

Laboratorio 3 - Circuitos Electrónicos I - Ing. Electrónica

Ignacio Nahuel Chantiri 69869/1

Universidad Nacional De La Plata, Argentina, Junio 2024.

Resumen—El análisis de laboratorio presentado describe el estudio del efecto de la realimentación de un amplificador de múltiples etapas, y el análisis del comportamiento de cascada de dichas etapas de transistores BJT.

I. INTRODUCCIÓN

El informe posee el siguiente formato: Primeramente, incluye un *Marco Teórico* que abarca las explicaciones y describe el comportamiento esperado. A continuación, se presenta el *Desarrollo experimental*, con la descripción del set-up y conexiones de la placa, junto con los resultados y mediciones correspondientes, seguido finalmente de una conclusión y comparación con las cuentas analíticas para cada uno de los pasos realizados.

II. MARCO TEÓRICO

II-A. Etapa amplificadora con transistor BJT con emisor común.

El circuito está compuesto por tres etapas de emisor común. A continuación se analizará la ganancia de una, y su capacidad de acoplarse según su impedancia de entrada y de salida.

En la *Figura 1* se presenta el diagrama circuital de una etapa individual:

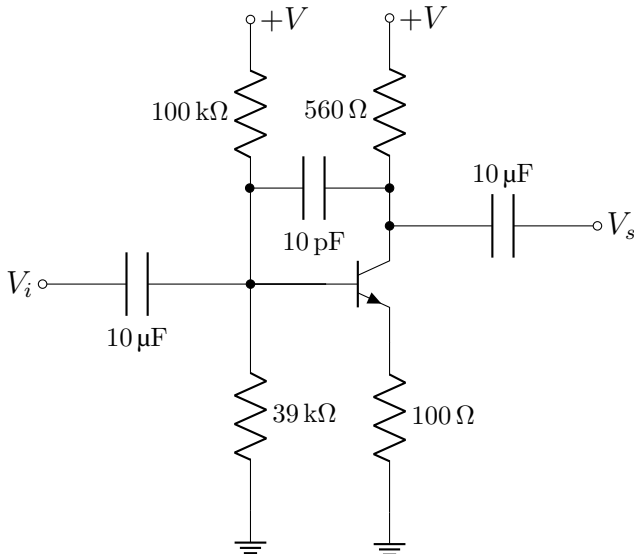


Fig. 1. Transistor NPN en configuración de Emisor Común.

II-A.1. Ganancia de Tensión A_v de una etapa individual (etapas 1 y 2): Del modelo de pequeña señal, y aproximando la corriente del Emisor como gmV_π , se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} V_o = -gmV_\pi R_C \\ V_\pi = V_i - V_{R_e} \implies V_i = V_\pi(gmR_e + 1) \end{cases} \quad (1)$$

Por lo que la ganancia $A_v = \frac{V_o}{V_i}$, considerando el producto $gmR_e \gg 1$, será:

$$A_{v1,2} = \frac{-gmR_c}{gmR_e + 1} \approx -\frac{R_c}{R_e} \quad (2)$$

Para el caso particular de estudio con valores $R_c = 560\Omega$ y $R_e = 100\Omega$, la ganancia de tensión de la etapa individual 1 y 2 es:

$$A_{v1,2} \approx -\frac{560\Omega}{100\Omega} \approx -5,6 \quad (3)$$

II-A.2. Impedancia de entrada Z_{in} :

$$Z_{in} = R_1 // R_2 = \frac{100k\Omega 39k\Omega}{100k\Omega + 39k\Omega} \approx 28k\Omega \quad (4)$$

II-A.3. Impedancia de salida Z_{out} :

$$Z_{out} = R_c = 560\Omega \quad (5)$$

II-A.4. Ganancia de Tensión A_v de la última etapa: La salida de la última etapa se ve cargada por un resistor de $1k\Omega$. La ganancia se obtiene de igual manera que las etapas anteriores, pero la carga será el resistor del colector R_c ahora en paralelo con el resistor de $1k\Omega$:

$$A_{v3} \approx -\frac{R_c // 1k\Omega}{R_e} \approx -3,58 \quad (6)$$

II-B. Amplificador Multietapa a Lazo Abierto.

El circuito a utilizar consta de tres etapas en cascada de transistores BJT NPN idénticas a las analizadas en la sección previa. Se analizará primeramente el Lazo Abierto.

En la figura a continuación se presenta un diagrama circuital de la placa utilizada:

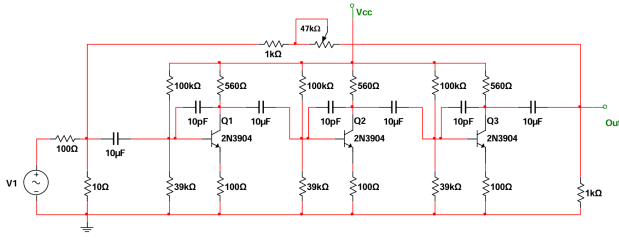


Fig. 2. Diagrama circuital de la placa utilizada.

