

6.101 Práctica introductoria de electrónica analógica
Práctica 4

TRABAJO DE LECTURA

En esta práctica, investigará el funcionamiento de amplificadores operacionales en configuraciones sencillas de circuitos. Analizaremos en clase diversos aspectos del comportamiento de los amplificadores operacionales. Además, debe haber leído al menos los trabajos de lectura de clase sobre **Amplificadores operacionales** que encontrará en la sección 7 del resumen del curso.

Objetivo: por fin ha llegado el momento de usar los amplificadores operacionales. Utilizará el LM741, que es uno de los primeros amplificadores operacionales populares; el LF356, que es un amplificador operacional JFET de entrada con escasa corriente de polarización de entrada, un ancho de banda más amplio en bucle abierto, una mayor velocidad de subida, etc.; el LM6152, que es un amplificador operacional dual "rail-to-rail" y el comparador LM311.

Experimento 1: la configuración invertida.

En este experimento, conectará un LM741 en la configuración invertida de la Figura 1. Aprenderá a ajustar el offset del amplificador, a medir el ancho de banda y a comprobar cómo se ve limitado su funcionamiento por la velocidad de subida.

1. Construya el circuito de la Figura 1. [Consulte la hoja de datos del LM741 para asegurarse de que conecta los pines adecuados de su LM741]. Seleccione los valores de resistencia $R_1 = R_2 = 22\text{k}\Omega$ y $R_3 = 11\text{k}\Omega$ y no instale el potenciómetro de $10\text{k}\Omega$ en este momento. Conecte la entrada V_{in} a tierra y mida la tensión de salida [probablemente diferirá de cero en un número de milivoltios]. Esta tensión es producida por la *tensión offset de entrada* que puede modelarse como una fuente de tensión DC en serie con la *entrada sin invertir* y la ganancia del amplificador [en este caso, la ganancia es dos para una tensión que se aplica a la entrada no invertida]. Calcule la tensión offset de entrada correspondiente y compare este valor con el de la hoja de datos del LM741.

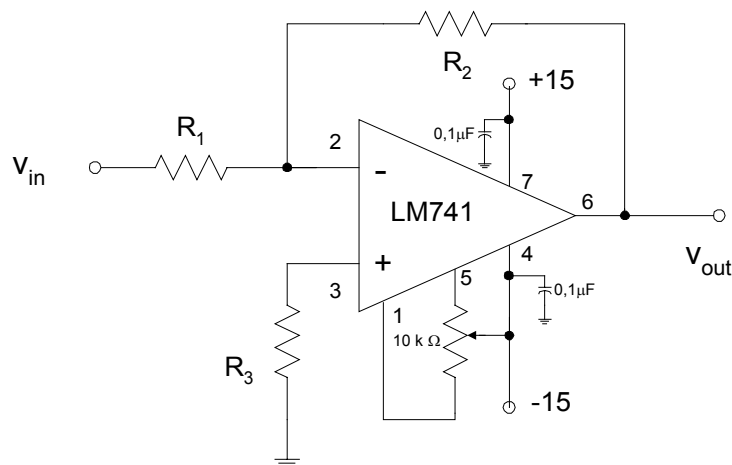


Figura 1. Circuito para el experimento 1.

2. A continuación, instale el potenciómetro de $10\text{k}\Omega$ offset-null. Dependiendo del estilo del potenciómetro, es posible que tenga que soldarle algunos cables para poder enchufarlo en el protoboard. [Los soldadores están instalados en el 38-601 y cerca del área del laboratorio del curso 6.071; el soldador y otras herramientas están disponibles en la ventanilla de la sala de instrumentos]. Ajuste el potenciómetro para que la tensión

de salida tenga un valor cero. ¿Qué margen de tensión offset de salida se puede obtener ajustando el potenciómetro por encima de su margen total?

3. A continuación, conecte el generador de señales a la entrada y ajústelo para producir un senoide de 0,2Vp-p y 1 kHz. [Recuerde que el valor de salida de su generador de funciones está calibrado por defecto para una carga de 50Ω]. Mida la magnitud de la ganancia de tensión de esta conexión. ¿Necesita un condensador de acoplamiento de entrada entre el generador de funciones y R_1 ? ¿Por qué es así o por qué no?

