

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

6.101 Práctica introductoria de electrónica analógica
Práctica 6

NOTA: ESTA PRÁCTICA REQUIERE UNA SESIÓN DE COMPROBACIÓN PARA EL EXPERIMENTO 1. Regístrese a una hora en la lista que se encuentra en la puerta del despacho del profesor adjunto. Lo que queremos es "juguetear" con los controles y probar su circuito con un micrófono real, un reproductor de CD y un altavoz. No se concederá ningún crédito a los informes de prácticas que no pasen la correspondiente sesión de comprobación.

Experimento 1: un pre-amplificador o "parte delantera" para el amplificador de potencia.

Una vez diseñado un amplificador que pueda recibir un par de voltios de señal de audio en una impedancia alta y producir una tensión superior a una corriente alta en una impedancia baja [del altavoz], necesita algún tipo de sección de control en la entrada al amplificador. Los diseños tradicionales de control incluyen los controles de volumen, de equilibrio y de tono, y funciones para cambiar a distintas fuentes de señal, es decir, sintonizador de FM y AM, reproductor de CD, tarjeta de sonido de computadora, micrófono, etc. Todas estas fuentes, excepto el micrófono se conocen como fuentes de "nivel de línea", es decir, producen un máximo de un par de voltios RMS desde una resistencia de fuente relativamente baja, quizás en el margen de 0Ω a $k\Omega$ [generalmente un seguidor-emisor o una entrada de amplificador operacional]. Sin embargo, un micrófono dinámico produce una entrada de unos pocos milivoltios RMS con impedancias de fuente que pueden ser superiores al margen dado para las fuentes de nivel de línea anteriores.

Hoy en día, muchos de nosotros escuchamos la FM o CDs mientras trabajamos con las computadoras y, ya que muchas de nuestras computadoras tienen tarjetas de sonido, estaría bien poder escuchar esas campanitas y silbidos y otros sonidos ocasionales que produce Windows y, a la vez, seguir escuchando nuestra música y programas de entrevistas. Para poder hacer esto, la parte delantera del amplificador debería ser mixta, es decir, usted debería poder escuchar 2 o más entradas al mismo tiempo, ajustar el nivel de señal de cada entrada por separado y ajustar el nivel total [control de ganancia maestro]. Consulte el diagrama de bloques de la figura 1 [que utiliza su amplificador de potencia de la práctica 5] y diseñe el circuito con las siguientes especificaciones:

- Utilice los amplificadores operacionales más baratos para todos los circuitos que le permitan cumplir las especificaciones. Se puede ahorrar dinero en la distribución de la placa si se utilizan dos dispositivos en un paquete, menos cápsulas de desacoplamiento, etc. Al principio puede resultar más económico usar un 741, pero nos puede llevar a tener que utilizar condensadores y resistencias adicionales, lo cual se evitaría con el uso de un amplificado operacional algo más caro.
- Proporcione tres entradas: una para el CD, una para la tarjeta de sonido y otra para el micrófono.
- Las entradas de nivel de línea deberían tener un valor de A_v máximo de 20 dB, la entrada de micrófono debería tener un valor de A_v máximo de 46 dB, los dos a 1000 Hz.
- Cada amplificador de entrada debería tener un divisor de tensión o un control de ganancia de retroalimentación. El control de ganancia del divisor de tensión es, básicamente, un potenciómetro cuyos extremos fijos están conectados entre la salida de una etapa de ganancia y tierra, como si fuese una resistencia de carga, que, parcialmente, lo es. El wiper o el terminal variable del potenciómetro está conectado a la entrada de la etapa siguiente. Cuando se gira el wiper hacia el extremo de tierra de la resistencia, el nivel de señal es cero y, a medida que se sube el wiper, la señal irá aumentando más debido a la acción del divisor de tensión. Los controles de volumen del divisor de tensión pueden estar acoplados al condensador a la entrada, a la salida o a

