

Principios de mecatrónica

Clase 12

SDI-11561-004, SDI-11561-002

Interrupciones

Una interrupción es una situación especial que suspende la ejecución de un programa de modo que el sistema pueda realizar una acción para tratarla. Tal situación se da, por ejemplo, cuando un periférico requiere la atención del procesador para realizar una operación de E/S.

Las interrupciones constituyen quizá el mecanismo más importante para la conexión del microcontrolador con el mundo exterior, sincronizando la ejecución de programas con acontecimientos externos.

De esta forma un **interrupción** se pueden definir como: eventos que hacen que el microcontrolador deje de ejecutar la tarea que está realizando para atender dicho acontecimiento y luego regresarse a continuar la tarea que estaba realizando antes de la interrupción. Siendo un mecanismo que permite ejecutar un bloque de instrucciones deteniendo la ejecución del programa y luego restablecer la ejecución del mismo sin afectarlo directamente.

En los microcontroladores AVR el programa asociado con la interrupción es llamada Rutina de servicio de interrupción (ISR).

Rutina de servicio de interrupción (ISR)

Cuando una interrupción es invocada, el microcontrolador ejecuta el servicio de rutina de interrupción. Generalmente, en muchos microcontroladores, para cada interrupción hay una localidad fija en memoria que guarda la dirección de su ISR. El grupo de ubicaciones de memoria reservado en AVR32 contiendo las direcciones de las ISR's denominado vector de interrupciones, se muestra en la siguiente tabla.

Interrupt	ROM Location (Hex)
Reset	0000
External Interrupt request 0	0002
External Interrupt request 1	0004
External Interrupt request 2	0006
Time/Counter2 Compare Match	0008
Time/Counter2 Overflow	000A
Time/Counter1 Capture Event	000C
Time/Counter1 Compare Match A	000E
Time/Counter1 Compare Match B	0010
Time/Counter1 Overflow	0012
Time/Counter0 Compare Match	0014
Time/Counter0 Overflow	0016
SPI Transfer complete	0018
USART, Receive complete	001A
USART, Data Register Empty	001C
USART, Transmit Complete	001E
ADC Conversion complete	0020
EEPROM ready	0022
Analog Comparator	0024
Two-wire Serial Interface (I2C)	0026
Store Program Memory Ready	0028

Pasos en la ejecución de una interrupción

Tras la activación de una interrupción, el microcontrolador realiza los siguientes pasos:

- I) Finaliza la instrucción que está ejecutando actualmente y guarda la dirección de la siguiente instrucción (contador de programa) en una stack.

- II) Brinca a una localidad fija en la memoria llamada *interrupted vector table*. La tabla de vectores de interrupción dirige el microcontrolador a la dirección del ISR.
- III) El microcontrolador empieza a ejecutar la “subrutina de servicio de interrupción” hasta que alcanza la última instrucción de la subrutina, la cual es RETI (volver de la interrupción).
- IV) Al ejecutar la instrucción RETI, el microcontrolador regresa al lugar donde se interrumpió. Primero, obtiene la dirección del contador del programa(PC) y entonces empieza a ejecutarse desde esa dirección.

Fuente de interrupciones en el AVR

Hay muchas fuentes de interrupciones en el AVR, dependiendo de cual periférico es incorporado en el chip. Las siguientes son algunas de las fuentes más utilizadas de interrupción en el AVR.

- Hay al menos dos interrupciones reservadas para cada uno de los timers, una para overflow (desbordamiento) y otra para comparación.
- Se reservan tres interrupciones para interrupciones externas. Los pines PD2 (PORTD.2), PD3 (PROTD.3) y PB2 (PORTDB.2) son para la interrupción de hardware externo INT0, INT1 e INT2, respectivamente.
- Comunicaciones seriales USART tiene 3 interrupciones, una para recibir y dos interrupciones para transmitir.
- Convertidor analógico digital.

De la tabla anterior podemos notar que un número limitado de bytes están reservados para interrupciones.

Normalmente, la rutina de servicio para una interrupción es demasiado larga para encajar en el espacio de memoria asignado. Por este motivo,

una instrucción JMP se coloca en el punto de la tabla de vectores a la dirección del ISR.

Por este motivo, se coloca el JMP como primera instrucción y redirigimos el procesador fuera de la tabla de vectores de interrupción.

Habilitar y deshabilitar una interrupción

Al reiniciar, todas las interrupciones se desactivan (enmascaran), lo que significa que el microcontrolador no responderá a ninguna de ellas si están activadas. Las interrupciones deben estar habilitadas (desenmascaradas) por software para que el microcontrolador responda a ellas. El bit D7 del SREG (Status register) es responsable de habilitar y deshabilitar las interrupciones globalmente. De esta forma, el bit I hace el trabajo de deshabilitar y habilitar todas las interrupciones fácilmente. Con una sola instrucción “*CLI*” (Clear Interrupt), nosotros podemos hacer I=0 durante la operación de una tarea critica.

Bit	D7	I	T	H	S	V	N	Z	C	D0
SREG										
C – Carry flag					S – Sign flag					
Z – Zero flag					H – Half carry					
N – Negative flag					T – Bit copy storage					
V – Overflow flag					V – Overflow flag					
Bits of Status Register (SREG)										

Pasos para habilitar una interrupción

Para habilitar cualquiera de las interrupciones, nosotros realizamos los siguientes pasos:

- I) Bit D7 (I) del registro SREG debe configurarse en ALTO para permitir que ocurran las interrupciones. Esto se realiza con la instrucción “*SEI*” (Set Interrupt).

II) Si $I = 1$, cada interrupción se habilita configurando en ALTO el bit de indicador de habilitación de interrupción (IE) para esa interrupción. Hay algunos registros de I/O que contienen los bits de habilitación de interrupción. La siguiente figura muestra que el registro TIMSK tiene bits de habilitación de interrupción para Timer0, Timer1 y Timer2. Examinaremos el registro que contiene los bits de habilitación de algunas interrupciones. Se debe tener en cuenta que si $I = 0$, no se responderá a ninguna interrupción, incluso si los bits de habilitación de interrupción correspondientes son altos.

	D7	D0
	OCIE2	TOIE2
	TICIE1	OCIE1A
	OCIE1B	TOIE1
	TOIE0	OCIE0
	TOIE0	TOIE0
TOIE0	Timer0 overflow interrupt enable = 0 Disables Timer0 overflow interrupt = 1 Enables Timer0 overflow interrupt	
OCIE0	Timer0 output compare match interrupt enable = 0 Disables Timer0 compare match interrupt = 1 Enables Timer0 compare match interrupt	
TOIE1	Timer1 overflow interrupt enable = 0 Disables Timer1 overflow interrupt = 1 Enables Timer1 overflow interrupt	
OCIE1B	Timer1 output compare B match interrupt enable = 0 Disables Timer1 compare B match interrupt = 1 Enables Timer1 compare B match interrupt	
OCIE1A	Timer1 output compare A match interrupt enable = 0 Disables Timer1 compare A match interrupt = 1 Enables Timer1 compare A match interrupt	
TICIE1	Timer1 input capture interrupt enable = 0 Disables Timer1 input capture interrupt = 1 Enables Timer1 input capture interrupt	
TOIE2	Timer2 overflow interrupt enable = 0 Disables Timer2 overflow interrupt = 1 Enables Timer2 overflow interrupt	
OCIE2	Timer2 output compare match interrupt enable = 0 Disables Timer2 compare match interrupt = 1 Enables Timer2 compare match interrupt	

Figura 1: Registro TIMSK (Máscara de interrupciones de los timers)

Los bits de la tabla, junto con el bit I, deben ser altos para que se pueda responder a una interrupción. Tras la activación de la interrupción, el propio AVR borra el bit I para asegurarse de que otra interrupción no pueda interrumpir el microcontrolador mientras da servicio al actual. Al final de ISR, la instrucción RETI hará que $I = 1$ permita que entre otra interrupción.

Ejemplo: Mostrar las instrucciones para

- Habilitar (unmask) la interrupción del overflow del Timer0 e interrupción de compare match del Timer2.
- Inhabilitar (mask) la interrupción overflow del Timer0, entonces
- mostrar como inhabilitar (mask) todas las interrupciones con una sola instrucción.

```
(a) LDI R20, (1<<TOIE0)|(1<<OCIE2) ;TOIE0 = 1, OCIE2 = 1
    OUT TIMSK,R20 ;enable Timer0 overflow and Timer2 compare match
    SEI             ;allow interrupts to come in

(b) IN   R20,TIMSK           ;R20 = TIMSK
    ANDI R20,0xFF^(1<<TOIE0) ;TOIE0 = 0
    OUT  TIMSK,R20           ;mask (disable) Timer0 interrupt
```

Además, podemos realizar la acción (b) con las siguientes instrucciones

```
IN   R20,TIMSK           ;R20 = TIMSK
CBR  R20,1<<TOIE0        ;TOIE0 = 0
OUT  TIMSK,R20           ;mask (disable) Timer0 interrupt

(c) CLI                  ;mask all interrupts globally
```

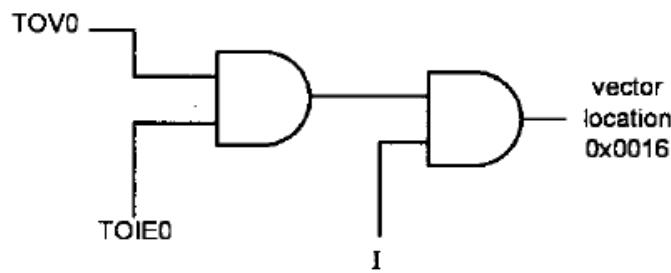
Es importante notar que en a) se puede usar “*LDI, 0x81*” en lugar de *LDI R20, “(1 << TOIE0)|(1 << OCIE2)”*.

En secciones pasadas, aprendimos que la bandera de desbordamiento del timer se activaba cuando el timer se desbordaba. También mostramos cómo monitorear la bandera del timer con la instrucción SBRS R20,

TOV0. En el sondeo de TOV0, tenemos que esperar hasta que se levante TOV0.

El uso de interrupciones evita atar al controlador. Si la interrupción del timer en el registro de interrupción está habilitada, TOV0 se eleva cada vez que el timer se desborda y el microcontrolador salta a la tabla de vectores de interrupción para dar servicio al ISR. De esta manera, el microcontrolador puede hacer otras cosas hasta que se le notifique que el temporizador se ha desbordado. Para usar una interrupción, primero debemos habilitar la interrupción porque todas las interrupciones se enmascaran al reiniciar. El bit TOIE_x habilita la interrupción para un timer dado. Los bits TOIE_x son retenidos por el registro TIMSK como se muestra en la tabla.

Timer Interrupt Flag Bits and Associated Registers				
Interrupt	Overflow Register		Enable Bit	Register
		Flag Bit		
Timer0	TOV0	TIFR	TOIE0	TIMSK
Timer1	TOV1	TIFR	TOIE1	TIMSK
Timer2	TOV2	TIFR	TOIE2	TIMSK



Consideraciones

- Debemos evitar utilizar el espacio de memoria asignado a la tabla de vectores de interrupción. Por lo tanto, colocamos todos los códigos de inicialización en la memoria comenzando en una dirección como \$100. De esta forma se debe usar inicialmente la instrucción JMP en la dirección 0000 para redirigir al controlador lejos de la tabla de vectores de interrupción.