4. Aumente la frecuencias del generador de señales hasta que comience a disminuir la amplitud de la tensión de salida. Halle la frecuencia a la que la ganancia del amplificador es $1/\sqrt{2}$ de su valor de baja frecuencia [1 kHz]. Esta frecuencia puede considerarse el ancho de banda [punto -3dB] de esta configuración en particular. Mida el cambio de fase entre las tensiones de entrada y de salida a esta frecuencia. [Consulte las instrucciones adjuntas para la medición del cambio de fase con el osciloscopio Tektronix 2445].

5. A continuación, cambie la resistencia de retroalimentación R_2 a 220 k Ω , calcule un valor nuevo para R_3 y repita los apartados 2, 3 y 4.

Si desconecta el potenciómetro offset, se dará cuenta de que el offset de salida es aproximadamente 5,5 veces mayor que el que halló cuando se configuró el amplificador para una ganancia de 1 de la entrada invertida. ¿Por qué? ¿Por qué modificamos el valor de R_3 ? ¿Cuál es el valor ideal de R_3 en relación a los valores de R_1 y R_2 ?

- Observe que, mientras que la ganancia del amplificador invertido es un factor de 10 más grande que la de la primera configuración, el ancho de banda es aproximadamente un factor de 5,5 menor. Si examinase esta configuración en busca de otros valores de ganancia, hallaría que cuanto mayor es la ganancia, menor es el ancho de banda; concretamente, que el producto de (uno más la ganancia) veces el ancho de banda es una constante.

6. Con el generador de señales fijo a la frecuencia de ancho de banda [punto -3dB] para la ganancia de -10 que halló en el apartado, aumente la amplitud de la tensión de entrada hasta que la tensión de salida comience a distorsionarse [es decir, que ya no parecerá sinusoidal, si no más bien una onda triangular]. En este punto, el amplificador ha alcanzado su **velocidad de subida** límite.

La velocidad límite de subida de un amplificador operacional la produce una fuente de corriente dentro del amplificador [polarizando la primera etapa del amplificador] que limita la cantidad de corriente que puede suministrar la primera etapa del amplificador. Cuando éste es empujado al punto en el que se alcanza este límite, deja de funcionar correctamente. El límite de velocidad de subida se manifiesta como un valor máximo de dv_{out}/dt para el amplificador, ya que hay una capacitancia interna del amplificador que debe cargarse por la corriente de salida de la primera etapa y, por consiguiente, el límite de corriente de la primera etapa corresponde al valor máximo de dv/dt para este condensador.

Con la amplitud de entrada fijada en el valor en el que la tensión de salida empieza justo a distorsionarse, calcule el valor máximo de dv_{out}/dt en la tensión de salida. Compare este valor con el de la velocidad de subida que se halló en la hoja de especificaciones del LM741.

7. Reduzca la frecuencia de tensión de entrada en un factor de 5 y mida de nuevo la velocidad de subida del amplificador hallando el valor de dv_{out}/dt para el que la tensión de salida comienza a distorsionarse. Compare esta medición con la anterior de la velocidad de subida.

8. Con el generador de señales fijo en una frecuencia de 1 kHz, aumente la amplitud de la tensión de entrada hasta que la tensión de salida quede saturada [la parte superior de la onda sinusoidal comienza a nivelarse]. Mida la tensión de saturación del amplificador [positiva y negativa] y compare los valores con las magnitudes positiva y negativa de la tensión de alimentación. Repita estas mediciones con la ayuda de una

resistencia de carga de 510 ohmios conectada entre la salida y la toma a tierra. ¿En qué difieren las tensiones de saturación de la prueba si se utiliza el amplificador sin una resistencia de carga [impedancia de carga infinita]?

9. Fije el generador de señales de forma que produzca una tensión de entrada de onda cuadrada. Ajuste la amplitud y la frecuencia de la tensión de entrada hasta que la salida se vuelva una onda triangular. ¿Por qué no es una onda cuadrada la forma de onda de salida? Calcule el valor de dv/dt para esta onda triangular. [Observe que ésta es una forma mucho más fácil y precisa de medir la velocidad de subida del LM741.]

10. A continuación, sustituya el chip del LM 741 por un amplificador operacional dual rail-to-rail LM6152.

AVISO: este dispositivo contiene DOS amplificadores operacionales. Rogamos conecte el terminal de salida a la entrada invertida (-) del amplificador operacional que no está en uso y conecte a tierra la entrada sin invertir para evitar que oscile mientras trabaja con el otro amplificador operacional.

Repita la medición de tensión de saturación del paso 8. ¿En qué difiere la tensión de saturación en la salida de este dispositivo de las tensiones de saturación que se consiguieron en el paso 8?

