



# Trabajo Práctico N°4

## Análisis y medición de un amplificador Emisor Común

### VOX TREBLE BOOSTER

#### Objetivos del trabajo

- Analizar satisfactoriamente el comportamiento de un circuito emisor común que forma parte de un módulo amplificador de audio real.
- Implementar el circuito con componentes comerciales.
- Familiarizarse con nuevos instrumentos de medición como generadores de funciones y osciloscopios.
- Validar el funcionamiento del circuito mediante simulaciones de *Spice* y mediciones experimentales.

#### Introducción

Desde el momento en que un guitarrista toca la cuerda de su guitarra eléctrica, hasta que su audiencia escucha el sonido generado, múltiples cambios se han producido hasta la generación de la señal acústica que llega a nuestros oídos.

Empezando por la propia guitarra donde el movimiento mecánico de la cuerda es traducido a una señal eléctrica a la salida de sus micrófonos (transductor), y terminando por el amplificador, cuyo último fin es transformar la señal eléctrica en la señal acústica que escuchamos a través de su parlante (transductor), en el medio la señal eléctrica puede sufrir una enormidad de modificaciones.

La figura 1a muestra un posible camino de señal desde una guitarra hasta un amplificador, donde diferentes módulos realizan alteraciones a la señal eléctrica, modificando su amplitud (**Boost**), su tono (**EQ**), deformando la señal (**Distortion, Fuzz**), o modulando la señal (**Reverb, Chorus, Delay**). Comúnmente, a esta cadena de módulos se los denomina “efectos”. La modificación de la señal puede ser tanto de manera analógica como digital, y el camino no es necesariamente lineal y puede ser tan complejo como el músico lo desee. Como ejemplo, se muestra en la figura 1b la disposición de los diferentes módulos usados por el famoso guitarrista Sir Brian H. May, PhD, por el año 1994. Resulta de interés para este trabajo práctico destacar en ambas figuras la existencia de un módulo en particular: **Boost** en la figura 1a y **Treble Booster** en la figura 1b. La palabra *Boost* significa “aumentar”, por lo que la función de esos módulos es amplificar la señal.

Los *Boosters* podría decirse que son los módulos más sencillos, ya que sólo buscan amplificar la señal sin deformarla, y existen distintos modelos de diferentes marcas que realizan esta función. La empresa VOX en los años 60's ha desarrollado distintos módulos con diferentes cualidades como se muestra en la figura 2a. Se trata de una pequeña caja donde a la entrada se conecta la guitarra y la salida se conecta a un amplificador o al inicio de la cadena de efectos. De esos cuatro *Boosters*, nos interesa el V806 TREBLE BOOSTER, cuyo circuito esquemático se muestra en la figura 2b. La función del *Treble Booster* es amplificar en mayor medida las frecuencias más altas del rango audible, consiguiendo no solo aumentar la señal, sino también incorporar un brillo distintivo al sonido.

