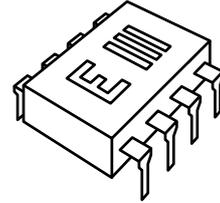




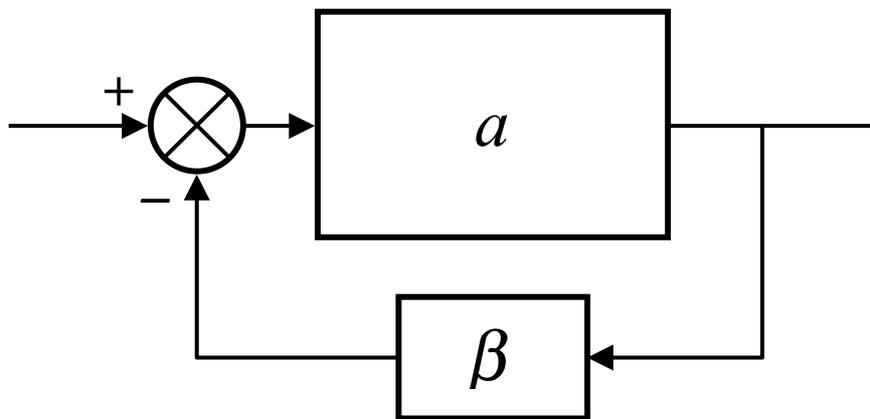
Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Electrónica
Departamento de Electrónica



ELECTRÓNICA III

PROBLEMAS RESUELTOS SOBRE AMPLIFICADORES REALIMENTADOS

José Salcedo Brull



AÑO 2002

B12.01

Código interno de publicación: B12.01
Publicado en Internet
<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/real-prb.pdf>
ISBN ----
Rosario, Argentina
Año 2002

Problema 1

Calcular la ganancia de tensión, la resistencia de entrada y la resistencia de salida del amplificador realimentado de la figura 1.1.

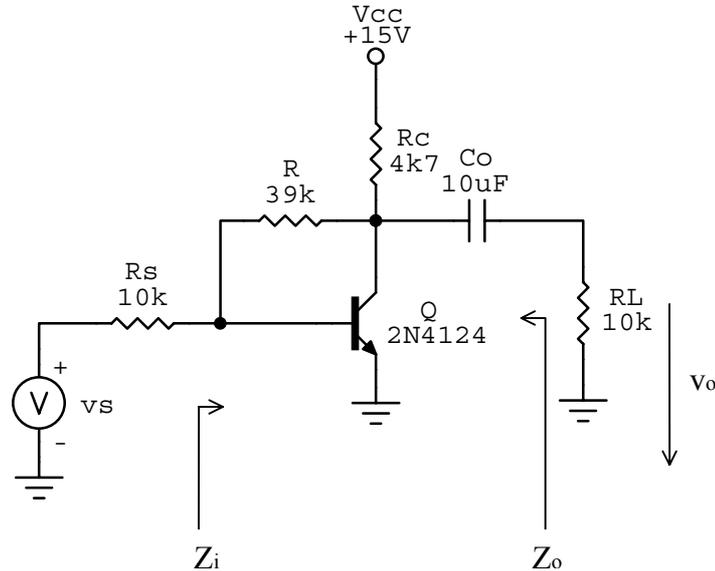


Figura 1.1. Amplificador realimentado

Solución

Se resolverá el problema utilizando el Método Sistemático de Análisis de Amplificadores Realimentados (ver material de teoría de la cátedra).

