

Laboratorio N°1 - Estabilidad

Lucas Starita, Ian Pedro Larrieu Lacoste, Augusto Loyza

Universidad Nacional de Mar del Plata

staritalucasmdb@gmail.com, augustoloyza03@gmail.com, ianlarrieu@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analiza experimentalmente el comportamiento de un circuito amplificador previamente diseñado, montado sobre una protoboard. El objetivo es evaluar su respuesta frente a señales sinusoidales y cuadradas, determinando características como ganancia, respuesta en frecuencia, respuesta al escalón y posibles distorsiones o inestabilidades. Los resultados obtenidos se comparan con los valores teóricos y simulados, y posteriormente, se implementan ajustes orientados a mejorar su estabilidad, evaluando los resultados antes y después de la intervención.

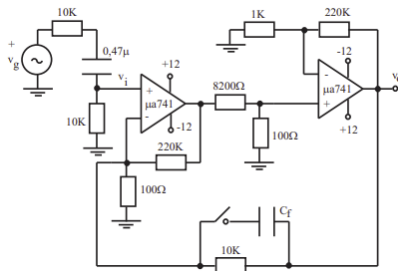


Figura 1: Esquemático del circuito.

II. DESARROLLO

Para calcular la ganancia del circuito en configuración serie/paralelo, es necesario determinar el parámetro g_{12} , el cual es equivalente al cálculo del parámetro f , ya que $T \gg 1$. Este valor depende de la red de retroalimentación utilizada, que se muestra en la Figura 2.

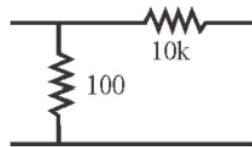


Figura 2: red de retroalimentación del circuito.

$$g_{12} = \frac{v_1}{v_2} \Big|_{i_1=0} = \frac{100}{10\,000+100} = \frac{100}{10\,100} \approx 0,0099$$

En este caso se sabe de antemano que T será muy grande por lo que:

$$A \approx \frac{1}{f} = 101 \text{ veces}$$

Si graficamos la transferencia con el f calculado anteriormente y con el A_0 de la hoja de datos de los AO obtenemos el diagrama de Bode de la figura 3.

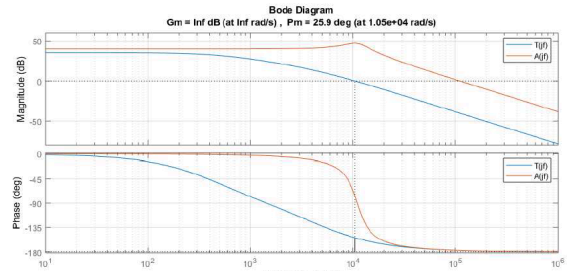


Figura 3: Diagrama de Bode de fase y amplitud teórico.

En este se observa que el cruce por 0 dB de $T(jw)$ se da en el mismo punto que el sobrepico de $A(jw)$, ese punto es donde deberá encontrarse el cero que se añadirá por adelante de fase.

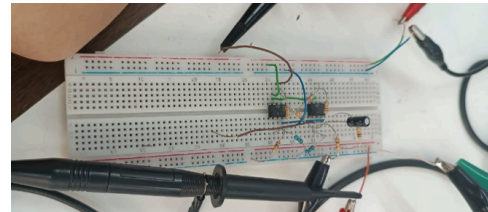


Figura 4: Fotografía del banco de pruebas.

Para el circuito experimental, se monta el circuito amplificador en una protoboard, siguiendo el esquema de la Figura 1. Se verifica su funcionamiento aplicando una señal senoidal de 200 mV pico a pico, con una frecuencia de 1 KHz desde un generador de funciones, midiendo la salida con un osciloscopio. Se obtiene una señal de salida de aproximadamente 10 Vpp, lo que indica una ganancia de 50 veces. Aunque teóricamente se espera una ganancia de 100, la diferencia se debe al divisor resistivo en la salida del generador, que reduce a la mitad el voltaje real aplicado al pin no inversor del amplificador operacional. Este resultado confirma que el circuito amplificador opera correctamente y que la señal se amplifica conforme a lo esperado.

