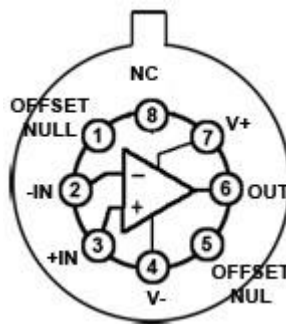


Amplificadores operacionales



Parte I



Amplificador:

- Amplificación (y atenuador)
- Filtro
- Comparador
- Oscilador
- Otros

Operacional:

- Suma (y resta)
- Derivador
- Integrador
- Promedio
- Otros

Símbolos:

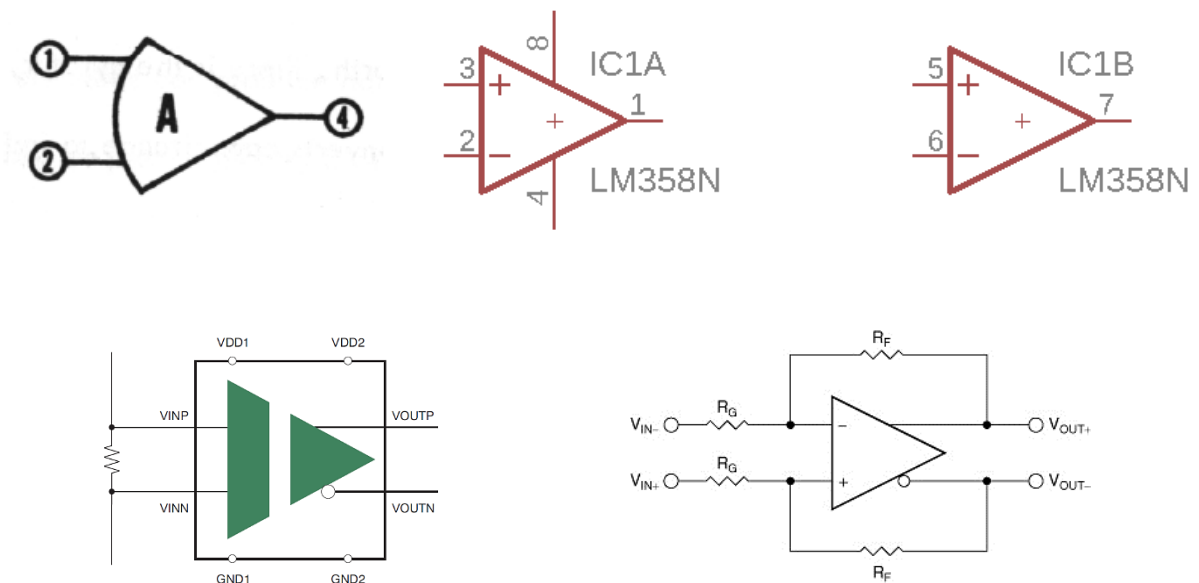
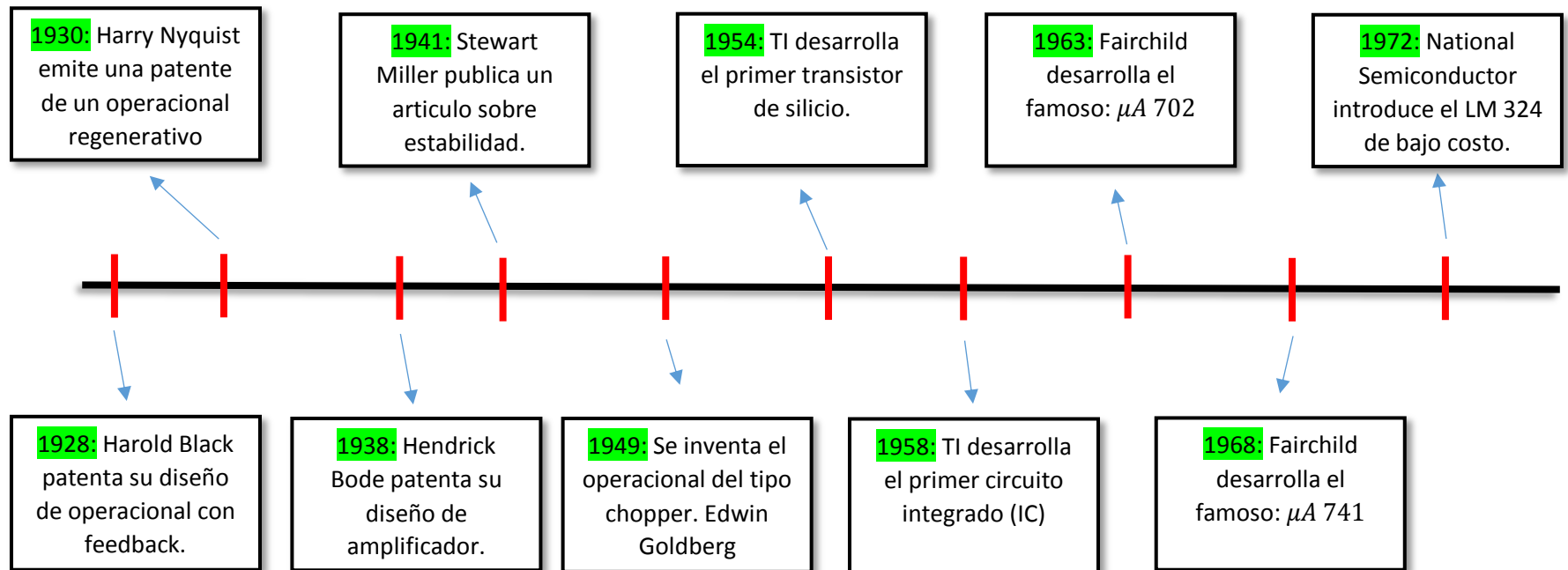