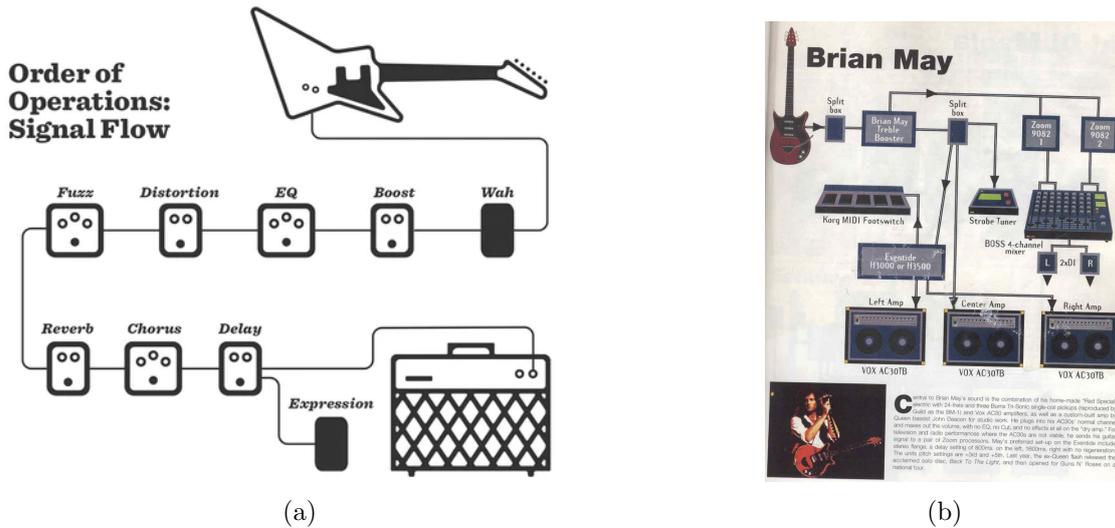


Figura 1: (a) Diagrama simplificado de un ejemplo de conexión de “efectos” entre una guitarra eléctrica y su amplificador. Puede verse que el segundo módulo de la cadena es un **Boost** (fuente: www.russomusic.com). (b) *Set-up* de efectos para conciertos del guitarrista Sir Brian H. May, PhD. Puede verse que el segundo módulo es un **Treble Booster** (fuente: Guitar Shop Magazine [1994]).

Si analizamos el circuito de la figura 2b, veremos que el VOX V806 TREBLE BOOSTER no es ni más ni menos que un emisor común. En este contexto, el objetivo de este trabajo práctico es lograr analizar un circuito similar a aquel del VOX V806 TREBLE BOOSTER, implementarlo utilizando un transistor TBJ conocido, y lograr validar el funcionamiento del circuito a través de simulaciones y mediciones experimentales.

## Enunciado

En este trabajo práctico se analizará el circuito de la figura 3 que debiera cumplir la función de un *Treble Booster*<sup>1</sup>. Para describir el funcionamiento del circuito como un amplificador, se deben hallar los parámetros del modelo macroscópico de amplificador de tensión ( $A_{vo}$ ;  $R_{IN}$ ;  $R_{OUT}$ ) y también la ganancia en funcionamiento ( $A_{vs}$ ). Los cálculos deberán validarse mediante simulaciones en *Spice*, y también de forma experimental implementando el circuito y realizando mediciones en el laboratorio.

En el circuito esquemático de la figura pueden identificarse tres módulos:

1. **Treble Booster:** Es el circuito amplificador. Se trata de una topología Emisor Común que debe implementarse con el transistor bipolar de juntura NPN **2N2222**. A diferencia de los circuitos estudiados hasta el momento, se deben remarcar las siguientes cuestiones a tener en cuenta:
  - El circuito presenta una resistencia de emisor ( $R_E$ ) con un capacitor de desacople en paralelo ( $C_e$ ). Por la presencia de  $C_e$ ,  $R_E$  solo será relevante para la polarización, ya que para el análisis de pequeña señal a frecuencias medias  $C_e$  se reemplaza por un cortocircuito, conectando el emisor a tierra.
  - La salida del amplificador no es por el terminal de colector, sino por el punto medio entre las dos resistencias de colector ( $R_{C1}$  y  $R_{C2}$ ). Estas dos resistencias funcionan como un

<sup>1</sup>Es importante notar que si bien la topología de los circuitos de las figuras 2b y 3 son iguales, existen diferencias entre los valores de los componentes de cada uno de los circuitos.

