$

donde  $k$  es la sensibilidad del VCO en Hertz por Volt.

El primer amplificador operacional se comporta como convertidor  $V - I$  y obliga al capacitor a conducir una corriente linealmente proporcional a  $V_{in}$ . Pero para conseguir una onda triangular a la salida, el capacitor debe cargarse y descargarse y, por ende, alternar entre polaridades opuestas. Dicha polaridad se controla mediante el transistor MOSFET tipo n que esta actuando de interruptor en este circuito. Si el transistor conduce por la resistencia  $R$  circula una corriente igual a  $\frac{V_{in}}{2R}$ , pero solo la mitad de esta corriente es suministrada por la resistencia  $2R$ , por ende, la mitad restante la suministra el capacitor. En el caso que el transistor este apagado y no conduzca, toda la corriente que llega al terminal no inversor debe fluir por el capacitor pero con sentido contrario al anterior.

A partir de la ecuación fundamental de carga y descarga del capacitor:

$$\Delta t = \frac{C}{I} \Delta v \quad (2)$$

y teniendo en cuenta la corriente que circula por el mismo se llega a la siguiente expresión que caracteriza la salida del primer amplificador operacional:

$$V_{TR} = \frac{V_{in}}{2} + V_C = \frac{V_{in}}{2} (1 \pm \frac{\Delta t}{2RC}) \quad (3)$$

Entonces los cambios en la tensión de salida  $V_{TR}$  vienen dados por:

$$\Delta V_{TR} = V_{in} \frac{\Delta t}{4RC} \quad (4)$$

Por otro lado, el segundo op-amp forma un Schmitt trigger el cual controla la tensión en la base del transistor y por consiguiente, la pendiente de la rampa. La salida del Schmitt trigger cumple  $V_{out} = A_{vol}(V^+ - V^-)$ , limitada por la saturación del operacional. Dada esta ecuación el comparador tiene dos estados posibles:

- Con  $V^+ > V_{TR}$   $V_{SQ}$  adopta el valor  $+V_{SAT}$  y luego  $V^+$  será un valor menor a  $V_{SAT}$  que dependerá del valor de las resistencias de realimentación, este estado se define como  $V_{TH}$  (trigger high).
- Con  $V^+ < V_{TR}$   $V_{SQ}$  adopta el valor  $-V_{SAT}$  y ocurre lo mismo que en el caso anterior con  $V^+$ , este estado será definido como  $V_{TL}$  (trigger low).

En consecuencia, la rampa cambiará de pendiente positiva negativa cuando  $V_{TR} = V_{TH}$  y de pendiente negativa a positiva cuando  $V_{TR} = V_{TL}$ . Si se reemplaza  $\Delta V_{TR}$  por  $V_{TH} - V_{TL}$  y  $\Delta t$  por  $\frac{1}{2f_0}$  en la ecuación 3:

$$f_0 = \frac{V_{in}}{8RC(V_{TH} - V_{TL})} \quad (5)$$

consiguiéndose así una frecuencia variable dependiente de la tensión de entrada.

El diseño anterior funciona como VCO pero posee dos complicaciones:

En primer lugar, cuando la señal de entrada es nula la salida también. Por ende, debe agregarse una etapa que logre una tensión de 1 Volt cuando la entrada sea nula, y de 10 Volt cuando sea igual a 5, ya que así se obtiene una relación 1:1 tensión-frecuencia.

En segundo lugar, el VCO diseñado es un oscilador de relajación, es decir, con salida no sinusoidal, por ende debe efectuarse una conversión triangular-sinusoidal a la salida del primer opamp.

