



PRÁCTICA 1. AMPLIFICACIÓN: AMPLIFICADOR OPERACIONAL

A) Fundamentos básicos para la práctica

La realimentación negativa en un sistema

La estructura del amplificador diferencial transistorizado, pone de manifiesto la capacidad amplificadora típica del transistor como elemento activo y, por otra parte, constituye la etapa de entrada, aunque con una tipología de diverso tipo de los transistores del par diferencial, en un amplificador operacional integrado, por lo que, al margen de otras razones fundamentales, debe considerarse como una configuración importante de la electrónica analógica. Sin embargo, presenta varios problemas esenciales: a) La dependencia de la ganancia de parámetros característicos de los transistores (h_{ie} , β) que, como tales, resultan absolutamente incontrolables externamente; b) La linealidad de la tensión de salida, la cual queda restringida a un rango notoriamente más reducido que el establecido por los límites extremos de operación dinámica, como consecuencia directa de que un comportamiento dinámico de carácter lineal de un transistor únicamente se circunscribe al caso de pequeñas señales; c) La respuesta en frecuencia, que resulta completamente dependiente de parámetros intrínsecos de los transistores y, por tanto, sin posibilidad alguna de actuación externa. Estas limitaciones son inherentes a todo sistema de lazo abierto y se solventan, con carácter genérico, mediante la inclusión de realimentación negativa.

La realimentación negativa en una estructura posibilita, como condición necesaria aunque no suficiente, la estabilidad y, por consiguiente, la operación lineal, lo que resulta ineludible para trabajar con señales analógicas. Con carácter general, algunas de las propiedades más relevantes de los sistemas así realimentados, aunque en rangos concretos de operación, son las siguientes: a) Dependencia única de la respuesta de la red de realimentación, configurada externamente, lo que supone independizar dicha respuesta de parámetros característicos del sistema original que son incontrolables; b) Mejora de la linealidad de la respuesta. Dado que la respuesta va a depender, esencialmente, de los elementos que constituyen la red de realimentación, si esta tiene un carácter lineal, como sucede cuando está constituida por componentes pasivos eléctricos (R , L , C), se hace posible reducir en muy alto grado las limitaciones de linealidad inherentes a los componentes que integran la estructura del sistema original, lo que permite operar con señales de mayor amplitud; c) Adecuación de la respuesta en frecuencia a las necesidades concretas de operación, al ser posible incidir en sus características mediante los componentes de la red de realimentación.

Todas estas ventajas se ponen de manifiesto en el estudio posterior de las etapas amplificadoras básicas del amplificador operacional (AO). Por una parte, se analizará, tanto en la parte de simulación como de laboratorio, la etapa inversora con alimentación bipolar y simétrica (figura 1), con todas sus características de operación y limitaciones más relevantes. Por otra, se estudiará, en la parte de laboratorio, la etapa no inversora con alimentación simple (figura 3), prestando una muy especial atención a las restricciones derivadas de este modo de alimentación. Algunas de las cuestiones más significativas subyacentes a este estudio se describen a continuación, donde las referencias a apartados aluden al bloque de realización en el laboratorio.

Polarización, rango de operación y linealidad

El hecho de que en ausencia de excitación de entrada ($V_i=0$) la salida sea nula ($V_o=0$) y la utilización de alimentación bipolar y simétrica ($V_{CC\pm}$), determinan una situación de polarización (aptdo. 1a) que posibilita un amplio rango de operación dinámica en la tensión de salida con señales de ambas polaridades. Dado que este rango se extiende hasta niveles muy próximos a las alimentaciones (aptdo. 1b), se deduce el importante resultado de la polarización automática en el centro del mismo como una consecuencia de la propia realimentación negativa, lo que resulta máximamente eficiente para trabajar con señales bipolares. Además, puesto que la tensión de salida se establece mediante los componentes externos de la red de realimentación (R_1 - R_2), de carácter lineal, se asegura la completa linealidad en todo el rango de operación dinámica (aptdo. 1b), superando, así, la restricción de pequeña señal propia de los transistores.

