



unc



FCEFN

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Cátedra de Síntesis de Redes Activas

Trabajo Práctico N° 4: Compensación

Nombre	DNI
Bayón, Pablo	39.402.464
Godoy, Emiliano	41.524.015
Luna, Fenando Valentino	43.612.136
Testa, Lisandro Daniel	43.477.017

Docentes Prof. Ferreyra, Pablo Alejandro
 Prof. Reale, César

Córdoba, República Argentina
30 de noviembre de 2025

(Página intencionalmente blanca)

Índice

1. Introducción	5
2. Objetivos	6
3. Consignas de Laboratorio	7
3.1. Circuito 1: Amplificadores Operacionales en Cascada	7
3.2. Circuito 2: Fuente de Tensión de Corriente Continua	8
4. Desarrollo	9
4.1. Circuito 1: Amplificadores Operacionales en Cascada	9
4.1.1. VFA-VFA	10
4.1.2. CFA-VFA	10
4.1.3. CFA-VFA: II	10
4.2. Circuito 2: Fuente de Tensión de Corriente Continua	11
5. Conclusiones	12

Índice de figuras

1.	Circuito 1: Amplificadores Operacionales en Cascada	7
2.	Circuito 2: Fuente de Tensión de Corriente Continua y formas de onda esperadas	8

Índice de tablas

1. Introducción

El presente trabajo se centra en el diseño, análisis y caracterización de amplificadores compuestos utilizando tecnologías VFA (Voltage Feedback Amplifier) y CFA (Current Feedback Amplifier). Este ejercicio aborda el comportamiento dinámico de sistemas amplificadores, con especial énfasis en la compensación de polos y la optimización de la respuesta en frecuencia.

El estudio incluye configuraciones VFA-VFA y VFA-CFA, evaluando su desempeño frente a criterios como planicidad de módulo, margen de fase y ancho de banda. Se busca comprender cómo la ubicación de polos y ceros afecta la estabilidad y la fidelidad del sistema, y cómo puede mejorarse mediante técnicas de compensación activa.

La metodología combina análisis teórico, simulación en PSPICE, implementación práctica en laboratorio y comparación de resultados, permitiendo validar el diseño y extraer conclusiones sobre su aplicabilidad en sistemas electrónicos de precisión.

2. Objetivos

- Diseñar amplificadores compuestos VFA-VFA y VFA-CFA.
- Aplicar conceptos de compensación para lograr máxima planicidad de módulo y estabilidad.
- Calcular y medir el ancho de banda potencial, la frecuencia de polos y el margen de fase.
- Simular el comportamiento dinámico de los amplificadores en PSPICE.
- Implementar los circuitos en laboratorio y validar su desempeño frente a perturbaciones.
- Comparar resultados teóricos, simulados y experimentales, analizando las causas de las diferencias.

3. Consignas de Laboratorio

A continuación se presentan los circuitos a analizar en este laboratorio. Se trata de dos circuitos una de Amplificadores Operacionales en dos etapas, y otra de diseño de una Fuente de Tensión de Corriente Continua.

Dentro del desarrollo de los circuitos se harán:

- Realizar una breve introducción teórica.
- Análisis del circuito.
- Realizar el desarrollo numérico y analítico.
- Realizar las simulaciones en LTspice.
- Realizar el armado y mediciones de laboratorio.
- Comparar los resultados obtenidos calculados, simulados y medidos.

3.1. Circuito 1: Amplificadores Operacionales en Cascada

Se presenta a continuación el circuito a analizar. Se puede observar en la Fig. 1 muestra el esquema del circuito compuesto por dos Amplificadores Operacionales (AO) en cascada que deberá ser diseñado y analizado para obtener una **ganancia global** de $A_v f = 20dB$, compensándolo para que opere en **Máxima Planicidad de Módulo** ($M_\varphi = 65$ y $Q_p = 0,707$).