### 0.3. Elección de componentes

Los primeros Componentes a tener en cuenta son el capacitor y las resistencias del primer opamp. Deben elegirse dos valores respetándose la tensión máxima de saturación del Schmitt trigger  $V_{TH} - V_{TL}$ , la cual rondará los 13 Volt. Se hizo la resistencia de realimentación del comparador variable ya que así

puede calibrarse la tensión de disparo para los valores de resistencias y capacitor elegidos. Con un capacitor de  $10nF$  y resistencias de  $1,5k\Omega$  para una tensión de entrada de 1 Volt debe ser igual a  $1kHz$ :

$$1000 = \frac{1}{8 \cdot 1500 \cdot 10^{-8} \cdot (V_{TH} - V_{TL})} \Rightarrow (V_{TH} - V_{TL}) = 8,33 \text{ Volt} \quad (6)$$

Por ende se esta dentro del rango de tensiones adecuado.

El operacional usado es el TL084, contiene los 4 opamps necesarios para el diseño y posee características deseadas como alto slew-rate ( $13\frac{V}{s}$ ), baja corriente de bias ( $30pA$ ) y baja distorsión armónica (menor al 0,0003 %).

#### 0.4. Cirucito Sumador

El circuito deseado debe cumplir la siguiente ecuación de la recta:

$$V_{out} = \frac{9}{5}V_{in} + 1 \quad (7)$$

Lo natural es utilizar con este propósito un circuito sumador no inversor:

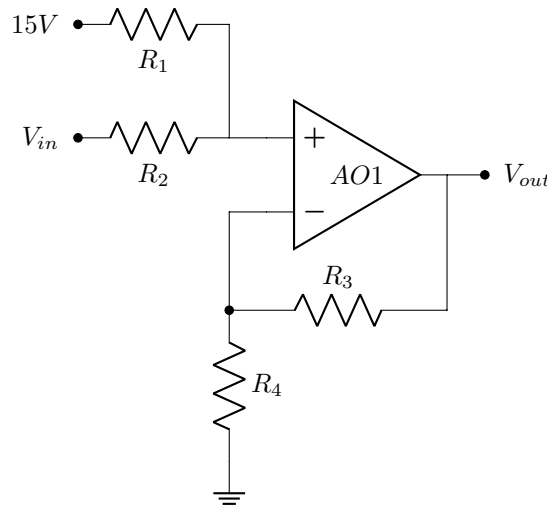


Figura 2: Sumador no Inversor

Si se usa el teorema de superposición se llega a la siguiente ecuación para la tensión de salida:

$$V_{out} = \left( \frac{1 + \frac{R_3}{R_4}}{R_1 + R_2} \right) \cdot (R_1 \cdot V_{in} + R_2 \cdot 15) \quad (8)$$

Si se iguala coeficiente a coeficiente la expresión anterior con 7 se llega a la siguiente relación entre resistencias:

$$1 + \frac{R_3}{R_4} = \frac{9}{5} \cdot \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = \frac{1}{15} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (9)$$

Despejando de la segunda igualdad se llega a la siguiente relación entre  $R_1$  y  $R_2$ :

$$R_1 = 27R_2 \quad (10)$$

si luego se despeja la primera igualdad:

$$13R_4 = 15R_3 \quad (11)$$

Los siguientes valores comerciales cumplen a la perfección ambas igualdades:

- $R_1 = 1k\Omega$
- $R_2 = 27k\Omega$
- $R_3 = 1,3k\Omega$
- $R_4 = 1,5k\Omega$

### 0.5. Conversion onda triangular a senoidal

Existen diversos métodos para transformar una señal triangular a senoidal, en este caso se optó por la utilización de un par diferencial, ya que si se hubiera utilizado algún tipo de filtro la respuesta en frecuencia podría afectar la transformación.