ambas. La principal razón para eliminar DC de un potenciómetro de control de volumen es prevenir la generación de "ruido de contacto" que se da cuando el wiper se mueve a lo largo del elemento de la resistencia mientras que la corriente DC fluye a través del elemento. A pesar de que este ruido solamente ocurre durante la rotación de control, puede ser alto e irritante. Si se utiliza un acoplamiento de condensador, surge una cuestión fundamental sobre el valor que se necesita del condensador para un punto -3dB de una frecuencia dada, puesto que la impedancia de fuente que va desde el wiper hasta el divisor de tensión varía drásticamente de un extremo de la rotación del potenciómetro a otro. Esto puede tener consecuencias para la carga que se presenta a la etapa que conduce también el control de volumen. Los controles de ganancia del divisor de tensión no deben ubicarse demasiado cerca de la etapa de entrada de un amplificador multi etapa de ganancia alta. Cuando las etapas de ganancia alta van detrás del control de volumen, bajar este control no tendrá ningún efecto sobre el ruido generado en las etapas posteriores. Se podría dar una situación en la que se baje el volumen para producir una señal de salida relativamente baja, pero esa señal debe ir acompañada de un nivel alto de ruido de amplificador que, generalmente, se oculta con una señal de salida de alto nivel.

Un control de ganancia de retroalimentación utiliza un potenciómetro conectado como reóstato, es decir, un extremo de la resistencia fija está conectada al wiper. Tiene que tener cuidado con qué cable conecta al wiper, ya que desea que la ganancia aumente al girar el potenciómetro hacia la derecha y que disminuya al girarlo hacia la izquierda. Un control de ganancia de retroalimentación sustituye a la resistencia de retroalimentación en un amplificador **invertido**. [¿Por qué no se puede utilizar en un amplificador sin invertir?]. Esto solamente funcionará si se utilizan amplificadores operacionales compensados para ganancias inferiores a uno. Por ejemplo, el LF357 no se puede utilizar porque sólo está compensado internamente para ganancias inferiores a 5. Un 357 oscilará tan pronto como la ganancia descienda por debajo de 5. Existen también cuestiones acerca de generar tensiones offset DC a medida que cambia el valor del potenciómetro de la resistencia de retroalimentación, al menos con los amplificadores operacionales de entrada bipolar.

- Los tres amplificadores de entrada deberían introducirse en un amplificador sumador que tenga un control de ganancia maestro de retroalimentación y un valor de A_v adecuado a cada entrada.
- Sería conveniente que realizase el diseño para una impedancia máxima de fuente de $1\text{ k}\Omega$.
- El ancho de banda de audio **mínimo** de la sección completa del pre-amplificador debería tener entre 10 y 50.000 Hz (puntos -3dB).
- Todas las entradas deberían estar acopladas a sus fuentes en AC, pero posiblemente quiera acoplar en DC el resto del circuito, siempre que no incumpla las especificaciones del offset de salida para el amplificador de potencia. ¿Cómo afecta potencialmente el control de ganancia de retroalimentación a la tensión offset DC de un amplificador operacional? ¿Qué tipo de condensador de acoplamiento se debería utilizar en esta aplicación? ¿Por qué?

