

# Principios de Mecatrónica

## Acondicionamiento de señales

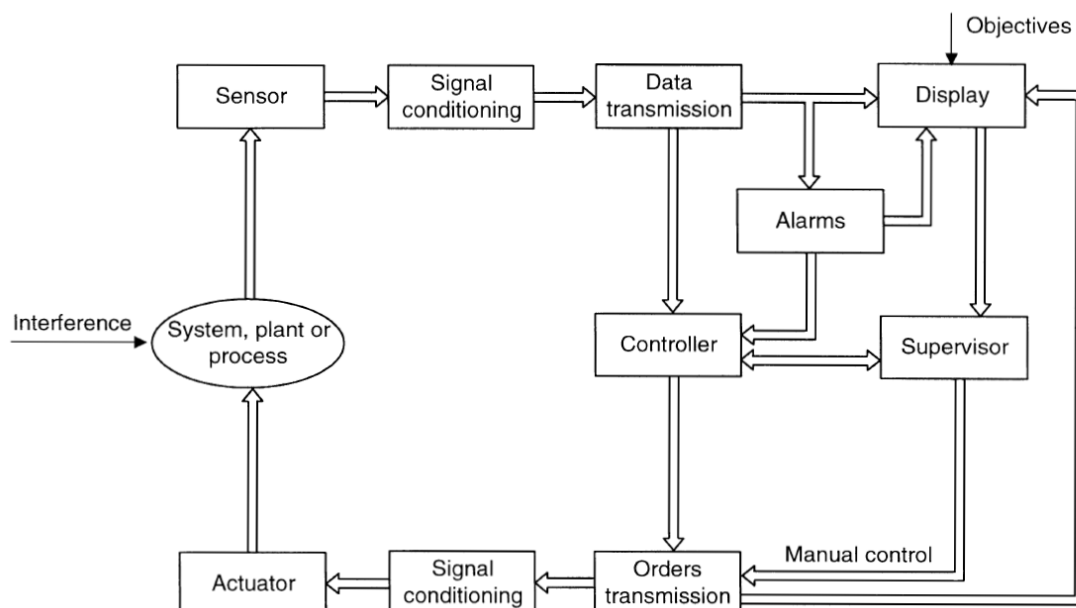
### Clase 13-19

SDI-11561-004, SDI-11561-002

## Sistemas de medición

Un sistema es una combinación de dos o más elementos, subsistemas, y partes necesarias para llevar a cabo una o más funciones.

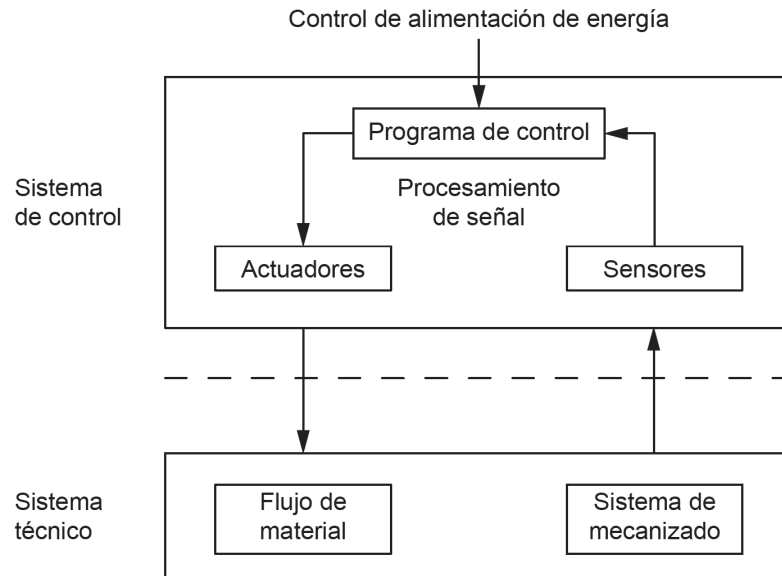
En la siguiente figura se muestra las funciones y flujos de datos de sistemas de medición y control. En general, para la adquisición de información llevada a cabo por un sensor, una medición es requerida para el **procesamiento de la información y la interpretación del resultado**, con el fin de hacerlo perceptible a los sentidos humanos. Cualquiera de esta información, puede ser remota o local, sin embargo funciones remotas requieren transmisión de información.



## Acondicionamiento de señales

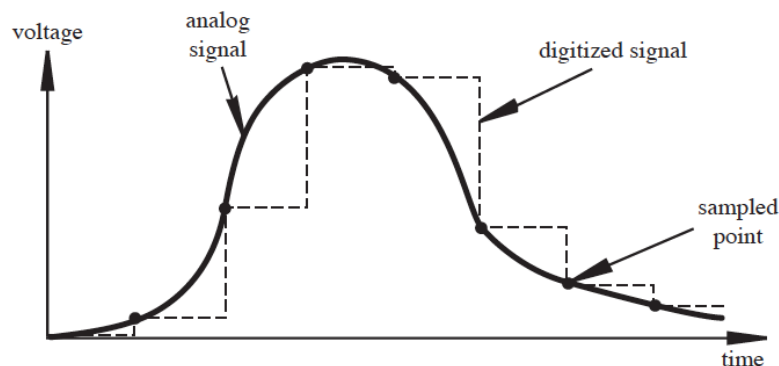
Son aquellos elementos de un sistema de medición o control que procesan la señal procedente de un transductor con el fin de adecuarla a un nuevo formato o para mejorar su calidad. La clasificación siguiente muestra algunos ejemplos de acondicionamiento de señales

- Cambios de señal
  - I) Amplificación
  - II) Atenuación
  - III) Eliminación de offset
- Interface digital
  - I) Multiplexores
  - II) Conversión A/D
  - III) Conversión D/A
- Conversion de señal
  - I) Conversión corriente/presión
  - II) Puente de Wheatstone
- Transmisión de señal
  - I) Conversión tensión/corriente
  - II) Conversión corriente/ tensión
  - III) Conversión tensión/frecuencia
  - IV) Modulación (PWM)



## Adquisición de datos

Conversión de señales analógicas y digitales son la interfaz más importantes entre circuitos digitales y componentes analógicos en sistemas mecatrónicos. Esto implica ingresar datos analógicos a un circuito digital o microprocesador, los datos analógicos se deben transformar en valores digitales codificados. Entonces, para llevar acabo esta tarea **primero se deben evaluar numéricamente la señal en instantes discretos en el tiempo. Este proceso se llama muestreo** y el resultado es una señal digitalizada compuesta por valores discretos correspondientes a cada muestra como se ilustra en la figura.



Una pregunta importante es qué tan rápido o con qué frecuencia se debe muestrear la señal para obtener una representación precisa.

**Entre más rápido mejor**, sin embargo para llegar a esto es necesario hardware especializado de alta velocidad y una gran cantidad de memoria para almacenar los datos.

Una alternativa es seleccionar la **tasa de muestreo** mínimo que se requiere para una aplicación dada que retenga toda la información importante de señal.

**Teorema de muestro**, también llamado teorema de muestreo de Shannon, afirma que es necesario muestrear una señal a una tasa de más de dos veces la componente de frecuencia máxima en la señal para retener todos los componentes de frecuencia. En otras palabras, para representar fielmente la señal analógica, las muestras digitales se deben tomar a una frecuencia  $f_s$  tal que

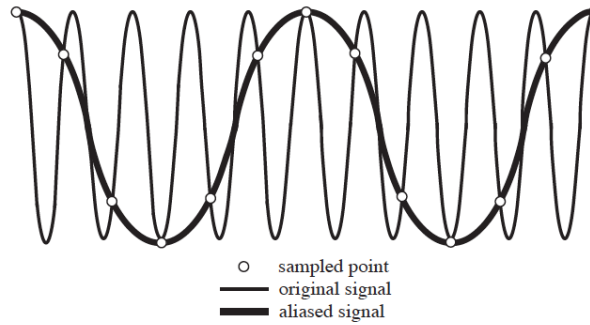
$$f_s > 2f_{max}$$

donde  $f_{max}$  es el componente de máxima frecuencia en la señal analógica de entrada. El término  $f_s$  se conoce como tasa de muestreo y el limite en la tasa mínima requerida ( $2f_{max}$ ) se le llama frecuencia de Nyquist. Así, el intervalo de muestras digitales es

$$\Delta t = 1/f_s.$$

Por ejemplo, si la tasa de muestro es de 5000 Hz, el intervalo de tiempo entre muestras sería de 0.2ms. Si una señal se muestrea a menos de dos veces su componente de frecuencia máxima, puede resultar “aliasing”—se genera una señal de la misma forma, pero de otra frecuencia.

En la figura anterior se ilustra un ejemplo de esto con una onda seno analógica muestreada regularmente en los puntos que se indican. Se toman doce muestras igualmente espaciadas durante 10 ciclos de la señal original. Por lo tanto, la frecuencia de muestro es  $1.2f_0$  donde  $f_0$  es la frecuencia de la onda seno original. Dado que la frecuencia de muestro no es mayor a



$2f_0$  no se captura la frecuencia en la señal original. Más aún, la frecuencia aparente en la señal muestreada es  $0.2f_0$  (2 ciclos de señal con aliasing por diez ciclos de señal original). En consecuencia el submuestro no sólo resulta en errores sino que dará información que realmente no existe.

## Teoría de cuantización

El proceso, llamado **conversión analógico-digital**, involucra conceptualmente dos pasos: cuantización y codificación.