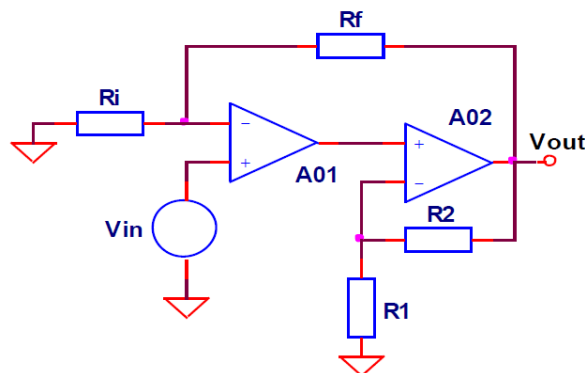


Figura 1: Circuito 1: Amplificadores Operacionales en Cascada

a: VFA-VFA

Utilizando tecnologías VFA-VFA. Como amplificador VFA se utilizará un LM324, de 2(dos) polos ($A_{d0} = 100dB$, $f_T = 1MHz$, $f_1 = 10Hz$ y $f_2 = 5,06MHz$).

- a.1 Diseñar el amplificador compuesto VFA-VFA.
- a.2 Calcular el **ancho de banda**, la frecuencia del polo de la función de transferencia a lazo cerrado y el **ancho de banda** a $-3dB$.
- a.3 Medir el ancho de banda a $-3dB$.
- a.4 Estimar el **margen de fase** obtenido en base a la respuesta al escalón del amplificador compuesto.

b: VFA-CFA

Utilizando tecnologías VFA-CFA. Se sugiere como amplificador VFA un LM324, de 2(dos) polos ($A_{d0} = 100dB$, $f_T = 1MHz$, $f_1 = 10Hz$ y $f_2 = 5,06MHz$) y como CFA un LM6181 con $R_T = 2,37M\Omega$, $C_T = 4,8pF$, cuya transimpedancia Z_T presenta también 2(dos) polos ($f_1 = 14kHz$, $f_2 = 82,3MHz$).

- b.1 Diseñar el amplificador compuesto VFA-CFA para **máxima planicidad de módulo** y que además cumpla con un **ancho de banda potencial** aproximado de $f_g = 2MHz$. Tener en cuenta la presencia del segundo polo del VFA.

- b.2 Calcular el **ancho de banda potencial**, la frecuencia del polo de la función de transferencia a lazo cerrado y **ancho de banda** a $-3dB$.
- b.3 Medir el ancho de banda a $-3dB$.
- b.4 Estimar el **margen de fase** obtenido en base a la respuesta al escalón del amplificador compuesto.

c: VFA-CFA

Insertar en la configuración anterior una red de compensación **cero-polo** (a la salida del VFA) de tal modo que el cero de la red cancele el segundo polo del VFA. Ubicar el polo de la red a una octava de su cero. Retocar la ganancia del CFA realimentado para compensar la atenuación introducida por la red. Constatar la **mejora del margen de fase** a través de la respuesta al escalón.

- c.1 Calcular y medir el **margen de fase**, el **ancho de banda potencial**, la frecuencia del polo de la función de transferencia a lazo cerrado y ancho de banda a $-3dB$.
- c.2 Calcular el **ancho de banda potencial**, la frecuencia del polo de la función de transferencia a lazo cerrado y ancho de banda a $-3dB$.
- c.3 Medir el ancho de banda a $-3dB$.
- c.4 Estimar el **margen de fase** obtenido en base a la respuesta al escalón del amplificador compuesto.

3.2. Circuito 2: Fuente de Tensión de Corriente Continua

Se pide diseñar una Fuente de Tensión de Corriente Continua con los siguientes elementos:

- Capacitores y Resistores.
- Fuente de Tensión CC de 12V.
- Amplificadores Operacionales LM324.
- Referencia de Tensión 2,5V (*TL431* o *LT1004* – 2,5).
- Transistor BJT (2N3019).