Figura 1: Distintos tipos de símbolos



Aspectos históricos



Amplificador operacional ideal:

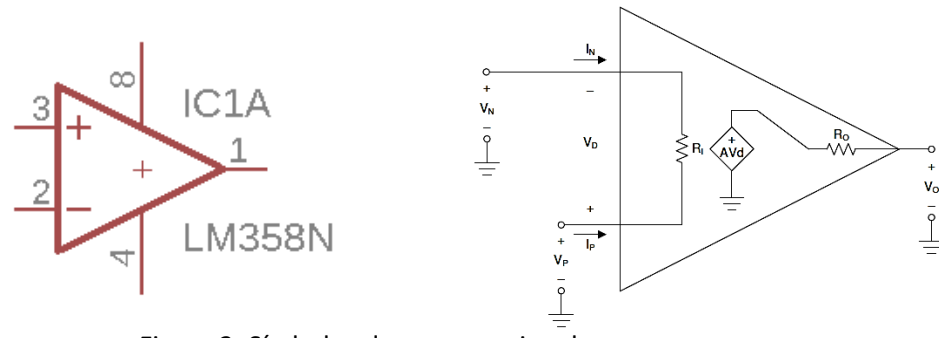


Figura 2: Símbolos de un operacional

Atributos del amplificador operacional ideal:

- ✓ Infinita ganancia en lazo abierto
- ✓ Cero ganancia en modo común
- ✓ Cero tensión de offset
- ✓ Cero corriente de bias
- ✓ Entradas de alta impedancia
- ✓ Salidas de nula impedancia
- ✓ Ancho de banda infinito
- ✓ Slew rate infinito
- ✓ Cero drift (No hay dependencias a través del tiempo, temperatura, humedad)

La técnica de la retroalimentación:

Hablando en términos generales, los amplificadores operacionales emplean lo que llamaremos lazo de retroalimentación tendrán un desempeño superior, a costas de sacrificar la ganancia. Así, el secreto es: una porción de la salida vuelve a la entrada para reducir la ganancia total.

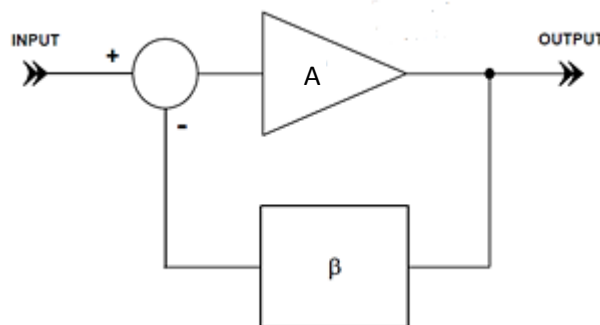


Figura 3: Diagrama en bloques de un operacional



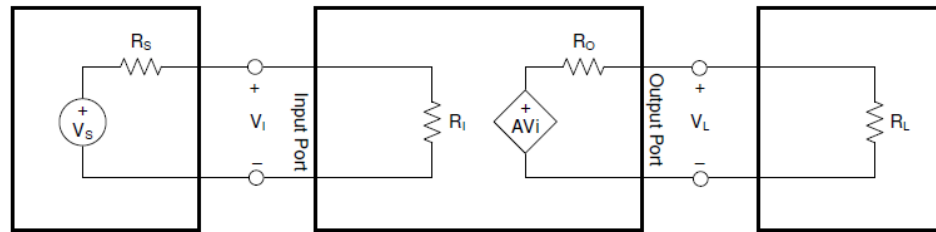


Figura 4: Equivalente de Thévenin de un amplificador operacional

Dependiendo de la naturaleza de señal de entrada y salida, podemos tener cuatro tipos de funcionamiento de amplificadores operacionales:

- ✓ Tensión (tensión de salida / tensión de entrada)
- ✓ Corriente (corriente de salida / corriente de entrada)
- ✓ Transimpedancia (tensión de salida / corriente de entrada)
- ✓ Transconductancia (corriente de salida / tensión de entrada)

Función de transferencia

Cuando se habla de la función de transferencia se está haciendo referencia a la **ganancia**. La misma indica que tan grande es la señal de salida respecto de la señal de entrada. De esta forma, para una entrada V_{IN} y una salida V_{OUT} se define a la ganancia como:

$$Ganancia = \frac{\text{salida}}{\text{entrada}} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

Tal como se usa, la red de retroalimentación β define la expresión de “transferencia” general del amplificador. Por lo tanto, algunos componentes pasivos, generalmente solo resistencias, establezca las características requeridas del sistema.

