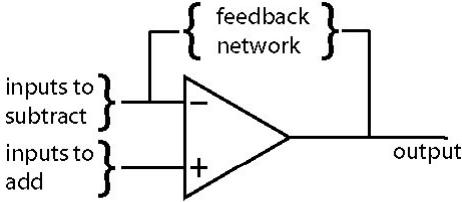
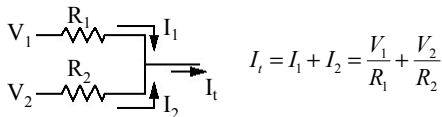


## Diapositiva 1

**Diseño con retroalimentación**



En las entradas, la corriente que entra controla la proporción de cada entrada.


$$I_i = I_1 + I_2 = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}$$

Cuanto menor es la resistencia, más importante es la entrada.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 1

Al terminar la clase anterior era cómo diseñar con retroalimentación. Se verá algunos ejemplos pero primero observemos los conocimientos básicos. La entrada de bucle cerrado puede recoger cualquier número de señales y añadirlas a la salida. La entrada de corriente invertida también puede recoger cualquier número de señales, que se sustraerán a la salida. La importancia de cada señal viene determinada por la corriente que envía a cada entrada (recuérdese que la entrada tienen impedancia constante y, por tanto, la corriente controla el voltaje interno. La red de retroalimentación establece la ganancia total.

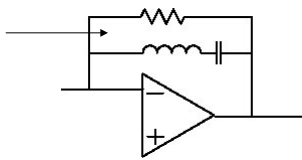
## Diapositiva 2

**La retroalimentación determina la ganancia n.º 1**

Si es independiente de la frecuencia (una resistencia), establece la ganancia para todas las formas de onda.

Si depende de la frecuencia (condensador, inductor, filtro), se establece la ganancia para cada componente de frecuencia, independientemente.

Pasa sólo 1 frecuencia



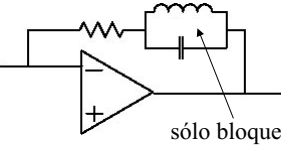
∴ fuerte retroalimentación en la frecuencia de resonancia y, por lo tanto, se suprime en la salida.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 2

Por supuesto, la retroalimentación establece una ganancia de frecuencia constante si consta de un componente independiente de frecuencia (resistencia). Si el bucle de retroalimentación depende de la frecuencia, la ganancia variará en función de ella. En el ejemplo del cuadro la resistencia establece la ganancia para la mayoría de las frecuencias, pero el circuito LC es un puente a la resonancia ( $2\pi/LC$ ) y por ello, se suprime este componente de frecuencia. Nótese que cuando la corriente de retroalimentación se aumenta, la ganancia se reduce.

### Diapositiva 3

**La retroalimentación determina la ganancia n.º 2**



sólo bloquea la frecuencia de **resonancia**

La retroalimentación es R salvo en la frecuencia de resonancia, donde llega a ser más alta. La frecuencia de resonancia se amplía selectivamente.

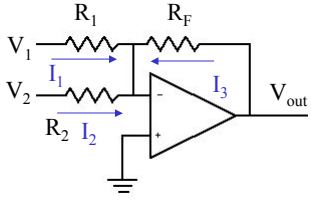
∴ Puede amplificar la suma o la resta selectivamente en cuanto a la entrada y a la frecuencia.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 3

Aquí se consigue justo lo contrario, el circuito resonante suprime la frecuencia de resonancia (pasa todas las demás) y por ello la corriente de retroalimentación se suprime en la frecuencia de resonancia y la ganancia es más alta allí.

## Diapositiva 4

**Amplificador sumador**


$$I_2 = -(I_1 + I_3)$$
$$\frac{V_2}{R_2} = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_{out}}{R_F}\right)$$
$$V_{out} = -R_F \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right)$$

Si  $R_1 = R_2 = R_F$ , luego  $V_{out} = -(V_1 + V_2)$

Úsese la regla en la que la corriente  $I_2$  es cero.