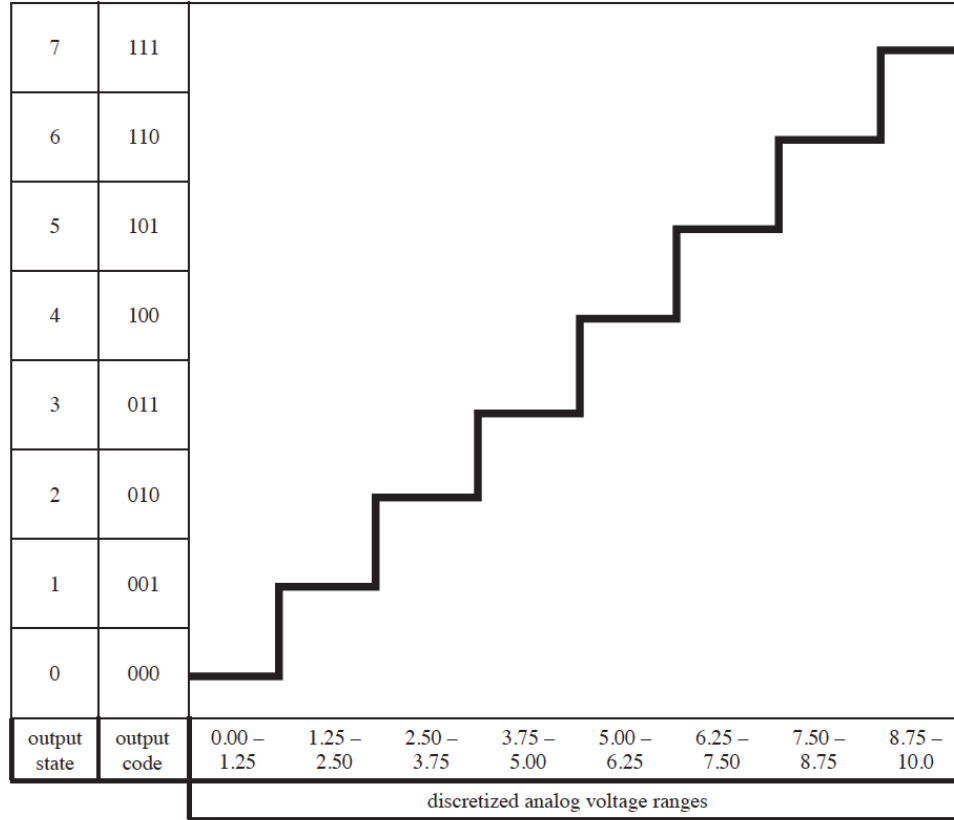
La **cuantización** se define como la transformación de una entrada analógica continua en un conjunto de estados de salida discretos. Mientras que,

**codificación** es la asignación de una palabra o número código digital a cada estado de salida.

La siguiente figura ilustra cómo un rango de voltaje continuo se divide en estados de salida discretos, a cada uno de los cuales se les asigna un código

Cada estado de salida cubre un subrango del rango de voltaje total. La señal escalón representa los estados de una señal digital generada al muestrear una rampa lineal de una señal analógica que ocurre sobre un rango de voltaje que se muestra.

Un **convertidor analógico digital** es un dispositivo electrónico que convierte un voltaje analógico en un código digital. La salida del converti-



El convertidor A/D se puede poner en interfaz directamente con dispositivos digitales como microcontroladores y computadoras. La **resolución** de un convertidor A/D es el número de bits usados para aproximar digitalmente el valor analógico de la entrada. El número de posibles estados  $N$  es igual al número de combinaciones de bits que se pueden sacar del convertidor:

$$N = 2^n$$

donde  $n$  es el número de bits. Para el ejemplo de la figura, el dispositivo de 3 bits tienen  $2^3$  u 8 estados de salida, como se menciona en la primera columna y la palabra código correspondiente para cada estado de salida se menciona en la segunda columna.

El **tamaño de cuantización analógica (Q)**; a veces llamado **ancho de código**, se define como el rango de escala completa del convertidor A/D dividido entre el número de estados de salida:

$$Q = \frac{(V_{max} - V_{min})}{N}$$

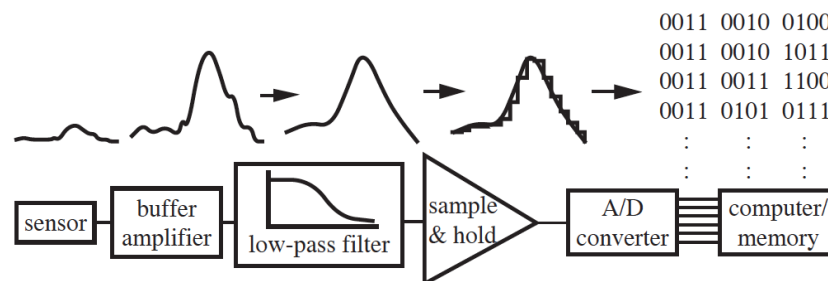
Es una medida del cambio analógico que se puede presentar por el convertidor.

## Conversión analógico digital

Los siguientes componentes deben seleccionarse apropiadamente y aplicarse en esta secuencia para adquirir adecuadamente una señal de voltaje analógico para procesamiento digital:

- Amplificador buffer
- Filtro pasabajas
- Amplificador de muestra y retención
- Convertidor digital analógico
- Computadora

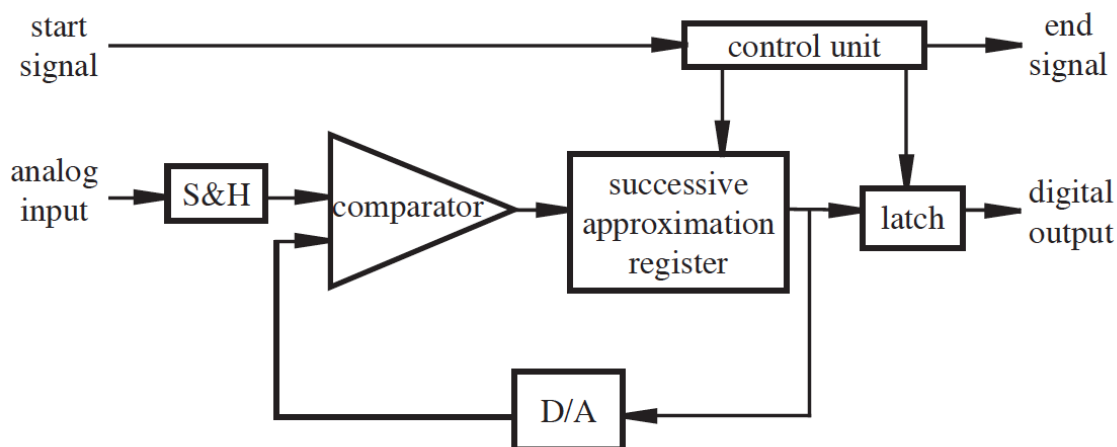
En la siguiente figura se muestran los componentes requeridos para la conversión A/D.



## Convertidores analógico digital

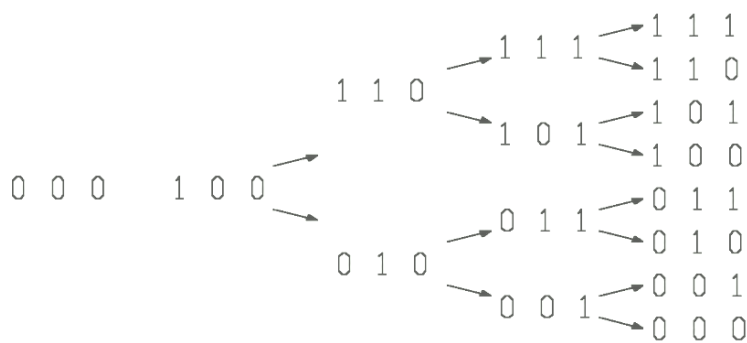
Los convertidores A/D se diseñan con base en diferentes principios: **aproximación sucesiva, codificación flash o paralela**, integración de pendiente sencilla y de doble pendiente, capacitor conmutado y delta sigma. Los más frecuentes en los diseños comerciales son los primeros dos.

El convertidor A/D de **aproximación sucesiva** es relativamente rápido y barato. Su diseño es el siguiente:



Estos convertidores usan un D/A en un lazo de retroalimentación. Cuando se aplica la señal inicio(start), el amplificador de muestreo-retención (S&H) bloquea la señal analógica. Entonces la unidad de control comienza un proceso iterativo, donde el valor digital es aproximado, convertido a un valor analógico con el convertidor D/A y mediante el comparador se coteja con la entrada analógica. Cuando la salida D/A es igual a la entrada analógica, la señal end(fin) se establece mediante la unidad de control, y en la salida queda disponible la salida digital correcta.

Si  $n$  es la resolución del convertidor A/D, tarda  $n$  pasos en completar la conversión.



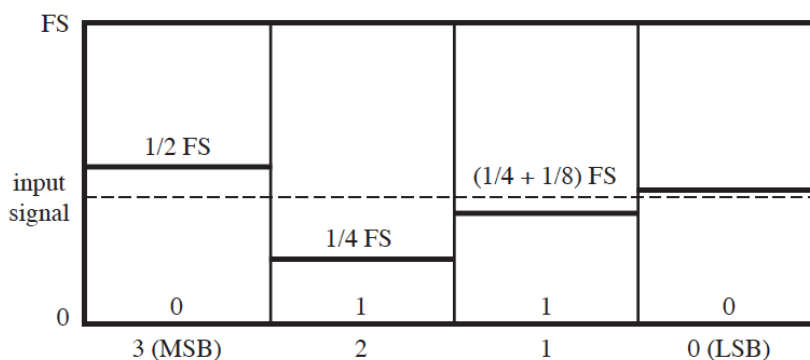
Más específicamente, la entrada se compara con fracciones binarias ( $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ , ...,  $1/2^n$ ) del valor de la escala completa(FS) del convertidor A/D.



La unidad de control primero enciende el bit más significativo (MSB) del registro y deja todos los bits menores en 0. Esta señal es transformada a señal analógica, que a su vez se introduce en el comparador.