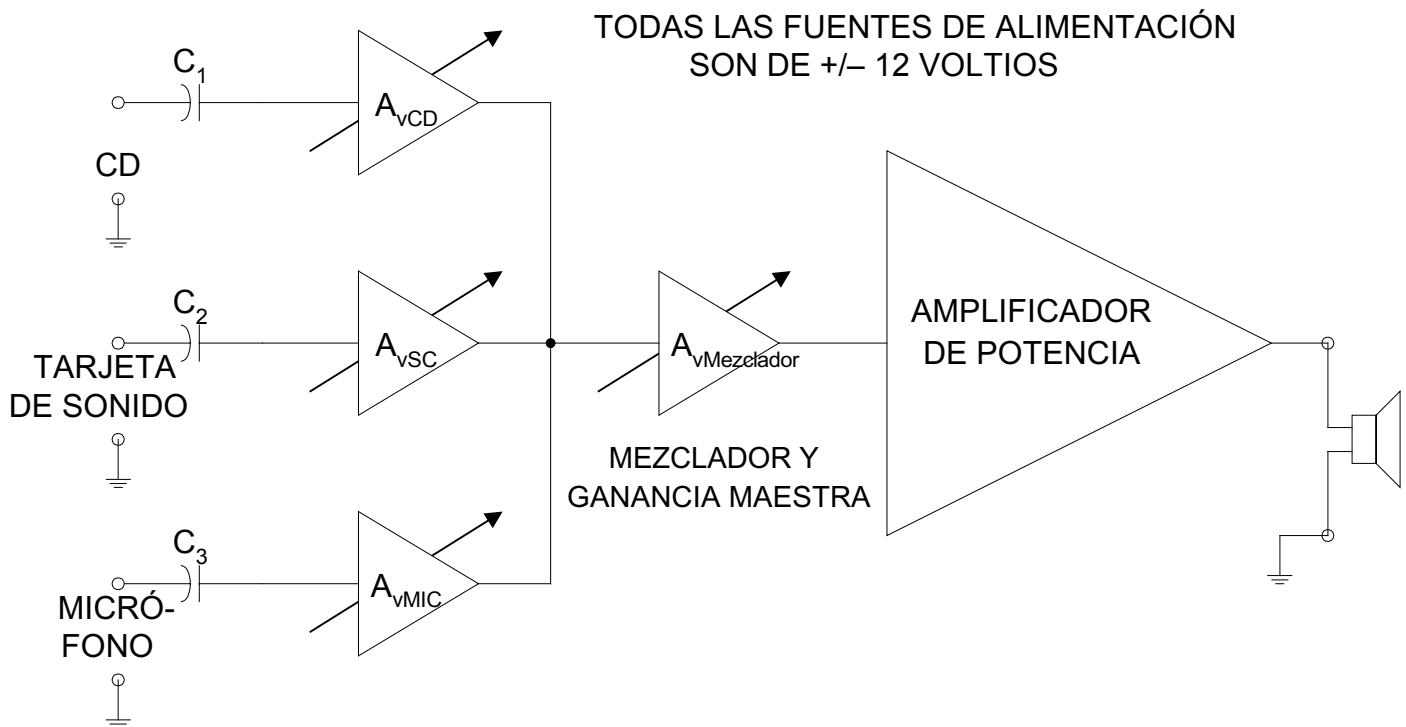


Figura 1. Amplificadores de control para el experimento 1.

Para los aventureros y curiosos, en la figura 2 se muestra una versión alternativa del experimento del amplificador de control. En lugar de mezclar las tres fuentes, este enfoque utiliza interruptores analógicos para conmutar únicamente en una de las fuentes al tiempo. Por lo general, los interruptores analógicos se controlarían mediante *push pads* que controlan un circuito de cierre para hacer funcionar los interruptores analógicos, pero para controlar los interruptores debe utilizar cables introducidos en el protoboard o usar los construidos en su kit de prácticas. Al no necesitar el funcionamiento sumador [mezclador], en esta versión puede utilizar una ganancia de control disipativa de un potenciómetro, en lugar de utilizar una etapa activa para el control de ganancia maestro. Generalmente, este tipo de potenciómetro cuenta con una *conicidad* para el trabajo de audio, pero tendrá que arreglárselas con los tipos lineales de su kit o de la ventanilla del almacén. [En esta versión no se necesitan los controles individuales de ganancia de entrada ya que no hay mezcla y, por consiguiente, no hay necesidad de un balance de nivel de señal. Posiblemente aún quiera utilizar una etapa o un seguidor de ganancia para aislar de otras etapas los diversos niveles de impedancia del control de volumen.

La ventaja fundamental de los interruptores analógicos sobre los mecánicos radica en que se utiliza una tensión DC para controlar el interruptor y que el cambio real de la señal se realiza cerca de las etapas de ganancia, sin necesidad de sacar el trayecto de la señal a un panel frontal a un interruptor mecánico. Esto reduce la superposición de sonidos, el zumbido y la recogida de ruido.