Experimento 2: comparación de los amplificadores operacionales LF356 y LM741.

En este experimento, comparará el funcionamiento de los amplificadores operacionales LF356 y LM741. Observe que el LF356 tiene prácticamente las mismas conexiones pin (o por clavijas) que el LM741. Sin embargo, la hoja de especificaciones muestra un potenciómetro de 25 k Ω offset-null con el wiper conectado a la tensión positiva de alimentación. Conecte un LF356 en la configuración de la Figura 1. No instale un potenciómetro offset-null [no es necesario para los objetivos de este experimento].

1. Utilizando los mismos valores de resistencia de la página 2, paso 5, y una entrada sinusoidal de 0,2 V_{p-p}, compare el ancho de banda del amplificador construido con un LF356 con el que midió en la configuración correspondiente utilizando el amplificador operacional LM741. Compare las mediciones con el valor que se facilita en la hoja de especificaciones.

2. Mida la velocidad de subida del LF356 y compare el valor que ha medido con el de la hoja de especificaciones. Puede que le resulte difícil realizar una medición precisa, por lo que le recomendamos que presente una suposición bien fundamentada.

3. ¿Cómo son la velocidad de subida y el ancho de banda del LM741 en comparación con el LF356?

Experimento 3: configuraciones del amplificador común.

En los experimentos anteriores, estudió la configuración del amplificador operacional invertido y en éste estudiará otras configuraciones comunes. Estos circuitos se muestran en la Figura 2. Utilice un amplificador operacional LM741 para estos experimentos, **excepto en el caso de la figura 2c, el circuito comparador, en el que debe utilizar el comparador LM311**. Para cada uno de los circuitos, dibuje un esquema y marque todos los valores en el informe de prácticas.

1. En la Figura 2[a] se muestra la configuración de un sumador invertido. Seleccione los valores de resistencia, de forma que $V_{out} = -(V_1 + 5 V_2)$. Seleccione el valor de resistencia R_4 para minimizar los efectos de la corriente de polarización de entrada. Construya el circuito y confirme su funcionamiento.