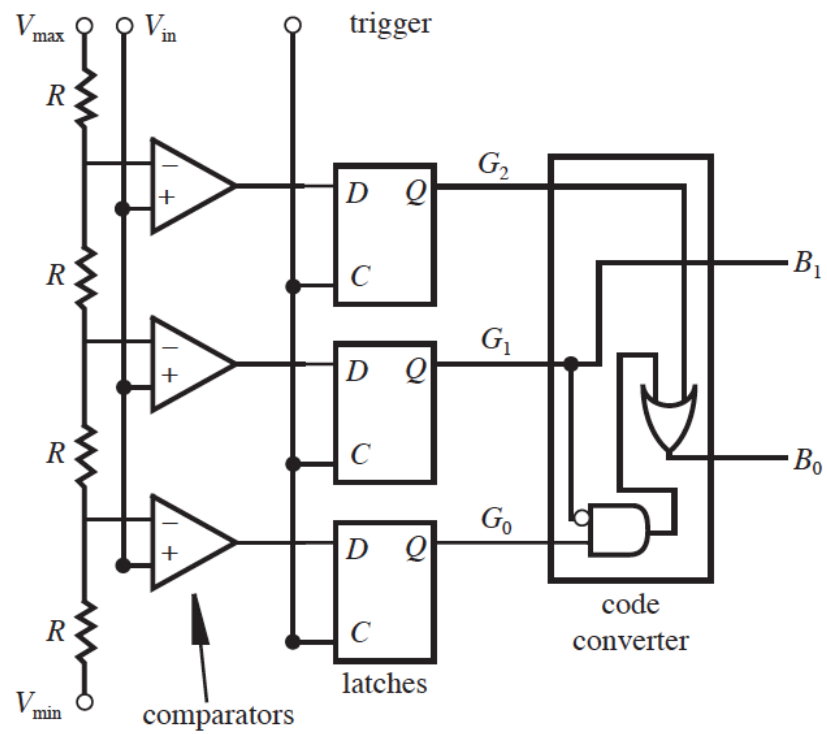
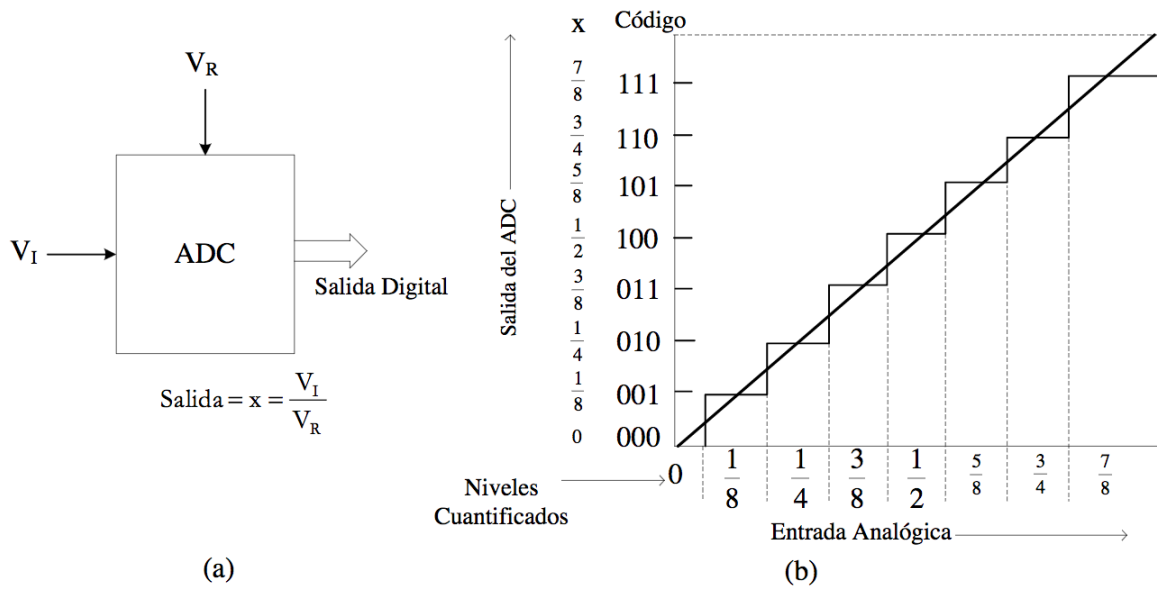
Si la entrada analógica supera la salida del convertidor D/A, el bit más significativo MSB se deja encendido (alto); de otro modo, se restablece en 0. Entonces este procedimiento se aplica al siguiente bit menos significativo LSB y se realiza de nuevo la comparación. Después de  $n$  comparaciones, el convertidor se baja al bit menos significativo (LSB). Entonces la salida D/A representa la mejor aproximación digital a la entrada analógica. Cuando el proceso termina, la unidad de control establece la señal end, lo que significa el fin de la conversión.

En la siguiente figura, se ilustra gráficamente un procedimiento de aproximación sucesiva de 4 bits. EL MSB es  $1/2$  FS, que en este caso es mayor que la señal; por lo tanto, el bit se apaga. El segundo bit es  $1/4$ FS y es menor la señal, de modo que se deja encendido. El tercer bit es  $1/4+1/8$  de FS, que todavía es menor que la señal analógica, de modo que el tercer bit se deja encendido. El cuarto proporciona  $1/4+1/8+1/16$  de FS y es mayor que la señal, de modo que el cuarto bit se apaga y la conversión está completa. El resultado digital es 0110. A mayor resolución se obtiene un valor más preciso.



El tipo más rápido de convertidor A/D se conoce como **convertidor flash** y se ilustra en la siguiente figura.

Consiste en un banco de comparadores de entrada que actúan en para-



lelo para identificar el nivel de la señal. La salida de los latches están en **forma codificada** que se convierte fácilmente a la salida binaria requerida con logica combinacional. El convertidor de la figura es de 2 bits que tiene una resolución de 4 estados de salida.

State	Code ( $G_2G_1G_0$ )	Binary ( $B_1B_0$ )	Voltage Range
0	000	00	0–1
1	001	01	1–2
2	011	10	2–3
3	111	11	3–4

La tabla menciona los códigos de salida del comparador y las correspondientes salidas binarias para cada uno de los estados, se supone un rango de voltaje de entrada de 0 a 4 volts. El rango de voltaje lo establecen las fuentes de voltaje  $V_{max}$  y  $V_{min}$ .

De esta forma, el conversor flash está constituido por una serie de comparadores analógicos que comparan voltajes de referencia con el voltaje de entrada analógico. Cuando éste excede el voltaje de referencia para un comparador, se genera un alto. El convertidor de código es un simple circuito combinacional. Para el convertidor de 2 bits, las relaciones entre los bits de código  $G_i$  y los bits binarios  $B_i$  son

$$B_0 = G_0\bar{G}_1 + G_2$$

$$B_1 = G_1$$

Un solo convertidor A/D puede digitalizar varias señales analógicas si dichas señales se multiplexan en la entrada del convertidor A/D.

El número de comparadores esta definido por  $2^n - 1$ , donde  $n$  corresponde al número de bits. Siendo  $2^n$  el número de resistencias en la escalera de referencia. Asumiendo que todas las resistencias son del mismo valor. La diferencia de tensiones entre 2 resistencias adyacentes sería

$$V_{LSB} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n}$$

## **Procesamiento de señales analógicas con el uso de amplificadores operacionales**

Debido a que los circuitos eléctricos ocurren de manera virtual en todos los sistemas mecatrónicos y de medición, es esencial comprender de forma básica la adquisición y procesamiento de señales eléctricas. Por lo general estas señales vienen en los transductores, que convierten señales físicas (por ejemplo, temperatura, esfuerzo, desplazamiento, tasa de flujo) en corrientes o voltajes, siendo éste último lo más deseado.

La salida del transductor generalmente se describe como una señal analógica, que es continua y variable en el tiempo.

Con frecuencia, las señales de los transductores no tienen la forma que uno quisiera ya que pueden

- ser muy pequeñas, por lo general en el rango de milivolts.
- ser muy ruidosas, esto debido a interferencias electromagnética.

- contener la información equivocada, por lo general debido al diseño del transductor o la instrumentación.

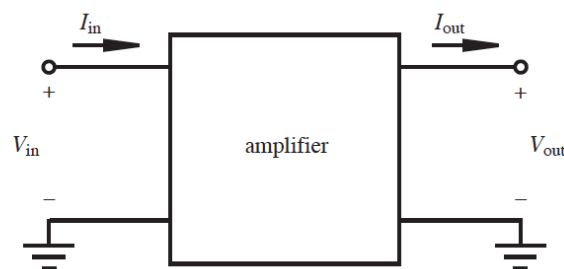
Muchos de estos problemas se pueden remediar, y la información de señal deseada se extrae a través del procesamiento adecuado de la señal analógica. La forma más simple y común de procesamiento de señal es la **amplificación**, donde la magnitud de la señal de voltaje se aumenta. Otras formas incluyen inversión de señal, diferenciación, integración, suma, resta por mencionar algunos.

Las señales analógicas son muy diferentes a las señales digitales, las cuales son discretas y sólo usan un número finito de estados y valores. Dado que las computadoras y los microprocesadores requieren señales digitales, cualquier aplicación que involucre medición o control por computadora requiere conversión analógica a digital.

## Amplificadores operacionales

Lo ideal de un **amplificador** usado como procesador de señal es que aumente la amplitud de una señal sin afectar las relaciones de fase de los diferentes componentes de señal. Cuando se elige o diseña un amplificador, se debe considerar el tamaño, costo, consumo de potencia, **impedancia de entrada o de salida**, ganancia y ancho de banda.

Por lo general, un amplificador se modela como un dispositivo de dos puertos, con voltajes de entrada y salida referidos a tierra, como se ilustra a continuación.



La **ganancia de voltaje**  $A_v$  de un amplificador define el factor por el cual se cambia la tensión:

$$V_{out} = A_v V_{in}.$$

Normalmente se requiere un amplificador para mostrar linealidad de la amplitud, donde la ganancia sea constante para todas las frecuencias. Sin embargo, los amplificadores se pueden diseñar para amplificar intencionalmente sólo ciertas frecuencias, lo que resulta en un efecto de filtrado. En tales casos, las características de salida están gobernadas **por el ancho de banda del amplificador y las frecuencias de corte asociadas**.

Las impedancias de entrada y salida de un amplificador,  $z_{in}$  y  $z_{out}$ , se encuentran al medir la razón de sus respectivos voltajes y corrientes

$$z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}}$$

La mayoría de los amplificadores están diseñados para tener una **gran impedancia de entrada por lo que se extrae muy poca corriente de la entrada**. El voltaje de salida no cambiará mucho a medida que cambie la corriente de salida.