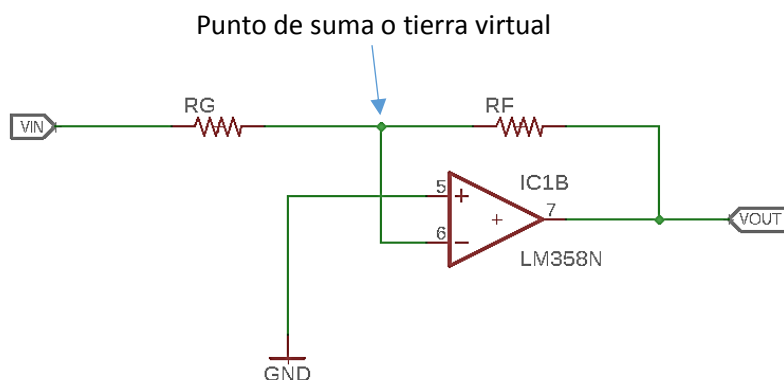


Figura 5: Esquema de un operacional con retroalimentación



Tierra virtual

En general, la entrada inversora (-) se denomina punto de suma o tierra virtual y no permitirá drenar corriente hacia el amplificador. Otro concepto importante que debemos aclarar es que tanto la entrada inversora (-), como la no inversora (+) deben permanecer a la misma tensión. Ambos conceptos nos permitirán hallar ecuaciones para predecir el comportamiento de las distintas configuraciones en los amplificadores operacionales.

Amplificador operacional en lazo abierto

Considere el amplificador operacional en lazo abierto de la figura 5. Recordemos que no circula desde "VIN" hasta la entrada no inversora (-) por lo que no existe caída de tensión sobre R1. Por tanto cuando VIN es cero, la salida del operacional es cero. Si VIN toma un valor distinto de cero, la salida aumenta hasta la condición de saturación.

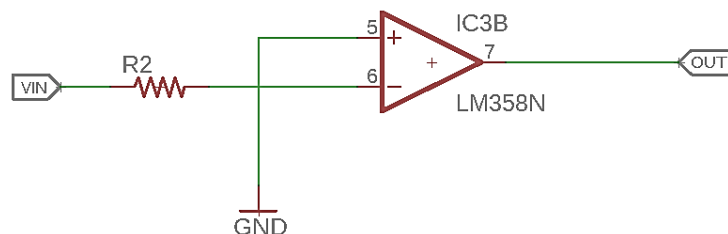


Figura 6: Esquema de un operacional a lazo abierto

Amplificador operacional seguidor de tensión o buffer

La configuración de la figura 7, demuestra como la ganancia pasa de un valor infinito a un valor finito. Observando la figura, se observa que la tensión de la entrada no inversora (+) es VIN, por otro lado, la tensión en la entrada inversora (-) se aproxima a la entrada no inversora (+) y la salida también lo hace: $V_{IN} = V_{OUT}$

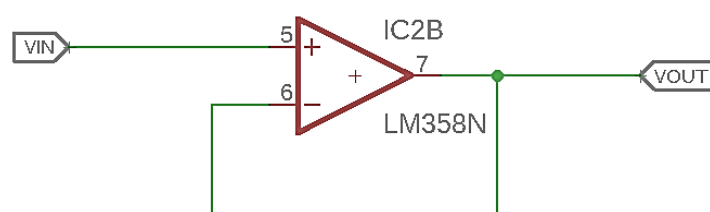


Figura 7: Esquema de un operacional como seguidor



Amplificador operacional no inversor

Analizamos el circuito de la figura 8 por su similitud a la configuración de seguidor de tensión.

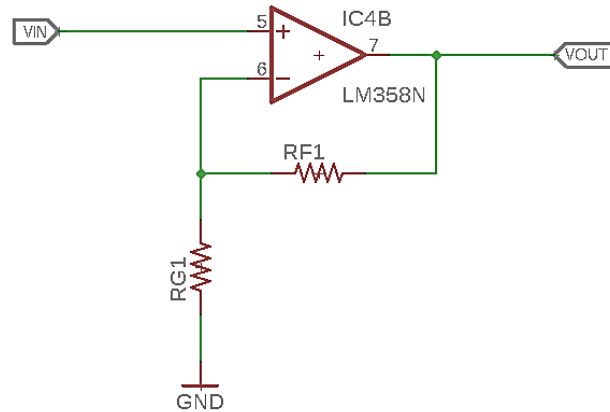


Figura 8: Esquema de un operacional no inversor

Dado que no circula corriente por la entrada no inversora (+), RF y RG forman un simple divisor de tensión:

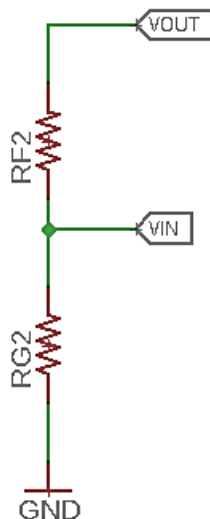


Figura 9: Esquema equivalente

La misma tensión debe aparecer en las entradas del operacional, entonces:

$$V_- = V_+ = V_{IN}$$



$$V_{IN} = \frac{R_G}{R_F + R_G} V_{OUT} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_F + R_G}{R_G}$$

$$G = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$

Concluimos que, con la fórmula anterior, controlamos la ganancia del circuito. Además, la impedancia de entrada es infinita dado que no circula corriente por ellos y la de salida es cero. La ganancia puede ser seteada a partir de la unidad.