II-B.1. Ganancia de Tensión Av_{LA} Multietapa a Lazo Abierto: En la sección previa se verificó que cada etapa individual presenta una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, de modo que puede considerarse que las tres etapas en cascada se acoplan tal que la ganancia total es el producto de las ganancias de cada etapa:

$$Av_{LA} \approx Av_1 Av_2 Av_3 \approx (-5,6)(-5,6)(-3,58) \quad (7)$$

$$Av_{LA} \approx -112,26 \quad (8)$$

II-B.2. Impedancia de entrada del Amplificador Multietapa a Lazo Abierto Z_{in} : La impedancia de entrada será la misma que la de la primer etapa individual. De 4:

$$Z_{in} \approx 28k\Omega \quad (9)$$

II-B.3. Impedancia de salida del Amplificador Multietapa a Lazo Abierto Z_{out} : La impedancia de salida será la misma que la de la última etapa individual. De 5:

$$Z_{out} = 560\Omega \quad (10)$$

II-B.4. Ganancia de Transimpedancia Az_{LA} Multietapa a Lazo Abierto: Para el análisis posterior sobre realimentación, resulta de interés convertir la ganancia Av_{LA} en una ganancia de Transimpedancia $Az_{LA} = \frac{V_o}{I_i}$. Esto se logra reescribiendo la tensión de entrada V_o en función de la corriente de entrada I_i , obteniendo:

$$Az_{LA} = Av_{LA} \cdot Z_{in} = (-112,26)28k\Omega \quad (11)$$

$$Az_{LA} = -3,14M \frac{V}{A} \quad (12)$$

II-C. Amplificador multietapa Realimentado.

La realimentación se da por una rama desde la entrada de la primer etapa a la salida de la última, compuesta por un bloque beta que contiene un resistor y un potenciómetro en serie, de manera tal que se pueda variar la resistencia del bloque Beta entre y $1k\Omega$ y $48k\Omega$.

Es por ello que el análisis a continuación describe ecuaciones pero no incluye los valores numéricos obtenidos, sino que se muestran posteriormente en la *Tabla I* en la sección II-D, para una mayor prolijidad.

II-C.1. Ganancia de Tensión $Az_{cargado}$: Para obtener la ganancia final del circuito realimentado, se precisa conocer primero la ganancia $A_{cargado}$, correspondiente al bloque A cargado con el bloque β .

La topología que presenta es Paralelo-Paralelo, que corresponde a un amplificador de Transimpedancia, diagramada en la siguiente figura:

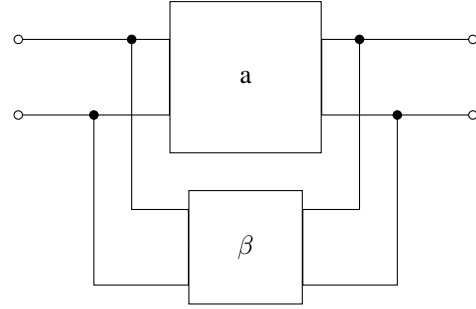


Fig. 3. Topología Paralelo-Paralelo correspondiente a un circuito amplificador de Transimpedancia.

Siendo el bloque Beta:

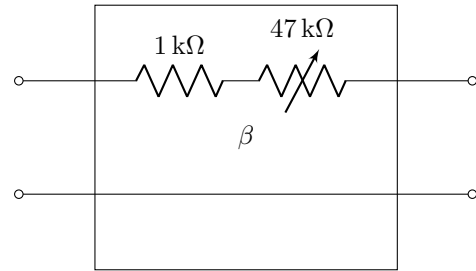


Fig. 4. Bloque beta de realimentación

Donde el bloque Beta posee los valores de transferencia de transadmitancia β , admitancia de entrada $y_{i\beta}$ y admitancia de salida $y_{o\beta}$ representados por los parámetros Y listados a continuación:

$$\beta = y_{12} = \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{U_1=0} = -\frac{1}{R_f}$$

$$y_{i\beta} = y_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0} = \frac{1}{R_f} \quad (13)$$

$$y_{o\beta} = y_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{U_1=0} = \frac{1}{R_f}$$

Con $R_f = 1k\Omega + R_p$ (R_p siendo la resistencia variable del potenciómetro).

Incluyendo y_{11}^{-1} y y_{22}^{-1} dentro del bloque A, se obtiene la ganancia de transimpedancia del bloque A cargado:

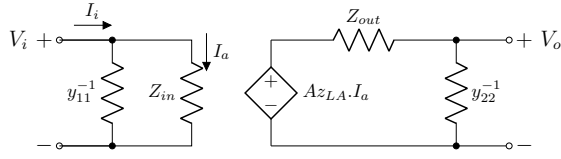


Fig. 5. Bloque A cargado.