Por otra parte, la impedancia de salida es una medida de cuánto desciende el voltaje de salida respecto a la corriente de salida

$$z_{out} = \frac{V_{out}}{I_{out}}$$

donde la caída de voltaje  $V_{out}$  se mide con relación a la tensión de salida sin corriente. La mayoría de los amplificadores están diseñados para tener una **impedancia de salida muy pequeña**, por lo que el voltaje de salida no cambiará mucho a medida que cambie la corriente de salida.

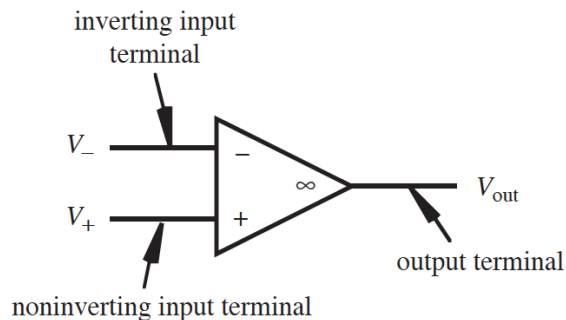
De esta manera, se considera que las impedancias de entrada  $z_{in}$  son muy grande—del orden de los  $10M\Omega$  y  $z_{out}$  de unos cuantos ohms o menos.

Como ya lo mencionamos previamente; los amplificadores operacionales son los bloques básicos para construir

- Amplificadores
- Integradores
- Sumadores
- Diferenciadores
- Comparadores
- Convertidores A/D y D/A
- Filtros activos

### Modelo ideal del amplificador operacional(opam)

La siguiente figura muestra el símbolo esquemático y la nomenclatura de terminales para un opam ideal. Es un amplificador con entrada diferencial y salida única que se supone tiene ganancia infinita.



Un circuito opam normalmente incluye retroalimentación desde la salida a la entrada negativa. Esta configuración también llamada **lazo cerrado resulta en la estabilización del amplificador** y el control de la ganancia. Cuando en un circuito opam está ausente la retroalimentación, se dice que el opam tiene una configuración de lazo abierto. Esta configuración tiene como resultado una considerable inestabilidad debido a la muy alta ganancia y rara vez se usa.

La siguiente figura ilustra un **modelo ideal** que puede ayudar a analizar circuitos que contengan opam. Este modelo se basa en las siguientes suposiciones que describen el opam ideal.

- **Tiene impedancia infinita en ambas entradas;** por lo tanto, no extrae corriente de los circuitos de entrada. En consecuencia,

$$I_+ = I_- = 0$$

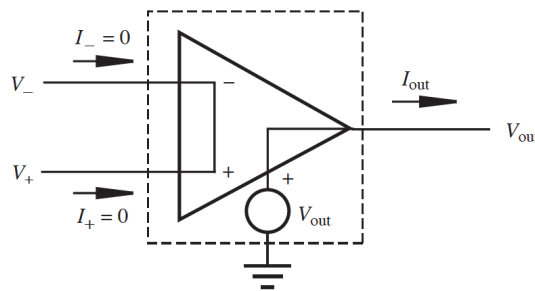
- **Tiene ganancia infinita.** Por lo tanto la diferencia entre los voltajes de entrada debe ser cero; de otro modo, la salida sería infinita. Esto se denota en la figura mediante el cortocircuito de las dos entrada. Entonces,

$$V_+ = V_-$$

Aún cuando se indica un corto entre las dos entradas, es de suponer que no puede fluir corriente a través de este corte.

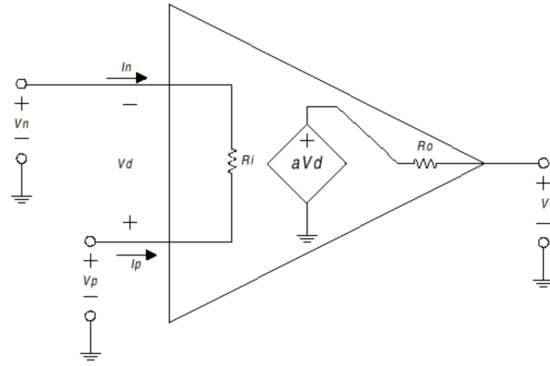
- **Tiene impedancia de salida cero.** Por lo tanto, el voltaje de salida no depende de la corriente de salida.

Note que  $V_{out}$ ,  $V_+$ ,  $V_-$  están todos referidos a una tierra común. Además, debe haber retroalimentación entre la salida y la entrada inversora para el comportamiento lineal estable.



Estas suposiciones y el modelo pueden parecer ilógicos y confusos, pero proporcionan una aproximación cercana al comportamiento de

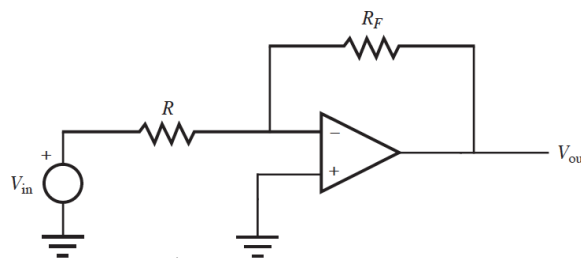




un opam real cuando se usa un circuito que incluye retroalimentación negativa. Con la ayuda de este modelo ideal, sólo se necesitan las leyes de Kirchhoff y la ley de ohm para analizar por completo circuitos opam.

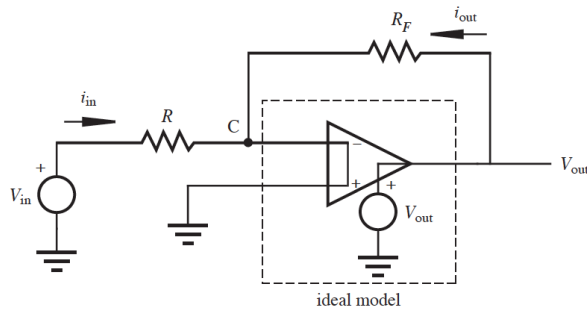
## Amplificador inversor

Se construye al conectar dos resistencias externas a un opam, como el nombre lo indica, este circuito invierte y amplifica el voltaje de entrada. note que la resistencia  $R_F$  forma el lazo de retroalimentación. Este lazo siempre va de la salida a la entrada negativa del opam.

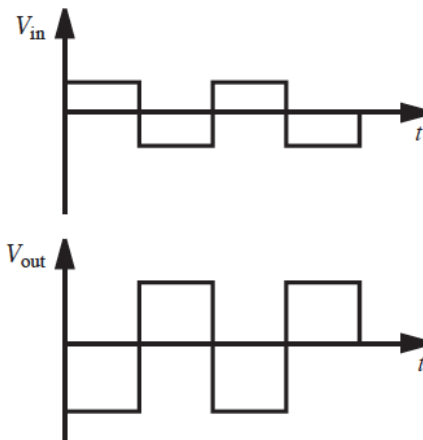


Así la relación de entrada/salida es:

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

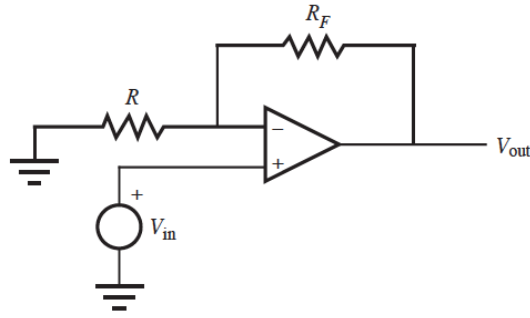


Por lo tanto, la ganancia de voltaje del amplificador se determina simplemente a través de las resistencias externas  $R_F$  y  $R$ , y siempre negativa. La razón por la que este circuito se llama amplificador inversor es que invierte la polaridad de la señal de entrada. Esto resulta en una compensación de la fase de  $180^\circ$  para señales periódicas. Por ejemplo, si la onda cuadrada  $V_{in}$  que se muestra en la siguiente se conecta a un amplificador inversor con una ganancia de  $-2$ , la salida  $V_{out}$  se invierte y amplifica, lo que resulta en una señal de amplitud más grande,  $180^\circ$  fuera de fase en relación con la entrada.

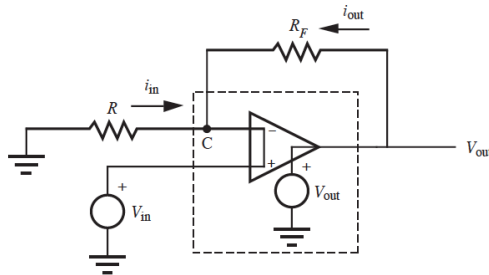


### 0.1. Amplificador no inversor

Este circuito amplifica el voltaje de entrada sin invertir la señal. Para determinar la ganancia de voltaje de este amplificador pueden aplicarse nuevamente las leyes de Kirchhoff y la ley de ohm.



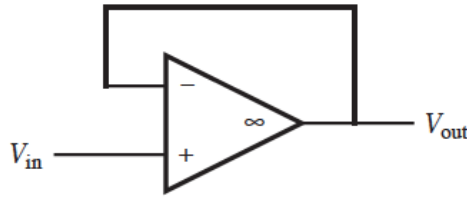
Como el caso anterior, se sustituye el opam con el modelo ideal y se obtiene. Haciendo el análisis, se obtiene que la ganancia de voltajes es



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_F}{R}$$

En consecuencia, el amplificador no inversor tiene una ganancia positiva mayor o igual a 1. **Esto es útil para aislar** una porción de un circuito de otro mediante la transmisión de un voltaje escalado sin extraer corriente apreciable.

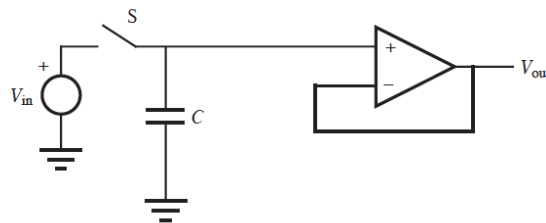
Si en el circuito opam no inversor se deja  $R_F = 0$  y  $R = \infty$ , el circuito resultante se puede representar como se muestra en la siguiente figura. Este circuito se conoce como **buffer** o **seguidor**, pues  $V_{out} = V_{in}$  y tiene alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida. El circuito es útil en aplicaciones donde se necesita acoplar una señal de voltaje sin cargar la



fuente de voltaje. La alta impedancia de entrada del opam **aisla** la fuente del resto del circuito.