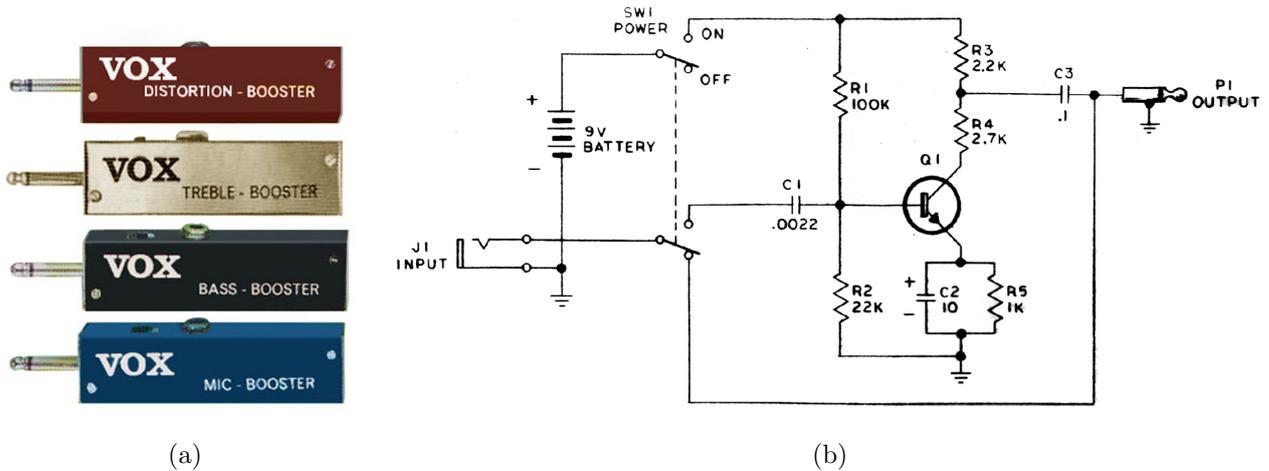


Figura 2: (a) Familia de **Boosters** de la marca VOX (1964-1968). (b) Circuito esquemático del VOX V806 TREBLE BOOSTER (fuente: www.voxshowroom.com)

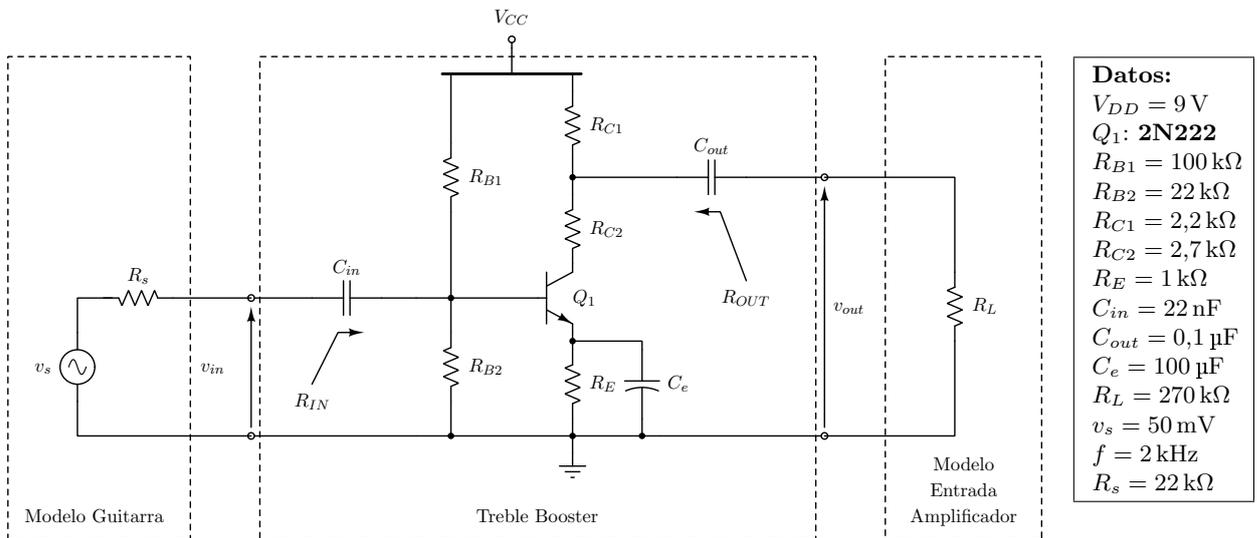


Figura 3: Circuito esquemático del amplificador a analizar.

*control de ganancia.* Las mismas podrían reemplazarse por un potenciómetro con punto medio y así variar la ganancia según la posición de dicho control.

2. **Guitarra:** Es el elemento que se conecta a la entrada del amplificador. Existen distintas tecnologías de micrófonos para que la guitarra genere la señal de tensión representada por  $v_s$ . Los más usuales son bobinados con núcleo ferromagnético que se conectan a un control de volumen implementado con un potenciómetro. Estos micrófonos generan una señal cuyo valor pico está en el orden de los ciento de mV, y los potenciómetros usados como control de volumen varían según el modelo de guitarra, y su valor nominal puede ser tanto de 10 k $\Omega$  como 250 k $\Omega$ . Teniendo estos valores en consideración, el modelo equivalente elegido para la guitarra presenta un valor de señal pico  $v_s = 50\text{ mV}$  y una resistencia serie  $R_s = 22\text{ k}\Omega$ . Considerar como frecuencia de trabajo  $f = 2\text{ kHz}$ .
3. **Carga:** El elemento que se conecta a la salida del *Treble Booster* puede ser la entrada del siguiente módulo de modificación de la señal (“otro efecto”), o bien la entrada del “amplificador