1. La fuente de señal es la tensión v_s y la carga del circuito la constituye R_L , pero para el análisis por el método de realimentación se deben agrupar dentro de la carga todas las impedancias que estén circuitalmente en paralelo con la carga. En este caso sería la resistencia R_c .
2. El problema pide calcular la ganancia de tensión, por lo tanto las variables de interés son v_s y la tensión v_o sobre la resistencia de carga R_L .
3. La impedancia de entrada se debe calcular entre la base de Q y masa, y la impedancia de salida entre el colector de Q y masa.
4. Identificar la configuración de realimentación:
 - a) Se observa que al cortocircuitar la carga ($R_c//R_L$) desaparece la realimentación, por lo tanto la variable muestreada es la tensión.
 - b) La señal realimentada entra al amplificador en el mismo punto que la señal de entrada, es decir en paralelo, entonces se realimenta corriente.
5. Es una configuración paralelo-paralelo y corresponde calcular a_z y β_v

6. En este caso se debe reemplazar la fuente v_s por su modelo de Norton, ya que la configuración a la entrada es en paralelo.
7. La red de realimentación está conformada por la resistencia R .
8. Reordenar el circuito de modo que quede de manifiesto la interconexión de los dos cuadripolos según la configuración hallada en el punto 4. El resultado se muestra en el circuito de la figura 1.2.

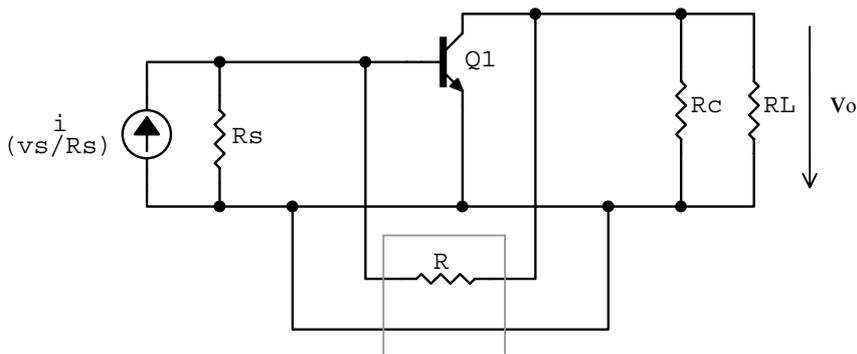


Figura 1.2. Circuito en señal

9. Determinar las impedancias con que la red de realimentación carga al amplificador (ver figura 1.3):
 - A la entrada: como la salida es en paralelo, se debe cortocircuitar el lado de la salida de la red de realimentación. Luego obtener la impedancia vista desde la entrada, (ver figura 1.3a).
 - A la salida: como la entrada es en paralelo, se debe cortocircuitar el lado de la entrada de la red de realimentación. Luego obtener la impedancia vista desde la salida (ver figura 1.3b).

Recordar que en todos los casos se está anulando la variable común a ambos cuadripolos del lado contrario a aquél del cual se obtendrá la impedancia.

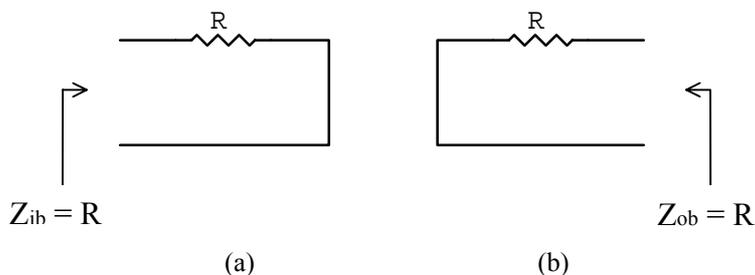


Figura 1.3. Impedancias de la red de realimentación.
 (a) Carga a la entrada. (b) Carga a la salida.

10. Restituir impedancias: a tal efecto redibujar el amplificador básico con el agregado de las impedancias anteriores y las de la fuente de señal y la carga según corresponda. Tanto a la entrada como a la salida, si la conexión es en serie, las impedancias se agregan en serie, y si es en paralelo, se agregan en paralelo. En el caso analizado las mismas se agregan en paralelo en ambos extremos (ver figura 1.4.)