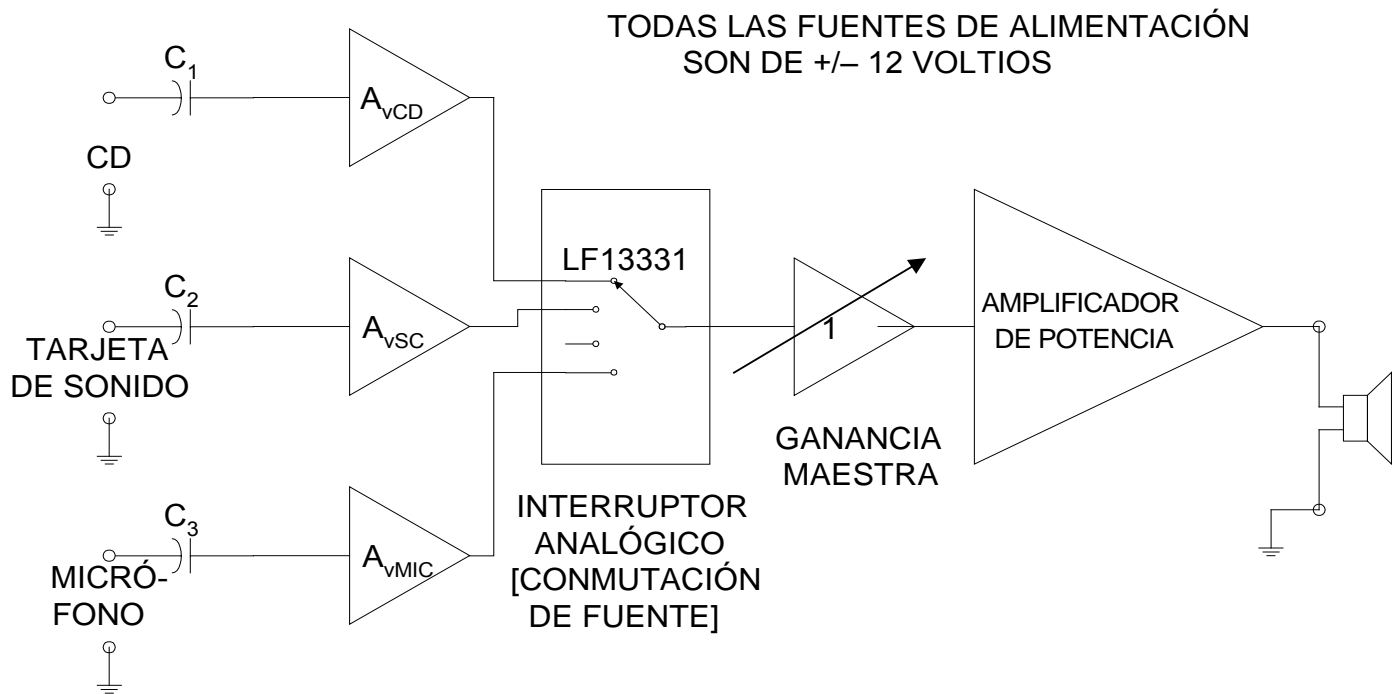


Figura 2. Amplificadores de control alternativos para el experimento 1.

Experimento 2: seguidor de emisor, paso en serie, regulador de tensión de la fuente de alimentación DC

En este experimento, estudiará el funcionamiento y diseño de un circuito regulador de tensión. En concreto, examinará un circuito en el que se utiliza un transistor en serie para absorber la diferencia entre la tensión DC sin regular que se da en la alimentación y la tensión regulada que ha de suministrarse a la carga. El regulador actúa a su vez como reductor de ondulación.

En la Figura 3 se muestra el esquema de un regulador de tensión en serie sencillo. Por medio del rectificador de puente se rectifica una tensión AC $V_{AC}(t)$ y se filtra mediante el condensador C_1 . Esta tensión se aplica al colector del transistor Q_1 , que es un modelo 2N2219 en una cápsula TO-5. **NOTA: ¡Este dispositivo puede calentarse!** Si lo desea, puede obtener un disipador de calor que se ajuste a la cápsula TO-5 en los cajones cerca del banco de soldadura del laboratorio del curso 6.101, sala 38-601. Este transistor está conectado como seguidor de emisor. Se aplica una tensión constante (suministrada por el diodo Zener D_1 y la resistencia R_1) a la base y se conecta la resistencia de carga R_L entre el emisor y la toma de tierra. El resultado es que la tensión de carga se mantiene constante a una tensión que es igual a la tensión Zener menos la caída base-emisor del transistor Q_1 .