Ej.- Realizar un programa donde se asuma que PORTC esta conectado a 8 switches y PORT D a 8 leds. De esta forma el programa usará Timer0 para generar una onda cuadrada sobre el pin PORTB.5, mientras al mismo tiempo los datos son transferidos del PORTC al PORTD.

```

INCLUDE "M32DEF.INC"
.ORG 0x0          ;location for reset
JMP  MAIN
.ORG 0x16         ;location for Timer0 overflow (see Table 10.1)
JMP  T0_OV_ISR    ;jump to ISR for Timer0
;-main program for initialization and keeping CPU busy
.ORG 0x100
MAIN: SBI  DDRB,5      ;PB5 as an output
LDI   R20,(1<<TOIE0)
OUT  TIMSK,R20     ;enable Timer0 overflow interrupt
SEI   ;set I (enable interrupts globally)
LDI   R20,-32       ;timer value for 4 µs
OUT  TCNT0,R20     ;load Timer0 with -32
LDI   R20,0x01
OUT  TCCR0,R20     ;Normal, internal clock, no prescaler
LDI   R20,0x00
OUT  DDRC,R20      ;make PORTC input
LDI   R20,0xFF
OUT  DDRD,R20      ;make PORTD output
;----- Infinite loop
HERE: IN   R20,PINC  ;read from PORTC
OUT  PORTD,R20    ;give it to PORTD
JMP  HERE         ;keeping CPU busy waiting for interrupt

;-----ISR for Timer0 (it is executed every 4 µs)
.ORG 0x200
T0_OV_ISR:
IN   R16,PORTB    ;read PORTB
LDI  R17,0x20      ;00100000 for toggling PB5
EOR  R16,R17
OUT  PORTB,R16    ;toggle PB5
LDI  R16,-32       ;timer value for 4 µs
OUT  TCNT0,R16    ;load Timer0 with -32 (for next round)
RETI             ;return from interrupt

```

Principios de Mecatrónica

Acondicionamiento de señales

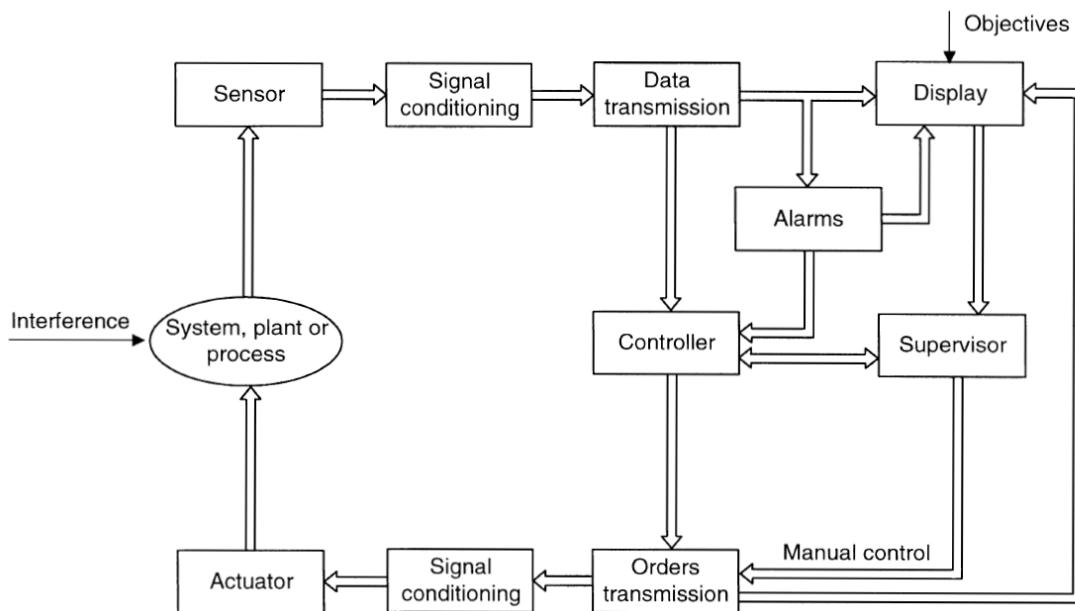
Clase 13-16

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 intérpretación 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.

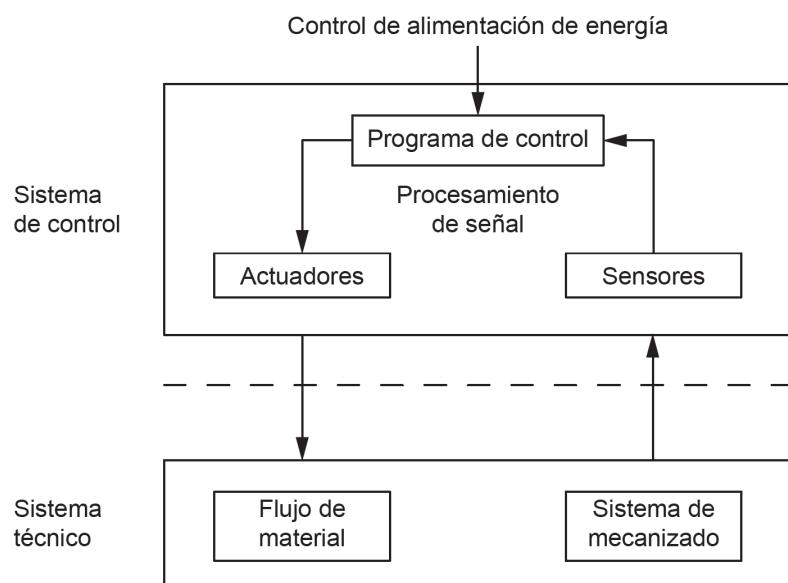


Acondicionamiento de señales

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

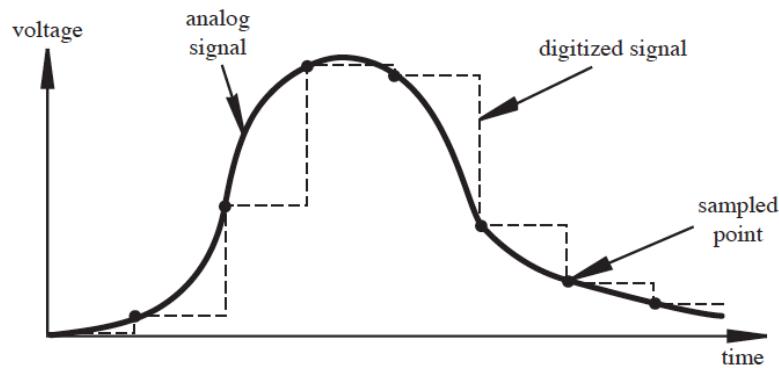
- Conversion de señal
 - I) Conversión corriente/presión
 - II) Puente de Wheatstone
- Transmisión de señal
 - I) Conversión tensión/corriente
 - II) Conversión corriente/ tensión
 - III) Conversión tensión/frecuencia
 - IV) Modulación (PWM)



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

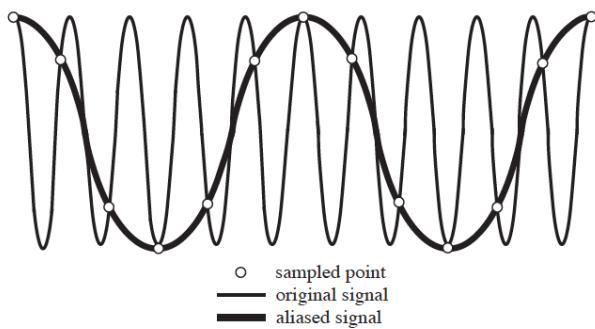
$$f_s > 2f_{max}$$

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 límite 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.

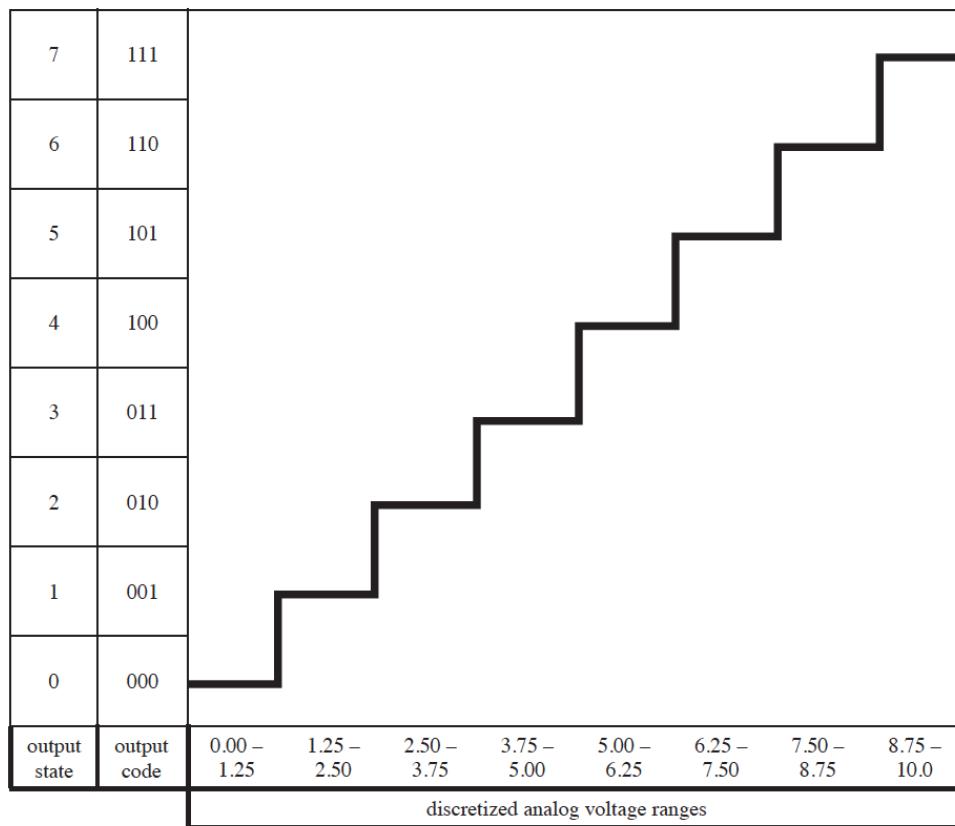
Teoría de cuantización

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 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:

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

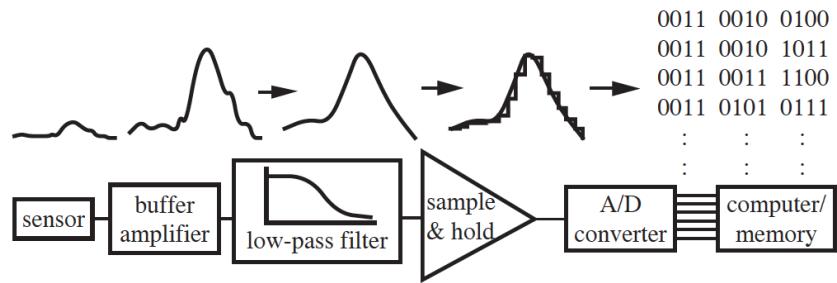
Es una medida del cambio analógico que se puede presentar por el convertidor.

