

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA E INFORMÁTICA  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MASSACHUSETTS**  
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02139

6.101 Práctica introductoria de electrónica analógica  
Práctica 5

## TRABAJO DE LECTURA

Horowitz y Hill: *The Art of Electronics (El arte de la electrónica)*, págs. 91-94, págs. 98-101, pág. 286-288  
Neamen: págs. 499-502, págs. 484 [8.3.2] –491 arriba.

**Objetivo:** construir un amplificador pequeño de potencia de audio y, ¡tocar música alta para tomar represalias contra los estudiantes del curso 6.002! Estudiar el amplificador diferencial, el corazón de la mayoría de los amplificadores. Jugar con el chip del temporizador 555 que se encuentra por todas partes.

**NOTA:** el informe de la práctica debería mostrar claramente las configuraciones del circuito, los valores del elemento y los cálculos, además de los resultados de las mediciones. El examinador no perderá el tiempo descifrando presentaciones desordenadas, tratando de averiguar qué es lo que hizo en la práctica. **NOTA: EN ESTA PRÁCTICA ES NECESARIO REALIZAR UNA SESIÓN DE COMPROBACIÓN PARA EL EXPERIMENTO 1. Regístrese para las sesiones de comprobación en la lista que hay en la puerta del despacho del TA.**

### Experimento 1: AMPLIFICADOR PEQUEÑO DE POTENCIA CON RETROALIMENTACIÓN LOCAL Y TOTAL

**NOTA: no utilice los terminales de fuente de alimentación variable de su kit para este experimento. La corriente de salida de estos terminales se limita a 500 mA, cantidad demasiado baja para este amplificador. Utilice los terminales fijos de +/- 12 voltios que están junto al interruptor de potencia. Estos terminales pueden producir un amperio antes de comenzar a limitar la corriente.**

En este experimento, construirá un amplificador con acoplamiento DC y examinará su funcionamiento. En la Figura 1 se facilita el esquema. Se pretende que este amplificador tenga una ganancia de 26 dB con una distorsión menor que la del amplificador del experimento 5 de la práctica 4.

- Observe que la función de las resistencias  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  y de los diodos 1N914 es polarizar ligeramente los transistores de salida para eliminar la distorsión de cruce (¿cómo funciona esto?). [Utilice resistencias de 4,7 kW 1/4 vatios para  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$ , al menos para empezar]. Para asegurar que no sufren daño alguno los transistores  $Q_1$  y  $Q_2$ , cerciórese de que la potencia máxima que tendrán que disipar se limite a 1,0 vatios. Observe que este cálculo implicará que tanto la potencia DC disipada debido a la corriente estática, como cada transistor, vean una mitad de la onda sinusoidal de salida. ¿Cuál es el valor menor de la resistencia de carga  $R_L$  que se puede conectar a la salida del amplificador para asegurar que no se sobrepase este límite de disipación de potencia?
- Observe también que el requisito para que se de impedancia de entrada relativamente alta puede ser incompatible con el requisito de tensión offset DC baja. Explique esta contradicción en su informe. Puede utilizar tanto la configuración sin invertir como la invertida para el amplificador operacional. Además, puede elegir el amplificador operacional que desea utilizar de su kit o de la ventanilla de la sala de instrumentos.

¿Cuál es la función de las resistencias  $R_E$  del emisor? Explique por qué la impedancia de entrada del amplificador no es de al menos  $5,6 \Omega$ . [Estas resistencias se encuentran en su kit de piezas y tienen un tamaño de 1/2 vatio].

1. Diseñe su amplificador para que cumpla las especificaciones siguientes:

- Corte de baja frecuencia [punto  $-3\text{dB}] \leq 10 \text{ Hz}$ .

[Para sacar partido a la ilimitada respuesta en frecuencia de los mandos por corriente (CD)].