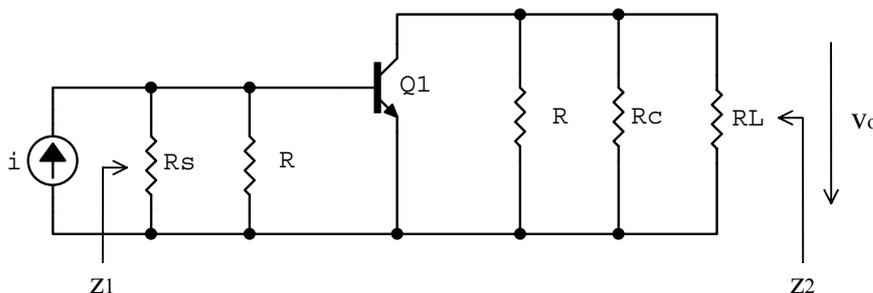


Figura 1.4. Amplificador básico con impedancias restituidas

11. Calcular la ganancia a_z , la impedancia de entrada z_1 y la impedancia de salida z_2 en la versión del amplificador básico con las impedancias restituidas.

De la Figura 1.4

$$a_z = \frac{v_o}{i} = \frac{-i_c R_L'}{i} = \frac{-h_{fe} i_b R_L'}{i} = \frac{-h_{fe} R_L' R_s'}{R_s' + h_{ie}} \tag{1-1}$$

$$z_1 = R_s' // h_{ie} = 1,6k\Omega$$

$$z_2 = R_L' = 2,96k\Omega$$

donde

$$R_L' = R_L // R_c // R = 2,96k\Omega$$

$$R_s' = R_s // R = 7,96k\Omega$$

reemplazando en la ecuación (1-1) se obtiene

$$a_z = -283,9k\Omega \qquad \text{Con, } h_{ie} = 2k\Omega \text{ @ } I_c \approx 2mA$$

Para los cálculos se despreciaron los parámetros h_{oe} y h_{re} del transistor, ya que

$$h_{oe}^{-1} = 66,7k\Omega \gg R_L'$$

$$h_{re} = 10^{-4}$$

Este último se desprecia ya que la realimentación a través de R es mucho mayor que la que se produce a través de h_{re} .

12. Calcular la realimentación β como cociente entre la variable de entrada y la variable de salida. Para ello excitar la red de realimentación, desde la salida, con una fuente de corriente si la salida es en serie, o con una fuente de tensión si es en paralelo; y calcular, a la entrada, la tensión en vacío si la entrada es en serie, o la corriente en cortocircuito si la entrada es en paralelo.

Estas reglas aseguran que se esté calculando el parámetro de transferencia inversa correspondiente a la configuración que se está analizando.

En nuestro caso se debe excitar a la salida de la red de realimentación con una fuente de tensión, y calcular a la entrada la corriente en cortocircuito, obteniéndose:

$$\beta_y = -\frac{1}{R} = -\frac{1}{39k\Omega} \quad (1-2)$$

Para este punto tomar siempre la polaridad de la fuente a la salida coincidente con la polaridad de la señal muestreada (v_o), y la polaridad a la entrada de forma tal que se reste al efecto de la fuente de señal v_s .

13. Realizar los cálculos correspondientes al amplificador realimentado:

$$A_z = \frac{a_z}{1 + a_z\beta_y} = -34,2k\Omega, \quad (1-3)$$

$$Z_1 = \frac{z_1}{1 + a_z\beta_y} = \frac{1,6k\Omega}{8,28} = 193,25\Omega \quad (1-4)$$

$$Z_2 = \frac{z_2}{1 + a_z\beta_y} = \frac{2,96k\Omega}{8,28} = 357,5\Omega \quad (1-5)$$

14. Convertir a los parámetros de interés.

De las figuras 1.2 y 1.4 se obtienen:

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{iR_s} = \frac{A_z}{R_s} = \frac{-34,2k\Omega}{10K\Omega} = -3,42 \quad (1-6)$$

$$Z_1 = R_s // Z_i$$

$$Z_2 = R_L // Z_o$$

por lo tanto,

$$Z_i = \frac{Z_1R_s}{R_s - Z_1} = 197\Omega \quad (1-7)$$

$$Z_o = \frac{Z_2R_L}{R_L - Z_2} = 370,8\Omega \quad (1-8)$$

Observar que al tratarse de una configuración paralelo-paralelo, las impedancias de entrada y de salida disminuyen.