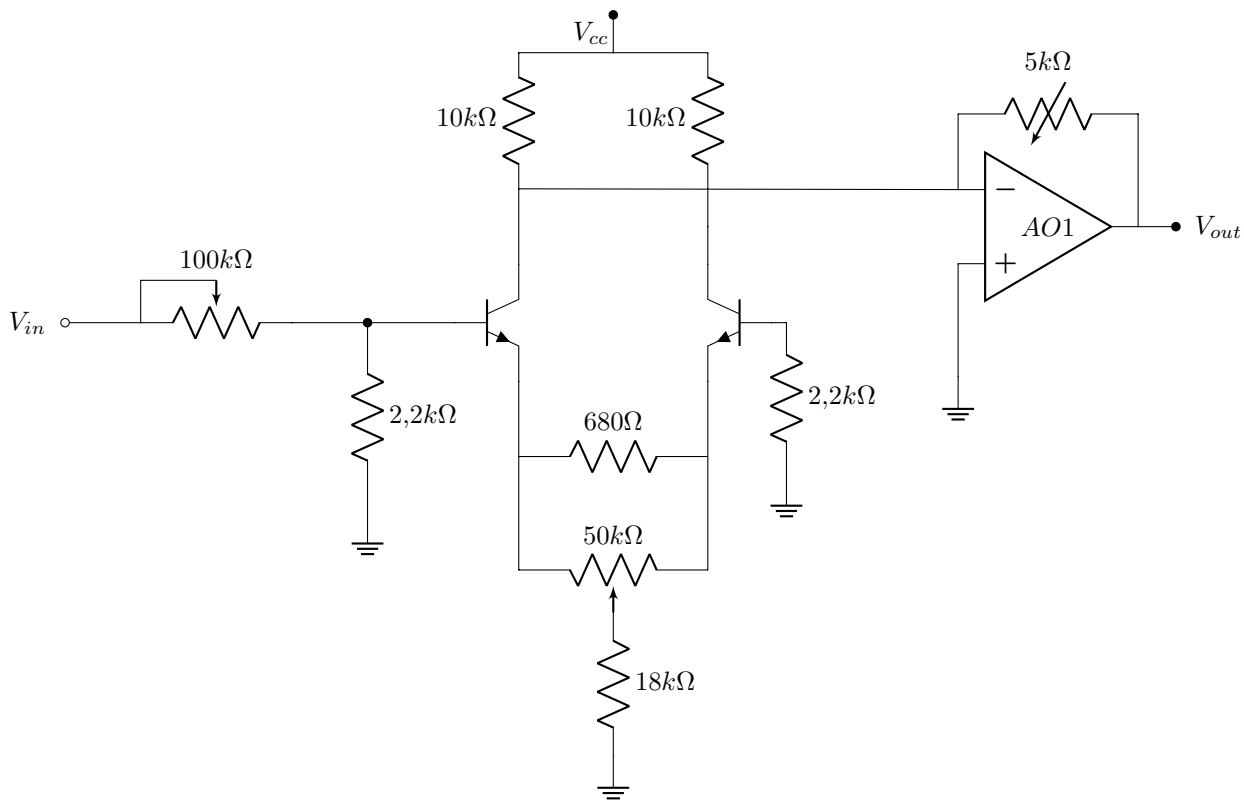


Figura 3: Conversor triangular-sinusoidal

### 0.6. Calibración

En total, el circuito posee 4 potenciómetros que deben ajustarse para calibrar correctamente el VCO:

- La resistencia de realimentación del Schmitt trigger debe ajustarse para lograr el nivel de tensión deseado, dados los componentes elegidos. Para eso se ponen 0 Volts a la entrada y se ajusta el preset hasta lograr una señal de  $1kHz$ .
- El preset entre los emisores de los transistores en el par diferencial debe ajustarse para lograr mejor simetría en la onda senoidal.
- El preset a la entrada del conversor se ajusta para suavizar la triangular y lograr una onda senoidal.

Frecuencia fundamental (kHz)	THD ( %)
1.1	0.51
3.3	0.72
5.29	1.442
7.2	1.128
9	1.376
10.8	1.446

- El preset a la salida del sistema se ajusta para lograr una señal de 1 *Volt* de amplitud.

## **0.7. Resultados Experimentales**

### **0.7.1.**

### **0.7.2. VCO**

## **0.8. Conclusiones**