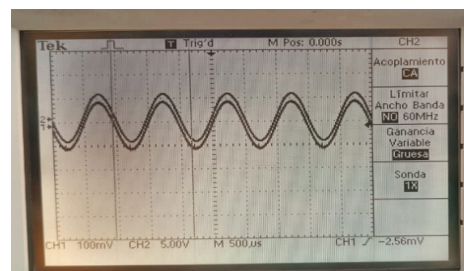


Figura 5: resultados de la primera medición.

Luego se varía la frecuencia de la señal de entrada utilizando el generador de funciones, registrando la amplitud de la señal de salida para cada caso. De esta manera, se obtiene una tabla de valores que permite analizar la respuesta en frecuencia del circuito amplificador.

f	Vi	V0	V0/Vi	V0/Vi (dB)
1 KHz	0.1 V	5 V	50	34
8 KHz	0.1 V	21.6 V	216	46.7
10 KHz	0.1 V	16.4 V	164	44.3
20 KHz	0.1 V	3.8 V	38	31.6
50 KHz	0.1 V	1 V	10	20
103 KHz	0.1 V	0.1 V	1	0
1.03 MHz	0.1 V	1 mV	0.01	-40

Tabla 1: valores de entrada y salida a diferentes frecuencias del circuito sin estabilizar.

Entre las mediciones realizadas, se identifica la aparición de un sobrepico en la señal de salida a una frecuencia cercana a 8 kHz. Para estabilizar el circuito, se implementa la técnica de adelanto de fase, que introduce un cero en la función de transferencia cerca de dicha frecuencia, mejorando la respuesta oscilatoria. Para ello, se incorpora un capacitor en el lazo de realimentación en paralelo a la resistencia. El valor de dicho capacitor se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{1}{2\pi R C} = f_{cero} = 8 \text{ kHz}$$

Donde R es la resistencia de 10k de la retroalimentación. Despejando esta ecuación se obtiene que el capacitor debe tener un valor de 2nF.

Una vez modificado el circuito, se repiten las mediciones para analizar el nuevo comportamiento del sistema y comparar la respuesta antes y después de la estabilización, evaluando la efectividad del ajuste aplicado.

f	Vi	V0	V0/Vi	V0/Vi (dB)
1 kHz	0.1 V	5 V	50	34
7.2 kHz	0.1 V	7.84 V	78.4	37.9
8 kHz	0.1 V	7.44 V	74.4	37.4
10 kHz	0.1 V	6.4 V	64	36.1
15 kHz	0.1 V	3.76 V	37.6	31.5
50 kHz	0.1 V	0.408 V	4.08	12.2
103 kHz	0.1 V	0.1 V	1	0
1.03 MHz	0.1 V	1 mV	0.01	-40

Tabla 2: valores de entrada y salida a diferentes frecuencias del circuito estabilizado.

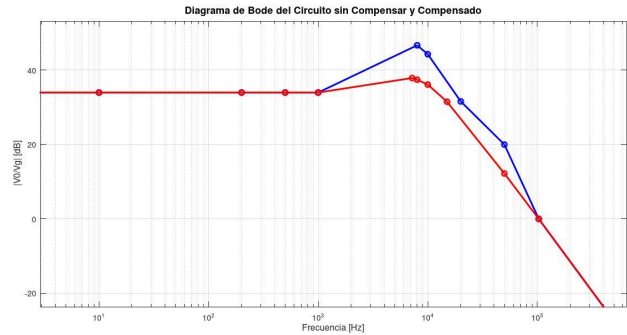


Figura 7: Diagrama de Bode con los datos de la tabla 1 (azul) y tabla 2 (rojo).

Luego de registrar las mediciones con el circuito estabilizado, se retira el capacitor de realimentación para restablecer el estado original del amplificador. En esta condición, se aplica una señal cuadrada de 1 KHz con el objetivo de analizar la respuesta transitoria del sistema sin estabilización, emulando su comportamiento como respuesta al escalón.

