

Trabajo de Laboratorio 5: Caracterización de Circuitos con OPAs I
 Seguidor de tensión, Amplificadores con ganancia / atenuación

Unidades temáticas relacionadas

UT II: MEDICIÓN DE VALORES CONSTANTES EN EL TIEMPO
 UT III: MEDICIÓN DE SEÑALES VARIABLES EN EL TIEMPO
 UT IV: CIRCUITOS DE "CORRIENTE ALTERNA"
 UT V: AMPLIFICADORES DE ESTADO SÓLIDO
 UT VI: FUENTES DE ALIMENTACIÓN
 UT VII: CIRCUITOS BASADOS EN OPAs

Introducción y repaso:

Los amplificadores operacionales (*OpAmp*) son *elementos de circuito activos* que se comportan como *amplificadores diferenciales*. Tienen dos entradas, V_+ (*entrada no-inversora*) y V_- (*entrada inversora*), una salida (V_{out}), y ganancia muy elevada (*ganancia a circuito abierto*, G_{CA}). La *función de transferencia* es $V_{out} = G_{CA} \cdot (V_+ - V_-)$. En un OpAmp se considera $G_{CA} \rightarrow \infty$, y en consecuencia se tiene $V_+ = V_-$ para cualquier valor finito de V_{out} . La impedancia de entrada Z_{in} de un OpAmp se considera ∞ , mientras que la impedancia de salida Z_{out} se considera nula. De igual forma, el ancho de banda (WB) se considera ∞ .

Actualmente, los OpAmp físicos se construyen mediante tecnología de *estado sólido*, y resulta en un dispositivo (*OPA*) encapsulado en material aislante, y sus conexiones son terminales cuyas dimensiones satisfacen la norma DIL (*dual in-line packaging*) con 8 ó 14 "patas" en dos hileras opuestas y equiespaciadas. El tamaño y espaciado de los conectores de una plaqueta Protoboard (®) se han diseñado de acuerdo con esta norma para compatibilizarla con el uso de OPAs-DIL. Sin embargo existen OPAs con encapsulado metálico, o que no satisfacen la norma DIL.

Los OPAs necesitan fuentes externas de energía para funcionar (*fente de alimentación*), que son generadores de tensión constante (DC) de baja tensión. En general los OPAs se diseñan para funcionar con una fuente de alimentación bipolar (*fente de alimentación partida*, $\pm V_{CC}$), con un punto medio que se toma como referencia de 0V para el OPA (*"tierra"*), aunque algunos modelos admiten alimentación unipolar.

NOTA: en un circuito práctico, las tierras de la fuente de alimentación, de la fuente de señal (GEN) y del sistema de exhibición (CRT) deben conectarse entre sí, constituyendo la *tierra común*.

Las propiedades físicas de un OPA toman valores *finitos*. Los fabricantes informan las propiedades reales de cada modelo de OPA que producen, en una hoja de características (*data-sheet*), y deben ser tenidas en cuenta en el diseño de amplificadores prácticos basados en OPAs.

Los circuitos prácticos basados en OPAs se obtienen mediante *retroalimentación* de la señal a la salida (V_{out}) en alguna de sus entradas (V_+ , retroalimentación *positiva*, ó V_- , retroalimentación *negativa*), lo que se consigue conectando una impedancia adecuada (con frecuencia basta una resistencia) entre los terminales correspondientes. La mayoría de los amplificadores prácticos disponen de una sola señal de entrada (ej. amplificador inversor ó no-inversor, amplificador integrador o derivador) pero algunos proveen dos entradas (ej. amplificadores de diferencias) o más de dos (ej. amplificadores sumadores). Para cualquiera de estas configuraciones, la función de transferencia se describe por la *ganancia a circuito cerrado* G , $V_{out} = F(V_{in}) = G \cdot V_{in}$. En la etapa de diseño, G se calcula aplicando teoría de circuitos al OPA conjuntamente con las impedancias de retroalimentación.

Para *caracterizar* físicamente a un amplificador práctico realizado en base a OPAs, se definen diferentes *observables* que deben ser cuantificados mediante ensayos en un banco de pruebas para medidas electrónicas. A continuación se definen las propiedades observables más importantes en amplificadores prácticos.

