

Laboratorio 2: Malla de fase encadenada

Gatica, Isaias ; Saez, Lautaro ; Millain, Gonzalo
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue

Resumen—Se empieza por analizar cada uno de los bloques que conforma una malla de fase encadenada (PLL). Luego se observa su uso a la hora de demodular una señal FM.

I. Procedimiento a seguir

- Frecuencia libre de V_{CO} cuando $V_{in} = 0V$.
- Frecuencia libre vs variaciones de $R=1k$
- Frecuencia libre vs R y τ
- llevar la salida del V_{CO} a $8KHz$ con in_2 en $1KHz$.
- Conectar el generador a una frecuencia que el PLL enganche
- Salida de V_{CO}
- Variacion de la frecuencia del generador de entrada
- Calculo de f_c del circuito RC.
- Variaciones de C .
- Medicion de C para frecuencias de enganche superior e inferior y para $1KHz$ de entrada
- Medicion de C para frecuencias de $4kHz, 5KHz, 6KHz$.

II. Marco teórico

II-A. Detector de fase

Un detector de fase es un mezclador optimizado para usarse con frecuencias de entrada iguales. También se lo denomina detector de fase, dado que la cantidad de voltaje de CD depende del ángulo de fase ϕ entre las señales de entrada.

Se muestra la función del detector de fase a partir de dos señales senoidales en la Fig. 1.

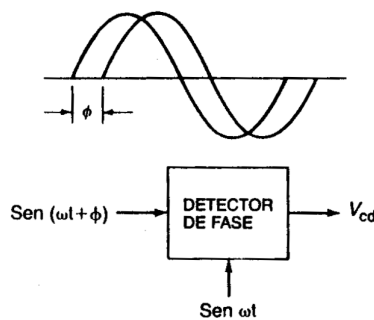


Figura 1: Funciones de entrada y diagrama en bloque.

Cuando el ángulo de fase $\phi = 0$, el voltaje de CD es máximo. A medida que el ángulo de fase se incrementa de 0° a 180° , el voltaje de cd decrece a su valor mínimo. Cuando $\phi = 90^\circ$, la salida de CD es el promedio entre la salida máxima y mínima. Una grafica de la función a la salida se muestra en la Fig. 2.

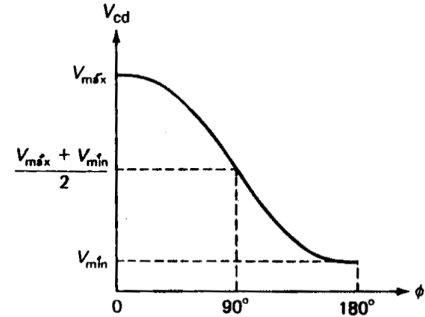


Figura 2: Salida del detector de fase

II-B. Oscilador controlado por voltaje (VCO)

En un VCO, un voltaje de CD de entrada controla la frecuencia de salida, como se muestra en la Fig. 3.

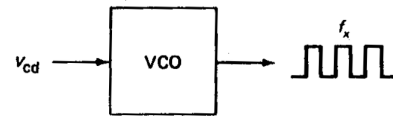


Figura 3: Diagrama en bloque del VCO.

Un voltaje de CD controla la frecuencia del oscilador. Típicamente la frecuencia decrece en forma lineal con un incremento en el voltaje de CD, como se muestra en la Fig. 4.

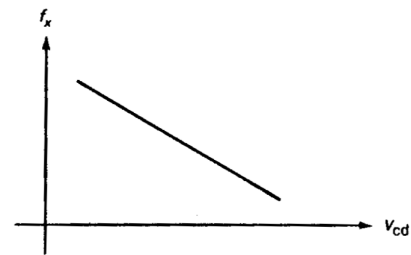


Figura 4: Relación voltaje de CD y frecuencia de salida.

II-C. Malla de fase encadenada (PLL)

En un PLL (phase-locked-loop); son entradas al detector de fase una señal con frecuencia f_x , y otra proveniente de un VCO. La señal de salida del detector pasa por un filtro pasabajos, que remueve las frecuencias originales, sus armónicas y la frecuencia suma. Por lo tanto queda la frecuencia diferencia (voltaje de CD) a la salida del filtro. Este voltaje de CD controla la frecuencia del VCO. En la Fig. 5 se muestra el diagrama en bloque del PLL.