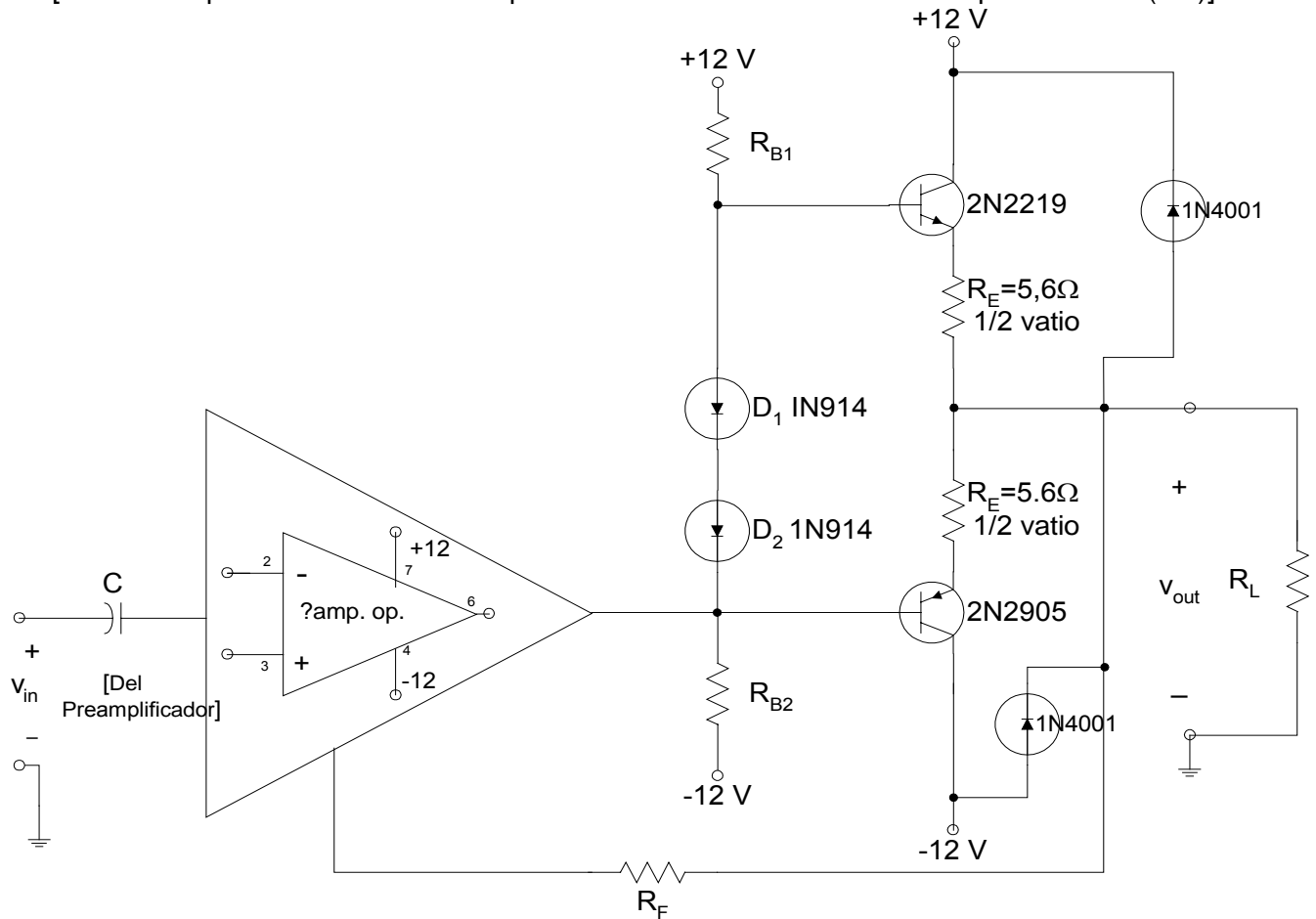


Figura 1. Circuito de amplificador para el experimento 1.