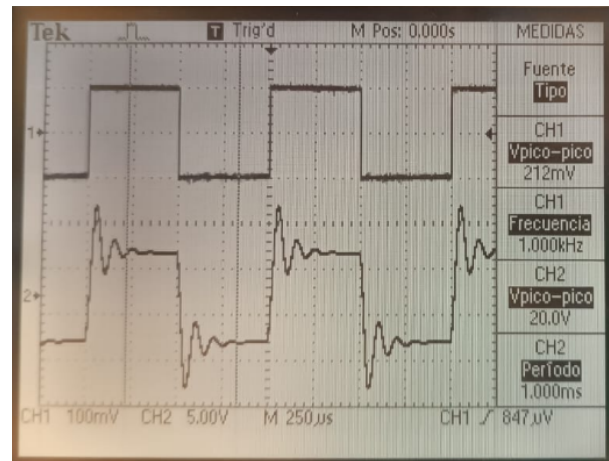


Figura 8: respuesta a una señal cuadrada del circuito sin estabilizar.

La imagen obtenida en el osciloscopio muestra una respuesta oscilatoria ante la entrada del escalón, lo que indica una falta de amortiguamiento en el sistema. Este comportamiento es típico de un circuito con baja estabilidad y confirma la necesidad de aplicar técnicas de compensación, como el adelanto de fase.

Posteriormente, se reinstala el capacitor de estabilización en el lazo de realimentación y se repite la medición bajo las mismas condiciones. La nueva respuesta presenta una reducción significativa de las oscilaciones, lo que evidencia una mejora en la estabilidad del circuito gracias a la compensación implementada.

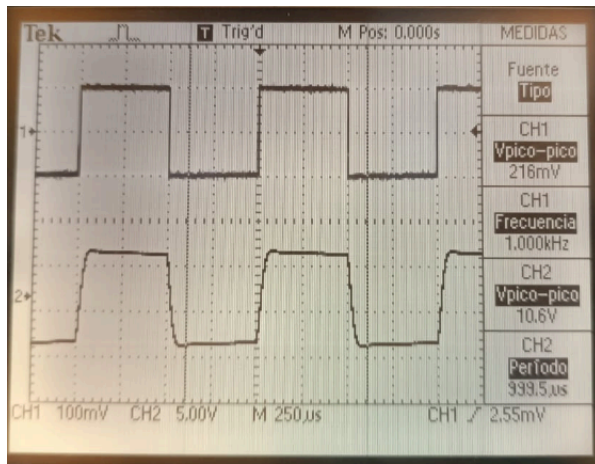


Figura 9: respuesta a una señal cuadrada del circuito estabilizado.

Para analizar cuantitativamente la respuesta al escalón sin estabilización, se miden ciertos parámetros de la misma, indicados en la figura 10.

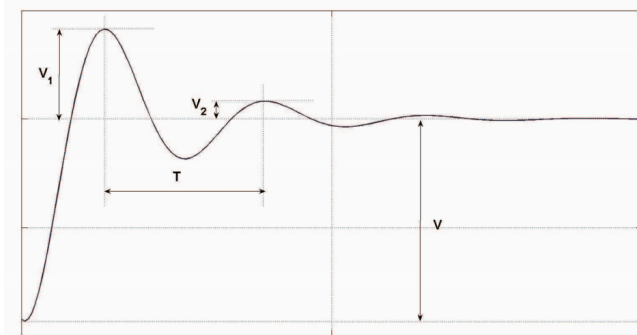


Figura 10: Boceto de los puntos claves a medir.