Verificación de los cálculos

Se verificarán los resultados obtenidos realizando una simulación del circuito utilizando un simulador de circuitos basado en Spice.

En el siguiente recuadro se pueden ver los resultados obtenidos para el análisis en pequeña señal, en donde se observan la ganancia del circuito (-3,567), la resistencia vista desde la fuente (10,17kΩ), la resistencia vista desde la base del transistor (166,3Ω), y la resistencia de salida (210,5Ω). Comparar estos resultados con los obtenidos en los puntos 13 y 14.

```

****  SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

V(VO)/V_Vs = -3.567E+00
INPUT RESISTANCE AT V_Vs = 1.017E+04
INPUT RESISTANCE AT V_Vs' = 1.663E+02
OUTPUT RESISTANCE AT V(VO) = 2.105E+02
    
```

En la figura 1.5 se observa la respuesta en frecuencia del circuito, obtenida excitando el circuito con una señal de entrada de 1 Vp de frecuencia variable entre 1 Hz y 1 MHz. Observar la ganancia del circuito a frecuencias medias (3,58) y compararla con la obtenida en el punto 14.

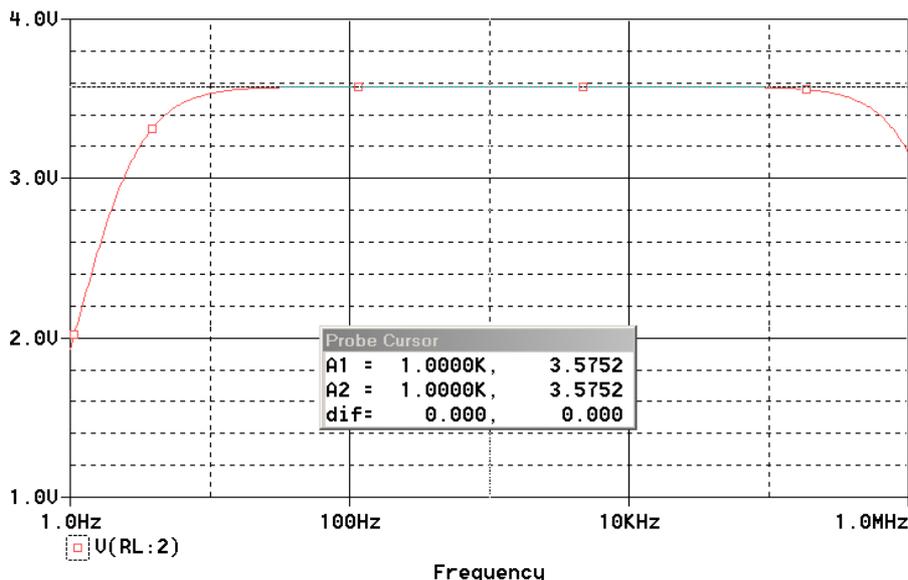


Figura 1.5. Respuesta en frecuencia del amplificador para una señal de entrada de 1Vp.

En la figura 1.6 se pueden observar las formas de onda del circuito para una señal de entrada de 1 Vp y de 1 kHz, en la misma se observa el carácter inversor del circuito.