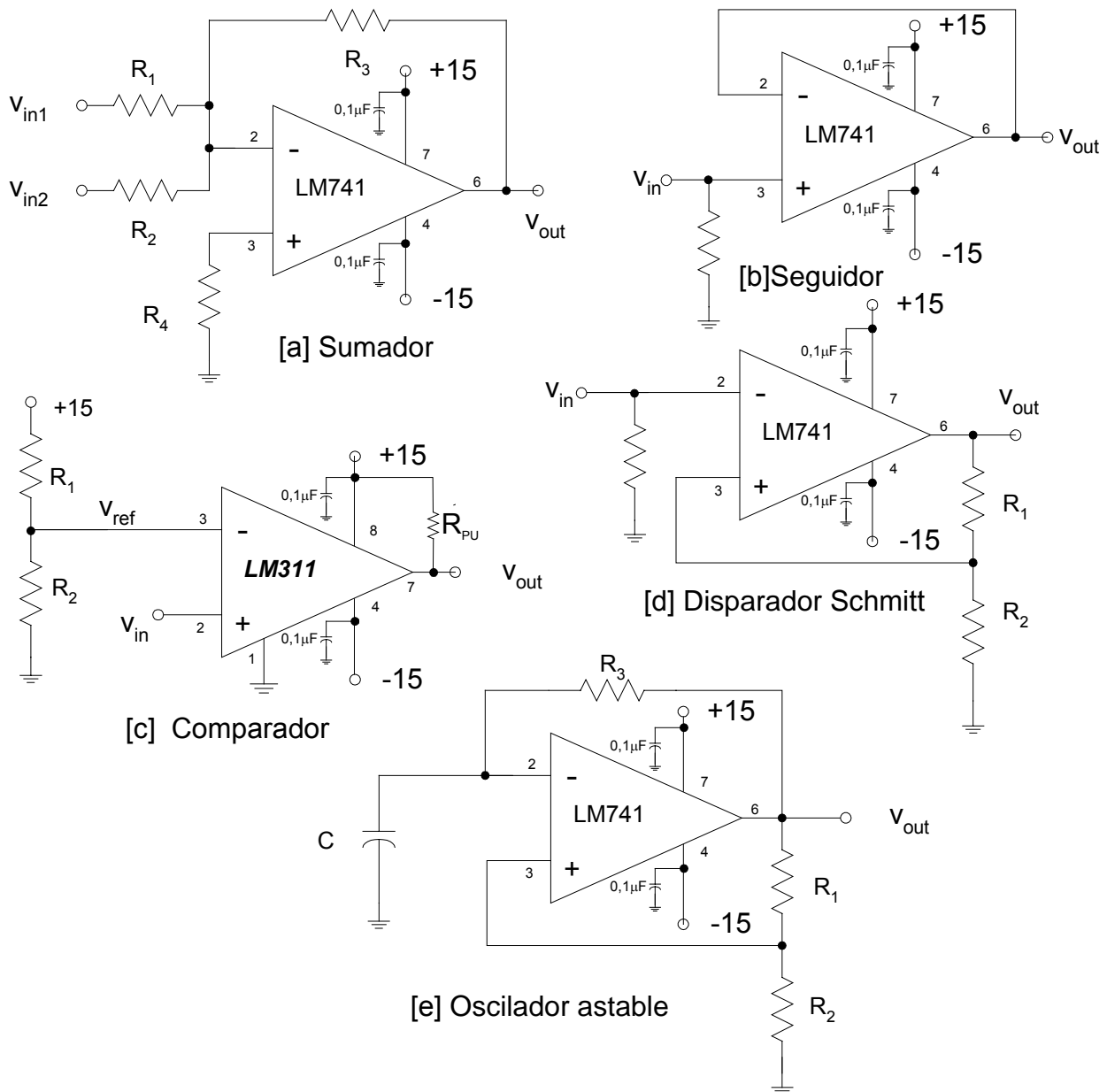


Figura 2. Circuitos para el experimento 3.

2. Construya el seguidor de tensión [buffer de ganancia unitaria] de la Figura 2[b]. Elimine la resistencia de conexión a tierra. Si no utiliza un condensador de acoplamiento, el circuito debería funcionar bien. ¿Por qué?

- Halle la frecuencia a la que la ganancia desciende a $1/\sqrt{2}$ [-3dB] del valor de baja frecuencia.

Inserte una resistencia de $10\text{ M}\Omega$ en serie con la entrada del seguidor de tensión [o para simular una fuente con una impedancia alta de fuente]. Al reconocer que una característica clave del seguidor de tensión es su impedancia de entrada, se espera que no haya cambios en la ganancia del seguidor del circuito. [Nota: la sonda de su osciloscopio tiene una resistencia de punta a tierra de $10\text{ M}\Omega$. ¿Qué efecto tendrá la sonda del osciloscopio si lo utiliza para medir la tensión de entrada a este amplificador?]. Observará que, en realidad, esto es cierto a frecuencias bajas. Sin embargo, se dará cuenta de que la ganancia disminuye bastante rápido con la frecuencia. Esto se debe a la presencia de capacitancia parásita en el circuito. En este caso, la elevada impedancia de la resistencia de fuente, en combinación con una pequeña cantidad de

capacitancia en la entrada al amplificador operacional, puede formar un filtro RC que reduzca la ganancia del amplificador operacional. Mida la frecuencia a la que la ganancia del amplificador desciende a $1/\sqrt{2}$ [-3dB] del valor de baja frecuencia en esta configuración y utilice esta medición para calcular el valor de la capacitancia parásita. **Observe que los efectos de las capacitancias de dispersión [junto con las cuestiones como la corriente de polarización de entrada] limitan la magnitud de los valores de resistencia que pueden utilizarse en las configuraciones prácticas de circuitos de amplificador operacional.**

3. En la Figura 2[c] se muestra la configuración de un circuito para un comparador. Las resistencias R_1 y R_2 ajustan el nivel de tensión al que la salida del circuito cambiará de una saturación positiva a otra negativa. Debido al condensador interno que se necesita para estabilizar los circuitos integrados (IC) diseñados para el funcionamiento del amplificador de retroalimentación negativa, y a la naturaleza de la etapa de salida, conducir tal amplificador a la saturación requiere un tiempo prolongado de recuperación una vez que el estímulo de entrada cambia. Esto hace que el uso del amplificador operacional como comparador a frecuencias elevadas sea una mala elección. [Los comparadores funcionan sin retroalimentación]. Por consiguiente, se han desarrollado unos productos para ser utilizados como compensadores. Estos dispositivos tienen salida de colector abierto y, por lo tanto, requieren una resistencia externa conectada al carril de alimentación positiva para funcionar de forma adecuada. El tamaño de la resistencia externa dependerá de la cantidad de corriente que se necesite para accionar la carga cuando el transistor de salida esté conectado [saturado] y la corriente fluya desde la alimentación a través de la resistencia de carga hasta la carga en la salida. Los valores típicos de resistencia se encuentran en el margen de $1,0k\Omega$ a $10k\Omega$. Esta resistencia es R_{PU} en el dibujo. Observe también que, aunque el comparador está conectado a las alimentaciones de +15 y -15 V, la salida oscila solamente de tierra a +15 voltios en el circuito que se muestra. [Se puede disponer la salida para que conduzca cargas que se refieran a la alimentación positiva o a la negativa, así como una carga referida a tierra, como se ilustra aquí. Para más información acerca del uso de este dispositivo, véase la hoja de especificaciones del LM311. Si su comparador oscila en el punto (de bajo a alto o viceversa) de transmisión, consulte los consejos de aplicación de la hoja de especificaciones para solucionarlo].

