

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

Trabajo Práctico N°6:  
Osciladores, PLL y circuitos no lineales  
Teoría de Circuitos - 2019

Grupo 1:

Farall, Facundo David  
Gaytan, Joaquín Oscar  
Kammann, Lucas  
Maselli, Carlos Javier  
Müller, Malena

Profesores:

Jacoby, Daniel Andrés  
Belaustegui Goitia, Carlos  
Iñaki Iribarren, Rodrigo

15 de noviembre de 2019

# Índice

<b>1. Oscilador de Wien</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción	3
1.2. Marco teórico	3
1.2.1. Frecuencia de oscilación	3
1.2.2. Transferencia del circuito	4
1.2.3. Criterio de Barkhausen	4
1.2.4. Desviaciones del circuito básico	4
1.3. Diseño y función de los componentes	6
1.3.1. Lazo de realimentación positiva	6
1.3.2. Lazo de realimentación negativa	6
1.3.3. Selección del operacional a utilizar	6
1.4. Caracterización del sistema	7
1.4.1. Singularidades	7
1.4.2. Sensibilidades	7
1.5. Resultados	7
1.5.1. Frecuencia de oscilación	7
1.5.2. Tensión de salida	7
1.5.3. Establecimiento de la señal	7
1.5.4. Distorsión armónica	7
<b>2. PLL: Phase Locked Loop</b>	<b>8</b>
<b>3. VCO: Voltage Controlled Oscillator</b>	<b>9</b>

# 1. Oscilador de Wien

## 1.1. Introducción

Las señales senoidales son de vital importancia en el ámbito de la electrónica, tanto en usos de intercambio de información como transferencia de energía, entre otros, y es justamente por eso que la generación de las mismas es de real importancia. Una forma de generar señales senoidales mediante componentes analógicos electrónicos es mediante osciladores, y uno de los ejemplos de estos circuitos es el oscilador de Wien, cuya forma más elemental se muestra en la Figura ??.

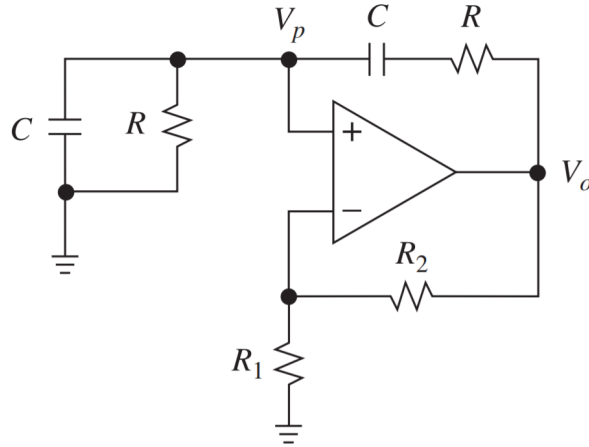


Figura 1: Oscilador de Wien en su forma más sencilla.

El objetivo de esta sección del artículo es, basándose en derivaciones del circuito anterior, diseñar un oscilador que genere una señal senoidal con su frecuencia de oscilación en  $77,5KHz$  como único parámetro de diseño.

## 1.2. Marco teórico

### 1.2.1. Frecuencia de oscilación

Retomando el circuito planteado en la sección anterior, el mismo puede ser analizado para encontrar las relaciones que determinan los parámetros fundamentales de la señal generada por el oscilador. El mismo puede ser pensado como un amplificador realimentado tanto positiva como negativamente, donde el lazo negativo es el de un amplificador no inversor de ganancia:

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

La tensión de entrada a este no inversor puede ser puesta en función de los parámetros del lazo negativo mediante la ecuación ??.

$$V_p = V_o \frac{R // \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C}}{\left(R // \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C}\right) + \left(R + \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C}\right)}$$

Manipulando algebraicamente esta expresión se obtiene la ganancia debida al lazo positivo:

$$B(jf) = \frac{1}{3 + j \cdot \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)} \quad (2)$$