Los criterios de diseño son los siguientes:

- Fuente 5V/500mA.
- Tolerancia de Tensión regulada: 0,1V.
- La variación (ripple) máxima admitida de 1 %

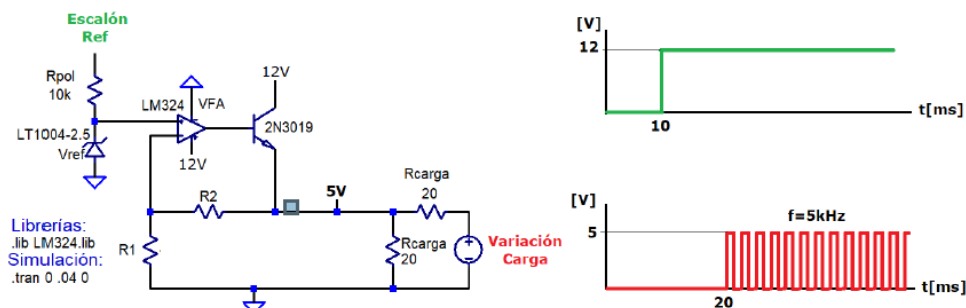


Figura 2: Circuito 2: Fuente de Tensión de Corriente Continua y formas de onda esperadas

A su vez, se pide agregar los componentes necesarios para alcanzar las especificaciones y simular el transitorio de los primeros 50ms, medir valor medio y ripple de estado estable.

4. Desarrollo

4.1. Circuito 1: Amplificadores Operacionales en Cascada

Los amplificadores operacionales en cascada constituyen una técnica ampliamente utilizada cuando se requiere obtener elevadas ganancias de tensión, mejorar el acondicionamiento de señales o adaptar niveles entre distintas etapas de un sistema electrónico. Esta configuración consiste en conectar la salida de un amplificador operacional a la entrada del siguiente, de modo que la ganancia total resulta del producto de las ganancias individuales de cada etapa. Este enfoque permite distribuir la amplificación, evitando problemas asociados a ganancias excesivas en una única etapa, como la saturación, el aumento del ruido y la reducción del ancho de banda.

Desde el punto de vista del comportamiento dinámico, los amplificadores operacionales pueden clasificarse, según su arquitectura interna, en amplificadores de realimentación por tensión (VFA, Voltage Feedback Amplifier) y amplificadores de realimentación por corriente (CFA, Current Feedback Amplifier). En los VFA, la señal de error se genera a partir de una diferencia de tensión entre sus entradas, mientras que en los CFA la variable controlada es una corriente de realimentación. Esta diferencia estructural se traduce en comportamientos distintos en términos de ancho de banda, estabilidad y respuesta en frecuencia, siendo los CFA especialmente adecuados para aplicaciones de alta velocidad.

Un parámetro fundamental en el análisis de estabilidad de amplificadores en cascada es el margen de fase, el cual indica cuán alejado se encuentra el sistema de la condición de inestabilidad. Junto con éste, resulta relevante la planicidad del módulo de la respuesta en frecuencia, ya que una ganancia aproximadamente constante dentro de la banda útil garantiza una amplificación sin distorsión de amplitud. En configuraciones con múltiples etapas, estos parámetros se ven afectados por la superposición de polos de cada amplificador, lo que puede provocar inestabilidad o respuestas transitorias indeseadas.

Para asegurar un funcionamiento estable, es habitual emplear técnicas de compensación activa de polos, cuyo objetivo es modificar la ubicación de los polos dominantes del sistema para incrementar el margen de fase. Esta compensación puede realizarse de diversas formas, como el uso de capacitores de compensación interna, redes externas de adelanto-atraso, o mediante la propia arquitectura del amplificador. En este contexto, resulta importante distinguir entre los métodos de compensación utilizados en VFA y CFA, ya que los criterios de estabilidad y los mecanismos de realimentación difieren sustancialmente entre ambas tecnologías.

El circuito presentado en la Fig. 1 corresponde a un sistema de amplificadores operacionales en cascada, compuesto por dos etapas de amplificación conectadas de forma secuencial. La primera etapa (AO1) se encuentra configurada como un amplificador inversor, mientras que la segunda etapa (AO2) opera en configuración no inversora. Esta disposición permite combinar las ventajas de ambas configuraciones, obteniendo una ganancia total elevada con adecuada estabilidad y versatilidad en el acondicionamiento de la señal, facilitando su diseño para lograr una Ganancia Global de $20dB$.