- Construya un comparador que cambie cuando la tensión de entrada alcance un nivel de aproximadamente +5,0 V. **Utilice los valores estándar de resistencia del 5%**, uno cada uno para R_1 y R_2 .
- Mida el tiempo que tarda el comparador en cambiar de una tensión de saturación positiva a una negativa.

4. En la Figura 2[d] se muestra la configuración del circuito para un disparador Schmitt, que utiliza el amplificador operacional como comparador y una retroalimentación positiva para crear un interruptor "histórico". Si analiza este circuito, descubrirá que si la salida del disparador Schmitt es positiva, la entrada tendrá que aumentarse en una fracción de la tensión de salida antes de que ésta cambie a un valor negativo. Entonces, será necesario utilizar el mismo nivel de tensión negativa de entrada antes de que la salida cambie a un valor positivo. Este circuito se puede utilizar para "comparar" señales ruidosas que se esperan que tengan la suficiente diferencia en sus valores como para sobrepasar los umbrales del diseño. En otras palabras, el disparador Schmitt no cambiará los estados de las salidas únicamente cuando se presente ruido en la entrada, en el caso de que el ruido sea menor que los umbrales. El comparador estándar anterior cambiará de estado fácilmente [¡y a menudo!] con una entrada de ruido. Halle R_1 y R_2 de forma que la tensión del umbral del disparador Schmitt sea aproximadamente $1/3$ de la magnitud de la tensión de alimentación. Construya el circuito y verifique los cálculos que ha realizado.

5. En la Figura 2[e] se han añadido un condensador y una resistencia al disparador Schmitt de la Figura 2[c] para producir un oscilador. Muestre la forma de onda de salida en su informe de prácticas, además de la tensión de carga y descarga del condensador. Explique cómo afecta el valor de la tensión del umbral de histéresis a la frecuencia de oscilación. Halle los valores de R_3 y C para producir una oscilación a aproximadamente 1000 Hz. Verifique los resultados de forma experimental.

Experimento 4: integradores, filtros, etc.

En este experimento, utilizará condensadores y resistencias en los circuitos de retroalimentación de su amplificador operacional. Todos estos circuitos se pueden considerar en términos del dominio de tiempo [ecuaciones diferenciales] o de la frecuencia [funciones de transferencia], dependiendo de la aplicación.