Donde:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (3)$$

La ganancia total del oscilador viene dada por la multiplicación de las ganancias de los lazos, consecuentemente, de las ecuaciones 1 y 2 se obtiene:

$$T(jf) = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{3 + j \cdot \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)} \quad (4)$$

De la observación de esta transferencia puede deducirse que se trata de un pasa banda con ganancia máxima en  $f = f_0$  y ganancia:

$$T_{max} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{3} \quad (5)$$

### 1.2.2. Transferencia del circuito

Este circuito puede ser modelizado como uno realimentado para el cual se cumple que:

$$H(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s) \cdot \beta(s)}$$

Donde para  $A(s)$  suficientemente grande, se puede aproximar la expresión a:

$$H(s) \approx \frac{1}{\beta(s)}$$

Con:

$$\beta(s) = \frac{1 + T(s)}{T(s)}$$

Y finalmente:

$$H(s) \approx \frac{\left( \frac{R_3}{R_4} + 1 \right) \cdot (C^2 \cdot R^2 \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot R \cdot s + 1)}{C^2 \cdot R^2 \cdot s^2 + \left( \frac{R_3}{R_4} + 4 \right) \cdot C \cdot R \cdot s + 1} \quad (6)$$

### 1.2.3. Criterio de Barkhausen

El criterio de Barkhausen dicta las condiciones que deben cumplirse en oscilador como el de Wien para que se cumpla la condición de oscilación y determina la frecuencia a la que se dará el mismo. El criterio consiste en hallar el punto para el cual se cumple que la ganancia es 1 y el desfase es nulo, y, para el circuito en cuestión, observamos que la segunda de las condiciones puede ser cumplida evaluando en  $f_0$ , mientras que la primera puede cumplirse para esa misma frecuencia si  $\frac{R_2}{R_1} = 2$

### 1.2.4. Desviaciones del circuito básico

Si bien el circuito previamente mencionado puede ser utilizado para buscar de forma más sencilla las relaciones que determinan el cumplimiento o no de la oscilación, en la práctica deben de hacerse modificaciones que prevengan al circuito de las variaciones intrínsecas a la utilización de componentes reales. Como se dijo en la sección anterior, para que se cumpla el criterio de Barkhausen, debe darse que  $\frac{R_2}{R_1} = 2$  exactamente; sin embargo, esta característica no puede ser lograda en la realidad con simples componentes pasivos, razón por la cual el circuito original de la Figura 1, es reemplazado por el de la Figura 2.

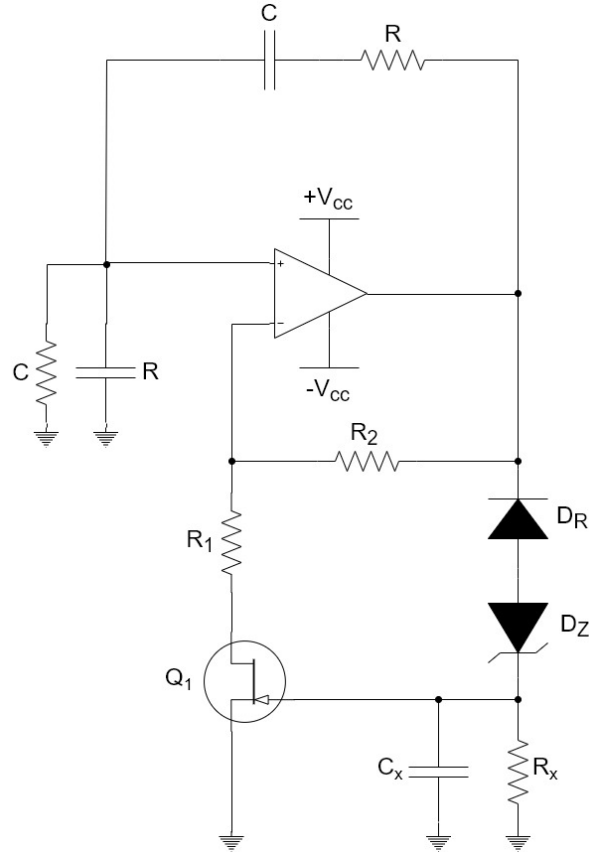


Figura 2: Circuito utilizado.