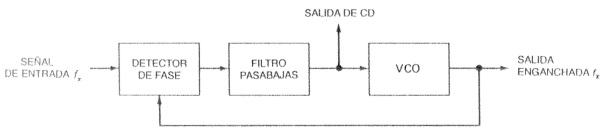


Figura 5: Diagrama en bloque del PLL.

El sistema realimentado “engancha” la frecuencia del VCO a la frecuencia de entrada. Cuando el sistema trabaja de manera correcta, la frecuencia a la salida del VCO es igual a f_x , igual a la señal de entrada. Por lo tanto, el detector de fase tiene dos entradas con frecuencias iguales; el ángulo de fase entre estas entradas determina la cantidad de voltaje de cd de salida.

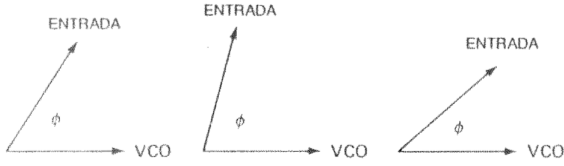


Figura 6: Fasores de la señal de entrada y VCO.

Los fasores para la señal de entrada y la del VCO se muestran en la Fig. 6. Si la frecuencia de entrada cambia, la frecuencia del VCO la seguirá.

Por ejemplo, si la frecuencia de entrada f_x se incrementa, su fasor gira más rápido y el ángulo de fase aumenta. Esto significa que saldrá menos voltaje de cd en la salida del detector de fase. El voltaje de cd más bajo forzará a que la frecuencia del VCO se incremente hasta que se iguala a la frecuencia de entrada.

Por otro lado, si la frecuencia de entrada decrece, su fasor disminuye su velocidad de giro y el ángulo de fase decrece. Se tiene más voltaje de cd a la salida del detector de fase, lo cual causa que la frecuencia del VCO disminuya hasta que se iguala a la frecuencia de entrada.

II-D. Intervalo de enganche

El intervalo de enganche B_L es el intervalo de frecuencias que el VCO puede producir, dado por

$$B_L = f_{max} - f_{min} \quad (1)$$

Donde f_{max} y f_{min} son las frecuencias máxima y mínima del VCO. Cuando f_x se encuentra dentro de este intervalo, el VCO seguirá esta frecuencia de entrada y la frecuencia de salida será igual a f_x .

II-E. Funcionamiento libre

Si la señal de entrada se desconecta, el VCO oscila en modo de funcionamiento libre a una frecuencia que determinan las componentes del circuito.

II-F. Captura y enganche

Si la PLL está en funcionamiento libre, esta se puede enganchar a la frecuencia de entrada cuando la frecuencia de entrada cae dentro del intervalo de captura B_C , una banda de frecuencias centrada alrededor de la frecuencia de funcionamiento libre; dado por.

$$B_C = f_2 - f_1 \quad (2)$$

Donde f_1 y f_2 son las frecuencias entre las que el PLL se puede enganchar. Este intervalo siempre es menor o igual al intervalo de enganche y está relacionado con la frecuencia de corte del filtro pasa-bajo. Mientras la frecuencia de corte es más baja, el intervalo de captura es más pequeño.

II-G. Salida de FM

La Fig. 7 muestra un simple modulador de FM, compuesto por un oscilador LC con un capacitor de sintonización variable. Al variar la capacitancia, la frecuencia de oscilación cambia.

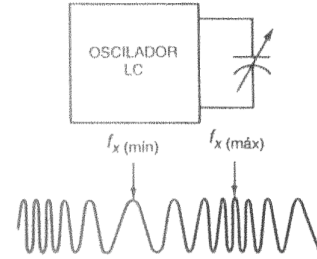


Figura 7: Diagrama en bloque modulador de FM.

Cuando una señal de FM es la entrada de una PLL, el VCO seguirá la frecuencia de entrada a medida que este cambie. Como resultado, se tiene un voltaje variable a la salida del filtro. Este voltaje tiene la misma frecuencia que la señal moduladora. En resumen la salida de CD representa una salida de FM demodulada.