de guitarra”, es decir la entrada del amplificador que le entregará energía al parlante que genera el sonido. Estos elementos se espera que tengan una resistencia de entrada equivalente muy elevada, pero la realidad es que su valor es muy variable y típicamente se encuentra entre  $100\text{ k}\Omega$  y  $1\text{ M}\Omega$ . Para este trabajo se determinó que la carga presentada al amplificador se  $R_L = 270\text{ k}\Omega$ .

La alimentación de este tipo de circuitos suele ser con pilas alcalinas de 9 V.

## Parte I: Análisis del circuito amplificador

En la primera parte de este trabajo, se debe analizar el circuito de la figura 3 y calcular sus parámetros como amplificador de tensión. Para ello:

1. Determinar cuál es el circuito de polarización y calcular todas las tensiones y corrientes de reposo.
2. Calcular el modelo de pequeña señal del transistor bipolar de juntura.
3. Determinar el circuito equivalente de pequeña señal para el **Treble Booster**.
4. A partir del circuito de pequeña señal, calcular los parámetros del amplificador:  $A_{vo}$ ;  $R_{IN}$  y  $R_{OUT}$ .
5. Calcular la ganancia del amplificador *en funcionamiento* ( $A_{vs}$ ), es decir, con la fuente de señal conectada a la entrada y la carga conectada a la salida.
6. Calcular la señal de salida del amplificador *en funcionamiento*.
7. Considerando que el conjunto  $\{R_{C1}; R_{C2}\}$  podría reemplazarse con un potenciómetro de valor nominal  $R_C = R_{C1} + R_{C2} = 4,9\text{ k}\Omega$ , calcular nuevamente la ganancia que se obtendría si toda la resistencia estuviera conectada entre la salida y la alimentación, dejando la salida conectada directamente al colector del TBJ. En esta situación, calcular la máxima señal posible sin distorsión.

## Parte II: Simulación del circuito

Simular mediante *Spice* el circuito. Mediante la simulación se deben obtener los mismos parámetros que fueron calculados:

1. **Tensiones y corrientes de polarización:** Simular el puto de operación y obtener todas las tensiones y corrientes de reposo.
2. **Ganancia en funcionamiento:** Con la carga y la fuente de señal conectadas, se debe verificar que la señal a la entrada y la salida sean las esperadas. Calcular  $A_{vs}$  a partir de las señales  $v_{out}$  y  $v_s$ .

$$A_{vs} = \frac{v_{out}}{v_s}$$

3. **Ganancia a circuito abierto:** Desconectar la carga ( $R_L$ ) y calcular la ganancia del amplificador a circuito abierto ( $A_{vo}$ ) al ser excitado por una fuente ideal con  $v_s = 1\text{ mV}$  (sin  $R_s$ ). A partir de la señal a la salida en vacío ( $v_{out,o}$ ) y la señal  $v_s$  calcular:

$$A_{vo} = \frac{v_{out,o}}{v_{in}}$$



4. **Resistencia de entrada:** Obtener el valor de  $R_{IN}$  en la simulación a partir de la variación de la tensión de entrada del amplificador al ser excitado con una fuente ideal con resistencia serie  $R_s \simeq R_{IN}$ . El valor de tensión de la fuente ( $v_s$ ) debe ser tal que el amplificador funcione correctamente. Observando la señal de entrada ( $v_{in}$ ):

$$R_{IN} = \frac{v_s}{i_{in}} = \frac{v_s}{\frac{v_s - v_{in}}{R_s}} = \frac{v_s}{v_s - v_{in}} R_s$$

5. **Resistencia de salida:** Obtener el valor de  $R_{OUT}$  en la simulación a partir de la variación de la tensión de salida ( $v_{out,x}$ ) del amplificador al cargarlo con una resistencia de prueba  $R_x \simeq R_{OUT}$ . A la entrada se debe conectar una fuente ideal con  $v_s = 1$  mV, igual que para el cálculo de  $A_{vo}$ . Reutilizando la señal  $v_{out,o}$ , se puede calcular:

$$R_{OUT} = \frac{v_{out,o} - v_{out,x}}{i_{out}} = \frac{v_{out,o} - v_{out,x}}{\frac{v_{out,x}}{R_x}} = \frac{v_{out,o} - v_{out,x}}{v_{out,x}} R_x$$