### Transistor JFET

La principal diferencia yace en la inclusión de un JFET-N en la realimentación negativa, en serie con  $R_1$ , cuya función es la de resistencia variable dinámicamente. Mediante esta incorporación, puede colocarse una resistencia en  $R_1$  de valor tal que  $\frac{R_2}{R_1} > 2$  que en el encendido del circuito favorezca la realimentación positiva, y se inicie la oscilación. Una vez llegado al valor deseado de tensión de salida de la señal (fijado por los diodos, y explicado en el siguiente ítem), la tensión en el Gate del transistor se modificará achicando el ancho del canal y aumentando entonces la resistencia del mismo. Con este mecanismo es que se logra que la ganancia del lazo negativo llegue a la condición de  $\frac{R_2}{R_1} = 2$ .

La elección de qué tipo de JFET se usa va de la mano de la disposición de los diodos. Cabe recordar que un JFET canal N disminuirá el ancho de su canal conforme se aplique tensión negativa en su Gate, mientras que el canal P lo hará ante tensiones de valor positivo. Consecuentemente, el uso de un canal N realizará un control de la oscilación a través del semiciclo negativo de la misma, mientras que un canal P lo hará para el positivo.

Otro aspecto a considerar es la zona de utilización del transistor y el rango de variación de la tensión en el Gate. Este JFET está siendo usado en la zona lineal, con bajas tensiones en el Gate, empleándose como resistencia variable. En cuanto a la variación de estas tensiones, se pretende que sean chicas, ya que la no linealidad en la respuesta del transistor podría introducir distorsiones en caso de que no lo fueran.

**Diodo rectificador y Zener ( $D_R$  y  $D_Z$ )** Su función, como bien se mencionó antes, es la de limitar la amplitud de la señal generada a la salida. Cada vez que la salida del operacional supera el valor dado por  $V_Z + V_D$ , más la tensión en el capacitor cargado, los diodos limitan la amplitud a la salida. En el circuito de la Figura 2, los diodos están dispuestos de forma tal que la limitación de la amplitud se dé en el semiciclo negativo, dado que se está utilizando un JFET canal N para el control de la ganancia del lazo negativo. En caso de querer usar un JFET canal P, ambos deberían ser invertidos en su conexión, para permitir el control en el semiciclo positivo.

En caso de querer modificar la amplitud a la salida de la señal, hay dos caminos que pueden tomarse. El

primero y más sencillo es elegir convenientemente el diodo Zener a utilizar; sin embargo, si se requiere un valor de salida que no pueda ser satisfecho mediante valores comerciales de los Zener, puede colocarse una resistencia en la rama de los diodos que, al momento en que los diodos permitan el paso de la corriente, caerá una tensión sobre ella que permitirá el aumento de la amplitud en la senoidal.

**Capacitor y resistencia  $R_x$  y  $C_x$**  Esta malla RC, la cual puede ser vista como un pasa-bajos, cumple la función de mantener la polarización del transistor JFET durante todo el ciclo de la senoidal. Se busca que la constante de tiempo del mismo sea alta, para lograr así el deseado efecto de que la variación en la tensión de Gate sea baja, y esto se logra colocando valores altos de  $R_x$ .

### 1.3. Diseño y función de los componentes

#### 1.3.1. Lazo de realimentación positiva

En cumplimiento con el parámetro de diseño de  $f_0 = 77,5KHz$ , y dados los dos grados de libertad ( $C$  y  $R$ ) de los que se dispone para el diseño de un oscilador que cumpla con lo pedido, se fija en primer lugar  $C = 1nF$ , ya que será más sencillo ajustar un valor de resistencia que de un capacitor. Como consecuencia de esto, y haciendo uso de la ecuación 3, se obtiene que:

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot f_0} \approx 2,05K\Omega$$

Dado que no se cuenta con un valor comercial para esa resistencia, y teniendo en cuenta la importancia crítica de este parámetro, se decide colocar un preset para calibrar este aspecto post-diseño.