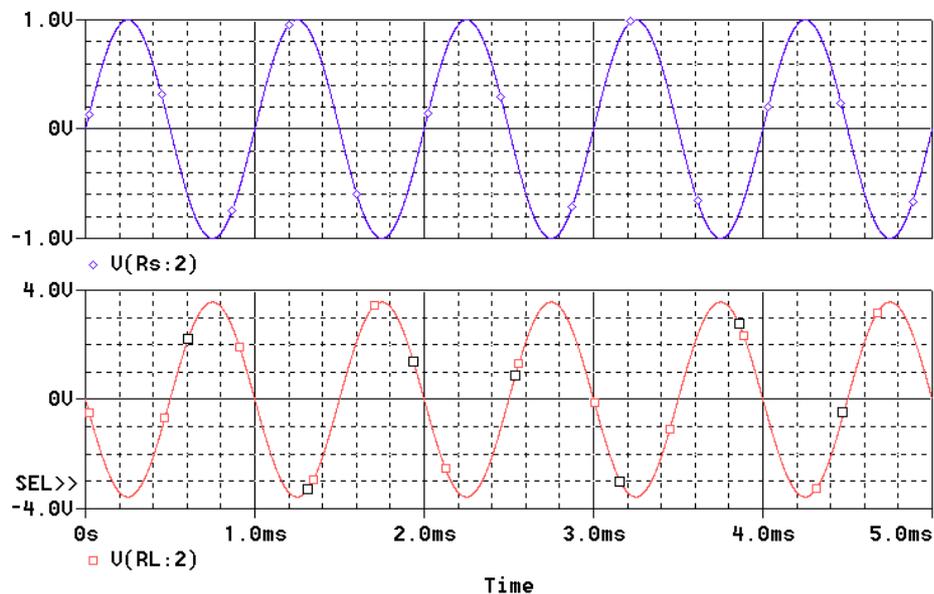


Figura 1.6. Formas de onda de la señal de entrada y de salida para una excitación de 1Vp y 1 kHz.

Conclusiones

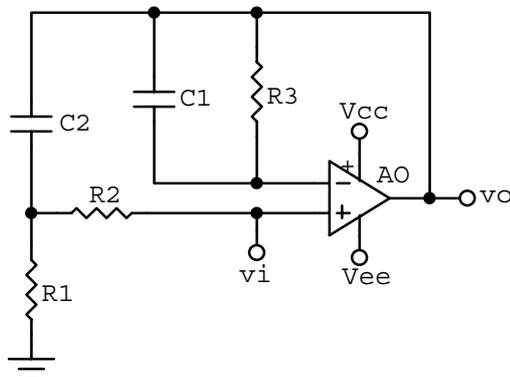
Comparando los resultados obtenidos en la simulación del circuito con los obtenidos por el método de realimentación podemos concluir que si bien se trata de un método aproximado, se obtuvieron resultados que se aproximan a los obtenidos por medio de la simulación con modelos de los componentes reales.

Sugerencias

1. Repetir los cálculos con los parámetros reales del transistor utilizado en la simulación ($h_{fe} \approx 200$, $h_{ie} \approx 1,5 K\Omega$). Para los cálculos del problema se utilizaron los valores mínimos obtenidos del manual.
2. Calcular la ganancia del circuito considerando $a_z\beta_y \gg 1$. Comparar el resultado obtenido con la ganancia de un amplificador inversor con amplificador operacional.
3. Calcular la variación de la ganancia por efecto de la dispersión del h_{fe} .

Problema 2

Calcular la ganancia de tensión y la impedancia de entrada del siguiente amplificador para transductor piezoeléctrico.



AO: LF155
 $r_d = 10e^{11} \Omega$
 $a_o = 50k \sim 200k$

$R_1 = 11M\Omega$
 $R_2 = 11M\Omega$
 $R_3 = 22M\Omega$
 $C_1 = 10 \mu F$
 $C_2 = 0.01 \mu F$

Figura 2.1. Amplificador de transductor piezoeléctrico.

Solución:

En primer lugar se debe redibujar el circuito para el análisis en señal, considerando que en alterna los capacitores son cortocircuitos, quedando el circuito de la figura 2.2.

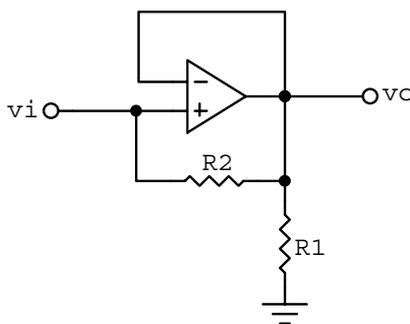


Figura 2.2. Circuito en señal.