Acoplamiento de entrada y de salida

El hecho de que la excitación de entrada, V_i , se aplique a terminales incondicionados de tensión, es decir, no fijados por el sistema, y la existencia de una salida nula, V_o , en ausencia de excitación de entrada, posibilitan la conexión directa de la excitación a la entrada y de la posible carga a la salida, respectivamente. De este modo, se evitan los acoplamientos capacitivos, del todo imprescindibles cuando existen niveles de tensión continua en los puntos de acoplo, que dan lugar a frecuencias de corte en el rango de muy bajas frecuencias y a la consiguiente quiebra de la banda plana de la respuesta en frecuencia en ese rango. El acoplo directo, por lo que respecta a la excitación de entrada en particular, puede constatar en todos los apartados de la práctica.

Control de la ganancia

La aplicación de realimentación negativa permite que la ganancia en tensión, V_o/V_i , solo dependa, aunque con la restricción a un cierto rango de frecuencias, de los componentes de la red de realimentación (R_1 - R_2), lo que posibilita su fácil establecimiento (aptdo. 1c) al margen de parámetros característicos del sistema de lazo abierto (el amplificador operacional).

Respuesta en frecuencia

La existencia de una ganancia en tensión solo dependiente de los componentes externos de la red de realimentación está intrínsecamente ligada a la aproximación ideal $V_+=V_-$ y esta a la de $k \rightarrow \infty$, siendo k el factor de ganancia del amplificador básico (el propio amplificador operacional). Sin embargo, la ganancia $|k(jf)|$ disminuye conforme se incrementa la frecuencia y puede conducir a la pérdida de validez de las aproximaciones anteriores y, en consecuencia, del valor constante de la ganancia dependiente de R_1 - R_2 . Esto supone una salida de la banda plana de la respuesta en frecuencia de la ganancia en tensión $|V_o/V_i|$, representada en el correspondiente diagrama de Bode por la frecuencia de corte f_c (aptdos. 1d y 1e).

En toda etapa amplificadora construida, como es el caso, con un amplificador operacional compensado internamente, y, por tanto, con un polo muy dominante en lazo abierto, lo que tiene por objeto asegurar la estabilidad para cualquier ganancia en lazo cerrado incluida la unitaria, el producto



ganancia • anchura de banda se mantiene constante al establecer el lazo de realimentación negativa y coincide con el del propio amplificador operacional. De este modo, la anchura de banda de la etapa puede controlarse sin más que variar su ganancia.

La salida de la banda plana de la respuesta en frecuencia de la etapa dará como resultado una reducción de la amplificación y también una variación de la fase, lo que no significa una pérdida de linealidad en la situación de excitación sinusoidal. Sin embargo, la distorsión resultará indefectible si la onda es de otro tipo. En efecto, suponiendo una excitación periódica, para que la onda de salida tenga la misma forma que la de entrada (condición para no distorsión) resulta obligado que todos los armónicos de la onda de entrada se amplifiquen por igual, al menos los de amplitud más significativa, que suelen ser los primeros, lo que conlleva, forzosamente, trabajar en una banda plana de la respuesta en frecuencia de la estructura. Por consiguiente, la anchura de banda de la etapa vendrá impuesta por la de la señal a amplificar, lo que implicará una limitación de la ganancia, aunque esto último no constituye problema alguno al poderse utilizar etapas en cascada para establecer la amplificación necesaria.

Limitaciones de linealidad de la tensión de salida

La más inmediata es como consecuencia del recorte a los niveles máximos de la tensión de salida, próximos a los de alimentación (aptdo. 1b). La otra es debida al denominado factor *slew rate* (SR) del amplificador operacional, que, a efectos funcionales, significa una restricción de la variación temporal de la tensión de salida, de modo que su vulneración supone una inmediata distorsión de esa tensión (aptdo. 1f). En este sentido, de acuerdo con el significado de la banda plana de la respuesta en frecuencia, descrito con anterioridad, el efecto del *slew rate* debería ubicarse, como condición del todo ineludible, fuera de esa banda, lo que puede conducir a limitar la amplitud $|V_o|$ de la tensión de salida para una operación sin distorsión. Este problema no tiene otra solución, llegado el caso, que utilizar un AO más rápido.

Circuito equivalente dinámico de la etapa

Analizada la operación de la etapa, el punto último es su caracterización dinámica funcional como un cuadripolo (aptdo. 1g), con los dipolos de entrada y de salida, en la banda plana de la respuesta en frecuencia. El dipolo de entrada está constituido, simplemente, por la impedancia de entrada (resistencia en la banda plana, R_i), definida como la vista por la excitación de entrada V_i . El dipolo de salida (equivalente Thevenin visto desde la salida), estará constituido por un generador de tensión, responsable de la amplificación entrada-salida, y la correspondiente impedancia serie, donde esta es la denominada impedancia de salida (resistencia en la banda plana, R_o); esta impedancia se identifica con la vista desde la salida con la excitación de entrada anulada ($V_i=0$), dado que esta anulación conlleva la del elemento activo del dipolo (generador de tensión dependiente de la tensión de entrada) y, por tanto, la reducción de este al elemento pasivo.