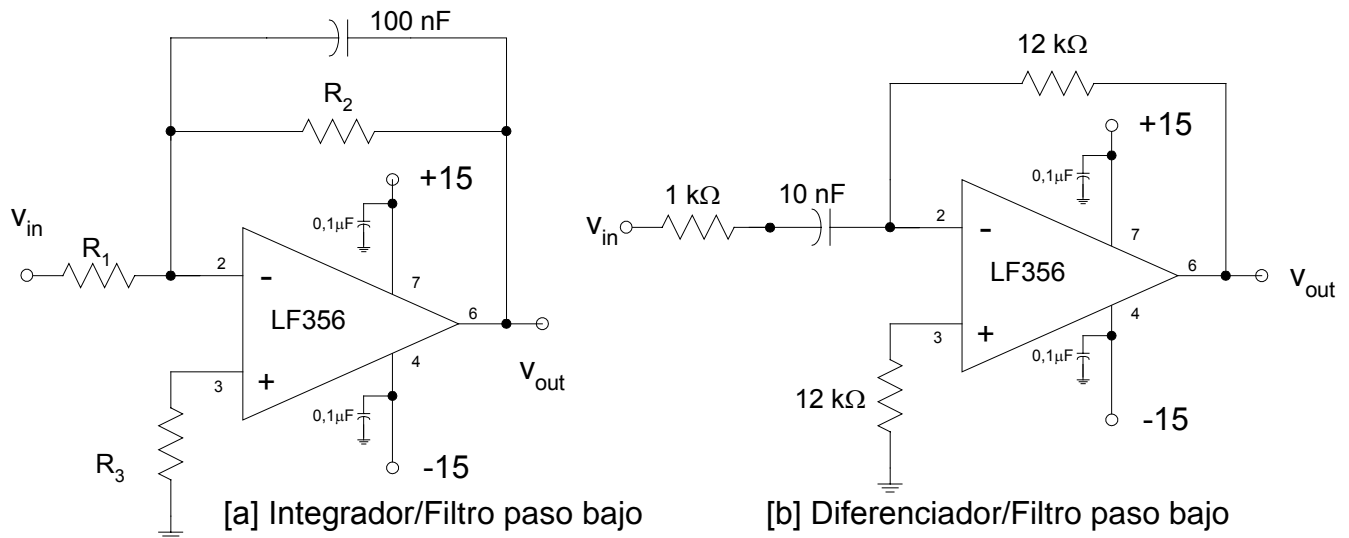


Figura 3. Circuitos para el experimento 4.

1. En la Figura 3[a] se muestra la configuración de un integrador/filtro paso bajo. En el dominio de frecuencia, este circuito corresponde a un filtro paso bajo. Para este experimento, usted desea diseñar este circuito para que sea un integrador a una frecuencia de 4000 Hz. Puesto que el circuito no será un integrador perfecto, querrá asegurarse de que el desplazamiento de fase entre la salida y la entrada será de al menos -85° [un integrador ideal tendría un desplazamiento de fase de -90°]. Diseñe el circuito para que tenga una ganancia de baja frecuencia de un valor de -10 . Muestre los cálculos que realice. Mida la magnitud y el ángulo de fase de la función de transferencia del circuito a 4000 Hz para verificar sus cálculos.

[NOTA: para que el integrador se integre a 4000 Hz, debe estar bien situado en la parte inferior de la pendiente del diagrama de respuestas que provocó el polo que determinó R_2 y el condensador de 100 nF en el bucle de retroalimentación. Es mejor mantener una diferencia de una década entre la frecuencia de esquina y la frecuencia en la que quiere que funcione el integrador. Recuerde que, mientras dibujamos líneas rectas para mostrar la ganancia en las frecuencias de esquina o en los puntos de ruptura, el cambio real de respuesta es gradual y este punto de ruptura es únicamente de -3dB , que corresponde al desplazamiento de fase de sólo -45 grados. Por lo tanto, le rogamos que tenga esto en cuenta al seleccionar su punto -3dB].

- Trace la magnitud medida de la función de transferencia en función de la frecuencia. En el mismo diagrama, dibuje las asíntotas que prevé para esta función de transferencia basándose en la función de transferencia calculada. ¿Cuál es el ancho de banda de este filtro?

2. En la Figura 3[b] se muestra la configuración del circuito para un diferenciador. En el dominio de frecuencia, este circuito corresponde a un filtro paso alto.

- Calcule la función de transferencia para este circuito. ¿Para qué frecuencias produce una forma de onda de salida derivada de la entrada?
- Aplique una onda triangular a este circuito. Observe la salida en función de la frecuencia. Verifique que este circuito funciona, en realidad, como un diferenciador. Fíjese que a frecuencias superiores verá cómo el

límite de velocidad de subida del amplificador domina el funcionamiento del circuito a medida que aumenta la amplitud de entrada. ¿A qué frecuencia comienza a deteriorarse el funcionamiento del diferenciador?

- En el dominio de frecuencia, este circuito se puede considerar como un filtro de paso alto. Trace la respuesta en frecuencia medida desde 10 Hz a 100 kHz. En el mismo diagrama, dibuje las asíntotas que prevé para esta función de transferencia basándose en la función de transferencia calculada.

Experimento 5: otras aplicaciones del amplificador operacional.

1. Construya el circuito de la Figura 4[a]. Con el generador de funciones ajustado para producir un senoide de 5 V p-p a 60 Hz, observe y dibuje la forma de onda de salida. Fíjese que es una versión rectificadora de una onda de la tensión de entrada, pero que usted no ve la caída de 0,6 V que vería si hubiese realizado un rectificador de diodos sencillo. Este circuito se conoce como rectificador de precisión. [El diodo está encerrado en el bucle de retroalimentación y, por consiguiente, la retroalimentación corrige el "error" de caída de tensión directa del diodo].