- Impedancia de entrada (vista por la salida del pre-amplificador)  $\geq 15 \text{ k}\Omega$ .  
Para evitar la carga de pre-amplificadores con impedancia de fuente relativamente alta].
- Tensión offset de etapa de salida  $< 50 \text{ mV}$ .  
[Para evitar que DC recaliente la bobina del altavoz y que el cono se desplace de su posición central entre las partes del polo magnético].
- Corte de punto de alta frecuencia  $[-3\text{dB}] = 25 \text{ kHz}$  **mínimo**.  
[Para sacar partido a la ilimitada respuesta en alta frecuencia del funcionamiento de DAT a una velocidad de muestreo de 48 kHz; también algunas tarjetas de sonido de gama alta].
- Ganancia de tensión de frecuencia media [1000 Hz] de +26 dB.
- La corriente estática de polarización de la etapa de salida de entre 1 y 10 mA [operación de clase AB o B]. [Mida la caída de tensión DC a través de una o de las dos resistencias de emisor]. Como le hemos facilitado los valores iniciales de polarización de la resistencia, no hay mucho que diseñar. Sin embargo, debería medir la corriente de polarización en las etapas de salida para asegurarse de que es inferior a 10 mA. Las variaciones del dispositivo de salida  $\beta_F$ , afectarán al valor de la corriente de polarización y será difícil conseguir una corriente estable de polarización si el valor de  $\beta_F$  de los dos dispositivos de salida no es aproximadamente el mismo. Si la corriente de polarización de su dispositivo de salida es mayor que 10 mA sin entrada de señal, desconecte inmediatamente el suministro de

+/- 12 voltios. Aumente el valor de  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$  al mismo valor estándar superior y vuelva a comprobar la polarización de salida. Siga aumentando el valor de este par de resistencias hasta que la corriente de polarización descienda a los límites que se proporcionaron anteriormente. ¿En qué medida controla este cambio de valor de las dos resistencias la corriente de polarización de la etapa de salida? [Nota: también es posible aumentar estas dos resistencias hasta el punto en el que no hay suficiente suministro de corriente de polarización a la base de uno de los transistores de salida, especialmente si tiene un valor bajo de  $\beta$ . Sería de ayuda que sus dispositivos de salida tuviesen valores  $\beta_F$  similares. Desde el punto de vista de AC, contar con valores grandes para estas dos resistencias puede provocar un *clipping* en la mitad de un ciclo, debido a que no se suministra suficiente corriente de base AC a través de estas resistencias en oscilaciones de gran señal. Es más probable que esto ocurra cuando los valores de  $\beta_F$  o  $\beta_O$  de los dos dispositivos de salida son diferentes]. El valor de la corriente de polarización DC es muy sensible a la temperatura y será superior una vez haya calentado los dispositivos de salida aumentando una señal AC. *Espere a que se enfríen los dispositivos antes de medir la corriente de polarización.*

Mantener la polarización DC baja evita la pérdida de potencia durante los periodos sin señal, además del calentamiento de los dispositivos de salida durante los mismos. Este diseño podría ser portátil y funcionar con pilas, si la corriente fuese lo suficientemente baja.

- Oscilación de tensión de la etapa de salida =  $20 V_{p-p}$  **mínimo** en una carga resistiva de  $100 \Omega$ . [Cuanto mayor sea la oscilación, mayor será la potencia de salida y más alta podrá sonar la música sin ninguna distorsión de clipping. Por consiguiente, seleccione sus componentes de forma inteligente]. [Su kit del curso contiene una resistencia de carga de  $100 k\Omega$ , del 5% y de 2 vatios para todas las mediciones que se realicen en este amplificador].
- Velocidad de subida: no hay una subida permisible que sea visible dentro del margen de frecuencia de 10 Hz a 20 kHz a salida completa en  $100 \Omega$ .