Etapas con alimentación simple

Cuando las señales de excitación son unipolares, es más consecuente recurrir, en la medida de lo posible, a la alimentación simple ($V_{CC+}=V_{CC}$, $V_{CC-}=0$). En este sentido, se debe enfatizar el hecho de



que manteniendo la estructura propia de alimentación bipolar, solo las etapas no inversoras de amplificador operacional son susceptibles de alimentación simple, pues, en tales condiciones, carecería de todo sentido un valor negativo. De este modo, cabe hacer una referencia particular, en el contexto presente, a la etapa amplificadora básica no inversora (figura 3).

Análogamente al caso de alimentación simétrica, resulta totalmente obligado, en aras a la linealidad de operación, tener una salida nula ($V_o=0$) o prácticamente nula en ausencia de excitación de entrada ($V_i=0$), es decir, en correspondencia con la situación de polarización. Esta condición, que está completamente asegurada con alimentación simétrica ($V_{CC\pm}$), resulta problemática en el caso de alimentación simple. Y ello no por causa de la etapa de salida del amplificador operacional, que en principio no presenta problemas especiales para trabajar en el entorno de 0V, sino por parte de la etapa diferencial de entrada, cuya idoneidad para trabajar con tensiones de excitación en el entorno de 0V, es decir, en las proximidades del nivel inferior de la alimentación, resulta completamente dependiente de la tipología de los transistores que la constituyen.

Así, en los amplificadores operacionales típicos para trabajar con alimentación simétrica, como es el caso del TL082 (con transistores JFET, canal P, en la etapa diferencial de entrada), las tensiones de entrada se reducen (en el sentido de que bajan de nivel) al acoplarse al interior de la estructura; de este modo, una tensión externa de entrada en el entorno de 0V daría lugar a una tensión negativa en el interior de la estructura, pero esto resulta del todo incompatible con la alimentación simple, pues no caben tensiones internas fuera del rango de las de alimentación. En tales condiciones, de total imposibilidad de operación lineal, la etapa pasa a operación no lineal, en la que la tensión de salida solo puede adoptar los valores extremos. En los amplificadores operacionales destinados a trabajar con alimentación simple, como es el caso del LM358 (con dos transistores PNP en cascada en la etapa diferencial de entrada), las tensiones de entrada se elevan (en el sentido de que suben de nivel) al acoplarse al interior de la estructura, lo que permite su operación con tensiones de entrada en el entorno de 0V haciendo uso de alimentación simple. Esta importante cuestión se analiza en el aptdo. 2a del bloque de laboratorio de la práctica.

Como dato especialmente importante para evaluar la posibilidad del amplificador operacional de trabajar con alimentación simple, el fabricante suministra el denominado rango de tensiones de entrada en modo común, especificado para asegurar la linealidad de operación. Por la forma en que actúa el acoplo de las tensiones de entrada al interior de la estructura (bajada o subida), en los amplificadores operacionales concebidos inicialmente para trabajar con alimentación bipolar ese rango se extiende desde la alimentación positiva, V_{CC+} , hasta un valor que no alcanza el de la alimentación negativa, V_{CC-} , lo que evidencia su imposibilidad de trabajar en el entorno de 0V cuando se utilizan con alimentación simple. Por el contrario, en los amplificadores operacionales destinados a trabajar con alimentación simple, el rango abarca desde 0V hasta un valor inferior al de la alimentación.

Consecuentemente con lo expuesto, y con carácter general para todas las prácticas de laboratorio de la asignatura, se hará uso del amplificador operacional LM358 en todos los casos de alimentación simple, mientras que para las situaciones más habituales de alimentación bipolar se utilizará el TL082, más rápido que el anterior.