III. Desarrollo

Para el desarrollo de las actividades propuestas implementamos el circuito en el simulador:

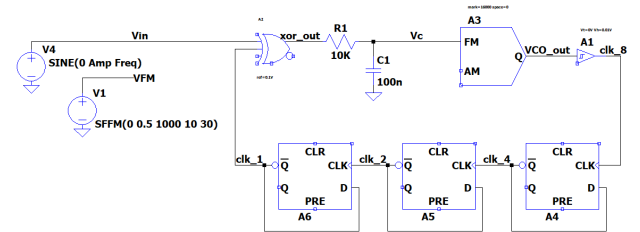


Figura 8: Circuito PLL

Se desconecta la señal de entrada V_{in} con el fin de medir la frecuencia de operación libre del PLL. Para esto se hace uso de la herramienta FFT y se encuentra la frecuencia correspondiente al nodo clk_1 . Dando como resultado que

la frecuencia de operación libre es de aproximadamente $980Hz$ para $R1 = 10K$ y $C1 = 100n$. El resultado mencionado se observa en la figura 9:

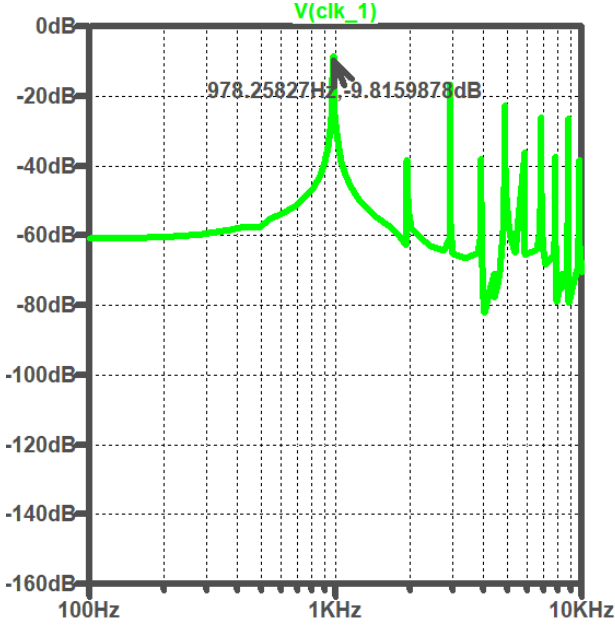


Figura 9: FFT de la señal salida de VCO, evidenciando la frecuencia de operación libre

El siguiente paso es realizar un barrido de valores para la resistencia $R1$ y ver la variabilidad de la frecuencia libre del PLL. Nuevamente hacemos uso de la FFT y vemos el resultado obtenido en la figura 10:

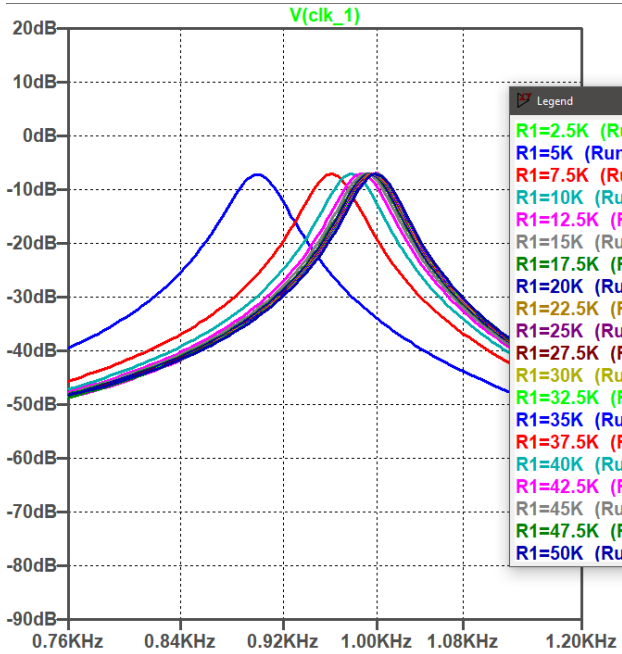


Figura 10: Frecuencia de operación libre para 20 distintos valores de $R1$

Se observa que para un rango de valores de $R1$ que parte de $2,5K$ hasta $50K$ con paso de $2,5K$ se obtienen