Amplificador operacional inversor

Según se observa en la figura 10 y dado que no circula corriente por sus entradas y además la tensión en ellas se aproxima a cero diremos que:

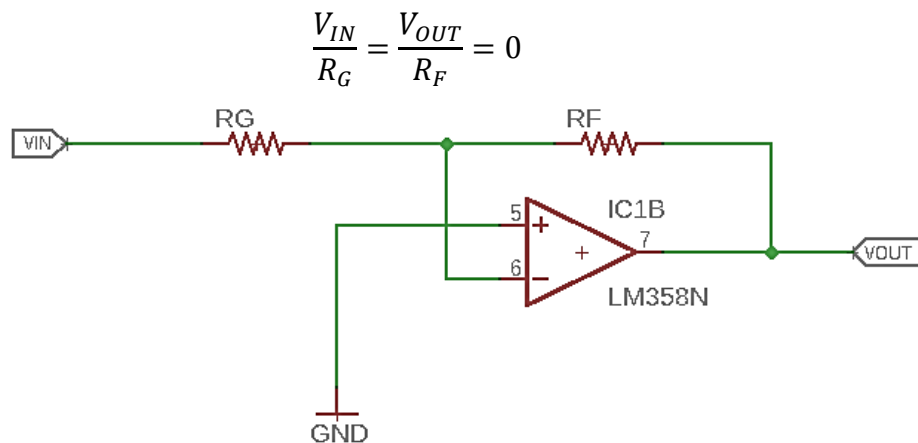


Figura 10: Amplificador operacional inversor

La impedancia de entrada a este circuito no es infinita como en los casos anteriores, la entrada inversora está conectada a tierra por lo que la fuente "ve" efectivamente a R_G como la impedancia de entrada. La impedancia de salida es cero y la señal opuesta a la entrada.

$$G = -\frac{R_F}{R_G}$$



Un caso especial se da cuando $R_F = R_G$ el cual se convierte en el llamado “inversor de ganancia unitaria”. Otro caso especial se da cuando R_G es mayor a R_F obteniendo así una ganancia menor a la unitaria.

Amplificador operacional integrador

Si un capacitor es utilizado en el lazo de retroalimentación en un operacional inversor como se observa en la figura 11, se obtiene lo que denominamos integrador. Un resultado intuitivo de esta configuración es pensar que la corriente que circula por el lazo de retroalimentación carga al capacitor y la almacena en forma de tensión. Dado que no se trata de una red puramente resistiva, utilizaremos impedancias para el análisis del siguiente circuito.

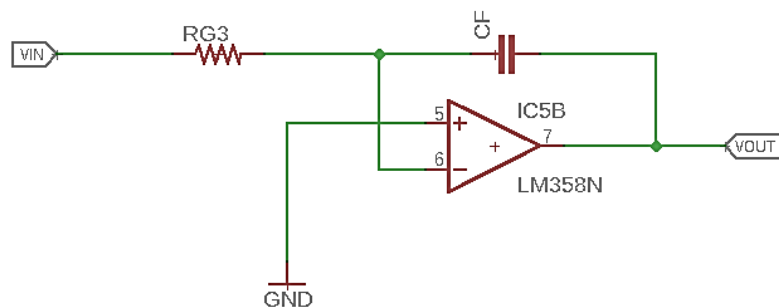


Figura 11: Amplificador operacional integrador

Cada vez que se coloca una impedancia dependiente de la frecuencia en una red de retroalimentación, se obtiene una respuesta de frecuencia inversa. Por ejemplo, si un capacitor, que tiene una impedancia dependiente de la frecuencia que disminuye al aumentar frecuencia, se coloca en la red de retroalimentación de un amplificador operacional, se forma un integrador, como en la figura anterior. También se puede pensar en un integrador de como un filtro pasa bajos.

Dada la fórmula general para un amplificador inversor, tenemos que:

$$V_{OUT} = -\frac{Z_F}{Z_G} V_{IN}$$

La impedancia capacitiva está dada para análisis de corriente alterna por:

$$Z_C = \frac{1}{j \omega C}$$

Por otro lado, mediante ecuaciones diferenciales se puede demostrar que el capacitor se comporta como el operador derivada: $\frac{d}{dt}$

$$Z_C = Z_F = \frac{1}{C'(t)} \quad , \quad Z_G = R$$

$$V_{OUT} = -\frac{Z_F}{Z_G} V_{IN} = -\frac{1}{R C'(t)} V_{IN} \Rightarrow$$

$$V_{OUT} = -\frac{V_{IN}}{R C} dt$$

Los circuitos integrados trabajan de manera satisfactoria, pero tiene el defecto de que almacenan corriente de offset en el lazo causando errores en la tensión de salida.