2. Construya el amplificador que ha diseñado y verifique su funcionamiento con las mediciones adecuadas. **AVISO: las cápsulas metálicas de los dispositivos de salida están conectadas al colector que, a su vez, está conectado a  $V_{CC}$  o  $V_{EE}$ . Tenga cuidado de no tocar los cables de otras partes de estas cápsulas.** Las mediciones deberían incluir diagramas de respuesta en frecuencia [únicamente la amplitud de Bode] para los puntos -3dB de alta y baja frecuencia, las mediciones de tensión offset y las de velocidad de subida. Además, debería valorar la resistencia de salida midiendo la tensión  $V_{out}$  del circuito abierto y de la tensión cargada  $V_{out}$ . Igualmente con la resistencia de entrada: utilice una resistencia de fuente lo suficientemente alta como para realizar un divisor de tensión en la entrada cuando esté conectada en serie con el generador de funciones. Las mediciones de las resistencias de entrada y de salida deberían realizarse con una entrada de onda sinusoidal de 1Hz. Las mediciones de respuesta en frecuencia deberían referirse siempre a 1 kHz en trabajo de audio.

Para medir la resistencia de entrada, podría colocar un potenciómetro en serie con la entrada y, a continuación, medir la tensión de la señal AC en la entrada mientras gira el potenciómetro hasta que la tensión de entrada descienda de entrada máxima [el potenciómetro se ha bajado....resistencia 0] a -6dB. En este punto, la resistencia del potenciómetro será la misma que la resistencia de entrada.

[La impedancia de salida es muy baja, por lo que utilizaremos el DMM para comparar las tensiones de salida cargadas y sin cargar. El DMM se debe utilizar para todas las mediciones en las que la respuesta en frecuencia lo permita, ya que únicamente es bueno para una precisión de aproximadamente el 5-10%.

Será necesario que cargue la salida con una resistencia muy pequeña para poder ver algún cambio en la tensión de salida entre el circuito abierto [sin cargar] y la tensión cargada de salida. Además, para utilizar una resistencia de carga baja, debe reducir la señal de entrada para mantener baja la disipación en los dispositivos de salida. Es posible que sólo pueda facilitar alrededor de 1 V RMS a la salida antes de que el valor bajo de la resistencia de carga o las salidas experimenten un recalentamiento. De todas formas, la idea es medir las tensiones de salida de los circuitos abierto y cerrado a 1000 Hz y, a continuación, poder calcular la impedancia

de fuente conociendo el valor de la resistencia de carga. Es un número muy pequeño.

- Amplifique las ondas triangulares de 1 y 10 kHz y observe que se da muy poca distorsión en comparación con el amplificador que construyó en el experimento 5 de la práctica 4. ¿Cómo se explica esto?
- Amplifique las ondas cuadradas de 10 Hz, 1 kHz y 10 kHz y dibuje las formas de onda de salida. ¿Cómo explica las diferencias que observa entre las tensiones de salida y de entrada?

Cambie la conexión de retroalimentación de la salida de la etapa de potencia de simetría complementaria a la de la salida del amplificador operacional. [¿Qué característica del seguidor de emisor nos permite hacer esto?]. Repita las dos series de pruebas anteriores, observe las diferencias y razónelas.

3. Si el amplificador se ha construido sin la etapa de salida, ¿qué le ocurre a la ganancia del amplificador y a la oscilación de salida si el valor seguro menor de resistencia de carga que calculó anteriormente se conectase directamente a la salida del amplificador operacional? ¿Cuál es la función de la etapa de salida de este amplificador? ¿Cómo afecta esto a la impedancia de salida del amplificador?

4. Conecte de nuevo la etapa de salida a su amplificador, elimine los circuitos de polarización del diodo de la etapa de salida y observe el aumento en la distorsión de cruce cuando la resistencia que calculó anteriormente carga el amplificador. Fíjese que tendrá que conectar la salida del amplificador operacional directamente a las bases de los transistores  $Q_1$  y  $Q_2$ . [Una las bases]. [Cuando el profesor adjunto haga una demostración del amplificador con el reproductor de CD, repita este paso mientras escucha la música. Al principio, mantenga el nivel de señal bajo para escuchar la distorsión máxima de cruce y, a continuación, suba el nivel y tendrá la sensación de que la distorsión desaparece. ¿Por qué?]