En la figura 2.2 se observa que se trata de un circuito doblemente realimentado, en el cual la resistencia R_1 queda conectada entre la salida y masa por lo tanto se la puede considerar como carga del circuito y no como parte de la red de realimentación.

Si se cortocircuita la salida desaparece la realimentación, es decir se muestrea tensión, además la realimentación ingresa en paralelo con la fuente de señal v_i , entonces se realimenta corriente. De lo anterior se concluye que se debe calcular a_z y β_y .

Con estas consideraciones se puede dibujar nuevamente el circuito de forma tal que quede de manifiesto la interconexión de los cuadripolos, obteniéndose el circuito de la figura 2.3.

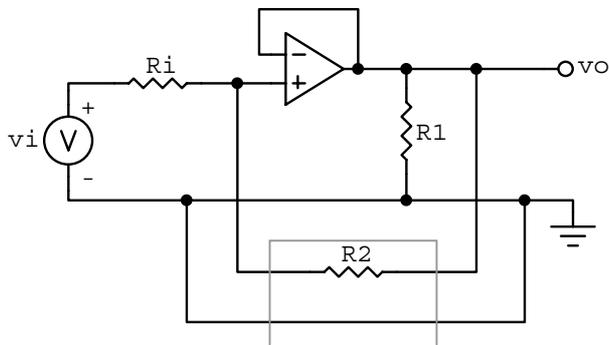


Figura 2.3. Esquema cuadripolar.

Para calcular las ganancias requeridas por la configuración se debe transformar la fuente de tensión por su equivalente de Norton, para ello supondremos que la fuente de señal tiene una resistencia R_i (ver figura 2.4).

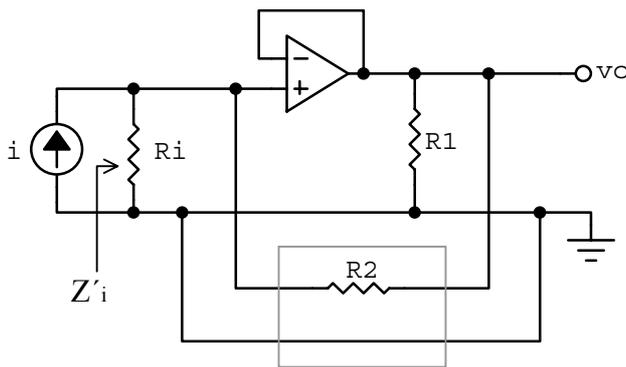


Figura 2.4: esquema cuadripolar con fuente de corriente.

La red de realimentación está constituida por la resistencia R_2 , por lo tanto las impedancias con que la red de realimentación carga al amplificador son:

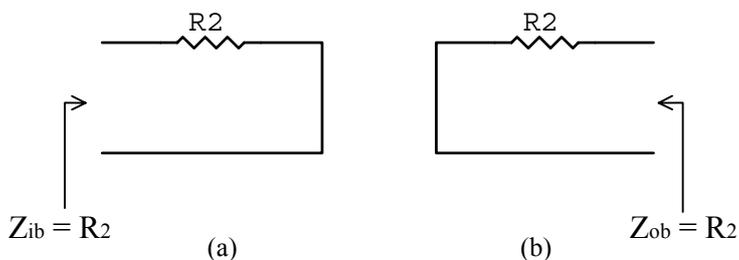


Figura 2.5: impedancias de la red de realimentación. (a) Carga a la entrada. (b) Carga a la salida.

Restituyendo las impedancias obtenidas en la figura 2.5 se obtiene el circuito de la figura 2.6.