### Circuito de muestreo y retención

Los circuitos de muestreo y retención se usan ampliamente en la conversión analógica a digital, donde **un valor de señal se debe retener** mientras que se convierte a una representación digital. El circuito de muestreo y retención consiste en un capacitor de retención de voltaje y un seguidor de voltaje.



Con el interruptor  $S$  cerrado,

$$V_{out}(t) = V_{in}(t)$$

Cuando el interruptor se abre, el capacitor  $C$  retiene el voltaje de entrada correspondiente al último valor muestreado, pues la corriente es extraída por el seguidor insignificamente. En consecuencia,

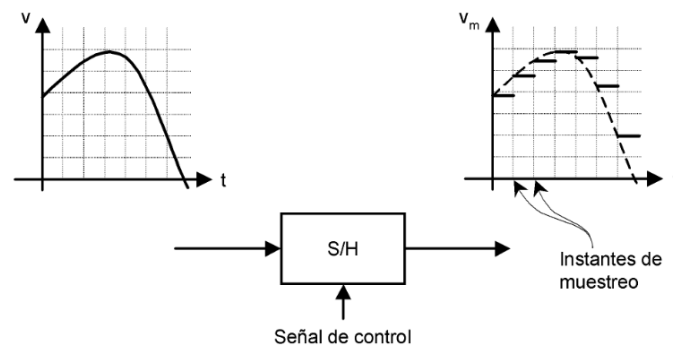
$$V_{out}(t - t_{sampled}) = V_{in}(t_{sampled})$$

donde  $t_{sampled}$  es el tiempo en el que el interruptor se abrió por última vez. Con frecuencia también se usa un buffer opam en el lado  $V_{in}$  del

interruptor para minimizar el drenado de corriente de la fuente de voltaje de entrada  $V_{in}$

Entonces, el circuito anterior toma muestras de la señal periódicamente, manteniéndolos estables a su salida el tiempo necesario para que el convertidor A(/D) realice la conversión.

El momento en que se toman los valores (instantes de tiempo) y el tiempo que son retenidos están marcados por una señal de control (S).

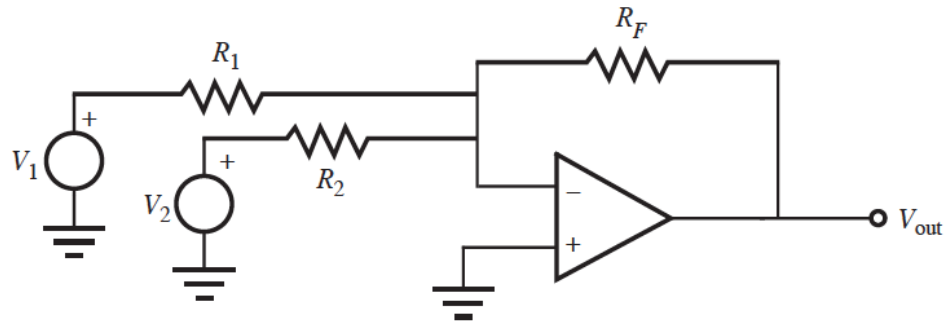


## Amplificador sumador

$$V_{out} = ??$$

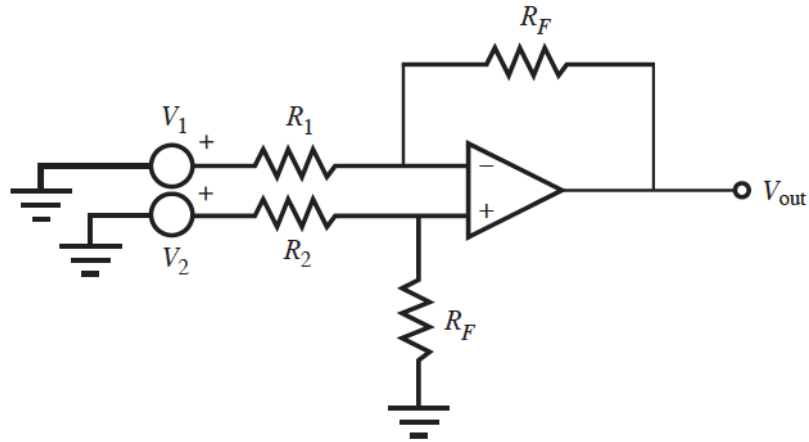
## Circuito restador

El circuito amplificador que se muestra en la figura, se utiliza para restar señales analógicas. Al analizar este circuito, podemos usar el principio



de superposición, que establece que, siempre que se apliquen múltiples entradas a un sistema lineal (por ejemplo, un circuito de amplificador operacional), podemos analizar el circuito y determinar la respuesta para cada una de las entradas individuales independientemente. La suma de las respuestas individuales es equivalente a la respuesta global a las múltiples entradas. Específicamente, cuando las entradas son fuentes de tensión ideales, para analizar la respuesta debido a una fuente, las otras fuentes están en cortocircuito. Si algunas entradas son fuentes de corriente, se reemplazan con circuitos abiertos.

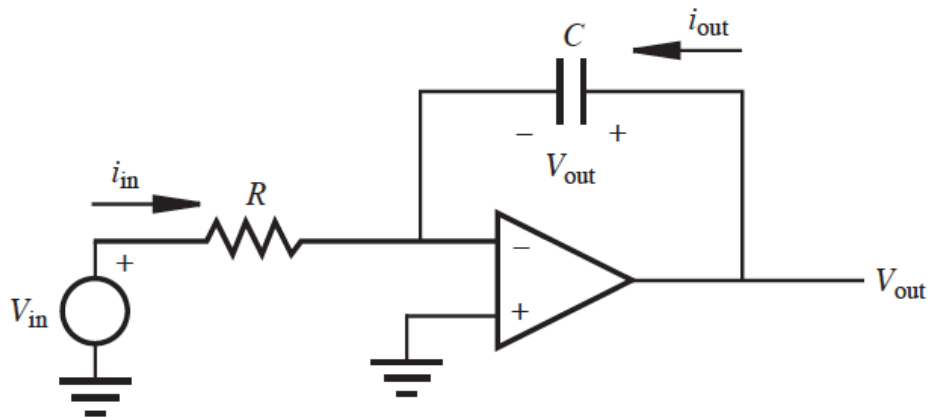
$$V_{out} = ??$$



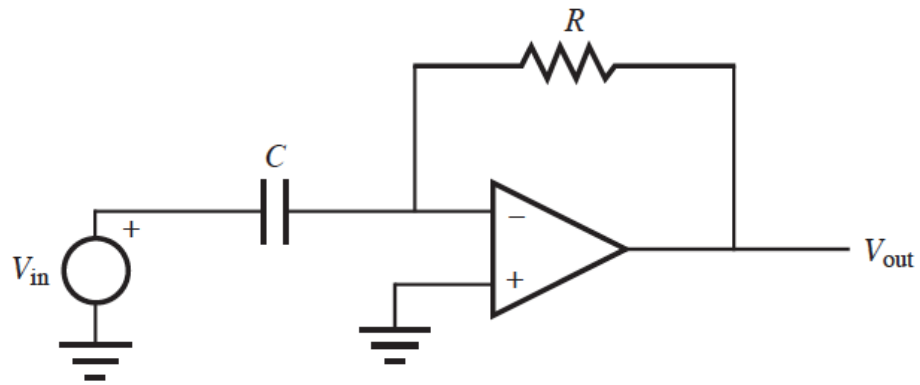
### Circuito integrador

Para analizar este tipo de circuito es necesario recordar que el voltaje almacenado en un capacitor es descrito por

$$i_c = C \frac{d}{dt}(v_c)$$



$$V_{out} = ??$$



Circuito diferencial

$$V_{out} = ??$$



## Opam con elementos pasivos combinados

### Summary—Transformada de Laplace

Para entender la transformada de Laplace es necesario entender cual es el origen de la misma. El antecedente de esta transformada esta dado por la transformada de Fourier la cual es empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo (o espacial) y el dominio de la frecuencia

“Toda señal periódica, sin importar cuan complicada parezca, puede ser reconstruida a partir de sinusoides cuyas frecuencias son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental, eligiendo las amplitudes y fases adecuadas.”

Joseph Fourier (Matemático francés [1768–1830])

De esta forma, se tiene que una señal puede reconstruirse utilizando *fasores* como detectores de frecuencia. El cual, solo tiene una componente de frecuencia.

$$e^{-j\omega t}.$$

Entonces, multiplicando cualquier señal de entrada con el fasor de sondeo, se obtiene

$$x(t)e^{-j\omega t}$$

Finalmente, sumamos (integramos) el producto se obtiene

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

El nuevo operador  $X(\omega)$ , revela la fuerza (energía) de varias componentes de frecuencia. Entonces, podemos decir que la transformada de Fourier actúa como un detector de energía en frecuencia–dependiente.

**Un fasor** es una representación gráfica de un número complejo que se utiliza para representar una oscilación, de forma que el fasor suma de varios fasores puede representar la magnitud y fase de la oscilación resultante

de la superposición de varias oscilaciones en un proceso de interferencia.

Ahora, La transformada de Laplace es una generalización de la Transformada de Fourier de tiempo-continuo. Sin embargo, en lugar de usar funciones senosoidales complejas de la forma  $e^{-j\omega t}$ , la transformada de Laplace utiliza una forma más generalizada,  $e^{st}$ , donde

$$s = \sigma + j\omega$$

La relación entre las dos es que Laplace trabaja en todo el plano complejo, mientras que Fourier “recorre” sólo el eje imaginario. Es decir, la transformada de Fourier se obtendría como  $s = j\omega$ .

**Definición 1.-** La transformada de Laplace de una función  $f(t)$ ,  $0 \leq t < \infty$  es una función  $\mathcal{L}[f(s)]$  de una variable real  $s$  dada por

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)](s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st}dt = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \int_0^{\tau} f(t)e^{-st}dt$$

Podemos concluir que la transformada de Fourier se utiliza, por ejemplo, para ver el espectro de señales mientras que la transformada de Laplace se utiliza para analizar estabilidad de sistemas, los cuales físicamente empiezan en tiempo cero.