I) Propiedades estáticas

- Tensión de *offset*:** V_{off} , la tensión continua de salida (V_{DC}) que se obtiene cuando la/las tensión/es a la entrada es nula. Típicamente es inferior al mV, puede ser importante a ganancias elevadas.
- Tensión de saturación:** V_{sat} , la máxima tensión a la salida que puede entregar el circuito. Típicamente es el valor de la tensión de alimentación $\pm V_{CC}$. Puede expresarse también como V_{sat} equivalente en la entrada (V_{sat} / G_{DC}).
- Ganancia en continua:** $G_{DC} = V_{out} / V_{in}$, el factor de amplificación (o de atenuación) del circuito, para señales de muy baja frecuencia o nula, con valores inferiores a V_{sat} .

II) Propiedades dinámicas

- Respuesta en frecuencias:** describe el comportamiento del circuito frente a excitaciones senoidales de diferentes frecuencias. Se describe mediante los Diagramas de Bode de Amplitud y de Fase, y se caracteriza mediante los indicadores definidos anteriormente para filtros pasa-bajos y pasa-altos.
- Ancho de banda:** $WB(Hz)$, describe el comportamiento tipo filtro pasa-bajos del amplificador, corresponde al intervalo entre DC ($f=0$ Hz) y la frecuencia de corte f_c . El ancho de banda es una propiedad del OPA, es inversamente proporcional a la ganancia en continua, siendo máximo para $G_{DC} = 1$. Se acostumbra informar como producto ganancia x ancho de banda $G_{DC}(dB) \cdot WB(Hz) = \text{constante}$.
- Tiempo de respuesta (1): constante de tiempo (time-constant) $\tau(s)$,** describe el comportamiento del circuito frente a una excitación con curso temporal "escalón", suponiendo una respuesta semejante a un circuito RC-simple configurado como filtro pasa-bajos; τ es el tiempo para que la respuesta alcance el valor $[1-1/e] = 0,63212\dots$ veces el valor asintótico del estado estacionario ($\approx 63\%$ del valor máximo de la respuesta, se aplica si el curso temporal es aproximadamente exponencial).
- Tiempo de respuesta (2): tiempo de subida (rise-time) $rt(s)$,** describe el comportamiento del circuito frente a una excitación con curso temporal "escalón"; rt es el tiempo para que la respuesta transcurra desde el 10% hasta el 90% del valor asintótico del estado estacionario (no exige que el curso temporal sea exponencial).

NOTA: Las propiedades dinámicas anteriores se deben a las características físicas de la etapa de entrada del OPA (aproximadamente un filtro pasa-bajos RC-simple). Se tornan observables en el comportamiento del circuito, solamente si la tensión de salida es muy inferior a V_{sat} , de modo que el retraso originado en la tasa de cambio en la etapa de salida produzca un efecto despreciable.

- Tiempo de respuesta (3): tasa de cambio (slew-rate) $SR(V/s)$,** describe la velocidad con que la señal de salida puede "seguir" a la señal aplicada en la entrada del amplificador; se define como SR a la pendiente de la respuesta lineal en la salida, cuando se aplica una excitación con curso temporal "escalón" en la entrada del amplificador.

NOTA: El retraso por slew-rate se debe a características físicas de la etapa de salida del OPA (los transistores de salida). Se torna observable en el comportamiento del circuito, solamente si la tensión de salida es muy cercana a V_{sat} , de modo que el retraso asociado a la constante de tiempo en la etapa de entrada sea despreciable.

- f) **Ruido de alta frecuencia:** *tensión de ruido* (noise-voltage) $V_{\text{noise}}(V)$, describe las variaciones aleatorias de alta frecuencia en la tensión de salida, por encima y por debajo de la media temporal. Se define de dos maneras i) *tensión de ruido "pico a pico"*, $V_{\text{noise}}(V_{\text{pp}})$ es la diferencia estimada entre valores máximos y mínimos de la tensión de salida en estado estacionario, ii) *tensión eficaz de ruido*, $V_{\text{noise}}(V_{\text{eff}})$ es la tensión continua que disiparía por Efecto Joule, la misma potencia que la tensión de ruido, corresponde a la raíz cuadrada de la variancia de la tensión de salida en estado estacionario.

