

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

11 de noviembre de 2019

# Índice

<b>1. Oscilador de Wien</b>	<b>3</b>
<b>2. PLL: Phase Locked-Loop</b>	<b>4</b>
2.1. Introducción	4
2.2. Diagrama en bloques del PLL	4
2.2.1. Comparador de fase	4
2.2.2. Filtro pasabajos	4
2.2.3. VCO: Voltage Controlled Oscillator	4
2.3. Respuesta en frecuencia	5
2.3.1. Transferencia en condición de enganche	6
2.4. Respuesta al escalón	6
2.4.1. Factor de calidad a partir del overshoot	6
2.4.2. Tiempo de establecimiento	6
2.5. Rango de captura y de enganche	6
2.6. Respuesta transitoria ante distintos filtros de lazo	6
2.6.1. Sin filtro: $F(s) = 1$	6
2.6.2. Filtro pasa bajos	7
2.6.3. Filtro con un polo y un cero	7
2.7. Implementaciones con PLL	7
2.7.1. Demodulador FM	7
2.7.2. Multiplicador de frecuencia	7
2.8. Conclusiones	7
<b>3. VCO: Voltage Controlled Oscillator</b>	<b>8</b>

## 1. Oscilador de Wien

## 2. PLL: Phase Locked-Loop

### 2.1. Introducción

Un Phase Locked-Loop, mejor conocido como PLL, es un sistema de control cuya señal de salida tiene la misma frecuencia que la señal de entrada y sigue sus variaciones en frecuencia dentro de un rango acotado. El PLL es muy usado en sistemas de comunicaciones, ya que sus principales aplicaciones son de demodulador de FM o PM y como seguidor o sincronizador de señales que temporalmente varían su frecuencia. A continuación se analizarán ciertos comportamientos del PLL y su aplicación como demodulador de FM y como multiplicador de frecuencia. Para realizar el trabajo se utilizará el integrado CD4046<sup>1</sup>.

agregar  
datasheet

### 2.2. Diagrama en bloques del PLL

El PLL está formado por tres bloques fundamentales para su funcionamiento: un comparador de fase, un filtro pasabajos y un oscilador controlado por tensión (mejor conocido como VCO y que será estudiado en profundidad en la última sección). Esta distribución en bloques es mostrada en la figura 1.

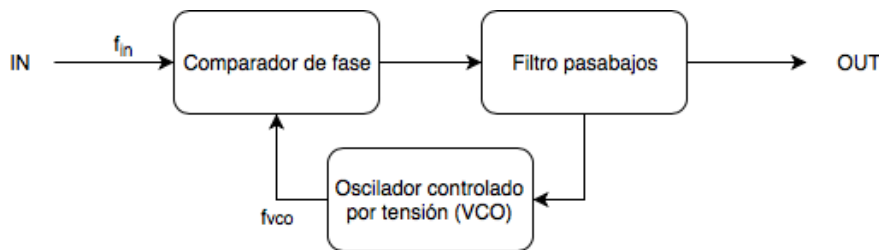


Figura 1: Diagrama en bloques del PLL.

#### 2.2.1. Comparador de fase

Del comparador de fase sale una tensión proporcional a la diferencia de fase entre la señal de entrada y aquella que proviene del VCO. Llamando a la tensión de salida del comparador  $V_1$ , a la ganancia del valor de fase  $K_\phi$  (la expresión que la determina depende de la forma de implementar el comparador) y a la diferencia de fase entre la señal de entrada y la proveniente del VCO  $\Delta_{phi}$ :

$$\begin{cases} V_1 = K_\phi \cdot \Delta_\phi \\ \Delta_\phi = \phi_{in} - \phi_{vco} = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

Se mencionó que hay distintas formas de implementar un comparador. El integrado que se emplea en este trabajo es el CD4046 y contiene dos tipos de comparadores de fase diferentes (tipo 1 y tipo 2)

explicar  
los compa-  
radores del  
integrado  
usado

#### 2.2.2. Filtro pasabajos

Este filtro se emplea para que el lazo sea estable. También permite un proceso de captura de frecuencias más rápido, un rango de captura mayor y la respuesta del circuito no es sobre amortiguada. Además, en caso de que se pierda el enganche por interferencias durante el transitorio, el filtro otorga una memoria en el lazo. Por otro lado, la presencia del filtro brinda una ventaja en la demodulación. La señal que sale del comparador de fase ingresará luego al VCO. Si esta señal tiene un riple, al demodularla puede producir picos no correspondientes a la señal que inicialmente fue modulada.