6. **Ganancia con salida en colector:** Modificar el circuito para que la salida sea por colector. Con la carga y la fuente de señal conectadas, calcular  $A_{vs}$  a partir de las señales  $v_{out}$  y  $v_s$ :

$$A_{vs} = \frac{v_{out}}{v_s}$$

### Parte III: Medición del circuito

Armar en un *protoboard* el amplificador y obtener en forma experimental todos los ítems solicitados en el punto (polarización, ganancia, resistencia de entrada y salida, y señal de tensión de salida).

#### Lista de materiales

- Transistor NPN **2N2222** utilizado en el trabajo práctico N°2.
- Resistencias: 100  $\Omega$ ; 1 k $\Omega$ ; 2  $\times$  2,2 k $\Omega$ ; 2,7 k $\Omega$ ; 3  $\times$  22 k $\Omega$ ; 2  $\times$  100 k $\Omega$ ; 270 k $\Omega$ . Todas las resistencias deben ser al 5 %.
- Capacitor electrolítico: 100  $\mu$ F.
- Capacitor de mica: 22 nF. En caso de no encontrar de mica, puede reemplazarse por uno cerámico.
- Capacitor cerámico: 0,1  $\mu$ F.
- Protoboard.
- Cables de conexión.
- De ser posible, traer 2 multímetros por grupo.
- **[Optativo]** Regulador de tensión **LM7809** y los capacitores sugeridos en su hoja de datos.

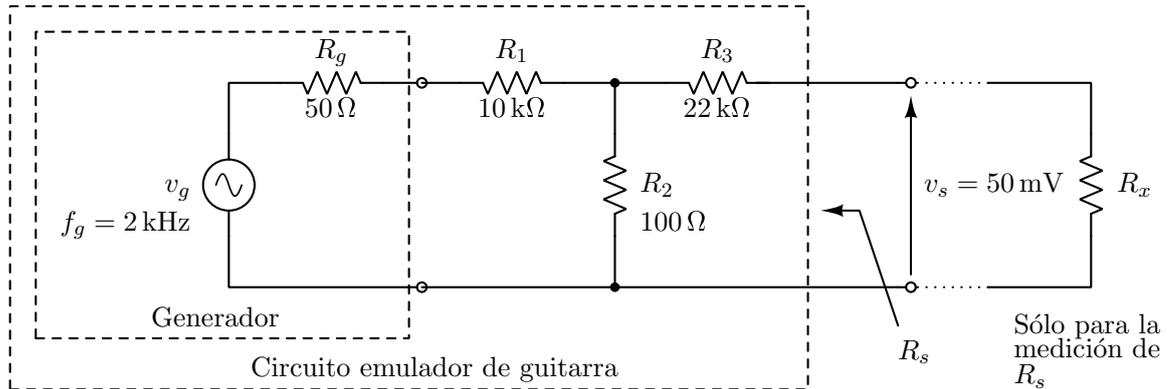


Figura 4: Circuito para emular la señal a la entrada del amplificador

### Emulación de la fuente de señal y la carga

Debido a las limitaciones del instrumental del laboratorio, no es posible obtener una señal de 50 mV con resistencia serie de 22 kΩ directamente con el generador de funciones, por lo que el circuito equivalente del generador de señal deberá ser emulado mediante los circuito de la Figura 4.

Al hacer el equivalente de Thevenin del circuito se obtiene:

$$v_s = v_g \frac{R_2}{R_g + R_1 + R_2} \simeq 1\% v_g$$

$$R_s = R_3 + ((R_g + R_1) // R_2) \simeq 22 \text{ k}\Omega$$

Se debe fijar la tensión del generador de funciones de manera de obtener  $v_s = 50 \text{ mV}$  (y no se debe volver a modificar para ninguna medición).

Para verificar el modelo equivalente se deben realizar las siguientes mediciones:

1. Medir la tensión pico  $v_s$  en vacío, es decir sin conectar la resistencia  $R_x$ .
2. Medir la tensión pico  $v_s$  al conectar una resistencia  $R_x = 22 \text{ k}\Omega$ .