Su objetivo es diseñar un regulador de tensión de este tipo que cumpla los siguientes objetivos y directrices de diseño:

- Basándose en el diodo Zener 1N754A de 6,8V de su kit de prácticas, el regulador de tensión tendrá una tensión de salida de aproximadamente 6V. ¿Por qué?
- La tensión de entrada será de 60 Hz (suministrada desde el mismo transformador de potencia de 12,6 VCT RMS construido en su kit de prácticas o en la caja de aluminio que está disponible en la ventanilla del almacén). No conecte el micrófono central. **No conecte los cables de tierra del osciloscopio a ninguno de los terminales del transformador.**

- El regulador debe proporcionar tensiones de salida reguladas para resistencias de carga de 100Ω y mayores. La tensión de ondulación de carga pico a pico no debe sobrepasar los 5 mV con este valor de carga.
- **Posiblemente** sea necesario un condensador pequeño de salida C_2 para evitar las oscilaciones de alta frecuencia que pueden aparecer en la tensión regulada de salida. Usted puede determinar de forma empírica la capacitancia que se necesita.

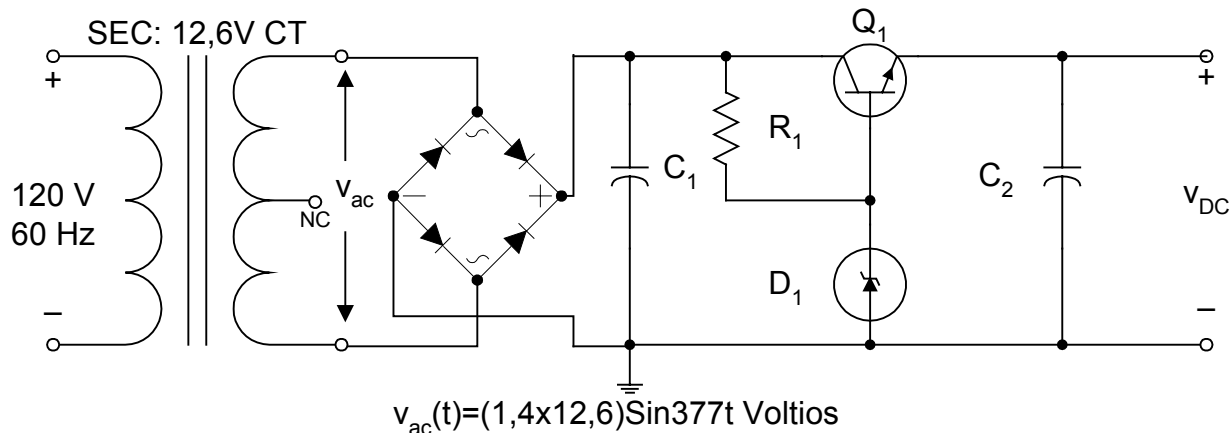


Figura 3. Circuito regulador de tensión para el experimento 2.

- Para mantener bajo el coste, debe utilizar el valor menor de capacitancia C_1 que cumpla los objetivos de diseño. Asegúrese de que la característica de tensión asignada al condensador es lo suficientemente grande como para resistir la tensión DC y la tensión de oscilación sobre la anterior.
- Para evitar que se queme el diodo Zener, debe limitarse a 55 mA la corriente máxima que pasa a través del diodo. (¿Necesita ejecutar 55 mA a través del diodo Zener para que funcione el circuito o es mejor utilizar un valor inferior de corriente?).
- R_1 suministra también una corriente de base al transistor de paso. ¿Cómo afectará al funcionamiento del transistor de paso un valor mayor de R_1 ? ¿Cómo afecta el valor β_F del transistor de paso al valor de R_1 ?

Con la ayuda de la resistencia de carga de 100Ω de 2 vatios de su kit y utilizando $C_1 = 100 \mu\text{F}$, rellene la tabla siguiente. Nota: C tiene un valor relativamente bajo para permitirle observar los cambios en la tensión de ondulación a medida que el valor de R_1 varía. Sin embargo, posiblemente tenga que aumentar C_1 para cumplir las especificaciones cuando cumplimente la tabla. Asegúrese de registrar el valor final de C_1 y de R_1 .