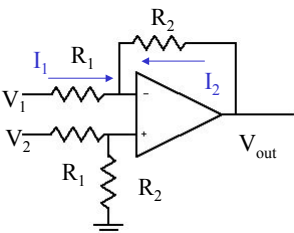
Para evitar errores de offset colóquese un  $R = R_1 \parallel R_2 \parallel R_F$  a masa desde la entrada de bucle cerrado.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 4

El amplificador sumador es una versión algo más complicada del amplificador de inversión, pero con dos generadores de tensión que contribuyen a la entrada. De nuevo sólo necesitamos que la suma de corrientes que llega al punto de inversión sea cero, y demostrar mediante el álgebra que el amplificador actúa para sumar las entradas. Nótese que las resistencias relativas determina el modo en que contribuye cada voltaje y que por el cociente entre la resistencia de la retroalimentación y la resistencia de la entrada se obtiene la ganancia.

Diapositiva 5

**Amplificador diferencial**



Ahora se deben usar ambas reglas: (1)  $V_+ - V_-$  es igual a cero, y (2) que la corriente  $I_-$  es cero

$$V_+ = V_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_1 = -I_2$$

$$\therefore \frac{V_1 - V_-}{R_1} = -\frac{V_{out} - V_-}{R_2}$$

$$V_- = \frac{V_1 R_2 + V_{out} R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_+ = V_-; V_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_1 R_2 + V_{out} R_1}{R_1 + R_2}$$

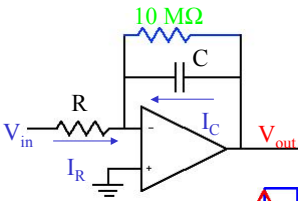
$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 5

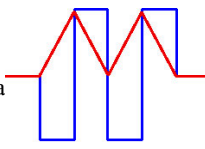
Aquí interesa considerar la diferencia de dos entradas (exactamente lo que debe hacer un amplificador operacional), pero con una ganancia más baja que la que se vería si condujésemos el amplificador directamente. Para analizarlo se utilizarán las dos reglas: (1) que la corriente que va a la entrada de inversión es cero, y (2) que los voltajes son iguales. Nótese que en este caso, al calcular las corrientes no se puede suponer que el voltaje en el amplificador es cero (en este caso no hay nada que vaya a masa). Por tanto, en el cálculo de la corriente en la entrada de corriente invertida hay que introducir el voltaje invertido como parámetro libre. Por supuesto, esto se establecerá más tarde como voltaje conocido de la entrada de bucle cerrado.

Diapositiva 6

**Integrador**



ejemplo de forma de onda



$$I_R = -I_C$$

$$\frac{V_{in}}{R} = -C \frac{dV_{out}}{dt}$$

$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

C es una retroalimentación dependiente de la frecuencia,  $Z = -1/\omega C$ .  
 Úsese la regla donde la corriente  $I_-$  es cero. La constante tiempo es  $1/RC$ .

La resistencia de la retroalimentación suministra una trayectoria CC para la estabilidad.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 6

Los integradores muestran lo que se puede conseguir con la retroalimentación dependiente de la frecuencia. En este caso, la trayectoria de retroalimentación que nos interesa es el condensador (la resistencia de 10 meg se incluye para proporcionar una trayectoria de retroalimentación para las señales CC y dar así estabilidad al amplificador. Por ahora la olvidaremos). Un modo de considerar esto es ver el condensador como cargador y proveedor de tensión de equilibrio entre la salida y la entrada. El ritmo de carga depende de la constante temporal RCRC (constante de tiempo). De nuevo, se analiza el circuito estableciendo corrientes iguales e integrándolas para hallar el voltaje de salida. Al aumentar R o C, el ritmo de la carga disminuye.

## Diapositiva 7

**Integrador**

Supóngase que la forma de onda es más compleja y que se desea:  
Integrar por un periodo de tiempo determinado y después reiniciar el integrador y volver a empezar.

1. ¿Qué hay que hacer para que el circuito reinicie el integrador.
2. ¿Cómo hacerlo usando un JFET?