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

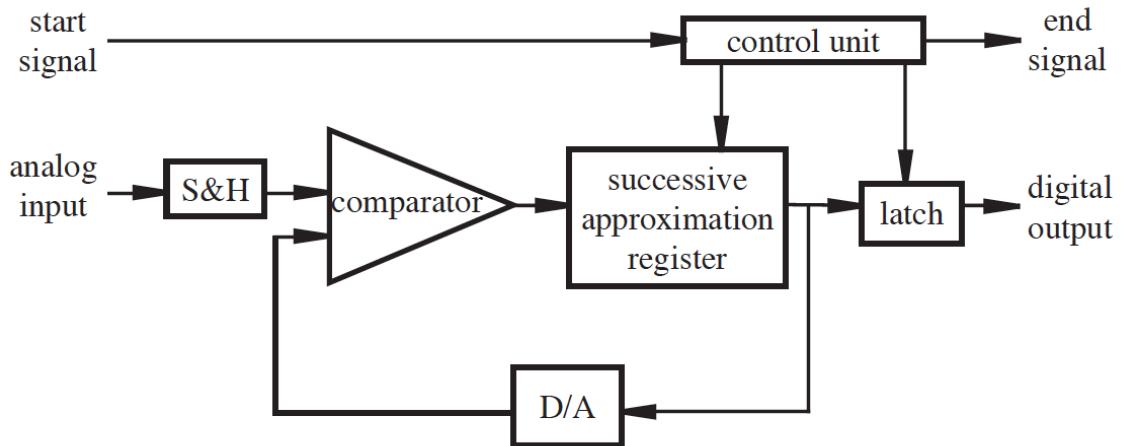
En la siguiente figura se muestran los componentes requeridos para la conversión A/D.



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 comutado y delta sigma. Los más frecuentes en los diseños comerciales son los primeros dos.

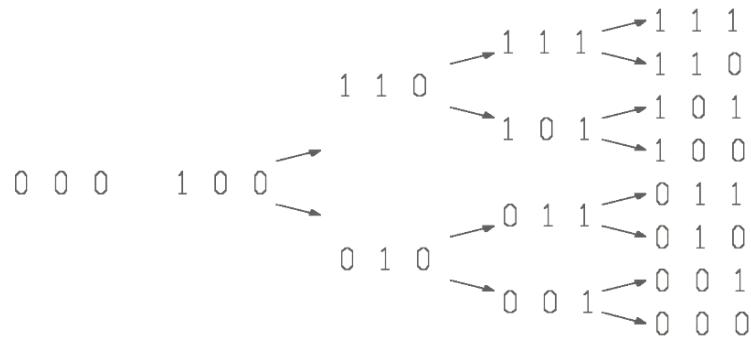
El convertidor A/D de **aproximación sucesiva** es relativamente rápido y barato. Su diseño es el siguiente:



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.

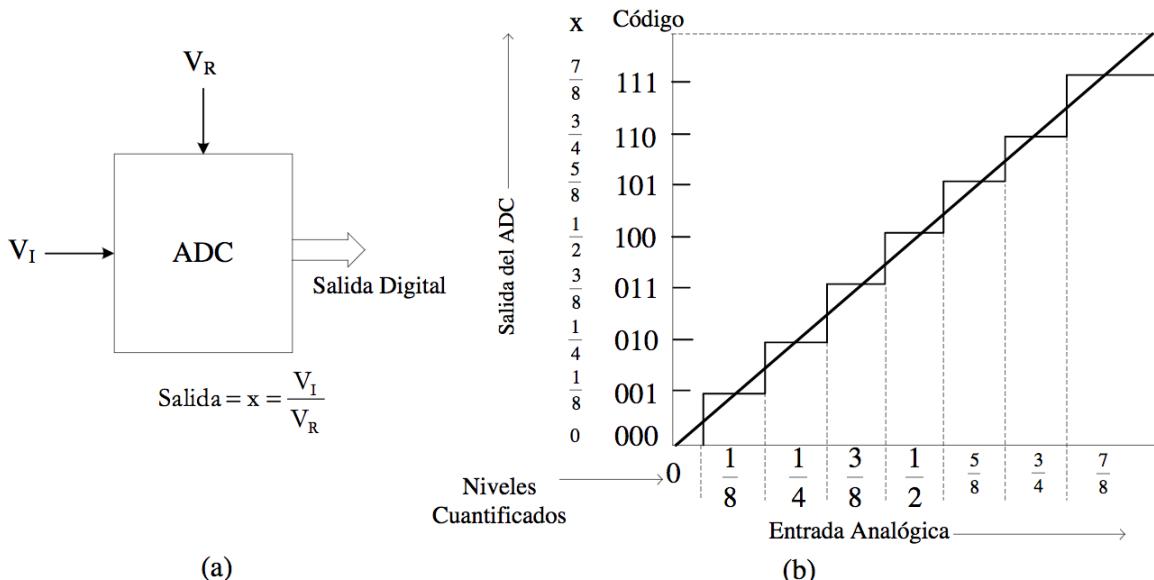
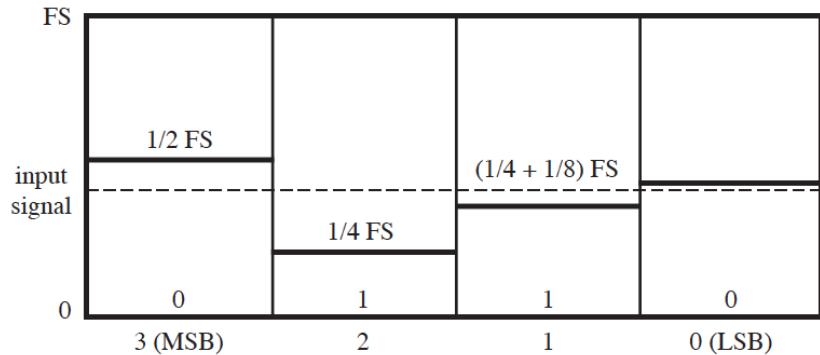


Más específicamente, la entrada se compara con fracciones binarias ($1/2$, $1/4$, $1/8, \dots, 1/2^n$) del valor de la escala completa(FS) del convertidor A/D. La unidad de control primero enciende el bit más significativo (MSB) del registro y deja todos los bits menores en 0. Esta señal es transformada 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

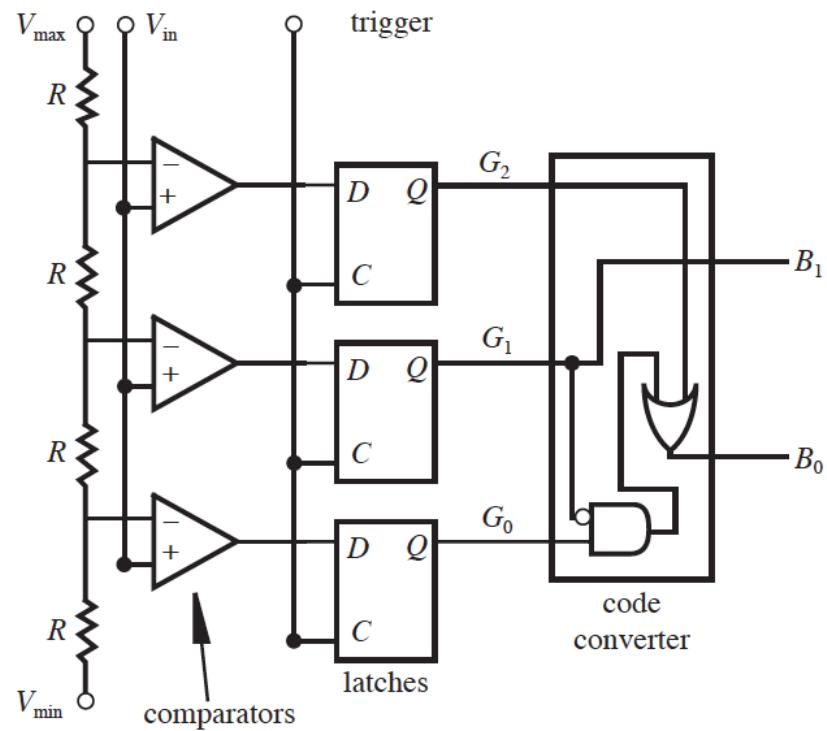
un valor más preciso.



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 paralelo 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 lógica combinacional. El convertidor de la figura es de 2 bits que tiene una resolución de 4 estados de salida.

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} .



State	Code ($G_2 G_1 G_0$)	Binary ($B_1 B_0$)	Voltage Range
0	000	00	0–1
1	001	01	1–2
2	011	10	2–3
3	111	11	3–4

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 este 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 milivoltios.
- ser muy ruidosas, esto debido a interferencias electromagnética.
- contener la información equivocada, por lo general debido al diseño del transductor o la instrumentación.

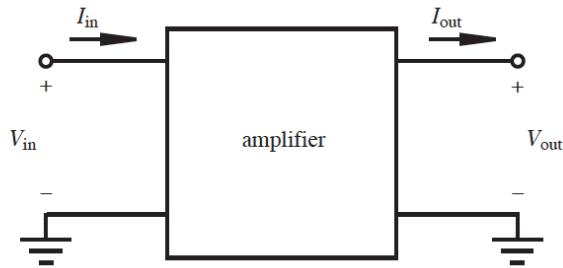
Muchos de estos problemas se pueden remediar, y la información de señal deseada se extrae a través del procesamiento adecuado de la señal analógica. La forma más simple y común de procesamiento de señal es la **amplificación**, donde la magnitud de la señal de voltaje se aumenta. Otras formas incluyen 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_{int} son muy grande—del orden de los $10M\Omega$ y z_{out} de unos cuantos ohms o menos.