$C(nF)$	100				
$R(k\Omega)$	2.5	5	10	25	50
$\tau(ms)$	0.25	0.5	1	2.5	5

Cuadro I: Valores de τ .

frecuencias de operación libre muy cercanas a $1KHz$ y la tendencia es creciente. Con estos valores se calcula el τ del filtro pasa bajos formado por $R1$ y $C1$, registrado en la Tabla I. Se deduce que aumentar la resistencia dejando fijo el valor de $C1$ genera un aumento en la frecuencia libre pero también en el tiempo que requiere el sistema para engancharse (τ).

Con el fin de obtener a la salida del VCO, denotado con $A3$ en la figura 8, una frecuencia de $8KHz$ y por lo tanto en el nodo clk_1 una frecuencia de $1KHz$ (ya que los tres flip flop generan un divisor por 8) se inspecciona la figura 10. Vemos que para una resistencia de $50K$ la frecuencia libre es igual a $1KHz$ que es lo requerido, por lo tanto a partir de ahora el valor de $R1 = 50K$.

Calculada la frecuencia libre del sistema y viendo como esta varía con $R1$ lo siguiente es analizar el funcionamiento del PLL, para esto conectamos la fuente V_{in} a la XOR y variamos su frecuencia en un rango alrededor de $1KHz$ (frecuencia libre) con el fin de encontrar de forma empírica el rango de frecuencias para el cual el PLL se engancha. Es decir, el rango de frecuencia que el circuito puede seguir a la señal de entrada. Los resultados obtenidos siguiendo estos pasos son:

- Frecuencia inferior de enganche $F_{Einf} = 790Hz$

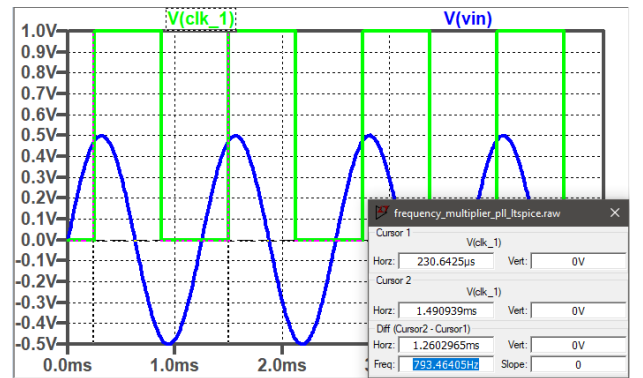


Figura 11: Verde: Señal de entrada de $790Hz$. Azul: Señal de enganche del PLL de $793Hz$ (nodo clk_1)

- Frecuencia media de enganche $F_{Emed} = 1KHz$

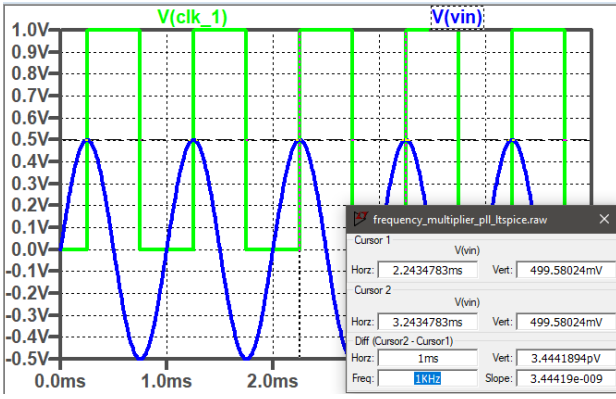


Figura 12: Verde:Señal de entrada de 1KHz . Azul:Señal de enganche del PLL de 1KHz (nodo clk_1)