#### 2.2.3. VCO: Voltage Controlled Oscillator

El VCO es un integrador que genera una señal cuya frecuencia es proporcional a la tensión de la señal aplicada en su entrada:

<sup>1</sup>Hoja de datos del integrado CD4046:

$$\begin{cases} \omega_{vco} = \omega_0 + K_{vco} \cdot V_2 \\ \omega_{vco} = \frac{d\phi_{vco}}{dt} \implies \phi_{vco} = \int \omega_{vco} dt \implies \phi_{vco}(s) = \frac{1}{s} \cdot \omega_{vco}(s) \end{cases} \quad (2)$$

Siendo, en las ecuaciones anteriores,  $\omega_{vco}$  la frecuencia a la salida del VCO,  $\omega_0$  la frecuencia de la señal que entra al VCO, denominada "free running frequency"  $K_{vco}$  la constante de proporcionalidad que introduce el VCO.

### 2.3. Respuesta en frecuencia

Se representa ahora el diagrama en bloques indicando matemáticamente la influencia de cada uno, para mostrar a partir de este la función transferencia del PLL.

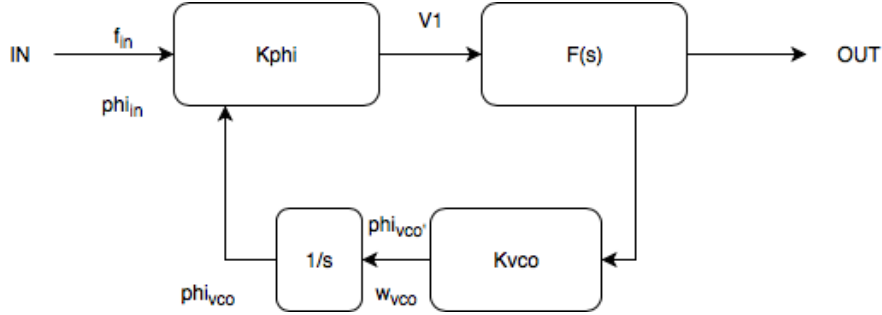


Figura 2: Diagrama en bloques del PLL con sus funciones matemáticas.

A partir del diagrama en bloques de la figura 2, se hace el siguiente desarrollo matemático. Se parte de:

$$\begin{cases} H(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} \\ G(s) = \frac{K_\phi F(s) K_{vco}}{s} \end{cases} \quad (3)$$

Luego,

$$\begin{cases} \frac{V_{out}}{\phi_{in}} = \frac{s K_\phi F(s)}{s + K_\phi K_{vco} F(s)} \\ \frac{V_{out}}{\omega_{in}} = \frac{V_{out}}{\phi_{in} s} = \frac{K_\phi F(s)}{s + K_\phi K_{vco} F(s)} \end{cases} \quad (4)$$

Y entonces se puede escribir  $G(s)$  como:

$$G(s) = \frac{K_{vco} F(s)}{s} \quad (5)$$

Además:

$$\phi_{vco} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \phi_{in}(s) \quad (6)$$

Y por el teorema del valor final, sabemos que  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sX(s)$ :

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \phi_{vco}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left( \frac{G(s)}{1 + G(s)} \phi_{in}(s) \right) = \phi_{in}(s) \quad (7)$$

Por lo tanto:

$$\phi_{vco}(t) \approx \phi_{in}(t)|_{t \rightarrow \infty} \quad (8)$$

La interpretación del resultado en la ecuación 8 es que una vez alcanzado el comportamiento permanente del circuito, la fase de la señal de salida del VCO sigue a aquella de la señal de entrada y a esto se debe lo mencionado al inicio sobre que estas señales presentan la misma frecuencia.