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 7

Con este único problema pretendemos reflexionar y ayudar a recordar que los JFET también son dispositivos útiles. De hecho, es mucho mejor un MOSFET o un JFET que un BJT.

Diapositiva 8

**Diferenciador**

$I_C = -I_F$   
 $C \frac{dV_{in}}{dt} = -\frac{V_{out}}{R}$   
 $V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$

ejemplo de forma de onda

Úse la regla donde la corriente I- es cero.

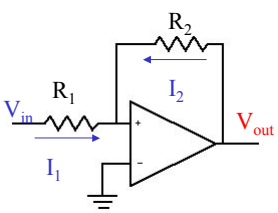
El condensador de retroalimentación proporciona una trayectoria de alta frecuencia para la estabilidad. Nótese que a frecuencias elevadas pasa a ser un integrador.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 8

El diferenciador tiene el condensador en la entrada, con una resistencia de retroalimentación. De nuevo observamos las corrientes emparejadas que van a la entrada de corriente invertida y vemos que el voltaje de salida es derivado del de entrada. De nuevo, la constante tiempo es sólo la constante tiempo RC. El condensador de 100 pF suministra una alta estabilidad de frecuencia (evita que el circuito oscile).

## Diapositiva 9

**Retroalimentación positiva**



Obsérvense los valores de  $V_{in}$  necesarios para que  $V_x = 0$

La retroalimentación positiva significa que el amplificador operacional está saturado y por ello no se pueden usar las mismas reglas que con la retroalimentación negativa. Recuérdese que las reglas de la retroalimentación negativa se desarrollaron porque el amplificador operacional encontró un punto de funcionamiento equilibrado y este ya no es el caso.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 9

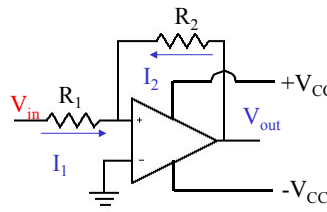
La retroalimentación positiva lleva al amplificador operacional a la saturación más rápido de lo normal. Nótese que la entrada de bucle cerrado se alimenta con parte de la salida.

## Diapositiva 10

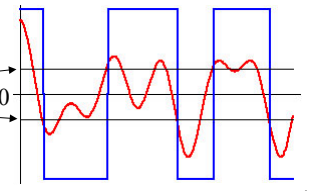
**Retroalimentación positiva**

La retroalimentación positiva lleva al amplificador operacional a la saturación aún más rápido, pero también introduces histéresis.

Obsérvense los valores de  $V_{in}$  necesarios para que  $V_+ = 0$



$V_{in} = \pm V_{cc} \frac{R_1}{R_2}$

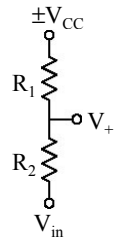


6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 10

Aquí tenemos otro ejemplo de histéresis. Esto se explicará en la pizarra y se entregará otra hoja con notas. El concepto de histéresis se ve en las propiedades de conmutación. Cuando se satura la salida en  $+V_{cc}$ , el voltaje de entrada se tiene que bajar a  $-R_1/R_2 V_{cc}$  para conmutar, pero cuando la salida es  $-V_{cc}$ , la entrada conmuta a  $+R_1/R_2 V_{cc}$ . Por lo tanto, entre estos dos puntos de conmutación no sabemos (simplemente mirando  $V_{in}$ ) si la salida es positiva o negativa: depende de la historia. Como la diapositiva no bien hecha, sigan las notas que se les han entregado mientras se soluciona este problema.

Diapositiva 11

**Retroalimentación positiva**



Nota: prácticamente no hay corriente en  $V_+$ .