Más aun, la principal propiedad de las transformadas integrales es que permiten reducir un problema dinámico, dependiente del tiempo, con derivadas de la función señal, a un problema algebraico, sobre el papel mucho más sencillo de resolver.

## Filtros activos

Son aquellos que cuentan con elementos activos, tales como, amplificadores operacionales, transistores o tubos de vacío. En comparación con los pasivos que cuentan con elementos como resistencias, inductores y capacitores.

El mismo es útil cuando la señal a medir, tiene un contenido de frecuencia que es diferente a las frecuencias de señales deseables y que por lo tanto se necesitan eliminar. Ejemplos de ellas son: la interferencia proveniente de las líneas de potencia, el ruido térmico, etc.

El filtro es utilizado para separar, pasar o eliminar componentes de frecuencia no deseadas de una señal. Ejemplos de ellas son: la interferencia proveniente de las líneas de potencia, el ruido térmico etc.

Las características principales de los filtros son las siguientes:

- **La banda de paso**, está formada por el rango de frecuencias que pasan sin ser filtradas con la mínima atenuación o con alguna amplificación.
- **La banda de rechazo**, está formada por el rango de frecuencias que son rechazadas o también, son todas las demás frecuencias no contempladas en la banda de paso.
- **La región de transición**, comprendida entre la banda de paso y la banda de rechazo en la cual la ganancia cae de uno a cero.
- **La frecuencia de corte o de esquina**, donde la amplitud cae en 3.01 dB de su valor en la banda de paso.
- **Ganancia de la banda de paso**. Es la ganancia que se obtiene por la amplificación de la banda de paso. Se obtiene en filtros que contienen un generador de ganancia o un dispositivo activo, ya que éste puede amplificar la señal de entrada en la banda de paso del filtro.
- **Atenuación de la pendiente**. Describe la proporción en que se decrementa la ganancia de un filtro fuera de la banda de paso. Se mide normalmente en octavas de dB (dB/octavas) o décadas de dB (dB/décadas). La proporción llega a ser de  $-6ndB/octavas$  o  $-20ndB/décadas$  para filtros de n-orden.

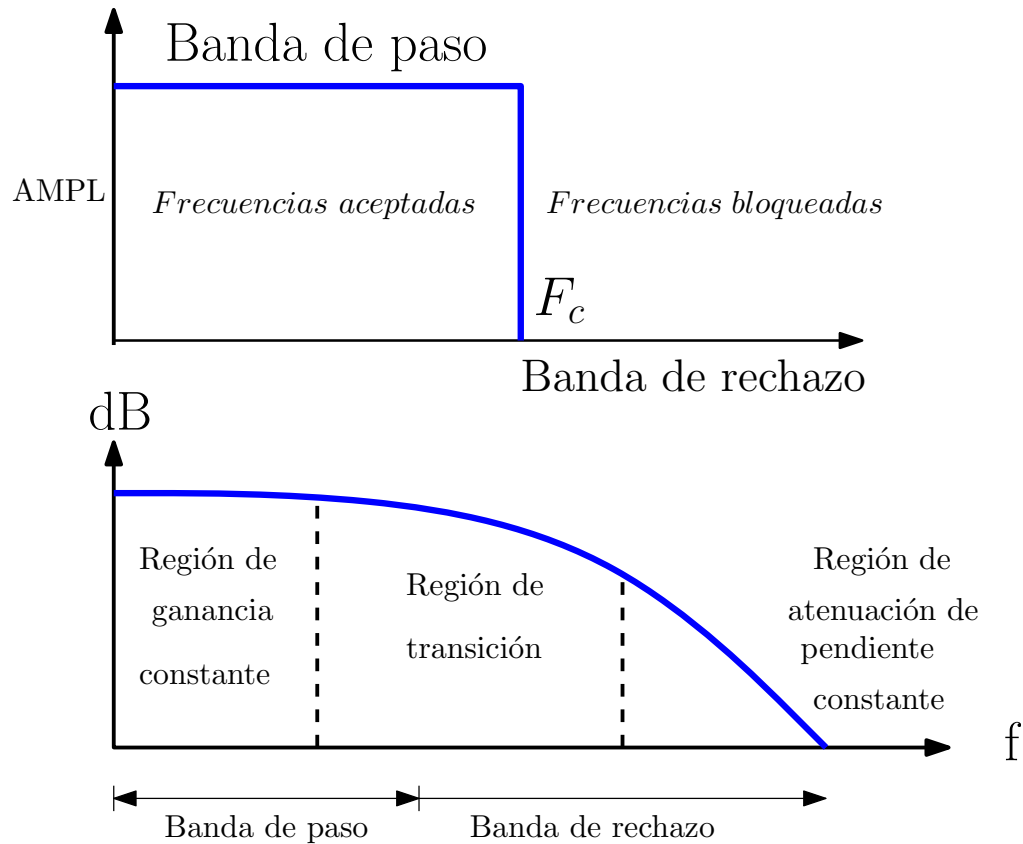
Donde: El intervalo entre dos frecuencias cuya razón es 10 se llama *década*. Así, dadas  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , siendo  $\omega_2 = 10\omega_1$ , el intervalo entre

ellas es una década. Cuando dos frecuencias están separadas por una octava significa que una frecuencia es el doble que la otra.

Por otro lado, si se tiene dos valores de potencia diferentes:  $P_1$  y  $P_2$ , y se desea saber cuál es el cambio de una con respecto a la otra, se utiliza la siguiente fórmula:

$$dB = 10 \log \frac{P_1}{P_2}.$$

- **Características de frecuencias  $\omega_0$**  . Es la frecuencia central en los filtros con respuesta de pasa-banda y rechaza-banda.



## Clasificación

Dependiendo del rango de frecuencias de la banda de paso, los filtros se clasifican en:

- I) *Filtros pasa bajas*, permiten el paso de frecuencias que estén por debajo de una frecuencia de corte especificada y atenúa las frecuencias que estén por arriba de dicha frecuencia.
- II) *Filtros pasa altas*, permiten el paso de frecuencias que estén por encima de una frecuencia de corte y atenúa las frecuencias que estén por debajo de dicha frecuencia.
- III) *Filtros pasa banda*, tienen una banda de paso entre dos frecuencias de corte, una inferior y otra superior.
- IV) *Filtros ranura*, rechaza una banda estrecha de frecuencias y deja pasar las otras. En particular es útil para eliminar una frecuencia específica (por ej. 60 Hz).

Como podemos notar los filtros son de gran utilidad, ademas cabe mencionar que los filtros activos son económicos en comparación de otros montajes. Los filtros de primer orden resultan ser los más fáciles de diseñar. Este tipo de montajes suele estar representado por la siguiente función de transferencia

$$H(s) = H_0 \frac{N(s)}{1 + \tau s}$$

Donde  $s = j\omega$ ,  $H_0$  es la amplitud de la ganancia,  $N(s)$  es un polinomio de grado  $\leq 1$ ,  $\tau = \frac{1}{\omega_c}$  es el inverso de la frecuencia angular del filtro dada por  $\omega_c$ , la cual se describe por

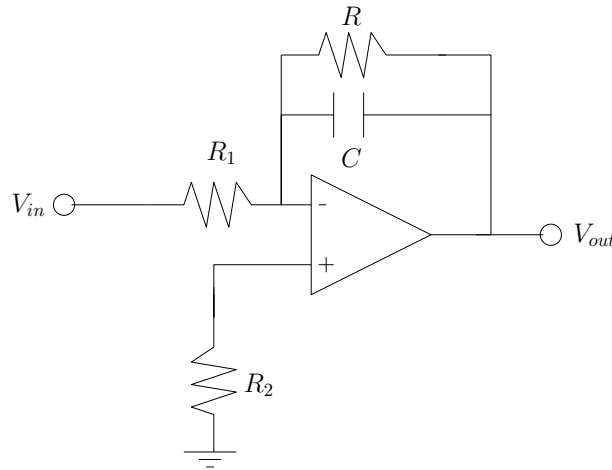
$$\omega_c = 2\pi f_c$$

donde  $f_c$  es la frecuencia de corte del filtro. Como hemos mencionado, la frecuencia de corte corresponde a aquella frecuencia limite del filtro para la cual se realiza una atenuación de la señal. Dependiendo de la configuración del filtro, el efecto del diseño del filtro se presenta, justamente, a partir de la frecuencia de corte.

En particular los filtros activos pasa bajas y pasa altas pueden ser de primer orden y utilizan un circuito formado por un amplificador inversor.

En el filtro pasa bajas la impedancia de realimentación está formada por una resistencia y capacitor en paralelo y en la entrada inversora se conecta una resistencia. En el filtro pasa altas, se tiene una resistencia en serie con un capacitor conectados a la entrada inversora y una resistencia como impedancia de realimentación.

## Filtro pasa bajas



La relación entre voltaje de salida  $V_{out}$  y voltaje de entrada  $V_{in}$  para el filtro activo pasa bajas esta dado por

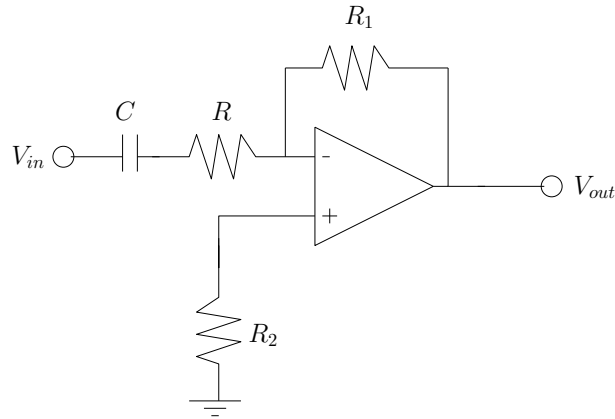
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R}{R_1} \frac{1}{1 + sRC}$$

y su frecuencia angular (a su vez de corte) es dada por  $\omega_c = \frac{1}{RC}$ . De esta forma se tiene que si  $\omega \ll \omega_c$  entonces la ganancia sigue siendo  $H_0$ . Sin embargo, si  $\omega \gg \omega_c$  la ganancia descendiera 20 dB cada *década*.