- Frecuencia superior de enganche $F_{Esup} = 1,2\text{KHz}$

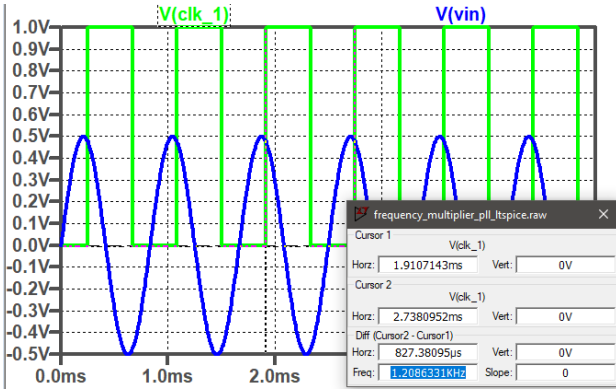


Figura 13: Verde:Señal de entrada de $1,2\text{KHz}$. Azul:Señal de enganche del PLL de $1,2\text{KHz}$ (nodo clk_1)

Como vemos en las figuras 11, 12 y 13 para un rango de frecuencias $[790\text{Hz}, 1,2\text{KHz}]$ la señal de salida del VCO sigue de manera precisa a la señal de entrada (replicando su frecuencia). Por otro lado, en las figuras 14 y 15 vemos que para frecuencias de señal de entrada de 500Hz y $1,5\text{KHz}$, respectivamente, el PLL es incapaz de engancharse.

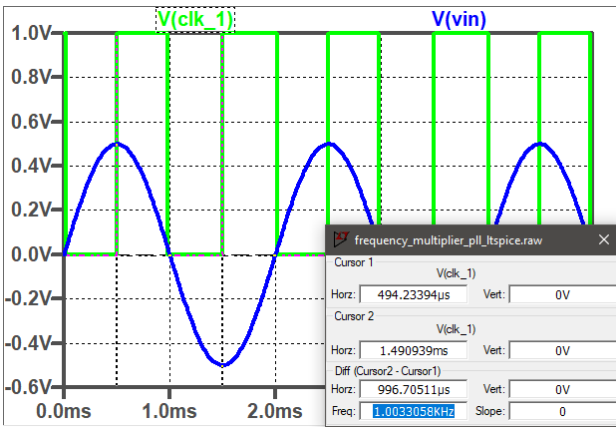


Figura 14: Verde:Señal de entrada de 500Hz . Azul:Señal de enganche del PLL de 1KHz (nodo clk_1)

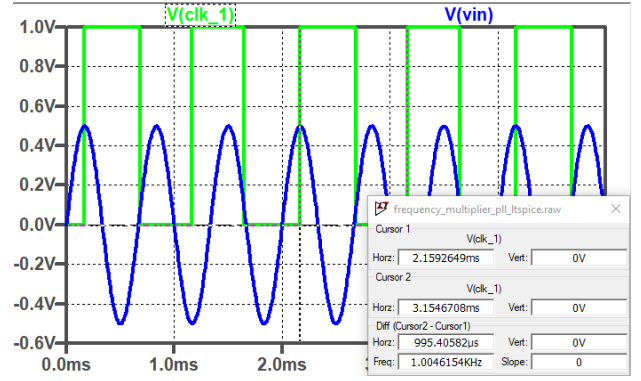


Figura 15: Verde:Señal de entrada de $1,5\text{KHz}$. Azul:Señal de enganche del PLL de 1KHz (nodo clk_1)

Al haber analizado el rango de frecuencias de enganche del PLL para los valores $R1 = 50\text{K}$ y $C1 = 100\text{nF}$ surge la posibilidad de variar el valor del capacitor y ver como éste influye en el rango de frecuencias de enganche. Para realizar esto se eligieron de forma arbitraria 3 valores de capacitores y se repitió el procedimiento anterior para encontrar el rango de frecuencias que el PLL sigue de forma correcta. Dando como resultado:

- $C1 = 1\text{nF} \rightarrow$ Rango de frecuencias de enganche igual a $[50\text{Hz}, 1850\text{Hz}]$
- $C1 = 10\text{nF} \rightarrow$ Rango de frecuencias de enganche igual a $[500\text{Hz}, 1500\text{Hz}]$
- $C1 = 1000\text{nF} \rightarrow$ Rango de frecuencias de enganche igual a $[990\text{Hz}, 1005\text{Hz}]$

Vemos que el rango de frecuencia tiene una relación directa con el valor del capacitor. Al aumentar la capacitancia el rango de enganche se acota demasiado, y en cambio al disminuirla el rango de frecuencias de enganche aumenta. Siempre manteniendo fijo el valor de la resistencia en 50K . Este resultado y el obtenido anteriormente al variar el valor de $R1$ nos indica lo sensible que es el circuito a cambios en los parámetros del filtro pasa bajo. Por lo tanto, para realizar un control óptimo del PLL es fundamental analizar el valor de τ y ajustarlo según el requerimiento, teniendo en cuenta como el valor τ modifica el tiempo que tarda el circuito en engancharse.