5. Conecte de nuevo el amplificador como se mostraba en la Figura 1. Observe la oscilación nítida máxima de tensión de salida pico-pico en la carga de  $100\ \Omega$  a 1000 Hz. A continuación, conecte la salida del amplificador operacional a la unión entre los diodos  $D_1$  y  $D_2$  en lugar de conectarla a la base del transistor PNP. ¿Qué diferencia produce este cambio en la oscilación de tensión de salida? ¿Por qué?

6. Haga una demostración de su circuito al profesor adjunto.

**Regístrese con tiempo para la sesión de comprobación. Su circuito debe funcionar adecuadamente antes de la sesión. La sesión de comprobación NO es el momento para depurar el circuito.** El profesor adjunto le planteará una serie de cuestiones para determinar su comprensión del circuito, le pedirá que haga una demostración de algunas mediciones y probará su circuito con un reproductor de CD y un altavoz. Puede traer su CD de música favorito si lo desea. **DEJE CONSTRUIDO EL CIRCUITO EN SU NERDKIT, YA QUE LO NECESITARÁ PARA LA PRÁCTICA 6.**

### **Experimento 2: par diferencial de transistores [par de cola larga]**

En este experimento, estudiará el funcionamiento de una etapa de entrada de amplificador diferencial y examinará sus características significativas. La rogamos introduzca los datos en la tabla que le facilitamos en la página siguiente.