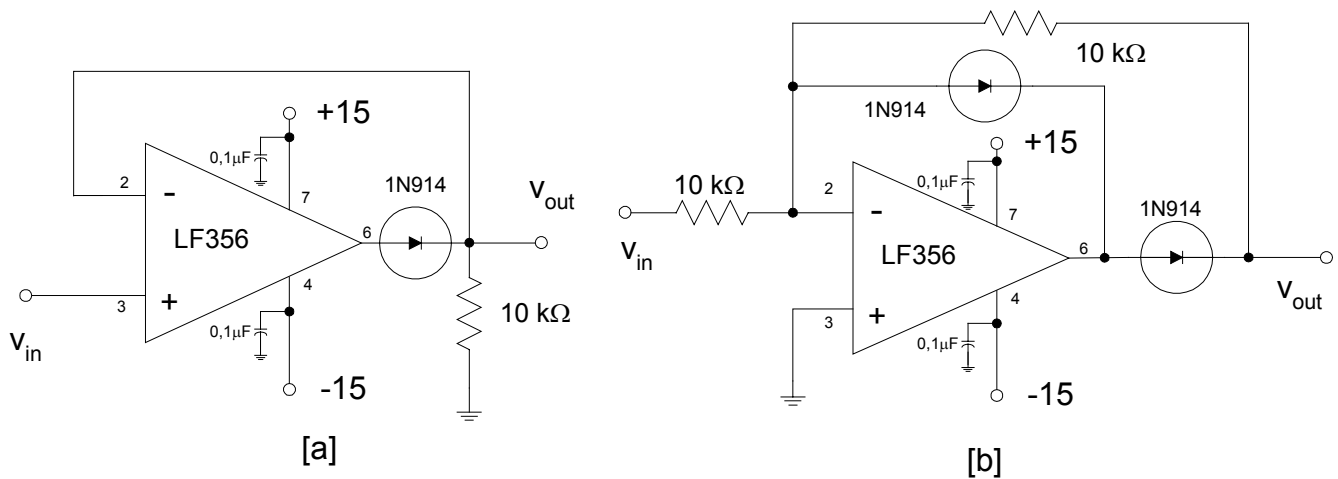


Figura 4. Circuitos para el experimento 5.

Aumente la frecuencia hasta que la tensión de salida deje de parecerse a un senoide bien rectificado. La razón la sabrá si revisa la salida del amplificador, pin 6. Observe que cuando la señal de entrada es negativa, el diodo está desconectado, lo que hace que la retroalimentación del amplificador se desconecte provocando que la salida del amplificador experimente una saturación negativa. Cuando la tensión de entrada se vuelve de nuevo positiva, la salida del amplificador tarda una cantidad limitada de tiempo [determinada por la velocidad de subida del amplificador] en regresar de la saturación negativa y alcanzar a la entrada. Mida el tiempo de recuperación de este circuito.

La Figura 4[b] es un circuito para un rectificador de precisión "mejorado". Construya este circuito y verifique que, en efecto, proporciona un funcionamiento mejorado al circuito de la Figura 4[a]. Aumente la frecuencia de entrada hasta que observe que el funcionamiento del circuito de este rectificador comienza a deteriorarse. ¿Aproximadamente, a qué frecuencia ocurre esto? Explique por qué funciona mejor este circuito que el rectificador sencillo.

2. Como se indica en la hoja de datos, el amplificador operacional LF356 puede suministrar una corriente máxima de salida de aproximadamente 25 mA [el LF356 es un cortocircuito protegido para limitar su corriente de salida a un valor que no destruya el dispositivo]. Las Figuras 5[a] y [b] muestran dos configuraciones de circuito en las que se ha añadido una etapa de salida push-pull [que consiste en un transistor 2N3904 y otro 2N3906] a la salida del LF356. Según las hojas de datos, cada uno de estos transistores puede suministrar hasta 200 mA y puede disipar una potencia total de hasta 350 mW.