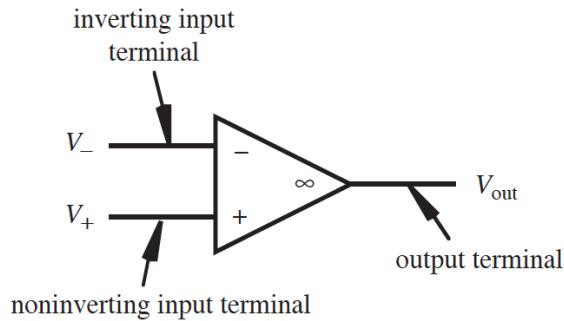
Como ya lo mencionamos previamente; los amplificadores operacionales son los bloques básicos para construir

- 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,

$$I_+ = I_- = 0$$

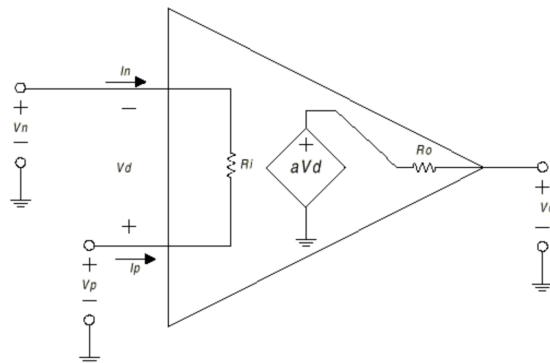
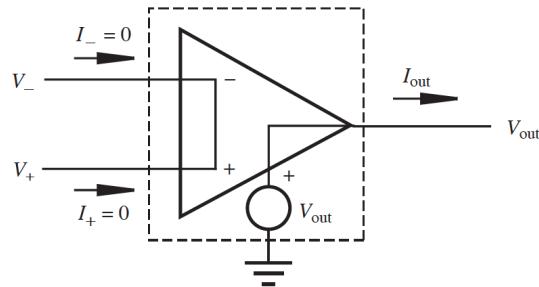
- **Tiene ganancia infinita.** Por lo tanto la diferencia entre los voltajes de entrada debe ser cero; de otro modo, la salida sería infinita. Esto se denota en la figura mediante el cortocircuito de las dos entradas. Entonces,

$$V_+ = V_-$$

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.

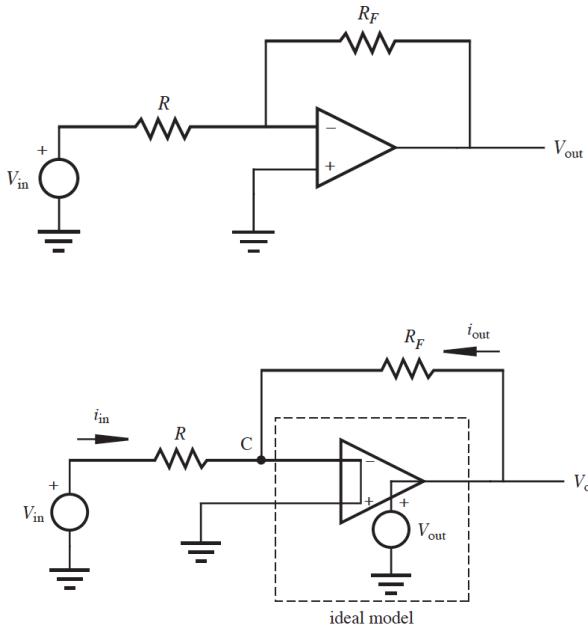
Note que V_{out} , V_+ , V_- están todos referidos a una tierra común. Además, debe haber retroalimentación entre la salida y la entrada inversora para el comportamiento lineal estable.



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

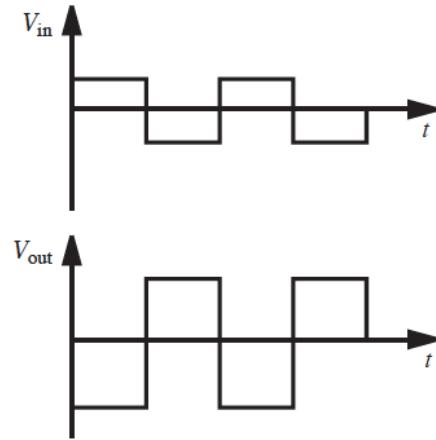
Se construye al conectar dos resistencias externas a un opam, como el nombre lo indica, este circuito invierte y amplifica el voltaje de entrada. note que la resistencia R_F forma el lazo de retroalimentación. Este lazo siempre va de la salida a la entrada negativa del opam.



Así la relación de entrada/salida es:

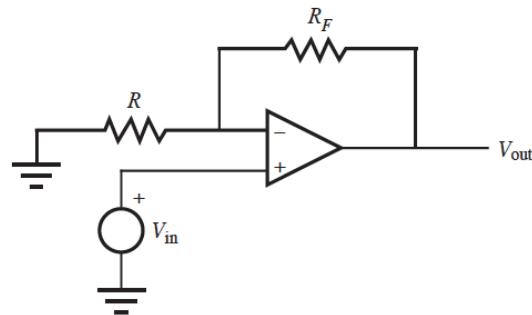
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_F}{R}$$

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° 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° fuera de fase en relación con la entrada.

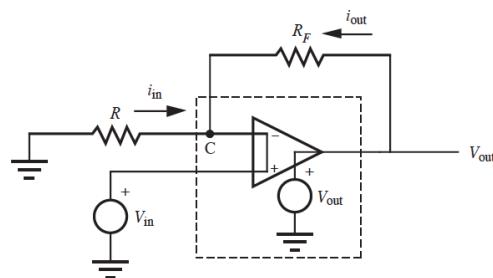


0.1. Amplificador no inversor

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.



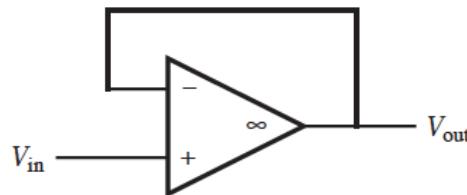
Como el caso anterior, se sustituye el opam con el modelo ideal y se obtiene Haciendo el análisis, se obtiene que la ganancia de voltajes es



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

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.

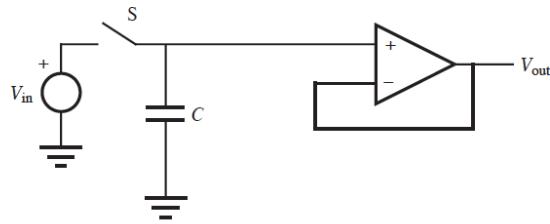
Circuito de muestreo y retención

Los circuitos de muestreo y retención se usan ampliamente en la conversión analógica a digital, donde **un valor de señal se debe retenner** 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



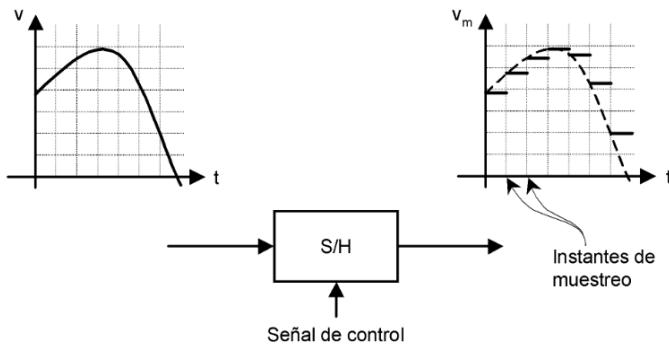
por el seguidor insignificantemente. En consecuencia,

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

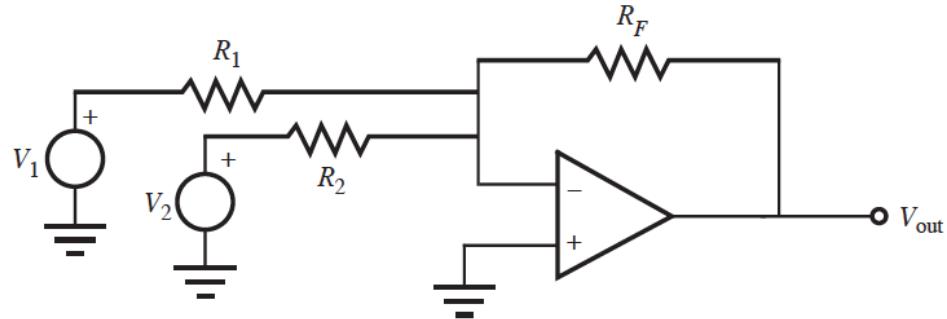
donde $t_{sampled}$ es el tiempo en el que el interruptor se abrió por última vez. Con frecuencia también se usa un buffer opam en el lado V_{in} del interruptor para minimizar el drenado de corriente de la fuente de voltaje de entrada V_{in}

Entonces, el circuito anterior toma muestras de la señal periódicamente, manteniéndolas 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).



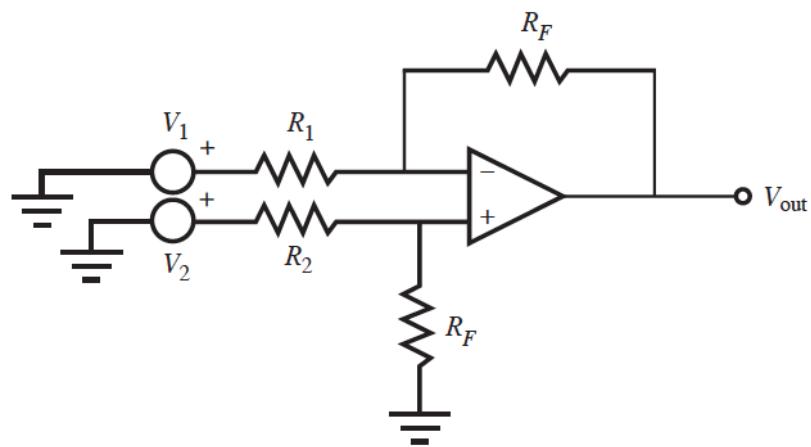
Amplificador sumador



$$V_{out} = ??$$

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.

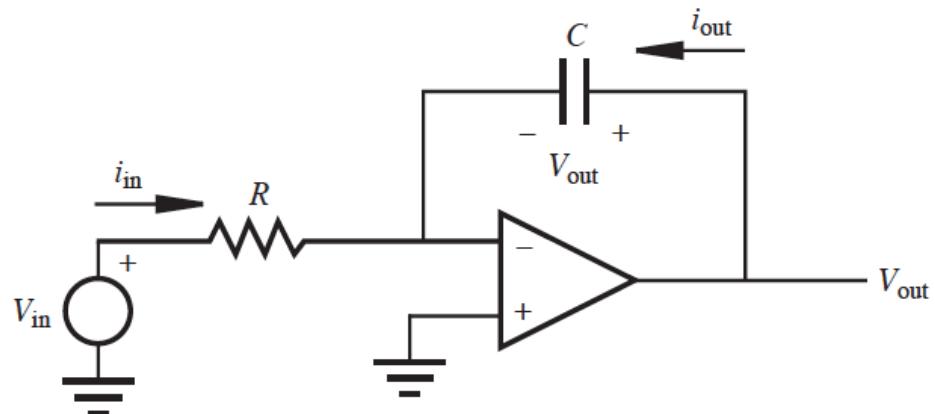


$$V_{out} = ??$$

Circuito integrador

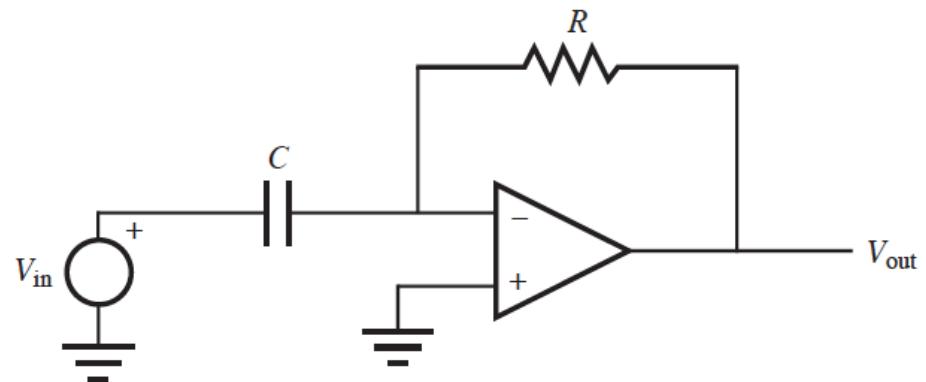
Para analizar este tipo de circuito es necesario recordar que el voltaje almacenado en un capacitor es descrito por

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



$$V_{out} = ??$$

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.

$$e^{-jwt}.$$

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

$$x(t)e^{-jwt}$$

Finalmente, sumamos (integramos) el producto se obtiene

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

El nuevo operador $X(w)$, 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^{-jwt} , la transformada de Laplace utiliza una forma más generalizada, e^{st} , donde

$$s = \sigma + jw$$

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 $s = jw$.