Se miden las características del sobrepico utilizando los cursores del osciloscopio. Los valores obtenidos son:

$$V1=264 \text{ mV} \quad V2=80 \text{ mV} \quad V=488 \text{ mV} \quad T=100 \text{ µs}$$

A partir de estos datos, se calculan los parámetros α y β , la ubicación de los polos y el sobreimpulso porcentual:

$$\text{SI}\% = 54,1\% \\ \alpha = 1900 \text{ Hz} \quad \beta = 10 \text{ kHz} \Rightarrow P_{1,2} = (-1900 \pm 10k)[\text{Hz}]$$

Para complementar el análisis, se implementa el circuito en el software LTspice para evaluar el efecto de diferentes valores de capacidades en la compensación. Se utilizan valores de 1 nF (rojo), 2 nF (azul), 4 nF (celeste) y sin compensar (verde).

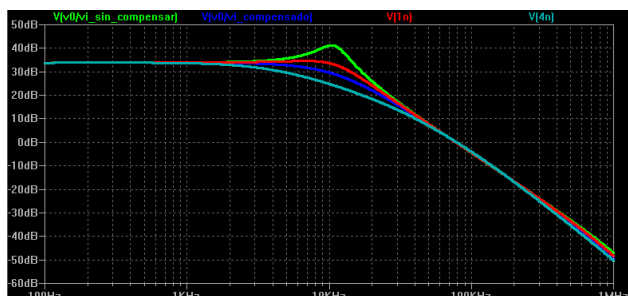


Figura 11: Diagrama de Bode realizado en LTspice.

Se mide las frecuencias de sobrepico y de cruce por cero del circuito sin compensar en el diagrama de Bode generado en LTspice utilizando cursores, resultado:

$$f_{\text{sobrepico}} = 10,35 \text{ KHz} \quad f_{0\text{dB}} = 77,51 \text{ KHz}$$

Adicionalmente, se observa una mejora en el sobrepico en el diagrama de Bode al compensar el sistema con el capacitor de 2 nF.

Finalmente, se simula la respuesta al escalón del sistema tanto compensado como sin compensar, para evaluar y comparar las mejoras en la estabilidad y el comportamiento del circuito.

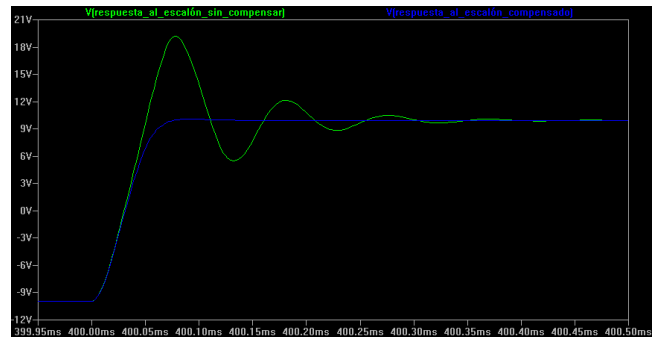


Figura 12: Respuesta al escalón en LTspice.

III. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se construyó un circuito amplificador utilizando dos amplificadores operacionales LM741, sobre el cual se realizaron distintas mediciones para analizar su respuesta en frecuencia y su comportamiento ante señales sinusoidales y cuadradas. Inicialmente se observó una ganancia menor a la teórica, atribuida a la presencia de un divisor resistivo en la entrada. Posteriormente, se detectó la aparición de un sobrepico en la respuesta del sistema alrededor de los 8 kHz, lo cual motivó la necesidad de estabilizar el circuito.

Se implementó la técnica de adelanto de fase mediante la incorporación de un capacitor en el lazo de realimentación. Las mediciones posteriores mostraron una disminución de las oscilaciones en la respuesta al escalón, indicando una mejora en la estabilidad.

Sin embargo, aun con la compensación aplicada, se mantuvo un pequeño sobrepico en la salida. Este fenómeno sugiere que el sistema se encuentra subcompensado, lo cual puede estar relacionado con la dispersión de los valores de los componentes utilizados, especialmente en un montaje sobre protoboard, donde las tolerancias y las características parasitarias pueden afectar significativamente el comportamiento esperado.

En resumen, se logró mejorar la estabilidad del circuito mediante una compensación parcial, observándose una respuesta más controlada pero aún mejorable. El trabajo permite visualizar de forma clara la relación entre el diseño de la realimentación y la respuesta temporal de un sistema amplificador real.