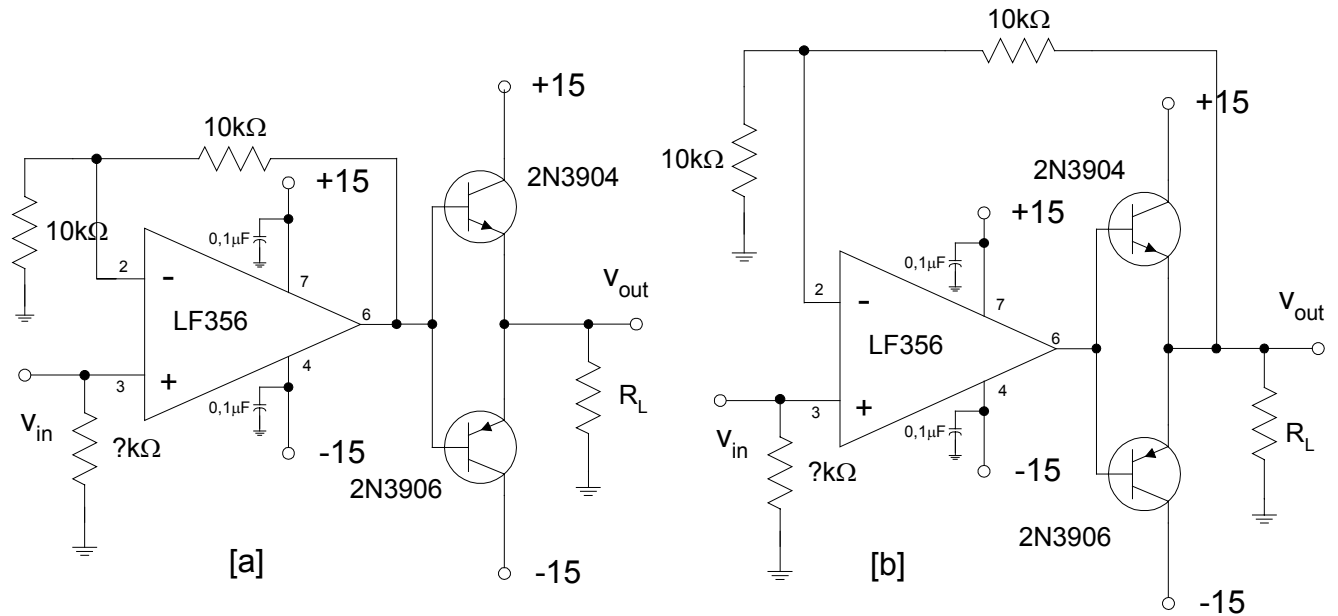


Figura 5. Circuitos de etapa de salida push-pull.

Con $R_L = 2,2 \text{ k}\Omega$, aplique una onda sinusoidal de 500 mV p-p, 500 Hz, a la salida de cada circuito. ¿Qué tensión de salida observa en cada uno de los circuitos? ¿Por qué? ¿En qué medida ayuda la retroalimentación del circuito de la Figura 5[b] al funcionamiento de este circuito? [Consejo: estudie y compare las salidas de los amplificadores operacionales en cada uno de los circuitos].

Aumente la amplitud de entrada a 1,0 V p-p. Compare de nuevo las dos formas de onda de salida. Observe la distorsión [conocida como distorsión de cruce] que se da en la salida del circuito de la Figura 5[a]. ¿Cuál es la fuente de esta distorsión? ¿Cómo reduce de forma notable el nivel de esta distorsión la configuración de la Figura 5[b]?

- ¿Cuál es el valor mínimo de resistencia de carga R_L que puede utilizarse en el circuito de la Figura 5[b] sin exceder las capacidades de disipación de potencia de los transistores de salida? [Para evitar dañar los transistores, sería buena idea limitar la disipación de potencia en los mismos a un máximo de 200 mW]. Utilice este valor de resistencia de carga y verifique que el circuito puede, en efecto, conducir esta resistencia de carga a través del margen completo de tensión de alimentación. [Consejo: es posible que deba utilizar condensadores de desacoplo de 10 nF o 100 nF entre los suministros positivos y negativos y de toma de tierra para evitar que el circuito oscile durante la prueba]. A continuación, elimine la etapa de salida push-pull y conduzca la resistencia de carga directamente del LF356 [conectado como seguidor de tensión]. ¿Cuáles son la tensión y la corriente máximas que puede suministrar a la carga el amplificador operacional? Halle este valor en la hoja de especificaciones del amplificador operacional.
- Sustituya el LF356 de la figura 5b por uno de los amplificadores operacionales en el LM6152. Repita todas las instrucciones del párrafo anterior utilizando este nuevo dispositivo. ¿Cuáles son las principales diferencias?