Definición 1.- La transformada de Laplace de una función $f(t)$, $0 \leq t \geq$ 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 indeseables 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 analógico también sirve, para eliminar el efecto alias que se origina al muestrear la señal.

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:

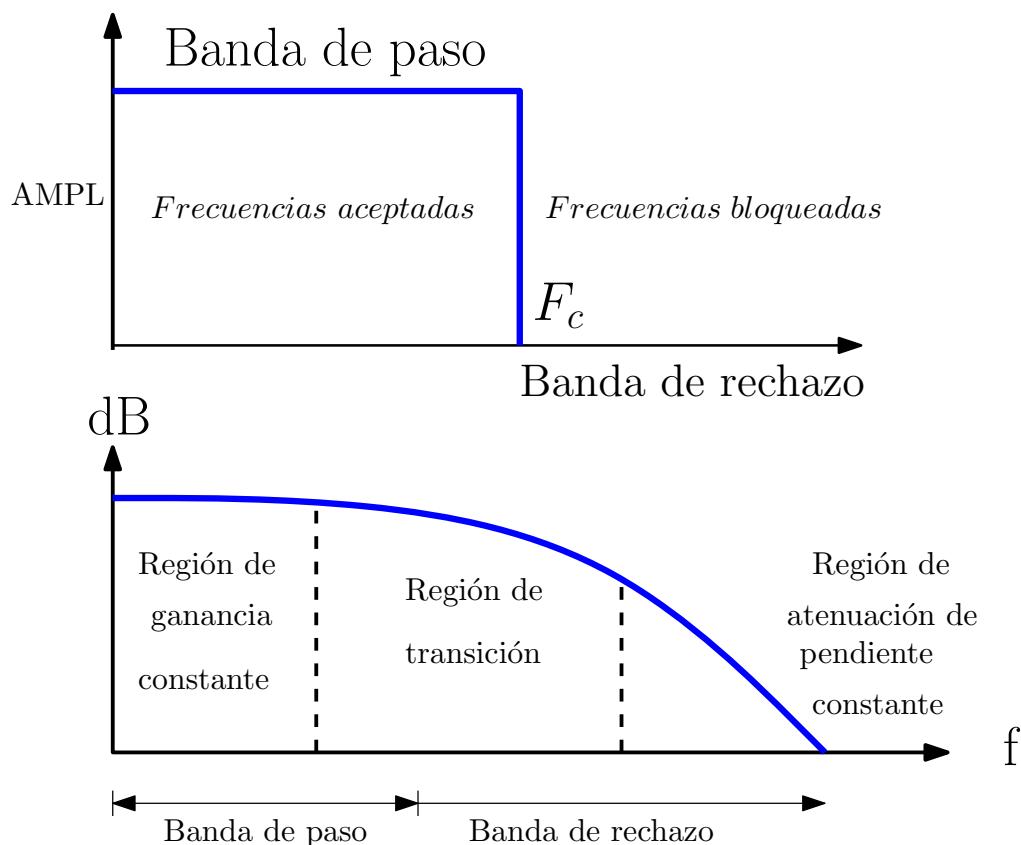
- **La banda de paso**, está formada por el rango de frecuencias que pasan sin ser filtradas con la mínima atenuación o con alguna amplificación.
- **La banda de rechazo**, está formada por el rango de frecuencias que son rechazadas o también, son todas las demás frecuencias no contempladas en la banda 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. item 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 ω_1 y ω_2 , siendo $y \omega_2 = 10\omega_1$, 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 ω_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 compración 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 ≤ 1 , $\tau = \frac{1}{\omega_c}$ es el inverso de la frecuencia angular del filtro dada por ω_c , la cual se describe por

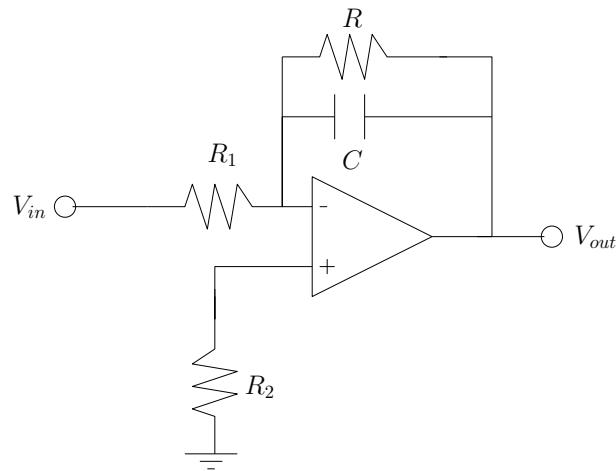
$$\omega_c = 2\pi f_c$$

donde f_c es la frecuencia de corte del filtro. Como hemos mencionado, la frecuencia de corte corresponde a aquella frecuencia límite 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

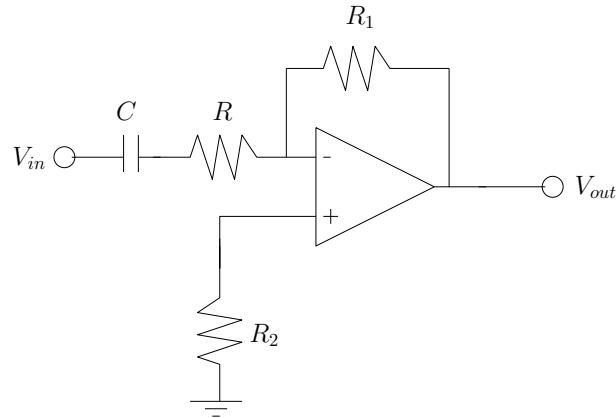


La relación entre voltaje de salida V_{out} y voltaje de entrada V_{in} para el filtro activo pasa bajas esta dado por

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

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 descenderá 20 dB cada *década*.

Filtro pasa altas

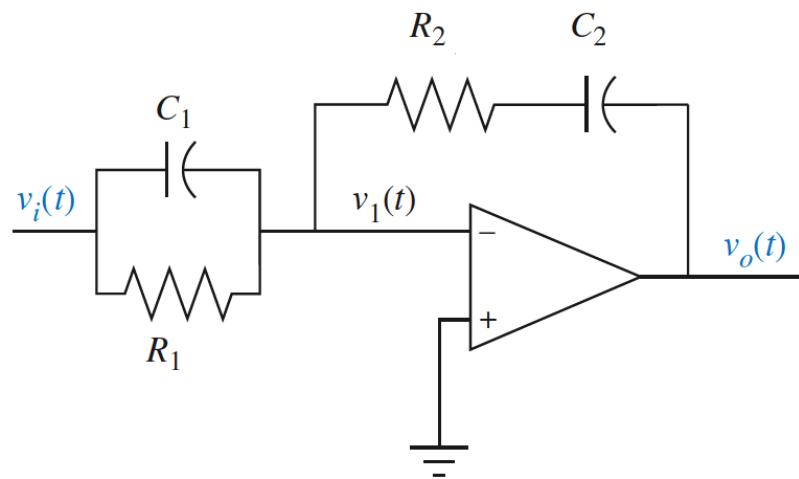


De igual forma, la relación entre voltaje de salida V_{out} y voltaje de entrada V_{in} para el filtro activo pasa altas es dada por

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{CR_1 s}{1 + sRC}$$

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.



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

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

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**

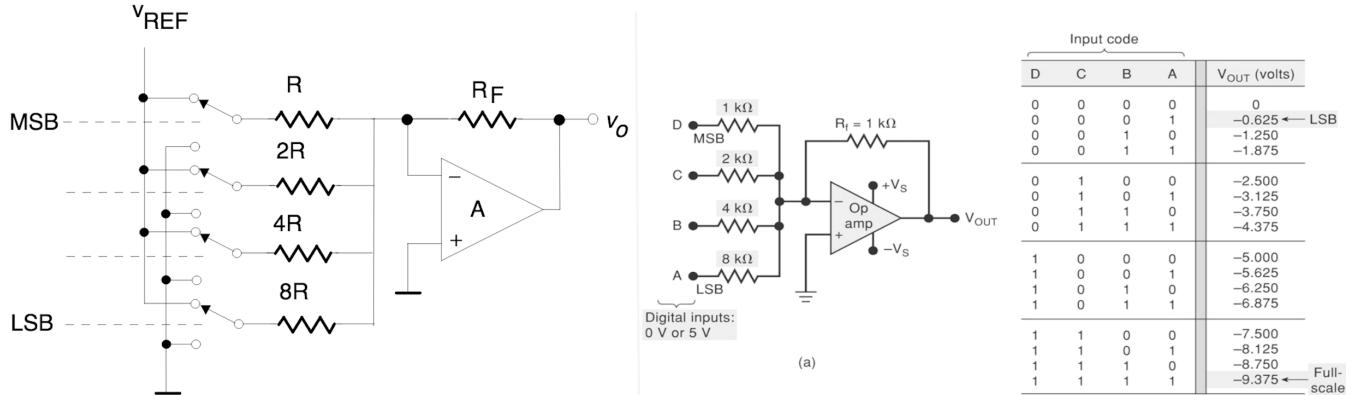
- **Con resistencias ponderadas.** En este convertidor, las salidas del registro controlan interruptores que permiten el paso de 0 [V] o el valor de la fuente de voltaje de referencia(generalmente 5). Los interruptores dan acceso a una red sumadora resistiva que convierten cada bit en su valor en voltaje 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.¹

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

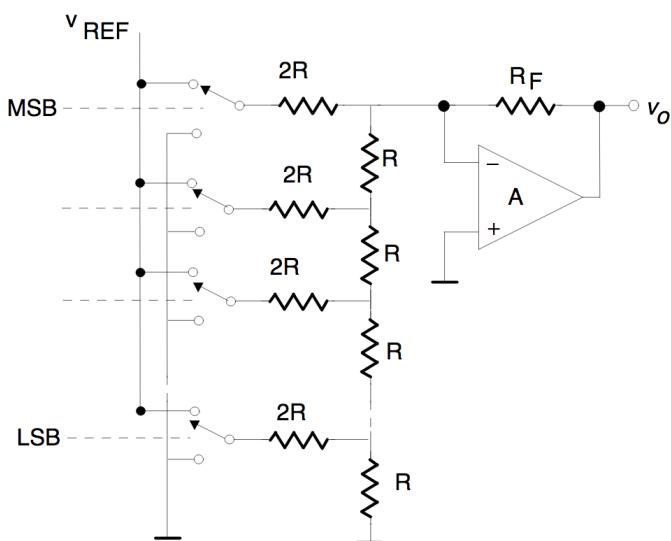
$$v_o(t) = \frac{R_f}{R} \left(\frac{a_0}{2^{n-1}} + \frac{a_1}{2^{n-2}} + \dots + \frac{a_{n-1}}{2^0} \right).$$

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

¹Conversores 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 múltiplos 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.

n-bit	Number of steps	Step size (mV)
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.