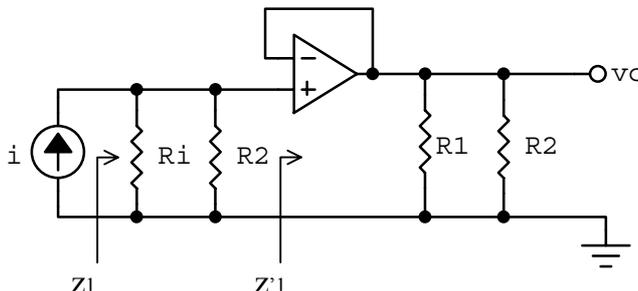


Figura 2.6. Amplificador básico con impedancias restituidas.

En la figura 2.6 se puede observar que el amplificador básico está constituido por un amplificador realimentado, el circuito seguidor, se recomienda resolver este circuito aplicando el método sistemático de amplificadores realimentados, resolviendo el circuito se tiene

$$z'_1 = r_d(1 + a_o) \quad \text{impedancia de entrada del circuito seguidor}$$

$$a'_v = \frac{a_o}{1 + a_o} \quad \text{ganancia del seguidor}$$

De la figura 2.6 se tiene

$$z_1 = z'_1 // R'_i = r_d(1 + a_o) // R'_i \quad (2-1)$$

Despreciando la resistencia de salida del operacional para calcular a_z obtenemos

$$a_z = \frac{v_o}{i} = z_1 a'_v = r_d(1 + a_o) // R'_i \frac{a_o}{1 + a_o} \quad (2-2)$$

$$R'_i = R_i // R_2$$

Para el cálculo de β_y se debe excitar la red de realimentación desde la salida con una fuente de tensión, y calcular a la entrada la corriente en cortocircuito, obteniéndose:

$$\beta_y = \frac{i}{v} = -\frac{1}{R_2} \quad (2-3)$$

De las ecuaciones 2-1, 2-2 y 2-3 se puede calcular la resistencia del circuito realimentado vista desde la fuente

$$Z'_i = \frac{z_1}{1 + a_z \beta_y} = \frac{r_d(1 + a_o) // R'_i}{1 - \frac{1}{R_2} r_d(1 + a_o) // R'_i \frac{a_o}{1 + a_o}} \quad (2-4)$$

desarrollando la expresión (2-4) se obtiene finalmente:

$$\begin{aligned}
 Z'_i &= \frac{1}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{rd(1+a_o)} + \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2} \frac{a_o}{1+a_o}} = \frac{1}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{rd(1+a_o)} + \frac{1}{R_2(1+a_o)}} \\
 &= R_i // (1+a_o)rd // (1+a_o)R_2 \\
 &= R_i // (1+a_o)(rd // R_2)
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

De la figura 2.6 se puede ver que

$$Z'_i = R_i // Z_i$$

con lo cual de la ecuación 2-5 se deduce

$$Z_i = (1+a_o)(rd // R_2) \tag{2-6}$$

de las ecuaciones 2-2 y 2-3 se puede calcular la ganancia del amplificador realimentado

$$A_z = \frac{a_z}{1+a_z\beta_y} = \frac{rd(1+a_o) // R'_i \frac{a_o}{1+a_o}}{1 - \frac{1}{R_2} rd(1+a_o) // R'_i \frac{a_o}{1+a_o}} = Z'_i \frac{a_o}{1+a_o} = Z'_i a'_v$$

la ganancia de tensión queda

$$A'_v = \frac{A_z}{R_i} = \frac{Z_i}{R_i + Z_i} a'_v$$

la ganancia considerando la resistencia de la fuente de señal

$$A_v = \frac{R_i + Z_i}{Z_i} A'_v = a'_v = \frac{a_o}{1+a_o}$$

es decir que la ganancia resulta igual a la del circuito seguidor y como $a_o \gg \gg 1$ se tiene

$$A_v \approx 1$$

y reemplazando en la ecuación (2-6) los datos del amplificador operacional, se tiene finalmente

$$Z_{imin} = 5,5 \text{ e}^{11} \Omega$$

Para los cálculos y para la simulación del circuito se supuso una resistencia de la fuente de señal de $10\text{M}\Omega$.