## Filtro pasa altas

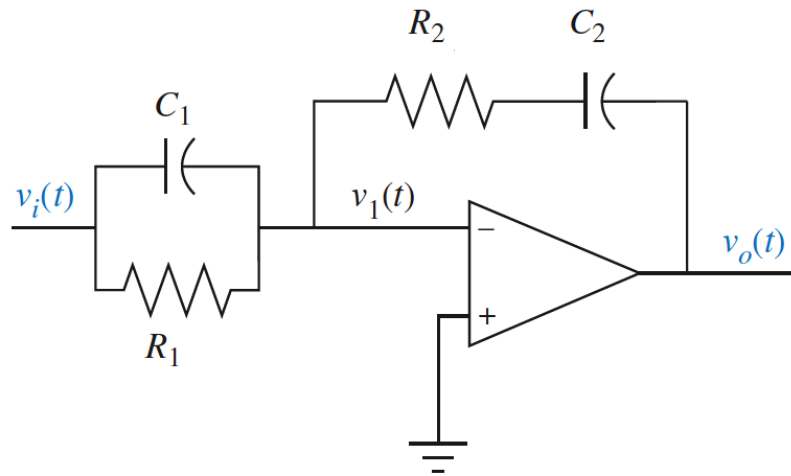
De igual forma, la relación entre voltaje de salida  $V_{out}$  y voltaje de entrada  $V_{in}$  para el filtro activo pasa altas es dada por

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{CR_1s}{1 + sRC}$$



con frecuencia de corte  $\omega_c = \frac{1}{RC}$ .

Utilizando estos conceptos de análisis en frecuencia, circuitos operacionales con mayor complejidad pueden resolverse desde un punto de vista algebraico.



## Convertidores digitales analógicos

En secciones previas, se estudiaron los convertidores analógicos digitales, sin embargo, un elemento importante en el método de aproximaciones sucesivas es la inclusión de un convertidor digital analógico, el cual, corresponde a un circuito que tiene una entrada digital y tiene como salida una tensión proporcional a la entrada digital.

$f(t)$	$F(s)$
1	$\frac{1}{s}$
$t^\alpha, -1 < \alpha$	$\frac{\Gamma(\alpha + 1)}{s^{\alpha+1}}$
$t^n e^{at}, n = 1, 2, 3, ..$	$\frac{n!}{(s - a)^{n+1}}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$\cosh(\omega t)$	$\frac{s}{s^2 - \omega^2}$
$e^{at} \cos(\omega t)$	$\frac{s - a}{(s - a)^2 + \omega^2}$
$t \cos(\omega t)$	$\frac{s^2 - \omega^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$
$\sin(\omega t) + \omega t \cos(\omega t)$	$\frac{2\omega s^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$
$\frac{1}{a - b} (a e^{at} - b e^{bt})$	$\frac{s}{(s - a)(s - b)}$
$\frac{1}{a^3} (at - \sin(at))$	$\frac{1}{s^2 (s^2 + a^2)}$



$f(t)$	$F(s)$
$t^n, \ n = 1, 2, 3, ..$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$e^{a t}$	$\frac{1}{s - a}$
$\sin (\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\sinh (\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2 - \omega^2}$
$e^{a t} \sin (\omega t)$	$\frac{\omega}{(s - a)^2 + \omega^2}$
$t \sin (\omega t)$	$\frac{2 \omega s}{(s^2 + \omega^2)^2}$
$\sin (\omega t) - \omega t \cos (\omega t)$	$\frac{2 \omega^3}{(s^2 + \omega^2)^2}$
$\frac{1}{a - b} \left( e^{a t} - e^{b t} \right)$	$\frac{1}{(s - a) (s - b)}$
$\frac{1}{a^2} (1 - \cos (a t))$	$\frac{1}{s (s^2 + a^2)}$
$f(t) + g(t)$	$F(s) + G(s)$
$f'(t)$	$s F(s) - f(0)$

Los diferentes tipos de convertidores reside en el tipo de red resistiva utilizada en el diseño y en la fuente de referencia, que puede ser de voltaje o corriente. Desde el punto de vista de la red utilizada, existen dos tipos (básicos) de convertidores: **con resistencias ponderadas y con red  $R - 2R$  en escalera**

- **Con resistencias ponderadas.** En este convertidor, las salidas del registro controlan interruptores que permiten el paso de 0 [V] o el valor de la fuente de voltaje de referencia (generalmente 5). Los interruptores dan acceso a una red sumadora resistiva que convierten cada bit en su valor en voltaje y a continuación la suma obteniendo un voltaje total. El valor total alimenta a un amplificador operacional que realiza la conversión a voltaje y el escalamiento de la salida, el cual corresponde a una configuración de sumador. Cada resistor de la rama esta ajustado según el bit que tenga a la entrada, la cual se va dividiendo sucesivamente en potencias de 2 como se muestra en la siguiente figura.<sup>1</sup>

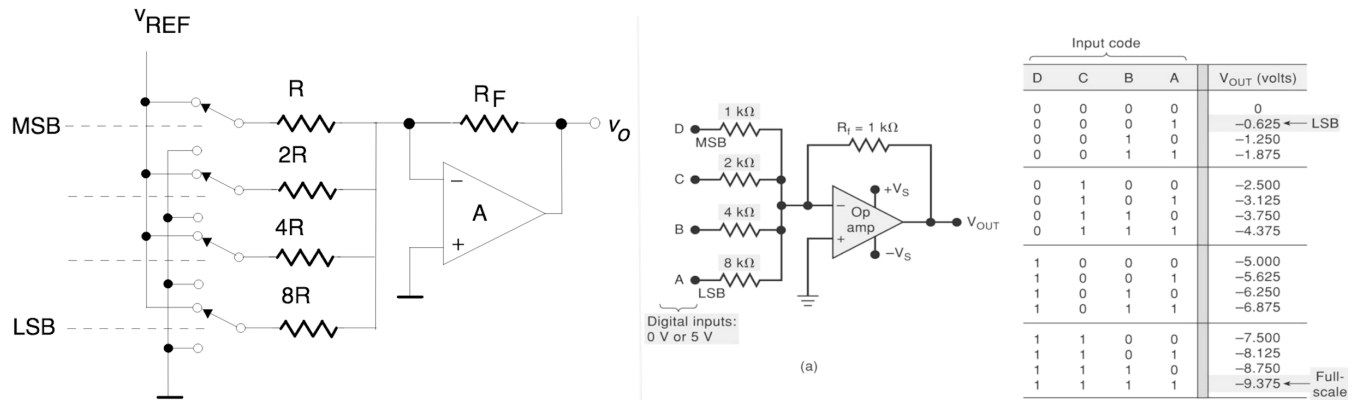
De esta forma, la tensión de salida de un convertidor de  $n$  bits, esta dada por la siguiente ecuación

$$v_o(t) = \frac{R_f}{R} \left( \frac{a_0}{2^{n-1}} + \frac{a_1}{2^{n-2}} + \dots + \frac{a_{n-1}}{2^0} \right).$$

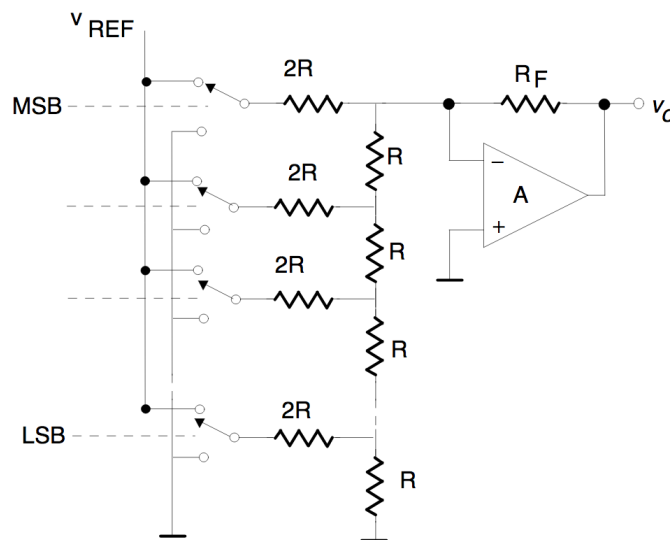
Donde cada  $a_n$  representa la información binaria “0” o “1”.

---

<sup>1</sup>Conversores Análogo-digital y digital análogo: conceptos básicos, J. I. Huircán.



- **Convertidor  $R - 2R$  en escalera.** El circuito de la figura anterior tiene un gran inconveniente, debido a que necesita resistores que se van duplicando en magnitud. Generalmente, en la fabricación de las resistencias, es difícil encontrar resistores adecuados para este diseño, ya que no se pueden tener multiples exactos. Para evitar la necesidad de disponer de tantos valores resistivos, la estructura  $R - 2R$  de la siguiente figura, utiliza solo dos valores aunque necesita el doble de resistencias. Con esta técnica se pueden fabricar convertidores de 12 a 16 bit, sin embargo, la estabilidad de la fuente de poder y el ruido viene a jugar un papel crítico al aumentar el número de bit.



## Convertidor Analógico Digital en el AVR

Para comprender de una mejor forma el funcionamiento de un convertidor analógico digital, es necesario recordar como se define la resolución. En la siguiente tabla se muestra la resolución para un voltaje de referencia de 5V utilizando diferente numero de bits para digitalizar la señal.

<b><i>n</i>-bit</b>	<b>Number of steps</b>	<b>Step size (mV)</b>
8	256	$5/256 = 19.53$
10	1024	$5/1024 = 4.88$
12	4096	$5/4096 = 1.2$
16	65,536	$5/65,536 = 0.076$

Si nombramos  $V_{ref}$  al voltaje de referencia en un convertidor AD y definimos diferentes rangos de voltaje podremos notar que la codificación de  $V_{ref}$  dependera del número de bits utilizados en el convertidor y además del rango del voltaje. Esto se podrá apreciar en las siguientes tablas, para diferentes rangos de voltaje y bits en la conversión.