Resistencia de carga	$V_{\text{OUT DC}}$	R_1	$V_{\text{OND ac}}$ a través de R_L	$V_{\text{OND ac}}$ a través de C_1
$100 \Omega, 2\text{W}$		510Ω		
$100 \Omega, 2\text{W}$		$1,0 \text{ k}\Omega$		
$100 \Omega, 2\text{W}$		$3,0 \text{ k}\Omega$		
$100 \Omega, 2\text{W}$		$5,1 \text{ k}\Omega$		
$100 \Omega, 2\text{W}$		$7,5 \text{ k}\Omega$		
$100 \Omega, 2\text{W}$		$10,0 \text{ k}\Omega$		

NOTA: si está utilizando uno de los nuevos osciloscopios de muestreo Tektronix, es posible que quiera hallar la media de la señal de tensión de oscilación para facilitar la lectura. Puede hacerlo accediendo a los menús

siguientes: ACQUIRE (adquirir) / MENU / MODE (modo) / SAMPLE (muestra) / AVERAGE (media). Puede ajustar el número de muestras de las que toma la media girando el mando más alto de la superficie del osciloscopio.

Recuerde el análisis de clase sobre cómo reducía el diodo Zener el tamaño de la tensión de ondulación. Esto se debía al efecto del divisor de tensión que se desprendía de un análisis Thevenin de la tensión de fuente de ondulación y del diodo Zener. ¿Respaldan los datos de la tabla este análisis? ¿Por qué o por qué no es así?

Puede estar tentado a desviar la ondulación en el diodo Zener mediante un condensador electrolítico grande. Sin embargo, considerando la baja impedancia AC del Zener, se necesita un condensador muy grande para tener un gran efecto sobre la ondulación en el Zener. Esta capacidad tiene una mayor relación coste eficacia en relación a la reducción de ondulación si se utiliza para aumentar C_1 . Sin embargo la derivación del Zener con un condensador pequeño de 100 ó 10 nF puede ayudar a reducir el ruido que genera el diodo Zener. [Los diodos Zener generan más ruido]. Debería darse cuenta también de que si se aumenta R_1 más allá de un determinado valor la corriente Zener se podría ver reducida lo suficiente como para comenzar a mover el punto de funcionamiento del diodo Zener alrededor de la flexión de la curva del mismo, lo que significa que la impedancia AC del Zener aumentará.

Experimento 3: regulador de tensión de fuente de alimentación del paso en serie regulable con la ayuda de un amplificador operacional.

ESTA PRÁCTICA ES OPCIONAL PARA OBTENER UN CRÉDITO ADICIONAL. [Equivalente al 30% del valor total de una práctica]. DEBE HACER UNA DEMOSTRACIÓN DE ESTE DISEÑO A UNO DE LOS DOCENTES.

Comience con el transformador, el rectificador de puente y el condensador de entrada del experimento 2 anterior. Mantenga como tensión de referencia la resistencia en serie y el circuito de diodo Zener, pero utilice un 741 u otro dispositivo adecuado para conducir el transistor de paso en lugar de hacerlo directamente desde el Zener.

Conecte el terminal $+V_{CC}$ 741 al lado del colector del transistor de paso [también puede intentarlo en el lado del emisor; puede que no se ponga "en funcionamiento", pero la tensión DC tiene menos ondulación aquí]. Conecte el terminal $-V_{EE}$ del 741 a la toma de tierra.

Utilice la tensión Zener de referencia para polarizar la entrada + del amplificador operacional. Si, a continuación, conecta directamente la entrada - [retroalimentación negativa] al emisor [salida] del transistor de paso, tendrá un suministro DC de 6,8 voltios, ya que la retroalimentación corregirá la tensión base-emisor en el momento que se corrige la caída de tensión del diodo en el rectificador de precisión. ¿Qué efecto tendrá la resistencia en serie con el diodo Zener sobre la ondulación en la entrada del amplificador operacional? ¿Cuál es la impedancia interna del Zener?