Amplificador operacional derivador

Utilizando un capacitor en la entrada no inversora (-) se convierte en un derivador.

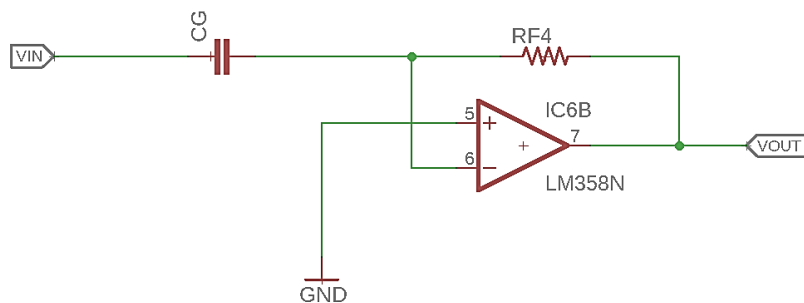


Figura 12: Amplificador operacional derivador



Consideremos la figura 13 para comprender el funcionamiento.

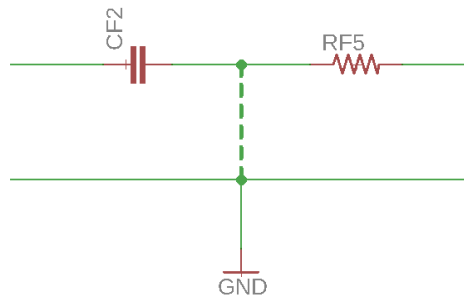


Figura 13: Amplificador operacional derivador equivalente

Dado que tenemos que la entrada inversora (-) es tierra virtual, tenemos que:

$$I_C = C \frac{dV_{IN}}{dt} \quad y \quad I_C - I_R = 0$$

$$C \frac{dV_{IN}}{dt} + \frac{V_{OUT}}{R} = 0$$

$$V_{OUT} = -R C \frac{dV_{IN}}{dt}$$

Amplificador operacional sumador de señales (restador)

En muchas aplicaciones, en la entrada no inversora (-) se presenta más de una tensión de entrada, como se observa en la figura 14.

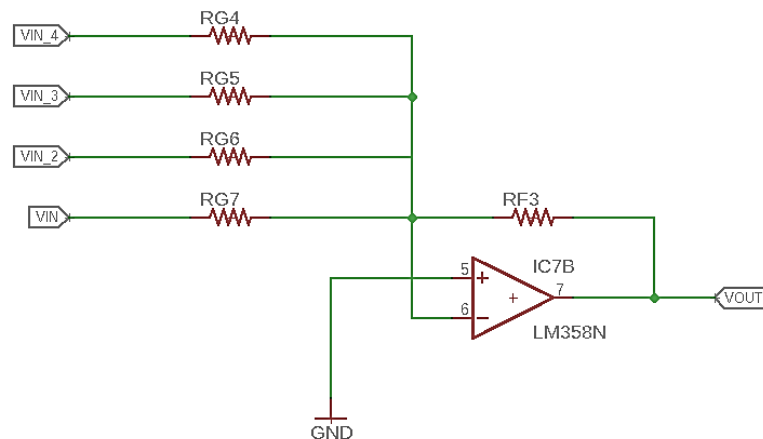


Figura 14: Amplificador operacional sumador



La corriente total en el lazo de retroalimentación será la suma parcial de cada una de las entradas. Cada fuente, V_{IN} , V_{IN_2} , contribuye en la formación total de la corriente, y no ocurre interacción entre ellas. Todas ven a R_G como la impedancia de entrada mientras que la ganancia es: $-\frac{R_F}{R_G}$.

La suma directa se obtiene cuando: $R_F = R_G$. Cuando esto no ocurre, se pueden escalar las ganancias para obtener:

$$V_{OUT} = -R_F \left(\frac{V_{IN}}{R_{G1}} + \frac{V_{IN2}}{R_{G2}} + \frac{V_{IN3}}{R_{G3}} + \dots + \right)$$

Agregando un capacitor en el lazo de retroalimentación se obtiene una configuración de sumador integrador.

Amplificador operacional restador o diferencial

En la figura 15 se observa que se utilizan ambas entradas del amplificador operacional diferencial.