NOTA: El ruido en una señal (observado como fluctuaciones aleatorias alrededor del valor medio temporal de la misma) tiene su origen en la agitación térmica que afecta todos los componentes del sistema que produce la señal. Puede disminuirse mediante filtrado pasa-bajos de la señal, o disminuyendo la temperatura del sistema que la origina.

NOTA: El nivel de ruido en una señal es la medida de la resolución en amplitud de la misma, es decir, la mínima diferencia entre valores de amplitud de la señal que es posible distinguir, en condiciones de observación dadas.

III) Medida de las propiedades estáticas

- a) **Tensión de offset** V_{off} : con la entrada cortocircuitada a tierra ($V_{\text{in}} = 0$), se mide la tensión de continua a la salida (V_{out}); además se calcula el valor equivalente de tensión de offset en la entrada $V_{\text{off}} = V_{\text{out}} / G_{\text{DC}}$.
- b) **Tensión de saturación** V_{sat} : se inyecta en la entrada (V_{in}) una señal senoidal o triangular de frecuencia $\leq f_c/10$ (0,1 · frecuencia de corte), con offset nulo, de pequeña amplitud (tal que no se produzca saturación); se configura el CRT para observar V_{in} en el CH1 y simultáneamente la señal de salida (V_{out}) en el CH2 (es muy cómodo que ambas señales se vean superpuestas, para lo cual puede "descalibrarse" la amplificación vertical en CH1 si es necesario); se aumenta paulatinamente la amplitud de V_{in} hasta observar en V_{out} la deformación característica del fenómeno de saturación (V_{out} aparece "recortada" en amplitud, aparenta un trazado constante dentro del período mientras V_{in} sigue aumentando); calcule V_{sat} equivalente en la entrada ($V_{\text{sat}} / G_{\text{DC}}$); deben medirse los valores de V_{out} de saturación positivos y negativos, verifique si coinciden con las tensiones de alimentación $\pm V_{\text{CC}}$.
- c) **Ganancia en continua** $G_{\text{DC}} = V_{\text{out}} / V_{\text{in}}$: se inyecta en la entrada (V_{in}) una señal senoidal o triangular, de frecuencia $\leq f_c/10$ (0,1 · frecuencia de corte), con offset nulo y amplitud pequeña ($V_p \approx 0,05 V_{\text{sat}}$); se configura el CRT para observar V_{in} en el CH1 y simultáneamente la señal de salida (V_{out}) en el CH2 (la amplificación vertical de ambos canales debe estar en la posición "CAL"); se miden los valores V_{pp} en V_{in} y V_{out} ; se calcula $G_{\text{DC}} = V_{\text{out}} / V_{\text{in}}$.