$Az_{cargado} = \frac{V_o}{I_i}$ se deriva planteando el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} V_o = \frac{Az_{LA} I_a y_{22}^{-1}}{y_{22}^{-1} + Z_{out}} \\ I_a = \frac{I_i}{Z_{in}(y_{11} + Z_{in}^{-1})} \end{cases} \quad (14)$$

Resulta:

$$Az_{cargado} = \frac{V_o}{I_i} = \frac{Az_{LA}}{(1 + Z_{out} y_{22})(y_{11} Z_{in} + 1)} \quad (15)$$

II-C.2. Ganancia de Transimpedancia Az_r del circuito realimentado: Para obtener la ganancia de Tensión Av_r del circuito realimentado, nos valemos de la siguiente fórmula:

$$Az_r = \frac{Az_{cargado}}{1 + \beta Az_{cargado}} \quad (16)$$

Donde $Az_{cargado}$ corresponde a la ganancia del bloque A cargado con el bloque β , mientras que β es la transferencia $\frac{I_1}{V_2}$ del bloque de realimentación, ambas obtenidas en la sección anterior.

II-C.3. Impedancia de entrada Z_{in_r} del circuito realimentado: La impedancia de entrada (del bloque A cargado) disminuye al realimentar, por un factor de $1 + \beta Az_{cargado}$:

$$Z_{in_r} = \frac{y_{11}^{-1} Z_{in}}{y_{11}^{-1} + Z_{in}} \frac{1}{1 + \beta Az_{cargado}} \quad (17)$$

El termino en paralelo corresponde a la impedancia de entrada para el bloque A cargado, siendo Z_{in} la impedancia de entrada del mismo bloque pero sin cargar, y y_{11}^{-1} la impedancia de entrada del bloque Beta

II-C.4. Ganancia de Tensión Av_r del circuito realimentado: En el desarrollo del laboratorio se pretende medir ganancia de tensión del circuito completo. Es por ello que es preferible transformar la ganancia de transimpedancia Az_r a una ganancia de tensión $Av_r = \frac{V_o}{V_i}$:

$$I_i = \frac{V_i}{Z_{in_r}} \quad (18)$$

Reemplazando en $Az_r = \frac{V_o}{I_i}$:

$$Az_r = \frac{V_o}{V_i} Z_{in_r} = Av_r Z_{in_r} \quad (19)$$

$$\therefore Av_r = \frac{Az_r}{Z_{in_r}} \quad (20)$$

II-D. Valores extremos

Recordemos que la resistencia R_f de la rama de realimentación está compuesta por un potenciómetro, que permite fijar en la rama un valor de resistencia entre $1k\Omega$ y $48k\Omega$. A continuación se presentan en forma de tabla los valores numéricos de los parámetros obtenidos en esta sección, para las resistencias extremas de realimentación:

Parámetro	Ecuación	$R_f = 1k\Omega$	$R_f = 48k\Omega$
β	13	$-1m \frac{A}{V}$	$-20,83\mu \frac{A}{V}$
$y_{i\beta}$	13	$1mS$	$20,83\mu S$
$y_{o\beta}$	13	$1mS$	$20,83\mu S$
$Az_{cargado}$	15	$-69,4k \frac{V}{A}$	$-1,73M \frac{V}{A}$
Z_{in_r}	17	14Ω	316Ω
Az_r	16	$-985,8 \frac{V}{A}$	$-34,9k \frac{V}{A}$
Av_r	20	$-71,9$	$-110,5$
Av_{total}		$-3,9$	$-9,7$

TABLA I. Parámetros del amplificador, para casos extremos de R_f .

Donde Av_{total} es la ganancia que se medirá en el laboratorio, ya que considera el divisor de tensión de la entrada de la placa.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se describirán a continuación las mediciones hechas y los resultados obtenidos.

La placa consiste en un amplificador multietapa realimentado, como el estudiado en la sección del Marco Teórico.

Se propuso entonces medir dos factores: la ganancia de tensión realimentada; y el ancho de banda, ambos para los valores extremos de las resistencias de realimentación del bloque beta.

III-A. Conexiones y consideraciones para la medición

- Se administró una tensión continua de polarización de 12V,
- Se conectó un generador de funciones a la entrada, entre los terminales 'E' y tierra. La función suministrada será siempre una onda senoidal de amplitud 200mV,
- Se conectó un osciloscopio a la entrada y a la salida, quedando representadas siempre la entrada en color amarillo, y la salida en azul.