Por último, cambiamos la señal de entrada a nuestro circuito por una señal FM de portadora 1KHz , con $\Delta f = 300\text{Hz}$ y probando con 3 valores de señal moduladora: $F_m = 10\text{Hz}$, $F_m = 30\text{Hz}$ y $F_m = 50\text{Hz}$. Al medir la señal en el nodo V_c deberíamos obtener una frecuencia que coincida con la frecuencia de la moduladora, es decir recuperamos la moduladora de la señal FM. Los resultados obtenidos son:

- $F_m = 10\text{Hz}$

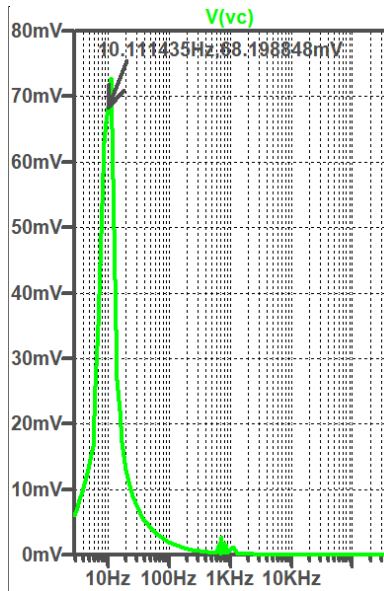


Figura 16: FFT de la señal en el nodo V_c evidenciando la correcta demodulación para una FM con moduladora de $10Hz$

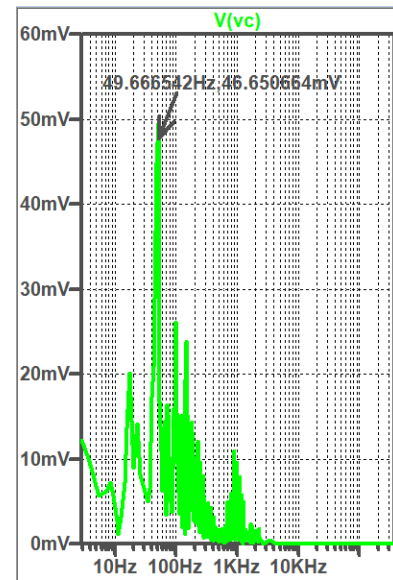


Figura 18: FFT de la señal en el nodo V_c evidenciando la correcta demodulación para una FM con moduladora de $50Hz$

Utilizando nuevamente la herramienta de la FFT que brinda el simulador, se observa que el PLL es capaz de demodular de manera correcta la señal FM para esos valores de frecuencia moduladora.

- $F_m = 30Hz$

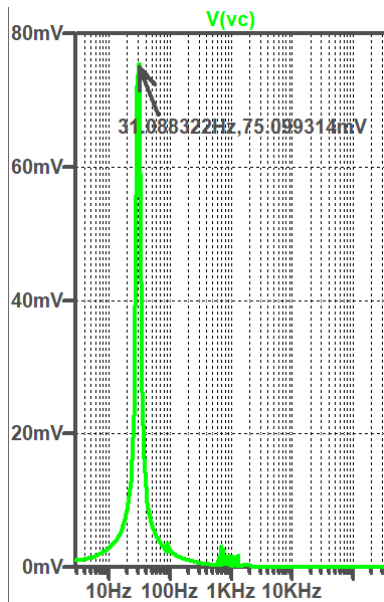


Figura 17: FFT de la señal en el nodo V_c evidenciando la correcta demodulación para una FM con moduladora de $30Hz$

- $F_m = 50Hz$