B) Requerimientos de conocimiento para la práctica

- 1) Función de transferencia de un sistema lineal: polos y ceros. Respuesta en frecuencia consiguiente: concepto, utilidad y determinación. Aproximación lineal de esa respuesta mediante el correspondiente diagrama de Bode: zonas planas y frecuencias de corte.
- 2) Descomposición armónica de Fourier de una onda periódica. Significado. Componentes armónicas.
- 3) Efectos más relevantes de la realimentación negativa en la operación de un sistema.
- 4) Amplificador operacional (lazo abierto): estructura (etapas de entrada y de salida), operación básica (relación entrada-salida), parámetros característicos, circuito equivalente dinámico, factor de ganancia $k(jf)$.
- 5) La realimentación negativa en un amplificador operacional: fundamento, consecuencias y limitaciones de la aproximación ideal $V_+ = V_-$.
- 6) Etapas amplificadoras básicas, de carácter inversor y no inversor, de amplificador operacional: polarización, acoplamiento de la tensión de entrada, rango de la tensión de salida, linealidad de operación, ganancia en tensión, limitaciones de frecuencia y su posible afectación a la linealidad, circuito equivalente dinámico.
- 7) Etapas de amplificador operacional con alimentación simple: problemática inherente, rango de tensiones de entrada en modo común.
- 8) Instrumentación: osciloscopio (posiciones $\times 1$ y $\times 10$ de la sonda, disparos), generador de señales (control de amplitud y DC *offset*).
- 9) Características básicas de operación, desarrolladas en las hojas de datos del fabricante, de los amplificadores operacionales TL082 y LM358, utilizados en la parte de laboratorio, y uA741, usado en la parte de simulación.

C) Trabajo previo a la realización de la práctica en el laboratorio

1) Contenidos desarrollados en la práctica y otros relacionados

Estudio, comprensión y asimilación de los contenidos abordados en el guion de la práctica, tanto en la parte de simulación como de laboratorio, cumplimentando, así, los requerimientos especificados con anterioridad. Se debe tener la solvencia necesaria para argumentar los resultados obtenidos y responder a las cuestiones planteadas al respecto a lo largo del desarrollo de la sesión presencial.

En los resultados gráficos de las simulaciones que se presenten, debe incluirse el nombre del autor o autores mediante una etiqueta (*label*). En la aplicación *Probe*, esa etiqueta se añade desplegando el menú de la pestaña principal *Plot* y seleccionando la opción *Text* (color blanco y tamaño 16) en el submenú asociado a *Label*. Las gráficas deben proceder de la impresión de la simulación y no de su captura, de modo que se puedan observar claramente la fecha y la hora de la simulación. Para imprimir una simulación, se accede a la pestaña *File* del menú principal y se selecciona *Print*.

2) Simulaciones electrónicas

Se utiliza, permanentemente, la etapa amplificadora inversora (figura 1, sin el potenciómetro de entrada) con el AO uA741, disponible en la librería *eval*. En el caso de una respuesta temporal, debe asegurarse el alcance del régimen permanente y, por otra parte, representarse, a efectos de la mejor visualización, no más de dos o tres periodos y con un número de muestras suficientemente alto en cada uno de ellos. Por otra parte, para una representación más precisa de las componentes armónicas de una señal, las cuales pueden visualizarse en el editor gráfico *Probe* al pulsar el icono FFT, debe utilizarse un número de periodos muy alto.

A) Operación básica en el dominio temporal

Haciendo uso del generador V_{sin} de excitación de entrada a 1kHz, observar la operación lineal de la etapa, mediante la representación sincrónica de las ondas de entrada y de salida, estableciendo ganancias sucesivas de 1, 10 y 100 para una amplitud de tensión de salida de 5V y fijando $R_1=1k\Omega$.

B) Respuesta temporal asociada al efecto del factor *slew rate*

Haciendo uso del generador V_{sin} de excitación de entrada con 5V de amplitud y estableciendo $R_1=R_2=1k\Omega$, representar las tensiones de salida a las frecuencias de 10 y 20 kHz. Determinar, en ambos casos, el contenido armónico de esas tensiones. Analizar y justificar los resultados de acuerdo con el valor del factor *slew rate* del AO utilizado. ¿Por qué se ha planteado la incidencia de este efecto en una etapa de ganancia unidad?

C) Respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia de un sistema está completamente ligada a un comportamiento lineal, es decir, a la existencia de una respuesta sinusoidal, V_o , de la misma frecuencia que la excitación sinusoidal de entrada, V_i . En este sentido, en el contexto de una etapa lineal de amplificador operacional, como es el caso, debe prestarse muy especial atención a la no incidencia del factor *slew rate* (SR), pues conlleva una inmediata distorsión de la onda de salida. Por tanto:

$$V_o(t) = |V_o| \sin \omega t, \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{m\acute{a}x.} = |V_o| \omega \cos \omega t|_{m\acute{a}x.} = |V_o| \omega = |V_o| 2\pi f < SR \Rightarrow |V_o| f < 0.16 \cdot SR$$

Considerando la relación entrada-salida de la etapa en el campo complejo (figura 2), resultante de la aproximación de la ganancia del AO, $k(jf)$, por un polo dominante, y designando por $|V_o|_{BP}$ la amplitud de la tensión de salida en la banda plana de la respuesta en frecuencia, resulta:

$$V_o = \frac{-R_2 / R_1}{1 + jf / f_c} V_i, |V_o| = \frac{R_2 / R_1}{[1 + (f / f_c)^2]^{1/2}} |V_i| = \frac{|V_o|_{BP}}{[1 + (f / f_c)^2]^{1/2}}$$

Introduciendo la aproximación de Bode:

$$f < f_c : |V_o| \approx |V_o|_{BP}; f > f_c : |V_o| \approx |V_o|_{BP} \frac{f_c}{f} \Rightarrow |V_o| f \approx |V_o|_{BP} f_c$$

De este modo, el producto amplitud de tensión de salida por frecuencia fuera de la banda plana coincide con el correspondiente al límite de la misma, límite asociado, en el diagrama de Bode, a la

frecuencia de corte de la etapa, f_c . Puesto que en toda la extensión de la banda plana, región típica de operación, resulta completamente imprescindible que no se manifieste el efecto de no linealidad del SR y dado que el peor caso corresponde a la máxima frecuencia de la misma, f_c , se desprende que la no incidencia del SR en la banda plana conlleva el mismo resultado fuera de la misma:

$$|V_o|_{BP} f_c < 0.16 \cdot SR, |V_o|_f \approx |V_o|_{BP} f_c \Rightarrow |V_o|_f < 0.16 \cdot SR$$

Este resultado es ciertamente importante, pues permite asegurar la linealidad de operación, siempre con excitación sinusoidal, en todo el rango de frecuencias y, por consiguiente, determinar la respuesta en frecuencia sin límite de esta última. La explicación del resultado es bastante directa. En efecto, la caída progresiva de la amplitud de la tensión de salida que acontece más allá de la banda plana va desplazando a frecuencias cada vez mayores la incidencia del factor SR, por lo que este no se manifiesta. Por otra parte, la existencia de polos superiores al dominante en la función de transferencia compleja del AO, $k(jf)$, no solo preserva el resultado anterior sino que lo refuerza, pues supondría una mayor caída de la amplitud de la tensión de salida y el consiguiente incremento de la frecuencia a la que incidiría el SR.

a) De acuerdo con lo anterior, utilizando una etapa de ganancia 100 y considerando los valores concretos, dados por el fabricante, del producto característico GBW (*Gain • Bandwidth*) y del factor SR del AO utilizado: ¿está asegurada la no incidencia de tal factor en toda la gama de frecuencias?, ¿por qué se plantea la determinación de la respuesta en frecuencia y, por ende, del producto característico GBW (*Gain • Bandwidth*) en una etapa de ganancia elevada (100), como es el caso?, ¿supone una pérdida de linealidad la salida de la banda plana de la respuesta en frecuencia?, ¿tiene relación esa salida con el valor de la amplitud de tensión en la entrada inversora?, ¿cuál es el factor característico del AO determinante de esa posible relación?

Simulación en el dominio de la frecuencia, en el rango 0.1Hz-10MHz, mediante un generador Vac de excitación de entrada con una amplitud de 50mV, y utilizando $R_1=1k\Omega$ y $R_2=100k\Omega$. En cada caso, debe utilizarse la escala adecuada para la mejor visualización de las representaciones e interpretación de los resultados.