V_{in} Range (V)	Step Size (mV)
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	$1/256 = 3.90$

V_{in} Range (V)	Step Size (mV)
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-

dor 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

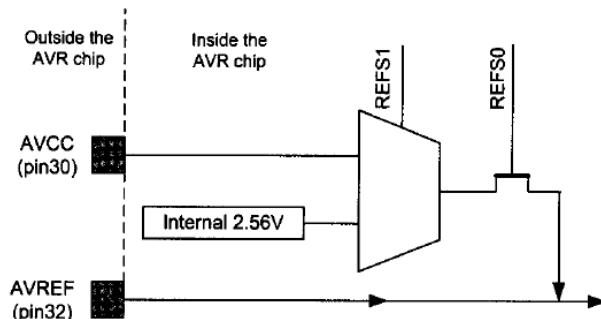
Debido a que el convertidor AD es ampliamente utilizado en la adquisición de datos, de esta forma, en los microcontroladores se han incorporado convertidores AD para eliminar la necesidad de tener una conexión externa con alguno de ellos. En particular, el ATMEGA32 tiene un conjunto de periféricos AD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

		ADCH	ADCL
Left-Justified		D9 D8 D7 D6 D5 D4 D3 D2	D1 D0 UNUSED
ADLAR = 1			
Right-Justified		UNUSED D9 D8 D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0	
ADLAR = 0			

Registro ADCSRA

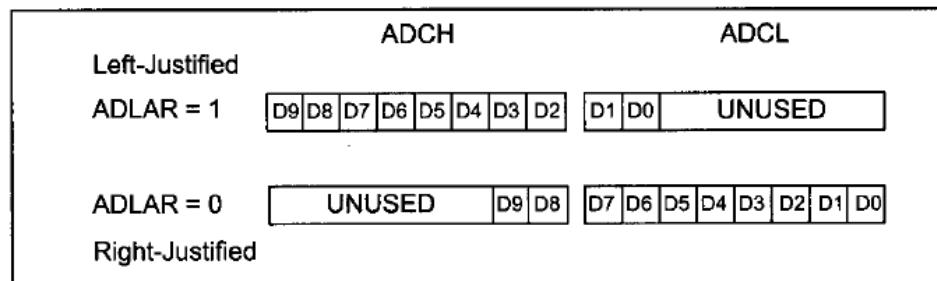
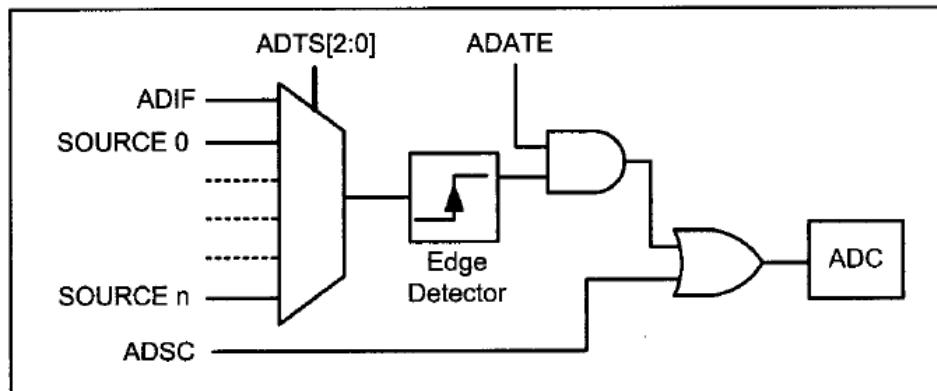
El registro ADCSRA es el registro del control y status del convertidor AD. Los bits de este registro controlan o monitorean la operación del convertidor AD. Los bits de este registro se pueden apreciar en la siguiente figura.

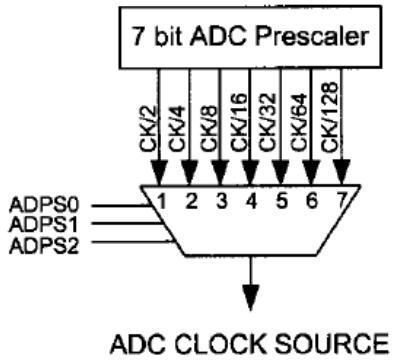


- ADEN. Este bit habilita y deshabilita el convertidor AD. Si este bit es igual a 1 habilita el convertidor, si este bit se limpia se deshabilitará el convertidor.
- ADSC. **Para iniciar la conversión es necesario configurar este bit en 1. En el momento que termina la conversión, de forma automatica este bit se pone en 0.**
- ADATE. Al poner este bit en 1 se activa de forma automatica 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        ;enable ADC and select ck/128
OUT ADCSRA, R16
LDI R16,0xC0        ;2.56V Vref, ADC0 single ended
OUT ADMUX, R16      ;input, right-justified data