∴ La corriente que atraviesa la resistencia es

$$\frac{\pm V_{CC} - V_{in}}{R_1 + R_2}$$

y la caída de voltaje a través de  $R_2$  es

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} (\pm V_{CC} - V_{in})$$

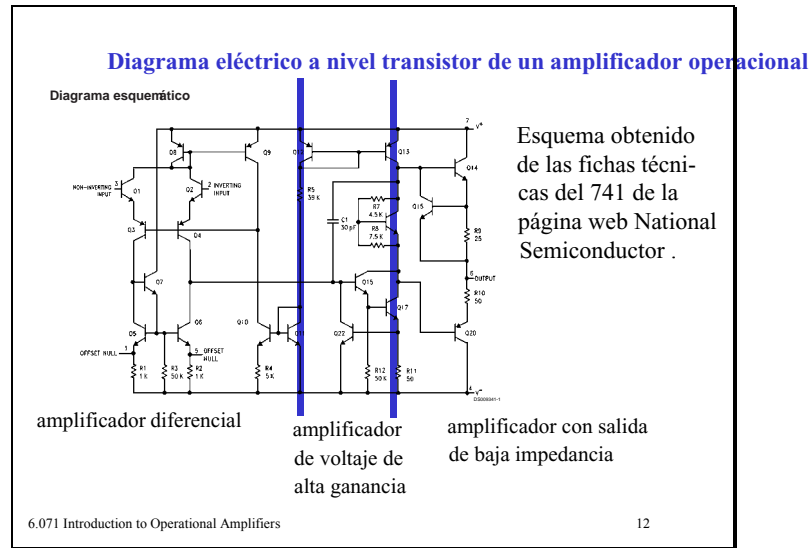
∴ el voltaje en  $V_+$  es

$$V_+ = \pm V_{CC} - (\pm V_{CC} - V_{in}) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Se quiere hallar  $V_{in}$  cuando  $V_+ = 0$  (luego  $V_+ = V_-$ )

$$V_{in} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \mp V_{CC} \pm V_{CC} = \mp \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{CC}$$

## Diapositiva 12



Esquema simplificado del modelo de transistor 741. No es fácil desenvolverse por él, pero con las secciones identificadas se puede sacar la idea general.

## Diapositiva 13

### Especificaciones de amplificadores operacionales

- CMRR: relación de rechazo de modo común. Estos amplificadores también amplifican la media de  $V_+$  +  $V_-$ , la CMRR mide la atenuación de esto.
- Ganancia de voltaje ( $A_v$ ): normalmente de **104 a 106** (de 80 a 120 dB).
- Ritmo limitado: el máximo ritmo de cambio del voltaje de salida con tiempo.
- Frecuencia de ganancia unitaria ( $f_T$ ) = frecuencia a la que la ganancia cae a 1.
- Corriente de salida: máxima corriente que puede proporcionar el amplificador

Características que considerar al elegir un amplificador operacional. Hay muchos, diseños optimizados para:

- (1) Linealidad
- (2) Velocidad de conmutación
- (3) Aplicaciones de alta frecuencia
- (4) Señales de modo común bajas
- (5) Intervalos de potencia

## Diapositiva 14

dispositivo	tensión de alimentación		corriente aliment.	equilibrio de tensión	ritmo limitado	$f_T$	CMR	ganancia	corriente de salida
	min (V)	máx (V)	mA	mV	V/ $\mu$ s	MHz	dB	dB	mA
bipolar 741C	10	36	2.8	2	0.5	1.2	70	86	20
MOSFET CA3420A	2	22	1	2	0.5	0.5	60	86	2
JFET LF411	10	36	3.4	0.8	15	15	70	70	30
bipolar LM10	1	45	0.4	0.3	0.12	0.12	93	93	20

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 14

Algunos ejemplos comunes de amplificadores operacionales. En el laboratorio se usa el 741.

## Diapositiva 15

**Compensación de offset**  
Ajuste del equilibrio de tensión de entrada

Cortocircuita las entradas, uniéndolas, y ajusta el potenciómetro para poner la salida a cero.

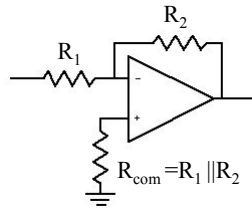
6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 15

En el 741 hay clavijas adicionales para equilibrar el cero. Esto se puede usar para los desajustes de corriente en las entradas. Así que si las cargas de la fuente no son iguales, se puede eliminar la polarización del amplificador siguiendo este método.