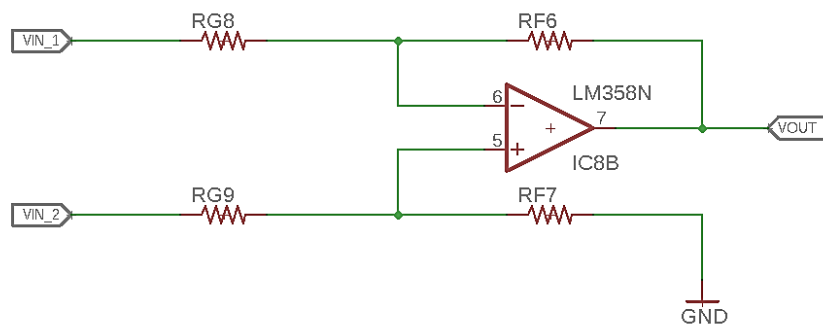


Figura 15: Amplificador operacional diferencial

Su operación se puede comprender considerando una combinación de amplificador inversor y no inversor, donde la entrada de tensión se toma desde el divisor de tensión formado por R_F y R_G . Ver figura siguiente:

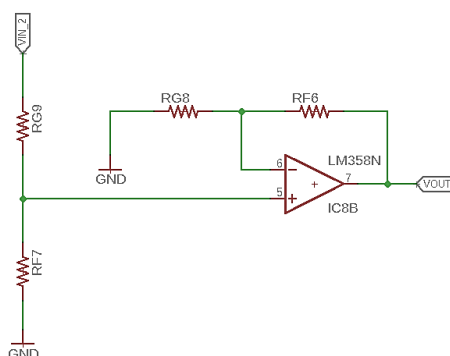


Figura 16: Combinación de amplificador inversor y no inversor



Dado que la salida debido a V_{IN2} viene dada por:

$$V_{OUT} = \frac{R_F + R_G}{R_G} \left(\frac{R_F}{R_F + R_G} \right) V_{IN2} = \frac{R_F}{R_G} V_{IN2}$$

Si conectamos V_{IN2} a GND el circuito se convierte en un simple inversor, debido a V_{IN1} se tiene:

$$V_{OUT} = -\frac{R_F}{R_G} V_{IN1}$$

Por lo tanto:

$$V_{OUT} = \frac{R_F}{R_G} (V_{IN2} - V_{IN1})$$

Las entradas del operacional se mantienen a un nivel de tensión de: $\left(\frac{R_F}{R_F + R_G} \right) V_{IN2}$ el tiene un efecto negativo sobre un amplificador real. la impedancia de entrada vista por V_{IN1} y V_{IN2} no se encuentran equilibradas. La impedancia de entrada vista por V_{IN1} es R_G , pero la impedancia de entrada vista por V_{IN2} es $R_F + R_G$. Dicho problema se puede solucionar adicionando etapas de buffer en cada una de las entradas, aunque esto puede agregar otros defectos que trataremos más adelante.

Amplificador operacional sumador de señales (sumador)

Hemos visto la configuración del amplificador como sumador inversor de señales. Entonces, ¿cuál es la ventaja de la configuración no inversora en comparación con la suma inversora? Además del hecho más obvio de que la tensión de salida del amplificador operacional está en fase con su entrada, y la tensión de salida es la suma de todas sus entradas que a su vez están determinadas por sus relaciones de resistencia, la mayor ventaja de la suma no inversora amplificador es que debido a que no hay una condición de tierra virtual a través de los terminales de entrada, la impedancia es mucho más alta que la de la configuración estándar del amplificador inversor.



Si la ganancia de lazo cerrado del amplificador operacional no inversor se iguala al número de sumando entradas, entonces el voltaje de salida de los amplificadores operacionales será exactamente igual a la suma de todas las entradas.

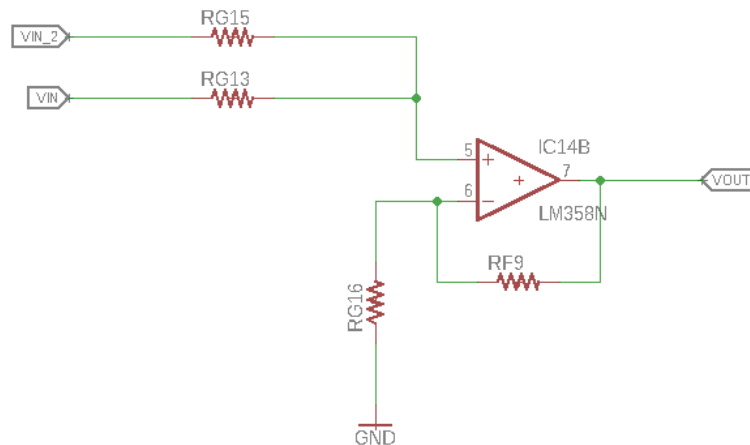


Figura 17: Amplificador operacional sumador no inversor

$$G = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$

Es decir, para el caso de suma de dos señales, la ganancia es igual a 2, para un amplificador sumador de tres entradas, la ganancia del amplificador operacional es 3, y así sucesivamente.

Aplicación de amplificador operacional restador o diferencial

Haremos uso de la configuración ya vista para eliminar el ruido presente en una señal. Existen más de un tipo de ruido, pero estudiaremos el ruido en modo común. Tal como lo indica su nombre, es una señal indeseada que se encuentra presente en ambas entradas del amplificador operacional.