READ_ADC:
    SBI ADCSRA,ADSC      ;start conversion
KEEP_POLING:
    SBIS ADCSRA,ADIF     ;wait for end of conversion
    RJMP KEEP_POLING    ;is it end of conversion yet?
    SBI ADCSRA,ADIF     ;keep polling end of conversion
    IN R16,ADCL           ;write 1 to clear ADIF flag
    OUT PORTD,R16          ;YOU HAVE TO READ ADCL FIRST
    IN R16,ADCH           ;give the low byte to PORTD
    OUT PORTB,R16          ;READ ADCH AFTER ADCL
    RJMP READ_ADC         ;give the high byte to PORTB
    ;keep repeating it
```

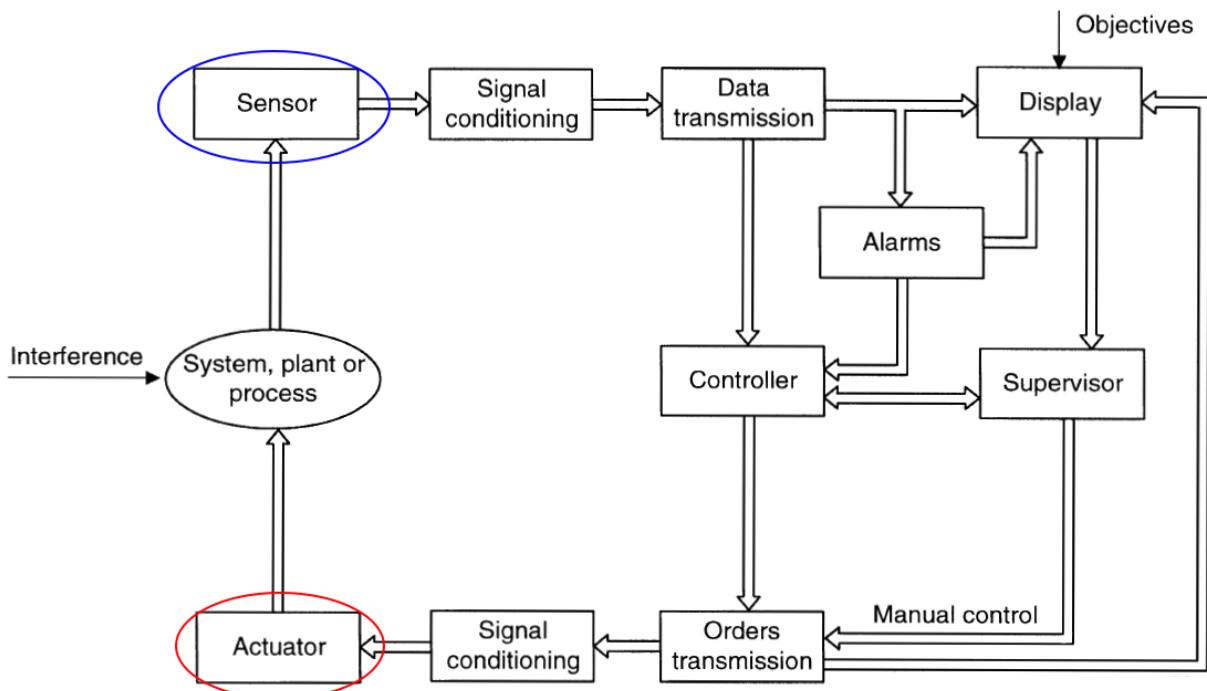
Principios de mecatrónica
Unidad 3: Sensores y Actuadores
Clase 19-22

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 acabo 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 acabo por un sensor, una medición es requerida para el procesamiento de la información y la interinterpretación 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.



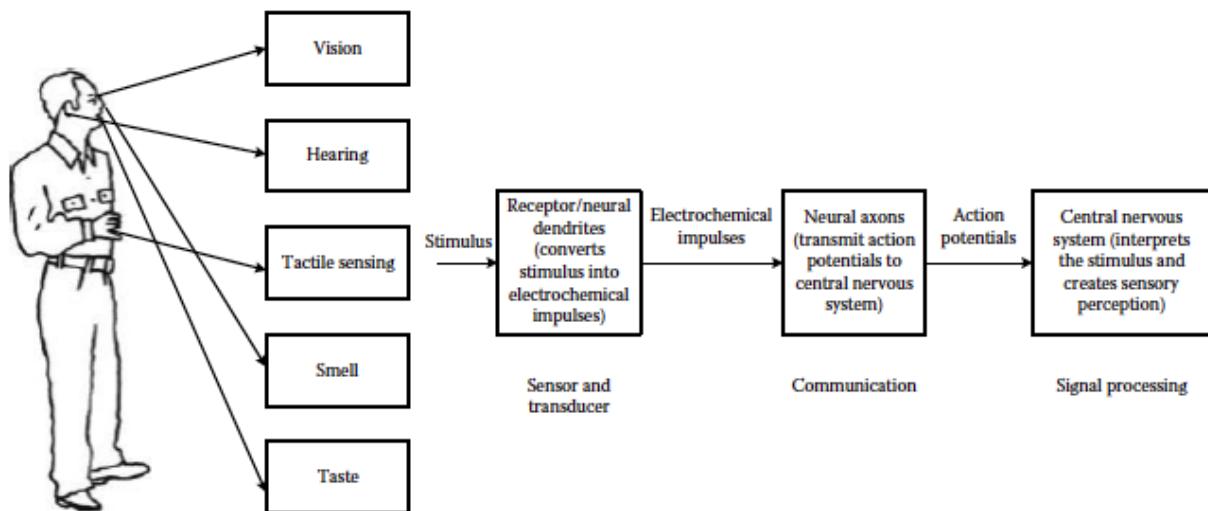
Sensores y Actuadores

Un área robusta en el desarrollo de robots inteligentes que puedan imitar las características de la inteligencia natural se refiere a la **sensores**. El objetivo principal es desarrollar sensores robóticos que puedan desempeñar el rol de actividades sensoriales humanas (cinco sentidos) de

- Vista (visual)
- Audición (Oído)
- Táctil (Tacto)
- Olor (olfativo)
- Sabor (gusto).

Los sensores en las **primeras tres categorías** se encuentran en una etapa más avanzada de desarrollo, comenzando con los básicos (cámaras, micrófonos, y sensores táctiles). Las dos últimas categorías de sensores utilizan principalmente procesos químicos, y son menos comunes ya que siguen en constante estudio. Además de estos cinco sentidos, los humanos también tienen otros tipos de características sensoriales; en particular, la **sensación de equilibrio, presión, temperatura, dolor y movimiento**. De hecho, algunas de estas capacidades sensoriales implicará el uso de uno o más de los cinco sentidos básicos, simultáneamente a través del sistema nervioso central. En su desarrollo, los sistemas robóticos y otros sistemas de ingeniería han sido inspirados durante mucho tiempo por el proceso sensorial de los humanos y otros animales.

El proceso básico de detección biológica se muestra en la siguiente figura. Se recibe un estímulo (por ejemplo, luz para la visión, ondas de sonido para la audición) en el receptor, donde las dendritas¹ de las neuronas convierten la energía del estímulo en impulsos electromecánicos. Los axones² de las neuronas luego conducen los potenciales de acción correspondientes al sistema nervioso central (SNC) del cerebro. Estos potenciales son interpretados por el cerebro para crear la correspondiente percepción sensorial. Un proceso sensorial de ingeniería, como el que se usa en un robot, básicamente usa procesos similares.



Transductores, sensores

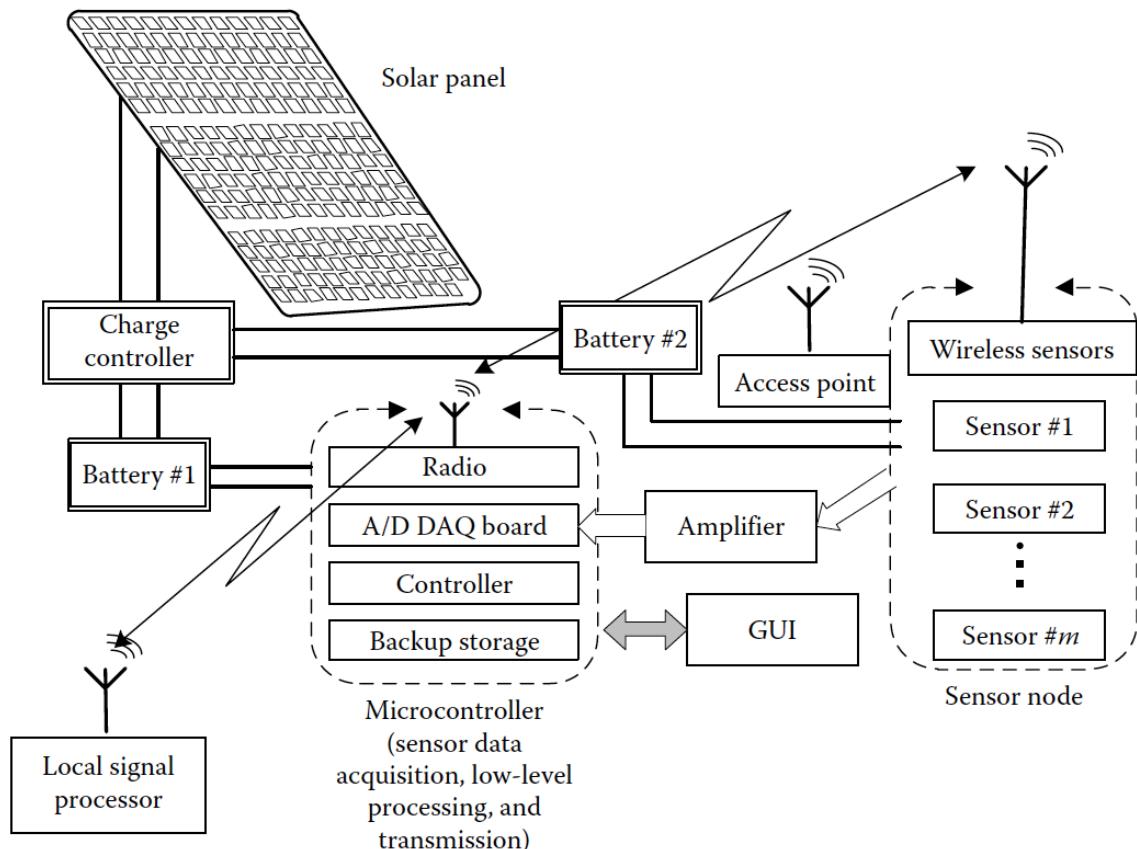
Los sensores y transductores son cruciales para instrumentar un sistema de ingeniería. Los sensores se pueden usar en un sistema de ingeniería para una variedad de propósitos. **Esencialmente, se necesitan sensores para monitorear y aprender sobre el sistema.** Este conocimiento será útil en muchos tipos de aplicaciones, por mencionar algunas tenemos

¹Las dendritas son prolongaciones protoplásmicas ramificadas, bastante cortas de la neurona, dedicadas principalmente a la recepción de estímulos. Son terminales de las neuronas; y sirven como receptores de impulsos nerviosos provenientes desde un axón perteneciente a otra neurona

²El concepto de axón se emplea en el ámbito de la biología para denominar a la continuación muy delgada de una neurona, mediante la cual esta célula envía los impulsos nerviosos hacia otros tipos de células

- I) Monitoreo de procesos.
- II) Operar o controlar un sistema.
- III) Modelado experimental (es decir, identificación del modelo).
- IV) Pruebas y calificación del producto.
- V) Evaluación de la calidad del producto.
- VI) Predicción, detección y diagnóstico de fallos.
- VII) Generación de alarmas y avisos.
- VIII) Vigilancia.

Ejemplo: Para recalcar la importancia de los sensores, a continuación describiremos su uso en el proceso de monitoreo de la calidad de agua.



La calidad del agua potable (local) se mide utilizando varios nodos de sensores que se distribuyen en una gran área geográfica. Los datos ad-

quiridos de un nodo (sensor) se pueden condicionar localmente y luego transmitir a un servidor central, que alberga la plataforma de las TIC (tecnologías de la información y la comunicación) para el monitoreo de la calidad y la evaluación del agua potable. El marco del sistema se muestra en la figura anterior. En esta plataforma, la calidad del agua se detecta a través de un conjunto de nodos de sensores distribuidos geográficamente.

Los sensores de temperatura, pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica están disponibles comercialmente y se utilizan en el monitoreo de la calidad del agua. Se utiliza un microcontrolador para la adquisición de datos del sensor en cada nodo del sensor (SN). El microcontrolador lleva a cabo un procesamiento de bajo nivel de datos sensoriales (por ejemplo, filtrado, amplificación y representación digital) antes de transmitir los datos a través de un radio transmisor a una computadora poderosa llamada procesador de señal local (LSP) en una instalación bien mantenida. En el LSP, los datos recibidos se someten a un alto nivel de procesamiento y compresión de datos, y posteriormente se transmiten a través de Internet a una computadora central llamada unidad central de evaluación (CAU). La CAU es una unidad de toma de decisiones basada en el conocimiento, que evalúa los datos de diferentes ubicaciones geográficas de manera temporal. Sobre la base de la evaluación, la CAU proporciona avisos, alarmas, tendencias y otra información útil sobre la calidad del agua en varios lugares, y también proporciona justificación y explicaciones de estas decisiones. Además, la CAU optimiza el funcionamiento de la plataforma de TIC para que los resultados del sistema sean más precisos, uniformes y efectivos.

Un **Transductor** es un dispositivo que convierte una señal de una forma física a una señal correspondiente que tiene una forma física diferente. **En otras palabras es un convertidor de energía.** Estó significa que la señal de entrada siempre tiene energía o fuerza. Entonces, ya que existen **seis** diferentes formas de señales: mecánica, térmica, magnética, eléctrica, quí-

mica y radiación (electromagnéticas, incluyendo luz), cualquier dispositivo que convierta señales de un tipo a señales de otro tipo es un transductor.

Una de las tareas más importantes en sistemas autónomos de cualquier tipo, es la adquisición de información del medio que lo rodea. Lo cual se puede lograr tomando mediciones por medio del uso de sensores, de esta forma, se extrae la información más importante y relevante de estas mediciones.

Los dispositivos que ofrecen una señal eléctrica como salida son llamados sensores. Muchos sistemas de medición usan señales eléctricas y por lo tanto recaen en los sensores. Sistemas de medición electrónico proporcionan las siguientes ventajas:

- I) Sensores pueden ser diseñados para cualquier cantidad no eléctrica, seleccionando un material apropiado. **Cualquier variación en un parámetro no eléctrico** implica una variación en parámetros eléctricos debido a la estructura electrónica del material.
- II) Hay una variedad de circuitos integrados disponibles para el acondicionamiento o modificación de señales eléctricas. Algunos sensores integran estos acondicionadores en un solo paquete.
- III) Transmisión de señales es más versátil para señales eléctricas. señales mecánicas, hidráulicas o pneumáticas pueden ser apropiadas en algunas circunstancias, pero señales eléctricas prevalecen sobre ellas.

Sensores y transductores son algunas veces usados como sinónimos. Sin embargo, un sensor sugiere la extensión de nuestra capacidad para adquirir información sobre cantidades físicas no percibidas por los sentidos humanos debido a su naturaleza subliminal o minúscula. **Entonces, tenemos que un sensor puede no ser un transductor, ya que puede ser concretamente definido el término sensor a aquel proceso de convertir cualquier señal externa a una señal eléctrica.**

Sensores

Existe una amplia variedad de sensores usados en sistemas autónomos, algunos de ellos son usados para medir simples valores como la temperatura interna de la parte eléctronica del sistema, hasta los más sofisticados y complejos, los cuales pueden adquirir información precisa del mundo que los rodea ó medir directamente la posición global respecto a un sistema de referencias universal. Así, para estudiar a los sensores, es necesario clasificarlos de acuerdo a dos importantes ejes funcionales: **propioceptivo / exteroceptivo y pasivos/activos.**

Los sensores **propioceptivos (PC)** miden valores internos del sistema, por ejemplo en un robot móvil sería la velocidad del motor, carga de la rueda, ángulos de la articulación del brazo de un robot o el voltaje de la batería.

Los sensores **exteroceptivos (EC)** adquieren información del entorno del sistema. Por ejemplo, mediciones de distancia, intensidad de luz, amplitud de sonido. Por lo tanto, las medidas del sensor exteroceptivo son interpretadas por el sistema para extraer características ambientales significativas.

Los sensores **pasivos (P)** miden la energía del ambiente que entra en el sensor. Ejemplos de sensores pasivos incluyen sondas de temperatura, micrófonos y fotoresistencias.

Los sensores **activos (A)** emiten energía al medio ambiente, luego miden la reacción ambiental. Debido a que los sensores activos pueden administrar más interacciones controladas con el medio ambiente, a menudo alcanzan un rendimiento superior. Sin embargo, la detección activa presenta varios riesgos: la energía de salida puede afectar las mismas características que el sensor está intentando medir. Además, un sensor activo puede

sufrir interferencia entre su señal y aquellas fuera de su control. Por ejemplo, las señales emitidas por otros robots cercanos, o sensores similares en el mismo robot, pueden influir en las mediciones resultantes. Ejemplos de sensores activos incluyen, sensores ultrasónicos, sensores capacitivos y sensores infrarrojos, entre otros.

La siguiente tabla proporciona una clasificación de los sensores más usados en aplicaciones roboticas.