#### 1.3.2. Lazo de realimentación negativa

Para la determinación de los valores de resistencias  $R_1$  y  $R_2$ , se retoma lo dicho en el marco teórico sobre la necesidad de que, inicialmente,  $\frac{R_2}{R_1} > 2$ . Nuevamente se tienen dos grados de libertad, de modo que se fija  $R_2 = 100K\Omega$ , y se busca  $R_1 < 50K\Omega$ , encontrando como valor comercial más conveniente  $R_1 = 47K\Omega$ . Para el Control Automático de Ganancia (CAG), compuesto por el diodo rectificador, el diodo Zener, el transistor y el pasa-bajos de  $C_x$  y  $R_x$ , se seleccionan los componentes 1N4148, 1N5230, MPF102,  $10\mu F$  y  $1M\Omega$ , respectivamente. Los últimos dos son elegidos respetando el criterio de la sección 1.2.4, con la intención de que la descarga del capacitor sea lo suficientemente lenta

#### 1.3.3. Selección del operacional a utilizar

Para la selección del amplificador operacional al utilizar se tienen en cuenta diferentes aspectos característicos de los mismos que hacen a la performance del circuito en el que serán empleados.

Algunas de estas características importantes son la tensión de saturación, slew rate y cross-over, ya que estos aspectos pueden tener implicancia en la distorsión armónica de la señal en la salida. Además, ha de observarse también el GBP del amplificador, ya que la presencia de polos que distorsionen la fase en frecuencias cercanas a la de diseño podría provocar problemas para el cumplimiento del criterio de Barkhausen.

La información recopilada de hojas de datos es comprimida en la tabla 1, de la cual se analizan como buenas opciones a los operacionales TL082, TL072 y LM833. Se considera que cualquiera de estas tres opciones satisface los requerimientos de este circuito, razón por la cual la decisión final de elegir al TL082 se basa en buenas experiencias previas con el uso de este amplificador.

Operacional	$A_{vol}$	GBP	$Z_{in}$	$Z_{out}$	SR	THD	$V_{CC_{max}}$
TL082	$200 \cdot 10^3$	3MHz	$10^{12}\Omega$	—	$13 \frac{V}{\mu s}$	< 0,0003	18V
TL072	$200 \cdot 10^3$	3MHz	$10^{12}\Omega$	—	$13 \frac{V}{\mu s}$	< 0,0003	36V
LM833	$316 \cdot 10^3$	16MHz	$2^{12}\Omega$	37 $\Omega$	$13 \frac{V}{\mu s}$	< 0,0002	36V
LM324	$100 \cdot 10^3$	1,2MHz	$2^6\Omega$	—	$0,5 \frac{V}{\mu s}$	—	32V
LM741	$200 \cdot 10^3$	1,5MHz	$2^6\Omega$	75 $\Omega$	$13 \frac{V}{\mu s}$	0,0006	22V

Tabla 1: Comparación de operacionales.

## **1.4. Caracterización del sistema**

### **1.4.1. Singularidades**

La posición de las singularidades en el plano complejo es de vital importancia para estos circuitos osciladores, es por eso que una correcta caracterización del mismo requiere de un análisis de singularidades. En el presente artículo, este análisis se realizará sometiéndolo a variaciones en la resistencia variable lograda con el transistor JFET, y mediante el auxilio de software de cálculo como los módulos de lenguaje Python scipy.

El resultado de este análisis es el ilustrado en la Figura

### **1.4.2. Sensibilidades**

## **1.5. Resultados**

### **1.5.1. Frecuencia de oscilación**

### **1.5.2. Tensión de salida**

### **1.5.3. Establecimiento de la señal**

### **1.5.4. Distorsión armónica**

## 2. PLL: Phase Locked Loop



### **3. VCO: Voltage Controlled Oscillator**