## Diapositiva 16

### Compensación de offset

Ajuste del equilibrio de tensión de entrada



La corriente de polarización de entrada a (-) introduce un equilibrio de tensión de salida. La resistencia de compensación se encarga de equilibrarlo. No es necesario con los amplificadores FET (pA), pero es importante en los dispositivos bipolares (nA).

Este método es mejor para corregir la polarización de offset. Las corrientes de entrada de los dispositivos FET son muy bajas y por eso no suele ser necesario, pero en los BJT los offsets se ven fácilmente.

## Diapositiva 17

### Magnitud de ancho de banda de amplificadores operacionales

El ritmo limitado es el que determina la magnitud de ancho de banda en estos amplificadores, así, reduciendo la ganancia se puede aumentar la respuesta de frecuencia.

$$f_{\text{máx}} = \frac{\text{ritmo limitado}}{2\pi \text{ voltaje máximo salida}}$$

Por tanto, para un ritmo limitado de 5 V/ $\mu$ s y un voltaje máximo de salida de 10 V, la máxima frecuencia de una onda senoidal sin distorsión es 80 kHz.

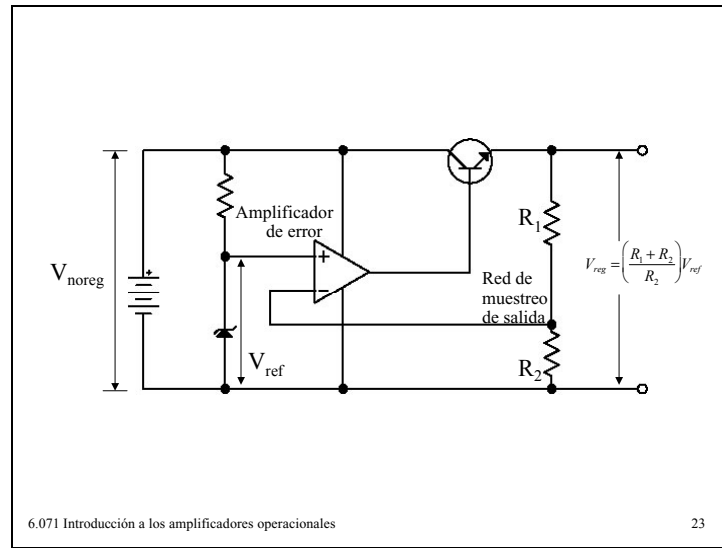
El ritmo limitado indica las propiedades dinámicas del amplificador operacional (a qué velocidad puede variar la salida). Como el mejor modo de indicarlo es en voltios/tiempo, no proporciona directamente un límite a la frecuencia. Sin embargo, combinado con el tamaño de la señal de salida sí que lo proporciona.

19 18-22

Visítese la página web del fabricante para obtener la ficha técnica de su producto. Síganse estos pasos:

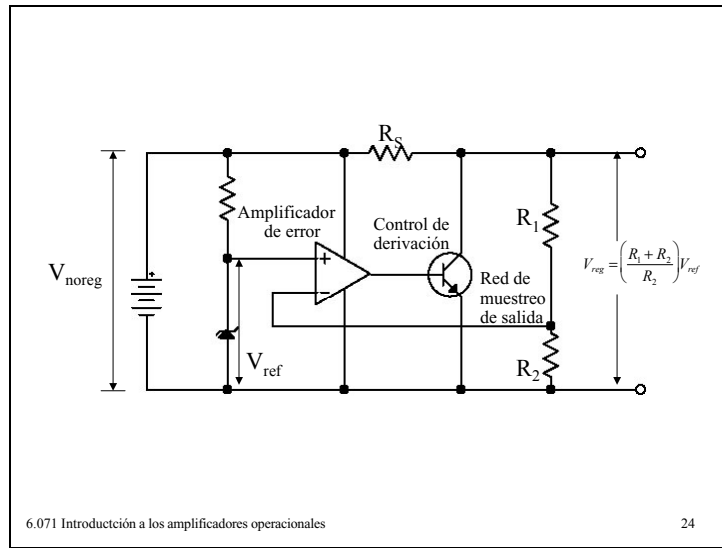
1. Visitar la página web National Semiconductor: <http://www.national.com/>
2. Consultar las condiciones de uso de la web ,siguiendo el enlace de la página de inicio llamado Site Terms and Conditions of Use, o este otro: [http://www.national.com/webteam/site\\_terms\\_of\\_use.html](http://www.national.com/webteam/site_terms_of_use.html)
3. Volver al inicio.
4. En el cuadro de búsqueda, escribir el número del producto (LM741) para encontrar un amplificador operacional determinado y hacer clic en “go”.
5. Hay varias opciones (por ejemplo, ver en línea, descargar PDF, enviar por correo electrónico, etc.). Elegir la que se desee.