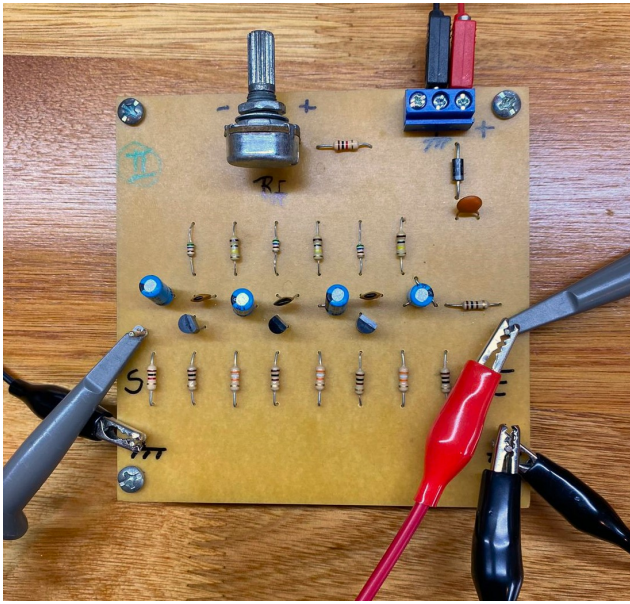


Fig. 6. Conexión final de los instrumentos a la placa

III-B. Ganancia de Tensión Realimentada Av_r

Se procedió entonces a la medición de la Ganancia de Tensión con el circuito realimentado, inyectando una señal senoidal de amplitud $200mV$ y frecuencia $10kHz$. La frecuencia elegida se consideró lo suficientemente baja como para no verse afectada por el polo dominante del circuito.

III-B.1. Potenciómetro en mínimo: Primeramente, se dispuso el potenciómetro en mínimo (0Ω), quedando el bloque Beta compuesto solo por la resistencia de $1k\Omega$. Para la entrada de $200mV$, se midió una salida de $950mV$, correspondiente a una ganancia $Av_r = -4,75$. Esto da un error relativo del $20,6\%$ comparado al valor teórico calculado.

III-B.2. Potenciómetro en máximo: A continuación, se subió el potenciómetro a su valor máximo ($47k\Omega$), quedando el bloque Beta como una resistencia de $48k\Omega$. Para la entrada de $200mV$, se midió una salida de $1,8V$, correspondiente a una ganancia $Av_r = -9$. Esto da un error relativo del $7,2\%$ comparado al valor teórico calculado.

	$R_f = 1k\Omega$ (mín.)	$R_f = 48k\Omega$ (máx.)
Entrada [mV]	200	200
Salida [mV]	950	1800
Av_r medida	-4,75	-9
Av_r teórica	-3,9	-9,7
Error Relativo	20,6 %	7,2 %

TABLA II. Mediciones de Ganancia

Las ganancias medidas se asemejan a lo esperado, pero igualmente el error obtenido del 20% para la primer medición es mayor a lo deseado.

III-C. Ancho de banda

Para estudiar el ancho de banda se realizó un barrido de frecuencia desde $10kHz$ hasta medir en la salida una atenuación de $3dB$.

III-C.1. Potenciómetro en mínimo: Para el potenciómetro en mínimo se obtuvo previamente una salida de $950mV$, por lo que su polo estará ubicado donde se produzca una atenuación de $3dB$, es decir, cuando su valor de salida sea $\frac{950mV}{\sqrt{2}} = 671,7mV$. Se realizó el barrido de frecuencia y se halló dicha atenuación a una frecuencia de $840kHz$.

III-C.2. Potenciómetro en máximo: Para el potenciómetro en máximo se obtuvo previamente una salida de $1,8V$, por lo que su polo estará ubicado donde se produzca una atenuación de $3dB$, es decir, cuando su valor de salida sea $\frac{1,8V}{\sqrt{2}} = 1,27V$. Se realizó el barrido de frecuencia y se halló dicha atenuación a una frecuencia de $1,57MHz$.

Las mediciones de frecuencia no son las esperadas, pues el producto ganancia x ancho de banda no se mantuvo.

Resistencia Bloque Beta	Frecuencia de corte
$1k\Omega$ (mín.)	840kHz
$48k\Omega$ (máx.)	1,57MHz

TABLA III. Frecuencias de corte ($3dB$)

IV. CONCLUSIONES

Debido a varias complicaciones durante el laboratorio, las imágenes tomadas mostraban mediciones mal hechas, por lo que no se incluyeron en el informe. Además, no se logró ubicar los polos de manera satisfactoria, y tampoco se obtuvieron los valores teóricos esperados para las ganancias. No logramos estimar el porqué de las diferencias entre los valores esperados y los medidos.

REFERENCES

- [1] J. Millman and A. Grabel, "Microelectrónica," McGraw-Hill, New York, 6ta edición, 1993.
- [2] P. R. Gray and R. G. Meyer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits," John Wiley Sons, New York, 4th edition, 2001