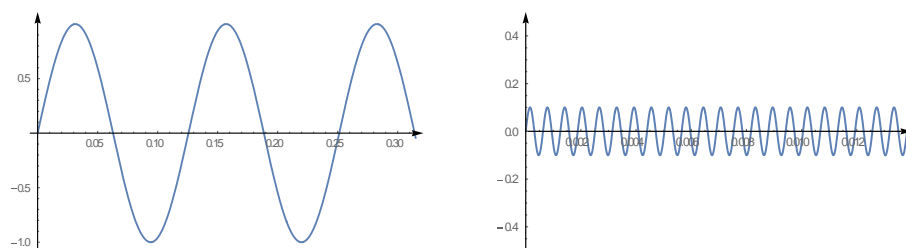


Figura 18: Izquierda señal, derecha ruido de alta frecuencia



Utilizaremos el generador de señales para fabricar una función, en este caso senoidal a la cual le sumaremos (con un amplificador operacional sumador) otra señal pero de menor amplitud y mayor frecuencia para obtener una señal similar a la de la figura 19.

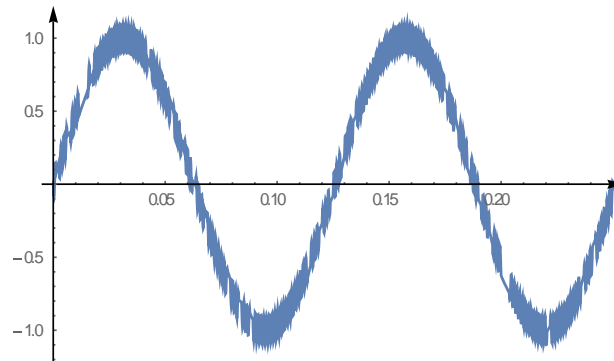


Figura 19: Suma de ambas señales

A dicha señal le restaremos “el ruido” para volver a obtener la señal original. Esta técnica se usa mucho a nivel industrial para obtener señales con menos ruido.

Amplificador operacional de entrada simple y salida diferencial

En algunas oportunidades se puede dar el caso de tener que manejar, por ejemplo, un ADC con entrada diferencial. En caso no contar con dicha señal, se puede fabricar una salida diferencial con dos etapas de operacionales. La primera etapa es un seguidor y la segunda es un amplificador inversor de ganancia unitaria. Siempre que trabajemos con señales diferenciales debemos tener dos señales de igual magnitud pero opuestas (o desfasadas 180° en caso de señales senoidales) para que luego de ser restadas sea posible reconstruirla. La ganancia final, será la resta de las ganancias de cada una de las etapas.

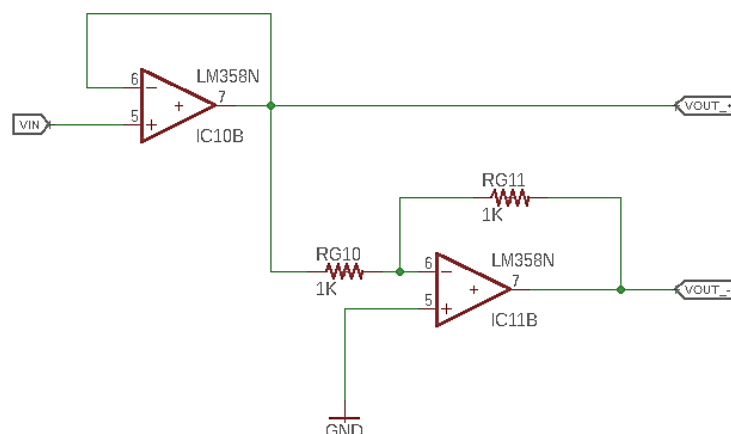


Figura 20: Entrada single y salida diferencial. $G = 2$



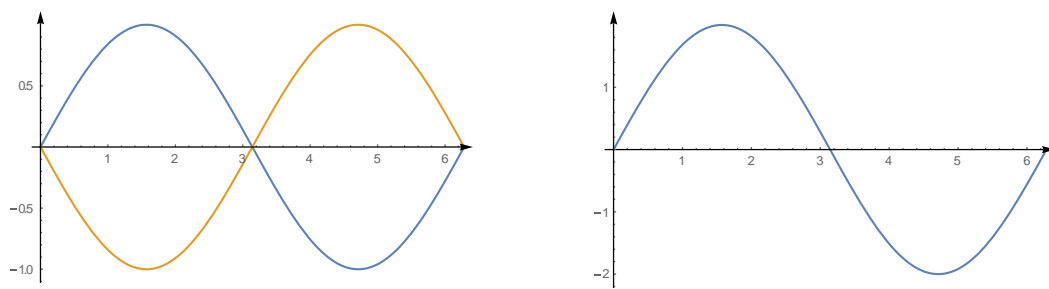


Figura 21: izquierda funciones desfasadas. Derecha: Resultante de la resta

Amplificador operacional de entrada diferencial y salida diferencial

Observando la figura 22, la primera etapa tenemos un amplificador operacional que amplifica de modo diferencial. La segunda etapa de ganancia unitaria pero inversora alimenta, en su salida, a RF15 como tierra de referencia. Esta configuración tiene dos grandes efectos: la corriente de entrada se iguala en magnitud que como consecuencia se logra balancearlas y la ganancia disminuye a la mitad.