A partir de estas dos mediciones obtener el valor experimental de la resistencia de salida  $R_s$  del “circuito de emulación de guitarra”. Consignar en el informe el resultado obtenido.

Para emular la carga que tendrá el amplificador, simplemente se debe conectar una resistencia comercial  $R_L = 270 \text{ k}\Omega$  al 5%.

### Mediciones sobre el circuito amplificador

Sobre el circuito se deben medir los mismos parámetros que fueron calculados y simulados.

1. **Tensiones y corrientes de polarización:** Medir con multímetro las tensiones y corrientes de polarización del transistor ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $V_{BE}$  y  $V_{CE}$ ) y otras tensiones relevantes del circuito ( $V_{OUT}$  y  $V_E$ ).
2. **Ganancia en funcionamiento:** Al conectar la carga y la fuente de señal, se debe verificar el correcto funcionamiento del amplificador. Una vez comprobado el funcionamiento, medir con el osciloscopio la señal en la carga ( $v_{out}$ ) y la señal en el nodo común a  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  en el circuito emulador de guitarra ( $\approx v_s$ ). Tomando el valor pico de cada señal se puede calcular:

$$A_{vs} = \frac{v_{out}}{v_s}$$



3. **Ganancia a circuito abierto:** Desconectar la carga ( $R_L$ ) y medir con el osciloscopio la señal a la salida en vacío ( $v_{out,o}$ ) y la señal en el nodo de base ( $v_{in}$ ). Tomando el valor pico de cada señal se puede calcular:

$$A_{vo} = \frac{v_{out,o}}{v_{in}}$$

4. **Resistencia de entrada:** medir con el osciloscopio la señal en el nodo común a  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  en el circuito emulador de guitarra ( $\approx v_s$ ) y la señal en el nodo de base ( $v_{in}$ ). Tomando el valor pico de estas tensiones, y conociendo el valor de la resistencia  $R_3$  en la Fig. 4, se puede calcular:

$$R_{IN} = \frac{v_s}{i_{in}} = \frac{v_s}{\frac{v_s - v_{in}}{R_3}} = \frac{v_s}{v_s - v_{in}} R_3$$

5. **Resistencia de salida:** Desconectar la carga ( $R_L$ ) y medir con el osciloscopio la señal a la salida en vacío ( $v_{out,o}$ ). Reemplazar la carga por una resistencia  $R_x = R_{C1} = 2,2 \text{ k}\Omega$  y volver a medir con el osciloscopio la señal a la salida ( $v_{out,x}$ ). Tomando el valor pico de estas tensiones, y conociendo el valor de la resistencia  $R_x$ , se puede calcular:

$$R_{OUT} = \frac{v_{out,o} - v_{out,x}}{i_{out}} = \frac{v_{out,o} - v_{out,x}}{\frac{v_{out,x}}{R_x}} = \frac{v_{out,o} - v_{out,x}}{v_{out,x}} R_x$$

6. **Verificación del funcionamiento como *Treble Booster*:** Con la carga conectada, variar la frecuencia del generador de funciones a los siguientes valores  $f = \{20 \text{ Hz}; 200 \text{ Hz}; 20 \text{ kHz}\}$ . Para cada valor de frecuencia, medir con el osciloscopio la señal en la carga ( $v_{out}$ ) y la señal en el nodo común a  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  en el circuito emulador de guitarra ( $\approx v_s$ ). Tomando el valor pico de cada señal se puede calcular:

$$A_{vs}(f) = \frac{v_{out}(f)}{v_s}$$

7. **Ganancia con salida en colector:** Modificar el circuito para que la salida sea por colector. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, medir con el osciloscopio la señal en la carga ( $v_{out}$ ) y la señal en el nodo común a  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  en el circuito emulador de guitarra ( $\approx v_s$ ). Tomando el valor pico de cada señal se puede calcular:

$$A_{vs} = \frac{v_{out}}{v_s}$$

### Sugerencias para realizar las mediciones

1. Para obtener la tensión de alimentación  $V_{CC} = 9 \text{ V}$ , se pueden utilizar las fuentes de tensión del laboratorio. De manera **optativa**, puede utilizarse un regulador de tensión como el **LM7809**.
2. Medir la tensión de alimentación antes de realizar las mediciones y asegurarse de no volver a cambiarla. Puede volver a verificar el valor de la misma antes de cada medición.
3. Luego, verificar el circuito emulador de guitarra como se indicó en la sección *Emulación de la fuente de señal y la carga*.
4. Al armar el circuito intentar que todas las conexiones a tierra se encuentren **próximamente** para evitar resistencias parásitas entre el terminal de emisor y tierra que pueden afectar el comportamiento del amplificador. Las pistas de interconexión del protoboard suelen estar dañadas por lo que aumentan su resistencia. **Evitar usar líneas de gran extensión como nodo común a tierra.**