Verificación utilizando un simulador de circuitos

Se verificarán los resultados obtenidos realizando una simulación del circuito utilizando un simulador de circuitos basado en Spice.

En el siguiente recuadro se pueden ver los resultados obtenidos para el análisis en pequeña señal, en donde se pueden ver la ganancia del circuito (1), la resistencia vista desde la fuente ($1,823 \text{ e}^{12} \Omega$), la resistencia vista desde el terminal inversor e^- del operacional ($1,823 \text{ e}^{12} \Omega$) y la resistencia de salida ($2,396 \text{ e}^{-4} \Omega$).

```

****  SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

V(VO)/V_vs = 1.000E+00
INPUT RESISTANCE AT V_vi = 1.823E+12
INPUT RESISTANCE AT V_vi' = 1.823E+12
OUTPUT RESISTANCE AT V(VO) = 2.396E-04

```

En la figura 2.7 se observa la respuesta en frecuencia del circuito, obtenida excitando el circuito con una señal de entrada de 1 Vp de frecuencia variable entre 1 Hz y 1 MHz. Se puede observar que la ganancia del circuito, en un amplio rango de frecuencias, es igual a la unidad.

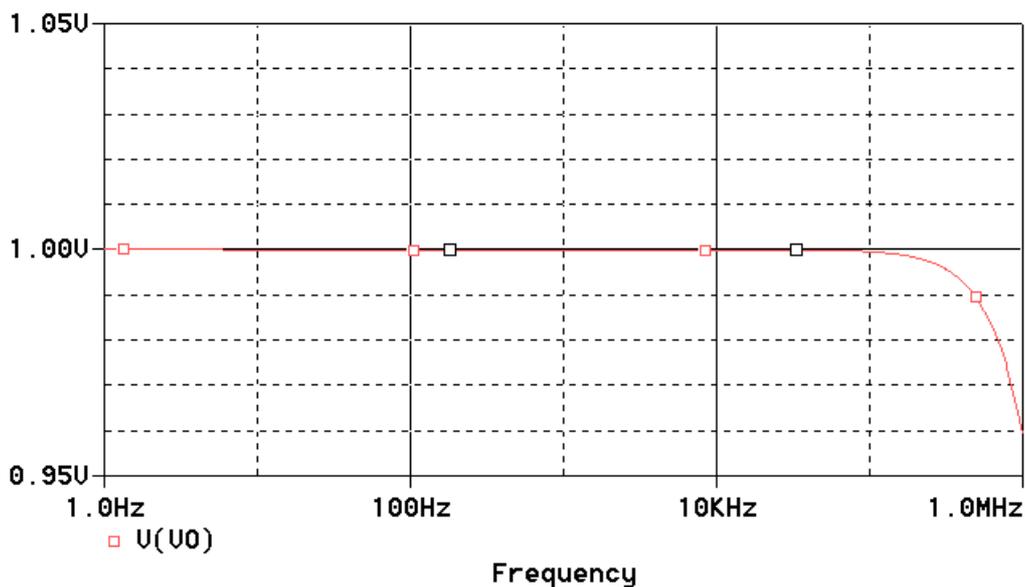


Figura 2.7. Respuesta en frecuencia del amplificador para una señal de entrada de 1Vp.

Conclusiones

Se puede observar que si bien la configuración a la entrada es en paralelo, la resistencia del circuito es mucho mayor que la del amplificador básico, esto es debido a que la rea-

limentación a través de R_2 es una realimentación positiva, y por lo tanto para este caso se tiene que $(1+a_z \beta_y) \ll 1$.

Sugerencias

1. Repetir los cálculos utilizando el valor típico de la ganancia del amplificador operacional.
2. Calcular la variación de la ganancia por efecto de la dispersión de los parámetros del amplificador operacional.
3. Calcular la resistencia de salida del amplificador realimentado, considerando la resistencia de salida del operacional $r_o=0,1\Omega$.