### 2.3.1. Transferencia en condición de enganche

## 2.4. Respuesta al escalón

### 2.4.1. Factor de calidad a partir del overshoot

### 2.4.2. Tiempo de establecimiento

## 2.5. Rango de captura y de enganche

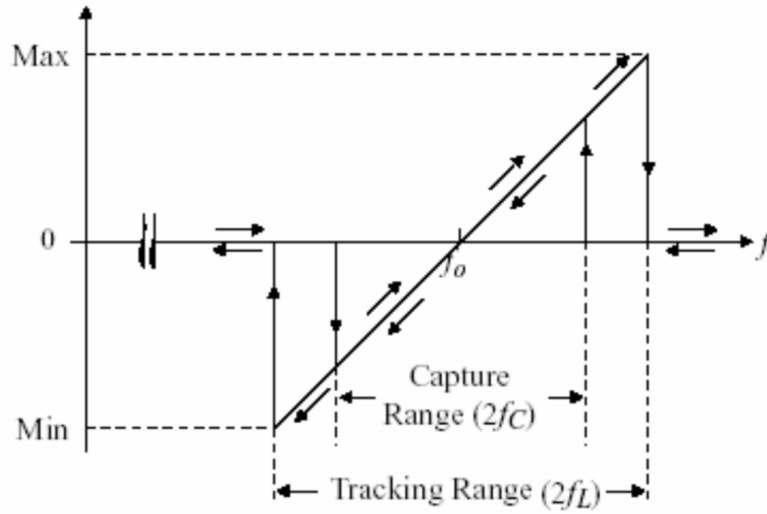


Figura 3: Rangos de captura y de enganche.

**Rango de captura:** Es el rango de frecuencias en el que la señal de entrada debe estar para engancharse. El rango de captura es  $2f_c$ , siendo  $f_c$  la frecuencia de captura, medida desde una frecuencia central  $f_0$ . Esto se ve en la figura 3.

**Rango de enganche:** Es el rango de frecuencias para el cual la señal a la salida del VCO queda enganchada luego de haber pasado por el rango de captura. El rango de enganche es  $2f_L$ , siendo  $f_L$  la frecuencia de enganche, medida respecto a la frecuencia  $f_0$ . Esto se ve en la figura 3.

El rango de captura es menor al rango de enganche, ya que para quedar enganchada la señal luego de pasar por el VCO, debe haber pasado previamente por el rango de captura. Por lo tanto  $2f_C < 2f_L$ .

## 2.6. Respuesta transitoria ante distintos filtros de lazo

### 2.6.1. Sin filtro: $F(s) = 1$

Haciendo  $F(s) = 1$  en la expresión 4, se obtiene:

$$\begin{cases} \frac{V_{out}}{\phi_{in}} = \frac{sK_\phi}{s + K_\phi K_{vco}} \\ \frac{V_{out}}{\omega_{in}} = \frac{V_{out}}{\phi_{in}s} = \frac{K_\phi}{s + K_\phi K_{vco}} \end{cases} \quad (9)$$

Considerando la segunda expresión de 9, se observa que es de la forma de un filtro pasabajos. La variable de entrada es  $\omega_{in}$ . La respuesta de esta expresión representa una tensión que corresponde a haber modulado en frecuencia una onda portadora entrante. Se mencionan ciertas características del comportamiento del circuito sin la presencia del filtro  $F(s)$ . Dado que del comparador sale una señal con una frecuencia de la suma de las de sus entradas y otra con la resta, no habrá un filtro luego del comparador que permita el

paso de solo una de ellas. También pueden aparecer señales de interferencia no pertenicientes a la banda deseada. El PLL con este tipo de filtro tiene un proceso de captura más lento, un menor rango de captura y una respuesta sobre amortiguada. Sin embargo, rechaza más aquellas perturbaciones en la frecuencia que entra.

### 2.6.2. Filtro pasa bajos

Teniendo un filtro pasa bajos de la forma  $F(s) = \frac{1}{\frac{s}{\omega_p} + 1}$ , reemplazando esto en la expresión 4 se obtiene:

$$\begin{cases} \frac{V_{out}}{\phi_{in}} = \frac{1}{K_{phi}} \cdot \frac{s}{\frac{s^2}{\omega_p K_{vco}} + \frac{s}{K_{vco}} + 1} \\ \frac{V_{out}}{\omega_{in}}(s) = \frac{V_{out}}{\phi_{in} s} = \frac{1}{K_{phi}} \cdot \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_p K_{vco}} + \frac{s}{K_{vco}} + 1} \end{cases} \quad (10)$$

### 2.6.3. Filtro con un polo y un cero

$$F(s) = \frac{\frac{s}{\omega_z} + 1}{\frac{s}{\omega_p} + 1}$$

## 2.7. Implementaciones con PLL

### 2.7.1. Demodulador FM

### 2.7.2. Multiplicador de frecuencia

## 2.8. Conclusiones

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