Nota. En la utilidad *Probe*, el módulo y el argumento se introducen con las funciones *M* y *P*, respectivamente. Estas funciones se pueden encontrar en la ventana “*Functions or Macros*” que aparece a la derecha de la pantalla cuando se pulsa la tecla *Insert* para añadir un nuevo trazo.

b) Representación del módulo (ganancia) y argumento de la función de transferencia compleja de la etapa, V_o/V_i . Determinar los correspondientes valores de la ganancia en la banda plana, de la frecuencia de corte y del desfase entrada-salida a esta frecuencia. Inferir, en consecuencia, el valor del producto característico GBW (*Gain • Bandwidth*) del AO.

c) Representación de la amplitud de tensión en la entrada inversora, $|V_-|$. Justificar el resultado y, a través de su correspondencia con la tensión de salida, $|V_o|$, determinada previamente, inferir su completa incidencia en la operación de la etapa.

d) Representación de la ganancia en lazo abierto del AO, $|k(jf)|=|V_o|/|V_-|$. Interpretar el resultado, en sí mismo y en relación con las representaciones previas. Con todo ello, se constata fehacientemente lo que se ha avanzado, de forma conceptual, en el apartado a).

D) Trabajo a realizar en el laboratorio

Observaciones generales de carácter experimental

- 1) En cada uno de los apartados siguientes, las condiciones de operación establecidas tienen por finalidad garantizar la dominancia de la característica a determinar, lo que exige, indefectiblemente, minimizar la posible incidencia de otros efectos reales.
- 2) La inclusión del potenciómetro en la entrada de la etapa de la figura 1 no tiene más objeto que posibilitar la atenuación de la señal V_i (imprescindible en etapas de alta ganancia), incrementando la funcionalidad de ajuste de amplitudes del selector correspondiente del generador de señales.
- 3) En función de las frecuencias utilizadas y de la operación a realizar, deberá considerarse la posición más adecuada de las sondas del osciloscopio ($\times 1$ o $\times 10$). Asimismo, debe tenerse presente el inconveniente de trabajar con sonda atenuadora en el caso de señales de baja amplitud.
- 4) Estando habilitadas las conexiones a tierra en el suministro de energía de la red eléctrica a los aparatos utilizados, los terminales de referencia de las fuentes de alimentación del entrenador, de las sondas del osciloscopio y del generador de señales tienen conexión directa con esa toma de tierra. De este modo, cualquier referencia de las sondas del osciloscopio a un punto que no sea la referencia común del sistema generará un cortocircuito.
- 5) Debe procederse al filtrado de las tensiones de alimentación caso de constatarse su necesidad.

1) Etapa amplificadora inversora (figura 1): análisis y caracterización

Se utilizará el AO TL082 con alimentación simétrica: $V_{CC\pm} = \pm 15V$.

- a) Operación en continua (polarización). Con la amplitud de señal del generador a cero, y habiendo anulado previamente el nivel de continua mediante el correspondiente control *DC OFFSET*, medir con precisión la tensión de salida (utilícese $R_2 = 1k\Omega$). Analizar y justificar el resultado obtenido.
- b) Rango de operación lineal. A la frecuencia de 1kHz y con $R_2 = 10k\Omega$, verificar, mediante la variación de la tensión de entrada, la completa linealidad en todo el rango de operación de la tensión de salida del amplificador. Determinar ese rango y relacionar sus valores límite con los de las tensiones de alimentación utilizadas. Constatar, en consecuencia, la polarización automática de la etapa en el centro del rango dinámico, la importante anchura de este rango, con sus límites, y la completa linealidad de operación en toda la extensión del mismo. Justificar, con rigor, los resultados obtenidos.