IV) Medida de las propiedades dinámicas

- a) **Tiempo de respuesta (1) time-constant τ** : se inyecta en la entrada (V_{in}) una señal rectangular de frecuencia $\leq f_c/10$ (0,1 · frecuencia de corte), con offset nulo y amplitud pequeña ($V_p \approx 0,05 V_{\text{sat}}$); se configura el CRT para observar V_{in} en el CH1 y simultáneamente la señal de salida (V_{out}) en el CH2 (es muy cómodo que ambas señales se vean superpuestas, para lo cual puede "descalibrarse" la amplificación vertical en CH1 si es necesario); se mide el tiempo $t_{63\%}$ que tarda V_{out} desde el inicio del escalón hasta alcanzar el 63% del valor de estado estacionario; resulta $\tau \approx t_{63\%}$.
- b) **Tiempo de respuesta (2) rise-time t_r** : se inyecta en la entrada (V_{in}) una señal rectangular de frecuencia $\leq f_c/10$ (0,1 · frecuencia de corte), con offset nulo y amplitud pequeña ($V_p \approx 0,05 V_{\text{sat}}$); se configura el CRT para observar V_{in} en el CH1 y simultáneamente la señal de salida (V_{out}) en el CH2 (es muy cómodo que ambas señales se vean superpuestas, para lo cual puede "descalibrarse" la amplificación vertical en CH1 si es necesario); se mide el tiempo t_r para que V_{out} cambie desde el 10% hasta el 90% del valor del estado estacionario.
- c) **Tiempo de respuesta (3) slew-rate SR**: se inyecta en la entrada (V_{in}) una señal rectangular de frecuencia $\leq f_c/10$ (0,1 · frecuencia de corte), con offset nulo y amplitud grande ($V_p \approx 0,8 V_{\text{sat}}$); se configura el CRT para observar V_{in} en el CH1 y simultáneamente la señal de salida (V_{out}) en el CH2 (es muy cómodo que ambas señales se vean superpuestas, para lo cual puede "descalibrarse" la amplificación vertical en CH1 si es necesario); se mide la pendiente SR = $\Delta V / \Delta t$ de la parte lineal en V_{out} .
- d) **Respuesta en frecuencias**: se inyectan en la entrada (V_{in}), sucesivamente señales senoidales con offset nulo, amplitud pequeña ($V_p \approx 0,05 V_{\text{sat}}$) y frecuencias en el rango 0,01 f_c -100 f_c ; se construyen los Diagramas de Bode de Amplitud y de Fase; se calculan los indicadores definidos para filtros pasa-bajos.
- e) **Ancho de banda WB**: se configura sucesivamente el amplificador (si es posible) para ganancias G_{DC} con valores 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000 y 10000; para cada valor de G_{DC} se mide la constante de tiempo τ (seguir el procedimiento **a**) descrito más arriba); se calcula $f_o = 2\pi/\tau$ (se toma $f_o = \text{WB}$); se grafica $G_{\text{DC}}(\text{dB}) = 20 \cdot \log[G_{\text{DC}}]$ vs. $\log[\text{WB}(\text{Hz})]$; se calcula el producto ganancia x ancho de banda.
- f) **Ruido de alta frecuencia** V_{noise} : con la entrada cortocircuitada a tierra ($V_{\text{in}} = 0$), y el CRT sincronizado en "LINE", se observa en un canal la señal en la salida (V_{out}); se configura sucesivamente el amplificador (si es posible) para ganancias G_{DC} con valores 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000 y 10000; para cada valor de G_{DC} se mide se mide la tensión V_{pp} de ruido con la máxima ganancia posible; si V_{off} interfiere se acopla el amplificador vertical del CRT en modo AC; se calcula el valor equivalente de tensión de offset en la entrada $V_{\text{off}} = V_{\text{out}} / G_{\text{DC}}$; ¿cambia con la ganancia del amplificador?

Objetivos del TL 5:

- Aplicar la teoría de circuitos al diseño de amplificadores basados en OPAs
- Reconocer las propiedades de un OPA tal como se informan en su hoja de características ("data-sheet")
- Diseñar amplificadores de una sola etapa basados en OPAs, montarlos en Protoboard (®)
- Caracterizar experimentalmente estos amplificadores mediante pruebas de banco

Materiales utilizados:

- Generador de funciones
- Osciloscopio
- Fuente de alimentación partida (electrónica)
- Plaqueta de montaje experimental Protoboard (®), alambres aislados de colores diversos, pinza de puntas, pinza de corte (alicate)
- Componentes electrónicos: OPA (TL081), resistencias, potenciómetro lineal / preset.
- Cables de conexión

Procedimiento:

- Identifique en la hoja de datos del TL081, los valores relevantes para este Trabajo de Laboratorio, y márkelos con resaltador.
- Configure la Fuente de Alimentación para que entregue valores de $\pm V_{\text{CC}}$: +15 VDC y -15 VDC, con punto común (punto medio) a tierra.
- Arme en la Protoboard (®), sucesivamente, cada uno de los siguientes circuitos utilizando el OPA :
 - amplificador seguidor de tensión
 - amplificador no-inversor con ganancia fija ($G_{\text{DC}} \times 100$)
 - amplificador / atenuador - inversor con ganancia variable en forma continua.
 - amplificador / atenuador - inversor con ganancias fijas 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000 y 10000
- Para cada uno de ellos, ejecute los protocolos para medida de propiedades estáticas y dinámicas enunciados más arriba. Confeccione Tablas adecuadas para consignar los datos experimentales y los datos calculados.

Buena suerte!!!