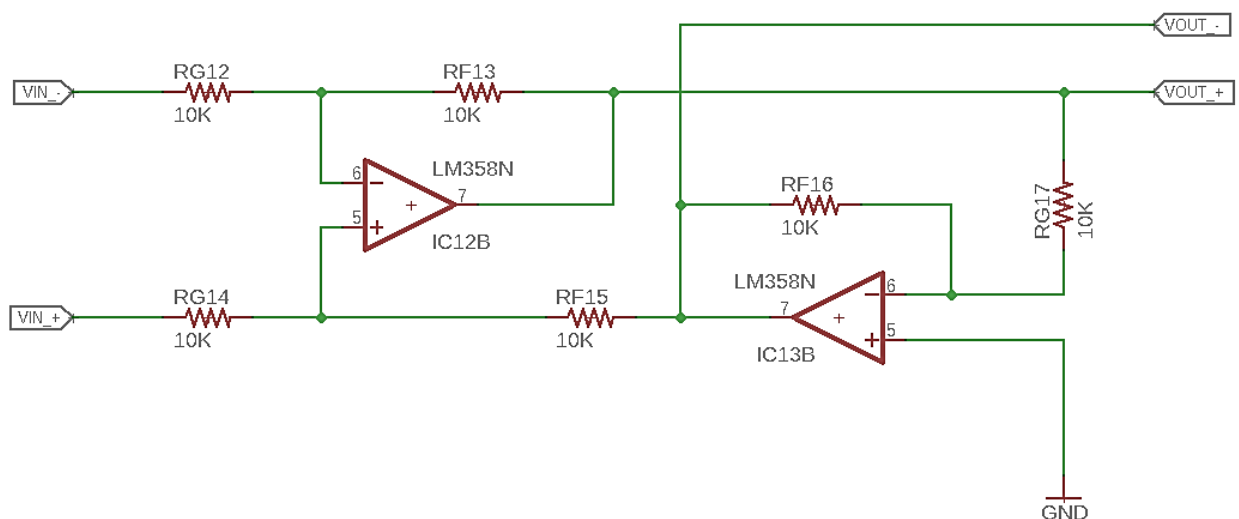


Figura 22: Amplificador operaciones con entrada y salida diferencial.



Redes de adelanto y retrasos de fase

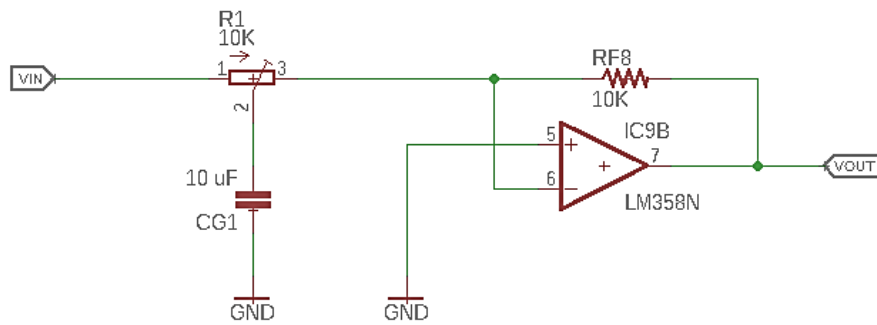


Figura 23: Red de retraso

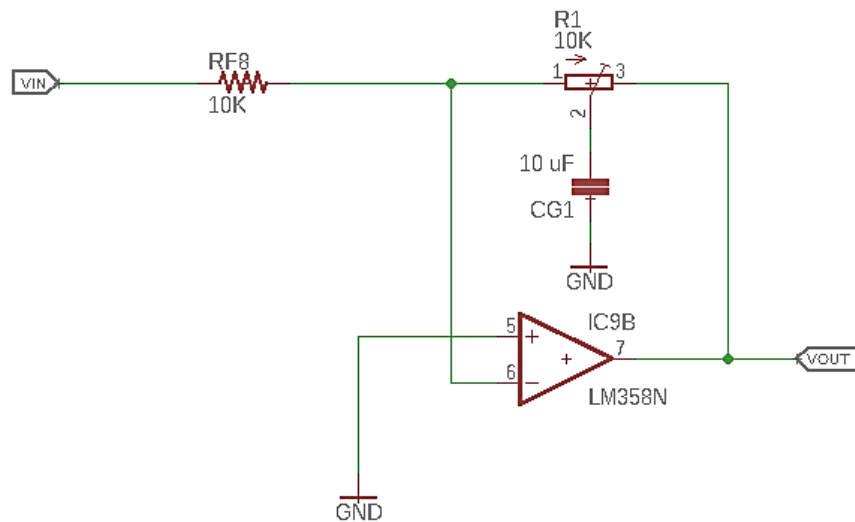


Figura 24: Red de adelanto