Para que este suministro sea regulable, necesitará utilizar sus conocimientos acerca de la ecuación de ganancia para el amplificador operacional sin invertir para así seleccionar una resistencia y un potenciómetro que proporcionen alguna ganancia. Para facilitar el ajuste, es mejor limitar la ganancia máxima para que pueda obtener un valor realista. La tensión de entrada al amplificador operacional es de 6,8 voltios. El circuito de puente le proporcionará al transistor de paso una entrada de alrededor de 16 voltios sin ninguna carga, por lo tanto, lo más que puede esperar en la salida a plena carga son unos 14 voltios. Esto requeriría una ganancia de aproximadamente $14/6,8 = 2,1$ para el ajuste máximo de ganancia.

El transistor de paso D44H8 o D44H11 puede controlar corrientes de salida de aproximadamente 8 amperios. Sin embargo, a tensiones más bajas de salida cuando la caída de tensión colector-emisor del transistor es alta, la disipación de potencia del transistor es elevada a corrientes de carga altas. La clasificación del transistor es de 20 vatios a una temperatura de la caja de 25° C. Debe asegurarse de que su diseño no sobrepase esta valuación.

Dibuje el esquema final de un circuito y resuma los cálculos de diseño que realice.

Experimento 4: artificio indicador de baja batería.

ESTA PRÁCTICA ES OPCIONAL PARA OBTENER UN CRÉDITO ADICIONAL. [Equivalente al 30% del valor total de una práctica]. DEBE HACER UNA DEMOSTRACIÓN DE ESTE DISEÑO A UNO DE LOS DOCENTES.

En el diseño de equipos portátiles que funcionan con pilas, a menudo resulta útil tener algún tipo de indicador de baja batería. Con la ayuda de las piezas de su kit de prácticas, o las disponibles en el almacén, además de un diodo fotoemisor (LED) LN29RPP que se encuentra en los cajones de piezas del curso 6.101 (la hoja de datos del curso está en la correspondiente colección del 6.101), diseñe un circuito de detección de baja batería que cumpla las especificaciones siguientes:

- La batería que está probando debe ser la única alimentación que reciba el circuito.
- El circuito debería encender el LED cuando la tensión de la batería (suponiendo que generalmente está en el margen de 10 a 15 Voltios) caiga por debajo de 10 voltios y, a su vez, el LED debería seguir funcionando a tensiones de batería de al menos 6 voltios.
- El circuito no debería extraer más de un miliamperio cuando la tensión de batería tiene un sobreexceso de 10 Voltios y el LED está desconectado. Si utiliza un circuito integrado (CI o IC) para este diseño, asegúrese de que tiene un drenaje de corriente muy bajo cuando el LED esté desconectado.
- Consejo: la fuente de alimentación variable del experimento 3 anterior puede simular bien una batería cuya tensión de terminal cae de 15 voltios a menos de 10 voltios.

Experimento 5: mejora de la etapa de salida del amplificador de potencia.

ESTA PRÁCTICA ES OPCIONAL PARA OBTENER UN CRÉDITO ADICIONAL. [Equivalente al 30% del valor total de una práctica]. DEBE HACER UNA DEMOSTRACIÓN DE ESTE DISEÑO A UNO DE LOS DOCENTES.

Diseñe una etapa de salida mejorada para el amplificador que diseñó en la práctica 5. Puede utilizar tanto el par complementario de retroalimentación [par Sziklai] (se adjunta) como un par regular Darlington. Los dispositivos de salida de cápsula TO-220 que se muestran tienen capacidad para hasta 8 amperios y, por tanto, ahora puede utilizar una resistencia de carga de 8Ω . Asegúrese de calcular la capacidad de carga necesaria para esta resistencia antes de subir el amplificador. La salida de potencia de este amplificador de potencia estará restringida principalmente por una limitación de corriente de 1 Amp construida en las fuentes de alimentación de su kit de prácticas. Es posible que desee utilizar un potenciómetro de 1000Ω conectado como un reóstato a través de los diodos de polarización para un ajuste fácil de polarización. Aún debería ser suficiente con que pasase una corriente de polarización de 10 mA a través de los dispositivos de salida. Debería ser capaz de aumentar los valores de R_{B1} y R_{B2} mediante la conexión de este dispositivo de salida. ¿Por qué? [Nota: para conseguir la mayor potencia de este circuito, utilice un amplificador operacional rail-to-rail LM6152]. Si desea experimentar con salidas de mayor potencia de este circuito, puede retirar un par de fuentes de alimentación del almacén que puedan suministrar tensiones y corrientes mayores. **Aviso: asegúrese de no utilizar una tensión externa de fuente de alimentación que sea mayor que la tensión límite máxima absoluta del amplificador operacional que está utilizando.**