Diapositiva 23



En el ejemplo se usa un amplificador operacional como regulador de tensión. El circuito básico que hemos visto antes con el zener conduciendo directamente al BJT. Con el amplificador operacional vemos que hay una trayectoria de retroalimentación (así que se pueden usar las reglas de retroalimentación). Los voltajes de las entradas deben ser iguales para que el voltaje Zener pase por la entrada de corriente invertida. Como la impedancia de entrada al amplificador es muy alta, la corriente que atraviesa  $R_1$  es la misma que atraviesa  $R_2$  y el voltaje de salida se mantiene como se ve en la gráfica.

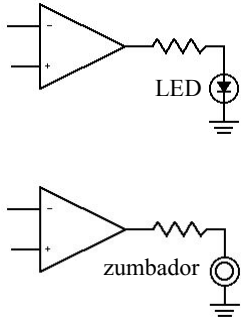
Diapositiva 24



Esta es una versión algo más compleja del mismo circuito. Identifíquese la trayectoria de retroalimentación y explíquese por qué es importante  $R_s$ .

## Diapositiva 25

**Controladores de salida**



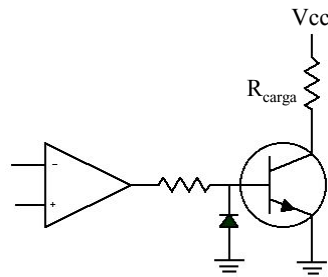
Aquí la carga tiene que estar activada o desactivada. Así, es útil usar una alimentación unipolar. Elija la resistencia necesaria para proporcional la corriente adecuada para el dispositivo.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 25

Amplificador operacional actuando como conmutador.

## Diapositiva 26

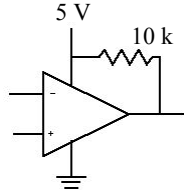
### Controladores de salida



El amplificador operacional puede conducir un transistor (o un FET) donde se necesite más potencia. El diodo de la base evita la disrupción inversa base-emisor.

## Diapositiva 27

### Controladores de salida TTL



Los amplificadores operacionales también son útiles para interconectar con electrónicas digitales, la resistencia de 10 k actúa como resistencia elevadora.