<b><math>V_{in}</math> Range (V)</b>	<b>Step Size (mV)</b>
0 to 5	$5/256 = 19.53$
0 to 4	$4/256 = 15.62$
0 to 3	$3/256 = 11.71$
0 to 2.56	$2.56/256 = 10$
0 to 2	$2/256 = 7.81$
0 to 1.28	$1.28/256 = 5$
0 to 1	$1/256 = 3.90$

<b><math>V_{in}</math> Range (V)</b>	<b>Step Size (mV)</b>
0 to 5	$5/256 = 19.53$
0 to 4	$4/256 = 15.62$
0 to 3	$3/256 = 11.71$
0 to 2.56	$2.56/256 = 10$
0 to 2	$2/256 = 7.81$
0 to 1.28	$1.28/256 = 5$
0 to 1	$1/256 = 3.90$

De esta forma podemos notar que el voltaje de salida para un converti-

donde AD de n bits puede ser definido por la formula

$$D_{out} = \frac{V_{in}}{V_{ref}/2^n}.$$

donde  $D_{out}$  corresponde al valor digitalizado, en decimal el cual debe ser convertido a binario.

## 1. Programación del convertidor AD en el AVR

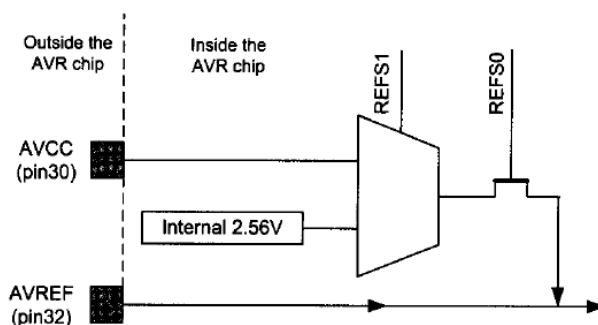
Debido a que el convertidor AD es ampliamente utilizado en la adquisición de datos, de esta forma, en los microcontroladores se han incorporado convertidores AD para eliminar la necesidad de tener una conexión externa con alguno de ellos. En particular, el ATMEGA32 tiene un conjunto de periféricos AD con las siguientes características.

- Tiene un convertidor AD de 10 bits.
- Tiene 8 canales análogos de entrada, 7 canales de entrada diferencial y 2 canales de entrada diferencial con ganancias de 10x y 200x
- Los datos binarios del convertidor se almacenan en dos funciones de registros especiales llamados ADCL(Low) y ADCH(High).
- Debido a que ambos registros (ADCL y ADCH) dan un total de 16 bits y la salida del convertidor tiene una amplitud de 10 bits, 6 de esos bits se quedan sin usar. Se tiene la opción de dejar de usar los 6 bits más significativos o los menos significativos.
- Se tienen 3 opciones para obtener el voltaje de referencia  $V_{ref}$ , este puede ser conectado a AVCC (que es el voltaje de polarización del AVR), voltaje de referencia interno 2.56, o un voltaje externo por medio del pin AREF.
- El tiempo de conversión es definido por la frecuencia del cristal, el cual también tiene un preescalamiento. ADPS2:0.

El convertidor AD del AVR tiene asociados 5 registros para su funcionamiento, el ADCH, ADCL, ADCSRA( Registro de control y status), ADMUX ( registro de selección de multiplexor elegir el tipo de canal de entrada) y SPIOR (Funciones especiales de registros I/O).

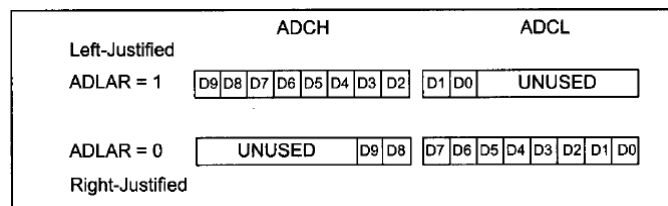
### 1.1. Registro ADMUX

- REFS1:0. Los bits 7 y 6 seleccionan el voltaje de referencia para el convertidor AD.
- ADLAR. Este bit que corresponde al 5 del registro ADMUX define si los bits del lado izquierdo o derecho son los que se dejan de usar al conjuntar los registros ADCH:ADCL. Si el bit es igual a 1, el resultado será ajustar hacia la izquierda, de otra forma, se ajustará a la derecha.
- MUX4:0, Los bits del 0 al 4 seleccionan la ganancia para el canal de entrada diferencial, además de seleccionar cual combinación de entrada analógica es conectada al convertidor AD.



REFS1	REFS0	$V_{ref}$	
0	0	AREF pin	Set externally
0	1	AVCC pin	Same as VCC
1	0	Reserved	----
1	1	Internal 2.56 V	Fixed regardless of VCC value

MUX4...0	Single-ended Input
00000	ADC0
00001	ADC1
00010	ADC2
00011	ADC3
00100	ADC4
00101	ADC5
00110	ADC6
00111	ADC7



## Registro ADCSRA

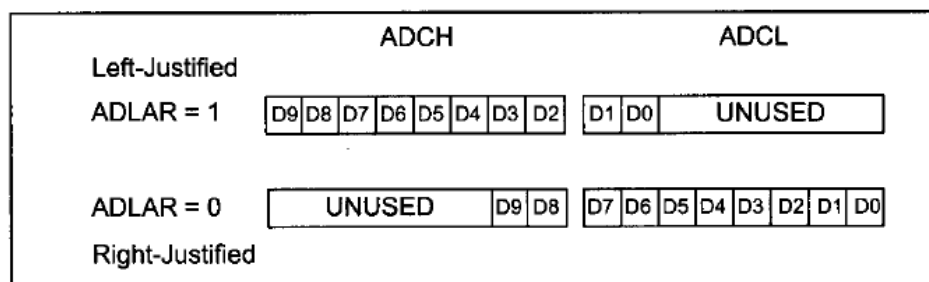
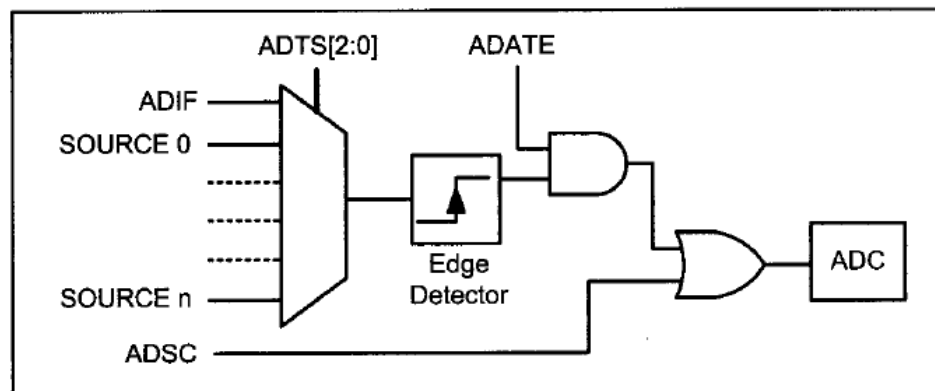
El registro ADCSRA es el registro del control y status del convertidor AD. Los bits de este registro controlan o monitorean la operación del convertidor AD. Los bits de este registro se pueden apreciar en la siguiente figura.



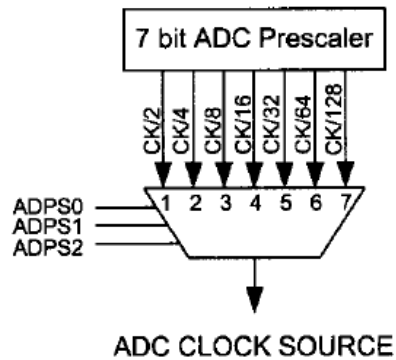
- ADEN. Este bit habilita y deshabilita el convertidor AD. Si este bit es igual a 1 habilita el convertidor, si este bit se limpia se deshabilitará el convertidor.
- ADSC. **Para iniciar la conversión es necesario configurar este bit en 1. En el momento que termina la conversión, de forma automática este bit se pone en 0.**
- ADATE. Al poner este bit en 1 se activa de forma automática el convertidor AD, utilizando una señal asociada con los bits ADTS2:0

del registro SFIOR.

- **ADIF.** Este bit se pone en 1 cuando una conversión AD es completada y los registros de los datos son actualizados. Para limpiar esta bandera, al igual que en los timers, es necesario limpiarla poniendo un 1.
- **ADIE.** Este bit es utilizado para habilitar la interrupción por la terminación de una conversión AD. Para habilitarlo se tiene que definir en 1.
- **ADPS2:0** Estos bits sirven para elegir el preescalamiento a utilizar para obtener la frecuencia de trabajo del convertidor AD.







ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADC Clock
0	0	0	Reserved
0	0	1	CK/2
0	1	0	CK/4
0	1	1	CK/8
1	0	0	CK/16
1	0	1	CK/32
1	1	0	CK/64
1	1	1	CK/128

Cualés son las características asociadas para el convertidor AD del AVR si se configuran los registros ADCSRA y ADMUX de la siguiente manera?

**ADCSRA:1000 0111**

**ADMUX: 1100 0000**

Programa de un convertidor AD utilizando el AVR.

```
.INCLUDE "M32DEF.INC"
    LDI    R16,0xFF
    OUT    DDRB, R16           ;make Port B an output
    OUT    DDRD, R16           ;make Port D an output
    LDI    R16,0
    OUT    DDRA, R16           ;make Port A an input for ADC
    LDI    R16,0x87
    OUT    ADCSRA, R16         ;enable ADC and select ck/128
    LDI    R16,0xC0
    OUT    ADMUX, R16          ;2.56V Vref, ADC0 single ended
                                ;input, right-justified data
READ_ADC:
    SBI    ADCSRA,ADSC         ;start conversion
KEEP_POLING:
    SBIS   ADCSRA,ADIF         ;wait for end of conversion
                                ;is it end of conversion yet?
    RJMP   KEEP_POLING         ;keep polling end of conversion
    SBI    ADCSRA,ADIF         ;write 1 to clear ADIF flag
    IN     R16,ADCL            ;YOU HAVE TO READ ADCL FIRST
    OUT    PORTD,R16           ;give the low byte to PORTD
    IN     R16,ADCH            ;READ ADCH AFTER ADCL
    OUT    PORTB,R16           ;give the high byte to PORTB
    RJMP   READ_ADC           ;keep repeating it
```