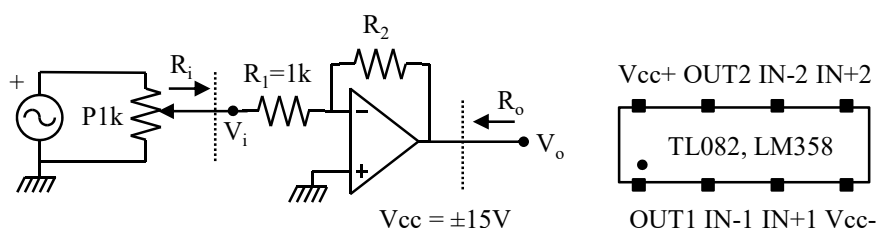


Figura 1

- c) Ganancia en banda plana. A la frecuencia de 1kHz y utilizando, sucesivamente, los valores para R_2 de 1k Ω , 10k Ω y 100k Ω , determinar las correspondientes ganancias en tensión de la etapa, $|V_o|/|V_i|$, con una amplitud de salida de 5V.
- d) Anchura de banda. En el caso de $R_2=100k\Omega$ y con una amplitud de salida de 5V a bajas frecuencias, analizar la dependencia con la frecuencia de la ganancia $|V_o|/|V_i|$ y determinar la frecuencia de corte de la etapa, f_c . Deducir, en consecuencia, el valor del producto característico ganancia $\cdot$ anchura de banda del amplificador operacional y compararlo con el típico suministrado por el fabricante.
- e) Masa virtual. A las frecuencias de 10 y 100kHz, y utilizando $R_2=1k\Omega$, determinar la tensión en la entrada inversora del amplificador para el caso de una amplitud de tensión de salida de 5V. Deducir, en consecuencia, el valor del factor de ganancia del amplificador básico $|k(jf)|$ a esas frecuencias. Justificar los resultados. Fundamentar la completa relación entre el valor de ese factor, la existencia de la banda plana de la respuesta en frecuencia $|V_o|/|V_i|$ y el valor correspondiente de esa respuesta solo dependiente de las componentes R_1 - R_2 de la red de realimentación.
- f) Efecto de *slew rate*. Con $R_2=1k\Omega$ y una amplitud de salida de 5V, determinar la frecuencia máxima sin distorsión de la etapa. Deducir, en consecuencia, el valor del producto característico sin distorsión amplitud de salida $\cdot$ frecuencia ($|V_o|f$) y del correspondiente factor *slew rate* del amplificador. Comparar el valor obtenido de este factor con el típico suministrado por el fabricante. Justificar, en toda su extensión, el alcance del efecto en cuestión.
- g) Circuito equivalente dinámico de la etapa. Con $R_2=1k\Omega$, estimar los valores de las resistencias de entrada (R_i) y de salida (R_o) de la etapa en la banda plana de la ganancia en tensión. Del conjunto de resultados previos, inferir el circuito equivalente dinámico de la etapa amplificadora (figura 2). Razonar la proyección de este circuito equivalente a la conexión entre etapas de AO. Por otra parte, extrapolar el circuito equivalente de la etapa inversora utilizada a la etapa no inversora.

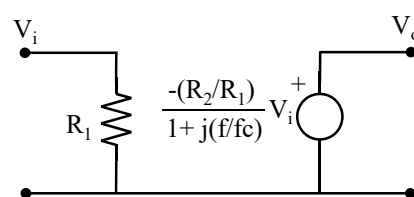


Figura 2

2) Etapa amplificadora no inversora (figura 3): operación con alimentación simple

Se utilizarán los AO TL082 y LM358, ambos con alimentación unipolar: $V_{CC+}=+15V$, $V_{CC-}=0V$.

Se establece como tensión de entrada, V_i , una onda sinusoidal del generador de señales de 1kHz y 2.5V de amplitud sobre un nivel de continua de 2.5V (onda de 5V de pico a pico sobre 0V, en la que debe fijarse muy bien el nivel inferior a 0V), y la etapa se configura con $R_1=R_2=10k\Omega$. Observando, simultáneamente, la onda de entrada, V_i , y de salida, V_o :

- a) Con la utilización sucesiva de los AO TL082 y LM358, analizar el comportamiento básico de la etapa, especialmente en la parte inferior de la onda de entrada. Justificar los resultados obtenidos. Relacionar estos resultados con el dato del rango de tensión de entrada en modo común suministrado

por el fabricante para cada AO. Inferir la completa idoneidad del LM358, con alimentación simple, para trabajar con señales unipolares.

b) Con el LM358, analizar la operación de la etapa (relación entrada-salida) y justificar el resultado.

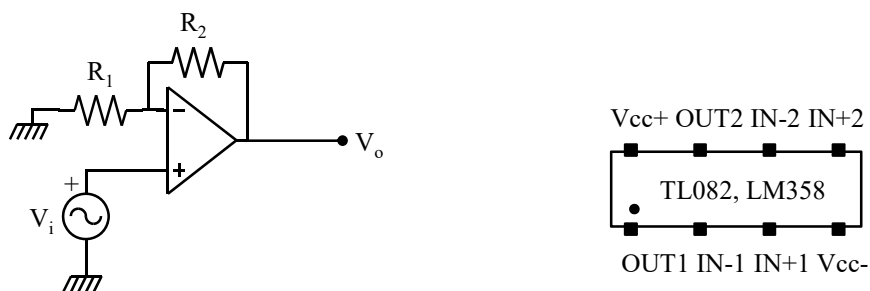


Figura 3