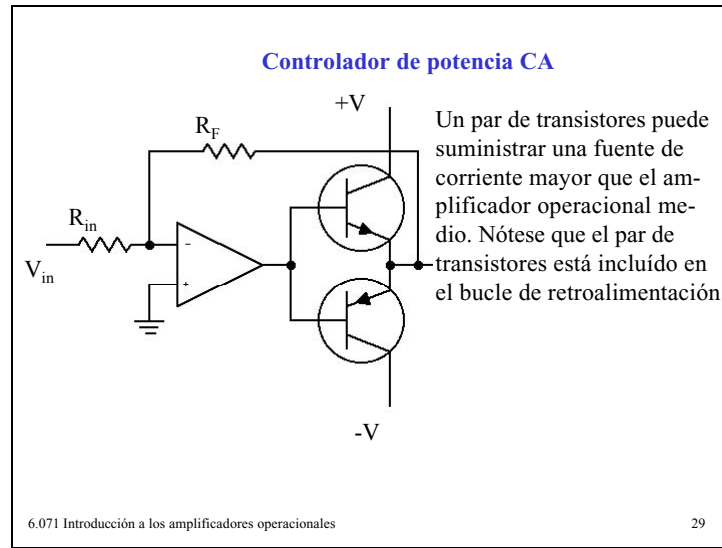
## Diapositiva 28

**Comparadores múltiples**

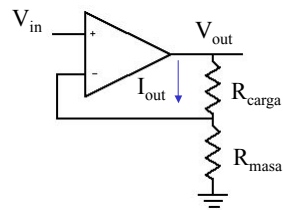
El voltaje de referencia de los comparadores aumenta a medida que se sube por el divisor de tensión formado por las resistencias (escalera). La resistencia variable determina el rango. Los LED se encienden cuando el respectivo comparador se activa.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 28

Diapositiva 29



**Convertidor de tensión en corriente**



Ya hemos visto los amplificadores no invertidos y que tienen una ganancia de:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_{carga} + R_{masa}}{R_{masa}}$$

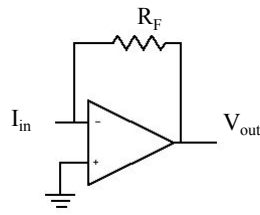
Por tanto, la corriente es:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{carga} + R_{masa}} = \frac{V_{in}}{R_{masa}}$$

Así, ajustando  $V_{in}$  se puede establecer la corriente que atraviesa la carga.

## Diapositiva 31

### Convertidor de corriente en tensión



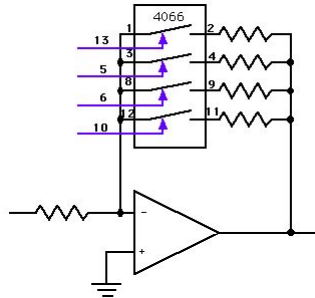
Hemos explorado el amplificador de inversión para una fuente de tensión. La situación es bastante similar para una fuente de corriente.

$$I_{in} = -\frac{V_{out}}{R_F}$$

$$V_{out} = -I_{in}R_F$$

La resistencia de retroalimentación ajusta la proporcionalidad entre la corriente de entrada y la tensión de salida.

### Amplificador operacional de ganancia programable

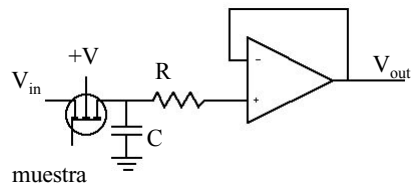


El CMOS IC 4066 es un conjunto de conmutadores bilaterales controlados digitalmente. Así, con 4 bits se puede elegir varias resistencias de retroalimentación. La resistencia de retroalimentación efectiva es la combinación paralela de todos los seleccionados.

Un conjunto cómodo de valores de resistencia está en la razón de 1: 2: 4: 8 para elegir (1-15).

## Diapositiva 33

### Muestreo y retención

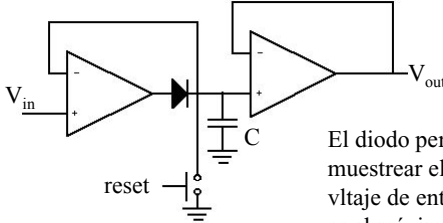


Muestra un voltaje y lo retiene de manera que se puedan realizar mediciones exactas.

Al encender el MOSFET se permite que el condensador cargue con una constante tiempo  $1/RC$ ). Cuando el FET está abierto, el condensador retiene su carga (descontando las fugas a la entrada de bucle cerrado), y se informa a la salida de este voltaje. Para que las fugas de corriente sean lo menores posible se debe usar un amplificador operacional MOSFET.

## Diapositiva 34

**Detector de cresta**



El diodo permite al condensador muestrear el valor más alto del voltaje de entrada. Así, la salida es el máximo voltaje de entrada desde la última puesta a cero.

Nótese que el bucle de retroalimentación del seguidor de tensión incluye al diodo, y esto elimina la caída de 0.6V que de lo contrario, se observaría.

6.071 Introducción a los amplificadores operacionales 34