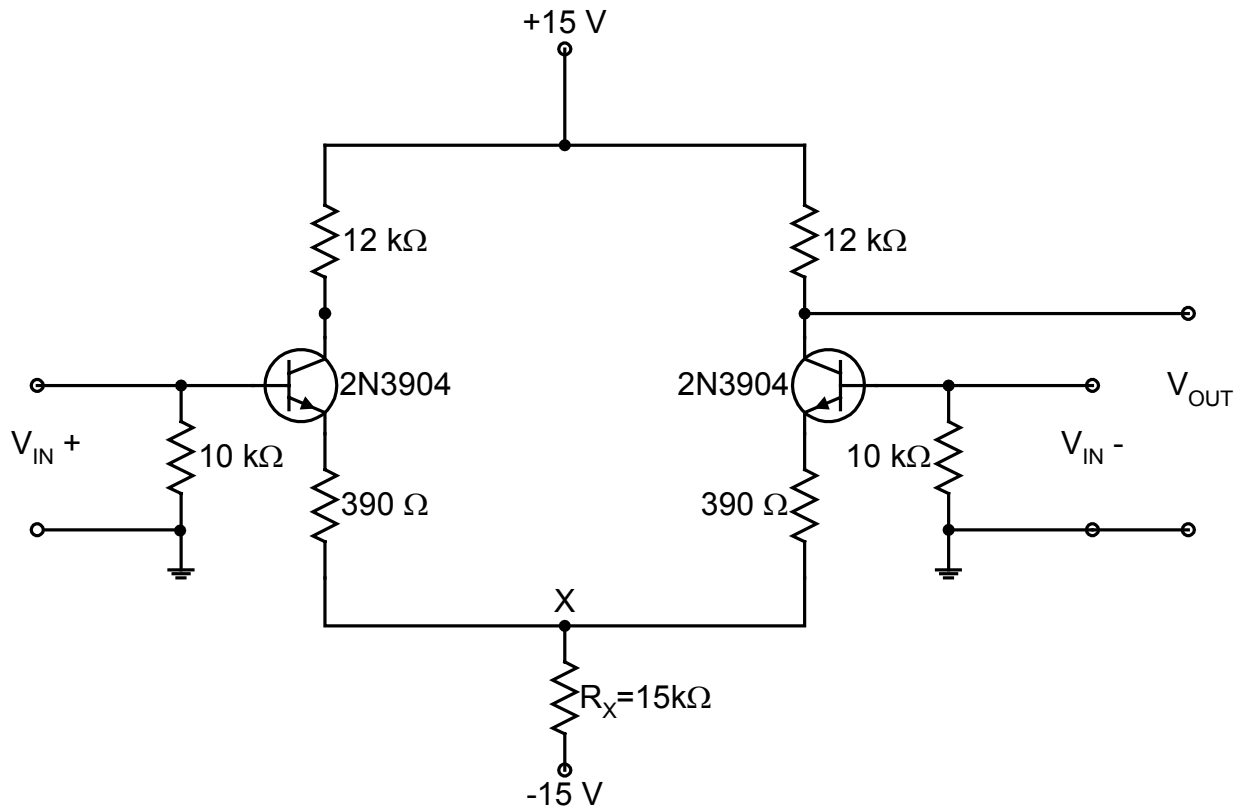


Figura 2. Amplificador diferencial para el experimento 2.

[Por favor fíjese que, sin las resistencias de linealización del emisor, este amplificador funciona sin ningún tipo de retroalimentación. Vigile la pureza de la señal de salida en el osciloscopio y observe si hay diferencias entre los circuitos con resistencias de emisor y los que no las tienen. Es posible que tenga que utilizar una oscilación de salida bastante grande para poder observar cualquier tipo de distorsión. Escriba las observaciones que realice sobre esto en su informe de prácticas].

1. Construya el amplificador diferencial de la Figura 2. Conecte una señal de 1 kHz a las dos entradas  $V_{in}^+$  y  $V_{in}^-$ . Mida la ganancia de modo común:

$$A_{cm} = v_{out} \div \left( \frac{v_{in}^+ + v_{in}^-}{2} \right)$$

A continuación, mida la ganancia diferencial de extremo único (*single-ended*). Puede hacerlo conectando a tierra la entrada negativa y aplicando una señal a la entrada positiva y ajustando de forma adecuada el resultado. \*

$$A_{dif} = \frac{v_{out}}{v_{in}^+} - \frac{A_{cm}}{2}$$

[\* Este ajuste es necesario ya que no estamos aplicando una tensión diferencial real de entrada, si no más bien estamos simulando una con una tensión única de entrada. Esto tiene el efecto de aplicar además un tensión media de entrada de modo común igual a  $\frac{v_{in}^+ + v_{in}^-}{2} = \frac{v_{in}^+ + 0}{2} = \frac{v_{in}^+}{2}$  al mismo tiempo, por lo que parte de la salida se debe a la ganancia de modo común, no simplemente a la ganancia diferencial].

¿Cómo puede decir qué entrada es la positiva?

Por último, mida la tensión offset de salida a través de los terminales diferenciales de salida [colector-

colector, en lugar de colector a tierra]. Asegúrese de que las resistencias de 12kΩ sean exactamente iguales para evitar generar una tensión offset como consecuencia de tener resistencias con distintos valores.

2. A continuación, sustituya las resistencias del emisor con cortocircuitos y repita las mediciones del paso 1 anterior.

Tabla de resultados de los amplificadores diferenciales				
Circuito	$A_{cm}$	$A_{diff}$ extremo único	Tensión offset de salida	CMRR
2N3904 de 390 Ω, resistencia de cola de 15 kΩ				
2N3904 Sin resistencia de cola $R_E$ de 15 kΩ				
LM394 de 390 Ω, resistencia de cola $R_E$ de 15 kΩ				
LM394 Sin resistencia de cola $R_E$ de 15 kΩ				
2N3904 390 Ω, fuente de corriente de $R_E$				
2N3904 Sin fuente de corriente $R_E$				
LM394 390 Ω, fuente de corriente de $R_E$				
LM394 Sin fuente de corriente de $R_E$				

3. Posteriormente, obtenga un par LM394 con una gran correspondencia [2 dispositivos en un chip], y repita los pasos anteriores 1 y 2 utilizando el nuevo dispositivo.