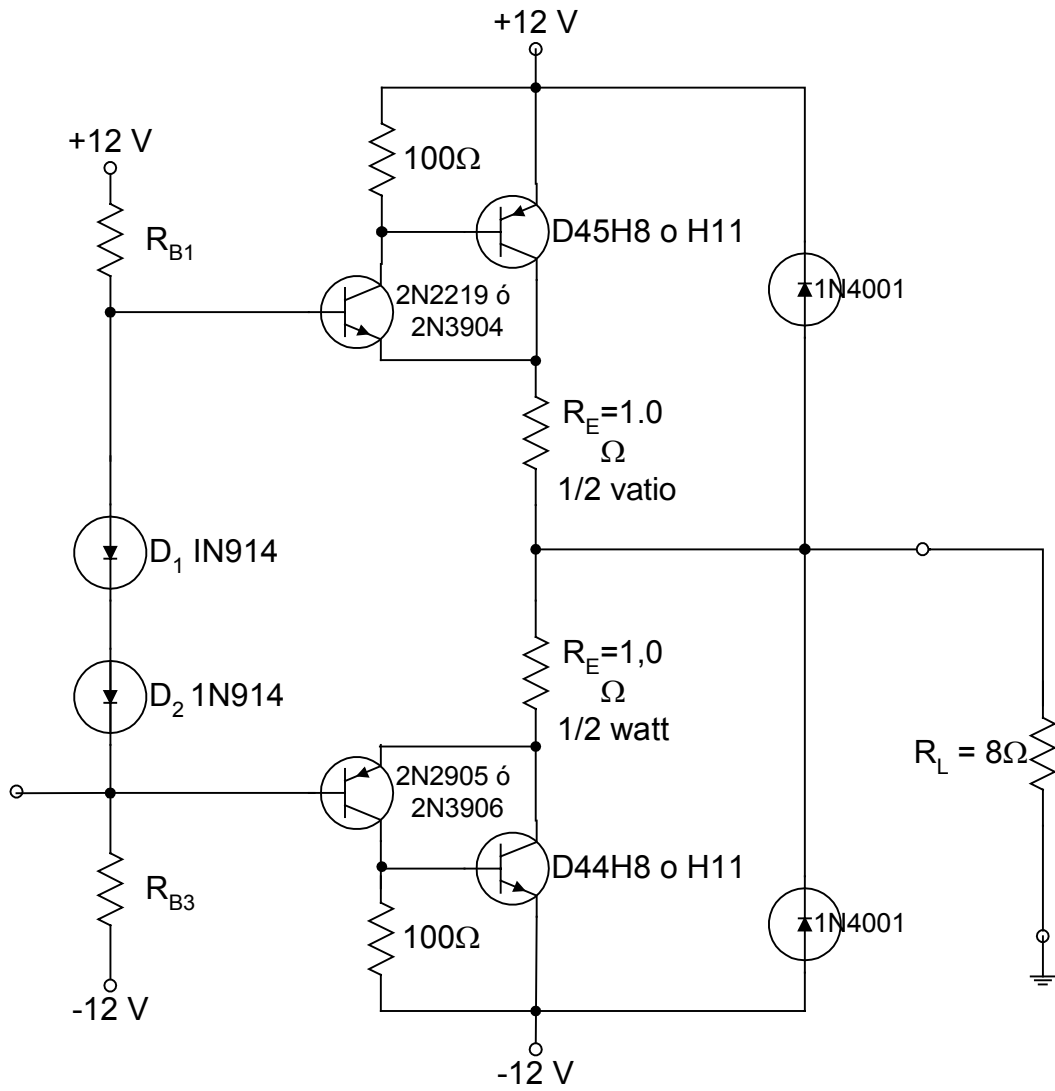


Figura 4. Mejora del amplificador de potencia para el experimento opcional 5.