La ganancia de la primera etapa depende de la relación entre las resistencias R_f y R_i , dada por:

$$A_{v1} = -\frac{R_f}{R_i}$$

Por su parte, la segunda etapa presenta una ganancia determinada por el divisor resistivo formado por R_1 y R_2 :

$$A_{v2} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

En consecuencia, la ganancia total del sistema en cascada resulta:

$$A_{vT} = A_{v1} \cdot A_{v2}$$

Desde el punto de vista funcional, esta arquitectura permite obtener altas ganancias sin exigir valores extremos de resistencias en una sola etapa, lo cual contribuye a reducir el ruido, mejorar la estabilidad térmica y disminuir los efectos de las no idealidades del amplificador operacional. Además, la segunda etapa no inversora actúa como adaptador de impedancias, presentando una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, lo que favorece el acoplamiento con etapas posteriores.

En cuanto a las características generales del sistema, se destacan:

- Alta ganancia total con realimentaciones moderadas.
- Mejor control de estabilidad frente a configuraciones de alta ganancia en una sola etapa.

- Mayor ancho de banda efectivo respecto a un único amplificador con igual ganancia total.
- Reducción relativa del impacto de los errores por offset, corrientes de polarización y ganancia finita.

Cuando ambas etapas del sistema son amplificadores de realimentación por tensión (VFA-VFA), la ganancia de cada etapa queda directamente determinada por relaciones de resistencias, y el ancho de banda del sistema resulta limitado por el producto ganancia-ancho de banda (GBW) de cada operacional. En esta configuración, el comportamiento es altamente predecible, con buena precisión en continua, alta linealidad y elevada estabilidad, siendo la opción más utilizada en aplicaciones de instrumentación y acondicionamiento de señales de baja y media frecuencia.

Sin embargo, al encadenar dos VFA, el ancho de banda total se reduce progresivamente, ya que la respuesta en frecuencia del sistema resulta de la superposición de los polos dominantes de ambas etapas. Esto puede afectar la velocidad de respuesta y el margen de fase, especialmente cuando se trabaja con ganancias elevadas.

En cambio, en una configuración mixta VFA-CFA, donde la primera etapa es un VFA y la segunda un amplificador de realimentación por corriente (CFA), se obtiene una mejora significativa en la respuesta en frecuencia del sistema. Los CFA presentan un ancho de banda prácticamente independiente de la ganancia, lo que permite conservar altas velocidades de operación aun cuando la ganancia total es elevada. Esto reduce las limitaciones impuestas por el GBW típico de los VFA y mejora el comportamiento dinámico del circuito.

No obstante, los CFA suelen presentar menor precisión en continua, mayor sensibilidad a la disposición de la realimentación y, en general, una RRMC inferior al de los VFA, lo que los hace menos apropiados para aplicaciones de instrumentación de alta exactitud. Por esta razón, la elección entre una configuración VFA-VFA o VFA-CFA depende del compromiso requerido entre precisión estática y velocidad dinámica.

En aplicaciones donde se prioriza la exactitud, estabilidad y bajo error en continua, la configuración VFA-VFA resulta más adecuada. En cambio, cuando se busca una alta velocidad de respuesta y un mayor ancho de banda, la configuración VFA-CFA se presenta como una alternativa más conveniente.

4.1.1. VFA-VFA

Análisis del Circuito en Cascada

Análisis Teórico

Diseño

Simulaciones

Mediciones de Laboratorio

Resultados

4.1.2. CFA-VFA

Análisis Teórico

Diseño

Simulaciones

Mediciones de Laboratorio

Resultados

4.1.3. CFA-VFA: II

Análisis Teórico

Diseño

Simulaciones

Mediciones de Laboratorio

Resultados

4.2. Circuito 2: Fuente de Tensión de Corriente Continua

Análisis Teórico

Diseño

Simulaciones

Mediciones de Laboratorio

Resultados

5. Conclusiones