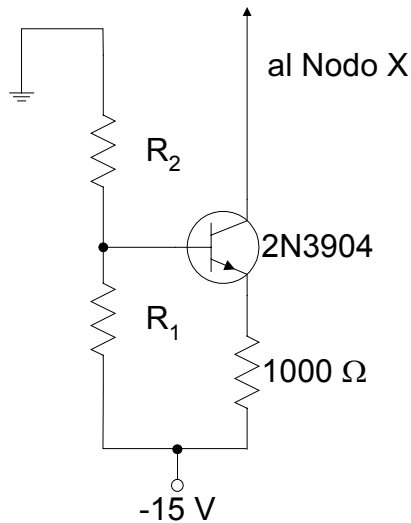


Figura 3. Fuente de corriente para el experimento 2.

- Sustituya la resistencia  $R_x$  en su amplificador diferencial por la fuente de corriente de la Figura 3. Repita todas las mediciones de los pasos 1 a 3 anteriores utilizando la fuente de corriente. Puesto que no hay consideraciones de resistencia AC de entrada, podemos seleccionar que  $R_B$  tenga un valor bajo para la fuente de corriente y así asegurar que el Beta del transistor no afecte al valor de la corriente a través de la fuente de corriente. **IMPORTANTE: diseñe la fuente de corriente para proporcionar la misma corriente que la que fluía por la resistencia  $R_x$  en el circuito anterior.** Utilice  $R_B = 2k\Omega$  [polarización excesiva del divisor de tensión].
- Calcule las relaciones de rechazo de modo común para todas las configuraciones de los circuitos. Exprese los resultados en dB. Exponga todos los datos de los pasos 1 a 5 en la tabla que se facilita, de forma que se puedan comparar fácilmente distintos circuitos. Realice algunas observaciones en su informe acerca de qué configuraciones y dispositivos son los mejores respecto a CMRR, la ganancia de tensión y la tensión offset baja.

$$cmrr = \left| \frac{A_{diff}}{A_{cm}} \right|$$

- A continuación, se indican algunas de las ecuaciones para el amplificador diferencial que puede utilizar para comparar sus mediciones:

$$I_X = I_{E1} + I_{E2}$$

$$v_{IN}^+ - v_{be1} - v_{be2} - v_{IN}^- = 0$$

$$o \quad v_{be1} - v_{be2} = v_{IN}^+ - v_{IN}^-$$

$$A_{cm} = v_{out} \div \left( \frac{v_{in}^+ + v_{in}^-}{2} \right) = \frac{-g_m R_L}{1 + g_m (2R_x + R_E) \left( 1 + \frac{1}{\beta_o} \right)} = \frac{-\beta_o R_L}{r_\pi + (2R_x + R_E)(\beta_o + 1)} \approx \frac{-R_L}{2R_x + R_E}$$

$$A_{dif} = \frac{v_{out}}{v_{indif}} = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{-R_L}{R_E}\right); \text{ or } = \frac{-g_m R_L}{2} = \frac{-\beta_0 R_L}{2R_{\pi}} \text{ if } R_E = 0.$$

### Experimento 3: chip temporizador 555

En este experimento, estudiará el funcionamiento del chip temporizador 555 que encontrará en su kit de prácticas. Tendrá que consultar la hoja de datos 555 que se entregó en clase y que muestra el esquema para el 555 y algunas de las aplicaciones típicas.

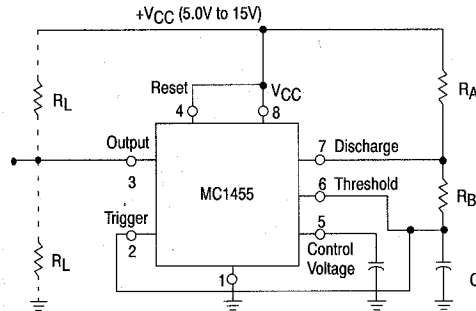


Figura 4. Oscilador astable mediante un chip temporizador 555.