5. Antes de conectar la señal de entrada, medir la polarización del transistor ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $V_{BE}$  y  $V_{CE}$ ), para poder verificar que el mismo está correctamente polarizado. Recién cuando se verifique la polarización, comience con las mediciones de señales temporales.
6. Medir con el osciloscopio la tensión del emisor antes de realizar las siguientes mediciones (se debe observar un valor menor a 1 mV).
7. Realice las mediciones de las señales temporales solicitadas.
8. Cuando se verifica que el circuito funciona correctamente, el mismo debe ser verificado por alguno de los docentes del curso. **Esto es condición necesaria para la aprobación del trabajo práctico.**

**IMPORTANTE:** el banco experimental a utilizar sólo dispondrá de una fuente de tensión variable, un amperímetro, un voltímetro, un generador de funciones y un osciloscopio de dos canales. El grupo es responsable de traer los transistores, resistores, capacitores, etc. que vaya a utilizar en las mediciones.

### Contenidos adicionales optativos

Pueden agregarse contenidos adicionales que resulten de interés al grupo. Algunas sugerencias son:

- Simular la respuesta del circuito a distintas frecuencias. Para esto se pueden hacer distintas simulaciones temporales a distintas frecuencias y calcular la ganancia, o bien realizar un simulación del tipo **AC Analysis**.
- Analizar y comparar la distorsión armónica de las señales de entrada y salida del amplificador. Emplear para ello la función **FFT** del “Math Menu” del osciloscopio digital para medir experimentalmente la distorsión armónica presente en:
  - La señal de salida del circuito emulador de fotodiodo sin que éste esté conectado al amplificador.
  - La señal de salida del circuito emulador de fotodiodo estando este conectado al amplificador.
  - La señal de salida del amplificador.

Comparar estos resultados con los obtenidos en *Spice* mediante la función **FFT**.

### Requisitos del informe

- Seguir las pautas del *modelo de informe*.
- **Todo resultado presentado en el informe debe estar analizado. Las comparaciones deben ser realizadas cuantitativamente.**
- Explicar todas las suposiciones realizadas y justificarlas.
- Se deben incluir como mínimo las siguientes figuras:
  - Simulaciones
    1. Presentar los circuitos esquemáticos utilizado para la obtención de cada uno de los parámetros, indicando el tipo de simulación, y las señales observadas en cada caso.



2. Un gráfico temporal de las señales  $v_s$ ,  $v_{in}$  y  $v_{out}$  que pongan en evidencia el correcto funcionamiento del circuito.
  3. Gráficos temporales de las señales observadas para el cálculo de los distintos parámetros. Se debe presentar un gráfico por cada uno de estos parámetros:  $A_{vs}$ ;  $A_{vo}$ ;  $R_{IN}$ ;  $R_{OUT}$ ;  $A_{vs}$  con salida en colector.
- Mediciones
    1. Presentar los circuitos esquemáticos de los bancos de medición empleados, indicando no sólo la conexión del transistor, fuentes de tensión y resistencias, sino también de los instrumentos empleados.
    2. Gráficos temporales de las señales medidas para el cálculo de los distintos parámetros. Se debe presentar un gráfico por cada uno de estos parámetros: Verificación de  $R_s$ ;  $A_{vs}$ ;  $A_{vo}$ ;  $R_{IN}$ ;  $R_{OUT}$ ;  $A_{vs}$  con salida en colector.
    3. Un gráfico de la variación de la ganancia  $A_{vs}$  en función de la frecuencia.
  - Tabla comparativa con los valores de polarización obtenidos de forma teórica, por simulación y por medición.
  - Tabla comparativa con los parámetros del amplificador obtenidos de forma teórica, por simulación y por medición.