1. Construya un oscilador astable que funcione a partir de la alimentación de +15 V de su kit de prácticas y que produzca una salida de 10 kHz con un ciclo de servicio con un exceso de 0,1. Observe que para evitar daños en el 555, no debe utilizar valores de resistencia inferiores a 1 kΩ en la proporción de tiempo del circuito. Con una frecuencia de oscilador fijada en 10 kHz, mida el ciclo de servicio. **Nota: el 555, junto con algunos otros chips temporizadores, genera un fallo técnico de corriente de suministro muy grande [≈ 150mA] durante cada transición de salida. Asegúrese de utilizar un condensador grande de desacoplo (=100 μF), desde el pin V<sub>CC</sub> del chip a tierra, que esté físicamente cerca del chip. Incluso así, puede que el 555 tienda a generar transiciones dobles de salida. La mayoría de las versiones CMOS del 555 no tienen este problema y, además, provocan mucha menos corriente, pueden oscilar rail-to-rail en la salida y funcionar a una V<sub>CC</sub> de 1 ó 2 voltios.**

2. Sin modificar ninguno de los valores de los componentes de su circuito, vuelva a conectar **todo** el circuito para que funcione a partir del suministro de +5 V de su kit de prácticas. Mida la frecuencia y el ciclo de servicio y compare los resultados con los valores del apartado 1. ¿Por qué varían tan poco estos valores con la tensión de alimentación?

3. Puede utilizar el chip del 555 para generar una forma de onda de diente de sierra, en lugar de la onda cuadrada disponible en el pin 3 de salida. Una forma de hacerlo es conducir el condensador con una fuente de corriente (que proporcionará una tensión lineal del condensador con el tiempo) y reajustar el condensador (descargarlo) con la conexión de descarga del 555. Diseñe y construya este circuito para generar una forma de onda de diente de sierra de 10 kHz con un reajuste de tiempo inferior al 1 % del periodo del diente de sierra. Construya la forma de corriente utilizando el FET 2N5459 en la configuración de la Figura 5. Las características del FET y el valor de la resistencia R determinan la corriente que suministra esta fuente. **Nota: para proteger el 555 de daños cuando se descargue el condensador, debería asegurarse, por lo general, de que hay al menos una resistencia de 1 kΩ en el trayecto de descarga. Sin embargo, si ubica esta resistencia como se muestra anteriormente, [R<sub>B</sub>], distorsionará la forma de onda de diente de sierra. Posiblemente desee reubicar esta resistencia para que siga estando en serie con el pin 7, pero no en el trayecto de carga. Es posible que también desee eliminar totalmente esta resistencia si su condensador temporizador es lo suficientemente pequeño como para que la resistencia de saturación del transistor limite la corriente de carga para salvar niveles.**

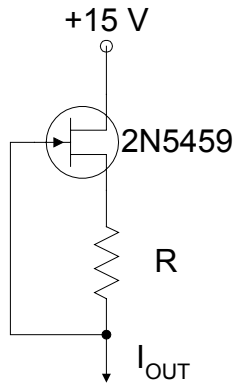


Figura 5. Fuente de corriente del JFET.

4. Con la ayuda del circuito integrado del temporizador 555, diseñe y construya un oscilador de diente de sierra controlado por tensión. El objetivo de su diseño debería ser una variación de frecuencia de unos 100 Hz a 10 kHz ya que la tensión de entrada varía aproximadamente de 0 a 15 voltios. Puede utilizar un potenciómetro para proporcionar la tensión de control regulable. Puede utilizar la tensión offset DC de su generador de funciones como tensión de control. Uno de los circuitos que quizá le interese probar es la "fuente de corriente controlada por tensión" [VCCS] que se entregó en clase. El transistor de salida de este circuito se conecta en lugar de la resistencia  $R_A$ . Su informe debería mostrar el diseño que ha realizado y además enumerar las frecuencias inferiores y superiores que obtuvo en el diseño.