General classification (typical use)	Sensor Sensor System	PC or EC	A or P
Tactile sensors (detection of physical contact or closeness; security switches)	Contact switches, bumpers Optical barriers Noncontact proximity sensors	EC EC EC	P A A
Wheel/motor sensors (wheel/motor speed and position)	Brush encoders Potentiometers Synchros, resolvers Optical encoders Magnetic encoders Inductive encoders Capacitive encoders	PC PC PC PC PC PC PC	P P A A A A A
Heading sensors (orientation of the robot in relation to a fixed reference frame)	Compass Gyroscopes Inclinometers	EC PC EC	P P A/P
Ground-based beacons (localization in a fixed reference frame)	GPS Active optical or RF beacons Active ultrasonic beacons Reflective beacons	EC EC EC EC	A A A A
Active ranging (reflectivity, time-of-flight, and geometric triangulation)	Reflectivity sensors Ultrasonic sensor Laser rangefinder Optical triangulation (1D) Structured light (2D)	EC EC EC EC EC	A A A A A
Motion/speed sensors (speed relative to fixed or moving objects)	Doppler radar Doppler sound	EC EC	A A
Vision-based sensors (visual ranging, whole-image analysis, segmentation, object recognition)	CCD/CMOS camera(s) Visual ranging packages Object tracking packages	EC	P

A, active; P, passive; P/A, passive/active; PC, proprioceptive; EC, exteroceptive.

Los sensores varían mucho en sus características de rendimiento. Algunos sensores proporcionan una precisión extrema en entornos de laboratorio bien controlados, pero sus errores aumentan cuando se someten a variaciones ambientales del mundo real. Otros sensores proporcionan datos estrechos y de alta *precisión* en una amplia variedad de configuraciones. Para cuantificar tales características de desempeño, primero definimos formalmente la terminología del *desempeño* del sensor.

Índice básico de respuesta de un sensor

Una serie de características de los sensores se pueden evaluar cuantitativamente en un entorno de laboratorio. Dichas evaluaciones de rendimiento serán necesariamente los mejores casos cuando el sensor se coloca en un robot del mundo real, pero no son necesariamente las mejores, sin embargo resultan ser útiles.

Rango dinámico se utiliza para medir la extensión entre los límites inferiores y superiores de los valores de entrada al sensor mientras se mantiene **el funcionamiento normal del sensor**. Formalmente, **el rango dinámico es la relación entre el valor de entrada máximo y el valor mínimo de entrada medible**. Debido a que esta relación bruta puede ser difícil de manejar, por lo general se mide en decibeles, que se calculan como diez veces el logaritmo común de la gama dinámica. Sin embargo, hay una confusión potencial en el cálculo de los decibeles, que están destinados a medir el radio entre fuerzas, como vatios (potencia) o caballos de fuerza.

De esta forma, podemos decir que: El decibelio o decibel, con símbolo dB, expresa una relación entre cantidades y no una cantidad. El decibel expresa cuantas veces más o cuantas veces menos, pero no la cantidad exacta. Es una expresión que no es lineal, sino logarítmica. Es una unidad

de medida relativa. En audiofrecuencias un cambio de 1 decibel (dB) es apenas (si hay suerte) notado.

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:

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

Ahora, si se tienen voltajes, nosotros tenemos que voltaje no es una unidad de potencia, pero el cuadrado del voltaje es proporcional a la potencia, entonces se usa

$$dB = 20 \log \frac{V_1}{V_2}$$

Suponga que su sensor mide la corriente del motor y puede registrar valores de un mínimo de 1 mA a 20 Amperios. El rango dinámico de este sensor de corriente es de 43dB. Ahora, suponiendo que se tiene un sensor de voltaje y mide valores entre 1mv y 20v se tiene que el rango dinámico es de 86dB.

Rango también es una clasificación importante en aplicaciones, ya que los sensores frecuentemente operan en ambientes donde son regularmente expuestos a valores de entrada más allá de su rango de trabajo. En estos casos, es fundamental comprender cómo reaccionará el sensor. Por ejemplo, un sensor sonar, puede proporcionar datos falsos cuando se toman mediciones con el objeto más próximo que ese mínimo.

Resolución: Es la diferencia mínima entre dos valores que pueden ser detectados por un sensor. Normalmente, el límite inferior del rango dinámico de un sensor es igual a su resolución. Sin embargo, en el caso de sensores digitales, esto no es necesariamente así. Por ejemplo, suponga que

se tiene un sensor que mide el voltaje, realiza una conversión analógica a digital (A / D) y la salida lo convierte como un número de 8 bits que corresponde linealmente entre 0 y 5 V. Si este sensor es verdaderamente lineal, entonces tiene $2^8 - 1$ salidas totales, o una resolución de $5V/255=20mv$.

Linealidad: Es una medida importante que gobierna el comportamiento de la señal de salida del sensor a medida que varía la señal de entrada. Las propiedades que rigen un sistema lineal son:

Homogeneidad : Un sistema es homogéneo cuando un cambio en la amplitud de la señal de entrada produce una variación proporcional en la señal de salida. Por ejemplo, si una señal de entrada $x(n)$ produce una señal de salida $y(n)$, una señal de entrada $kx(n)$ dará lugar a una señal de salida $ky(n)$.

Aditividad : Se dice que un sistema es aditivo cuando la señal de salida es igual a la suma de las salidas generadas por diferentes señales de entrada. Por ejemplo si $x_1(n)$ produce $y_1(n)$ y $x_2(n)$ produce $y_2(n)$ entonces $x_1 + x_2$ produce $y_1 + y_2$.

Invariabilidad en el tiempo : Significa que mover la señal de entrada en el tiempo produce un movimiento idéntico en la señal de salida. Entonces si $x(n)$ produce $y(n)$ entonces $x(n + t)$ produce $y(n + t)$.

Rendimiento del sensor en medios reales

Las características de los sensores anteriores pueden medirse razonablemente en un entorno de laboratorio con una extrapolación confiable al rendimiento en el despliegue del mundo real. Sin embargo, no se pueden adquirir de manera fiable una serie de medidas importantes sin una comprensión profunda de la interacción compleja entre todas las características ambientales y los sensores en cuestión. Esto es más relevante para los sensores más sofisticados, incluyendo sensores de alcance activo y sensores de

interpretación visual.

La sensibilidad es una medida del grado en el cual un cambio incremental en la señal de entrada de destino cambia la señal de salida. **La sensibilidad es la relación entre el cambio de la salida y el cambio de la entrada.** Formalmente se puede decir que, para un sensor en el cual la salida y es relacionada al punto x con la ecuación $y = f(x)$, la sensibilidad $S(x_a)$, en el punto x_a es

$$S(x_a) = \frac{dy}{dx} \Big|_{x=x_a}.$$

Es deseable tener una alta y si es posible una constante sensibilidad en los sensores. De esta forma, para un sensor con respuesta $y = kx + b$ la sensibilidad es $S = k$ para el rango de valores para x donde es aplicable. Para un sensor con respuesta $y = kx^2 + b$ la sensibilidad es $S = 2kx$ y cambiara de un punto a otro sobre el rango de medición.

Sensibilidad cruzada es el término técnico para la sensibilidad a los parámetros ambientales que son contrarios a los parámetros objetivo para el sensor. Por ejemplo, una brújula de puerta de flujo puede demostrar una alta sensibilidad al norte magnético y es por lo tanto de uso para la navegación en robots móviles. Sin embargo, la brújula también demostrará una alta sensibilidad a los materiales de construcción ferrosos, tanto que su sensibilidad cruzada a menudo hace que el sensor sea inútil en algunos ambientes interiores. Alta sensibilidad cruzada de un sensor es generalmente indeseable, especialmente cuando no se puede modelar.

Error de un sensor es definido como la diferencia entre las mediciones de salida del sensor y los valores verdaderos que se miden dentro de un contexto operativo específico. Dado un valor verdadero v y valor medido m , el error se define como $error = m - v$.

La **exactitud** se define como el **grado de conformidad entre la medida del sensor y el valor real (v)**, y se expresa a menudo como una proporción del valor real (por ejemplo, 97.5 % de exactitud). Así, el pequeño error corresponde a una alta exactitud y viceversa:

$$\text{exactitud} = 1 - \frac{|\text{error}|}{v}$$

Por supuesto, la obtención de la verdad sobre el terreno, puede ser difícil o imposible, y por lo tanto establecer una confiada caracterización de la exactitud del sensor puede ser problemático. Además, es importante distinguir entre dos fuentes de error diferentes:

Los **errores sistemáticos** son causados por factores o procesos que en teoría pueden ser modelados. Estos errores son, por lo tanto, deterministas (es decir, predecibles). Una mala calibración de un sensor láser de telemetría (*Es un sensor basado en la tecnología LIDAR [de los términos “light” y “radar”]. El sensor láser emite un rayo láser sobre el entorno, que rebota sobre los objetos para determinar la distancia a un objeto*), una pendiente no modelada de un suelo de pasillo son algunas de las posibles causas de errores sistemáticos del sensor.

La presencia de errores sistemáticos puede descubrirse midiendo la misma cantidad con dos dispositivos diferentes, utilizando dos métodos diferentes, utilizando las lecturas de dos operadores diferentes o cambiando las condiciones de medición de manera controlada y observando su influencia en los resultados. Para determinar la consistencia de los diferentes resultados es necesario utilizar métodos estadísticos. En cualquier caso, incluso en mediciones de alta precisión, siempre existe el riesgo de que un error sistemático pueda permanecer sin ser detectado. Por lo tanto, el objetivo es tener un riesgo muy bajo de que los grandes errores permanezcan sin ser detectados.

Ejemplo: Con el fin de medir la caída de voltaje a través de una resistencia, consideramos dos métodos: (1) Utilizando un voltímetro, cuya precisión es aproximadamente el 0.1 % de la lectura. (2) Utilizando un amperímetro, cuya precisión es también alrededor del 0.1 % de la lectura. Si la resistencia tiene 0.1 % de tolerancia, qué método es más preciso?

Los **errores aleatorios** no pueden predecirse utilizando un modelo sofisticado ni pueden ser mitigados por una maquinaria de sensores más precisa. Estos errores sólo pueden describirse en términos probabilísticos (estocásticamente). La inestabilidad del tono en una cámara de color, los errores espirales de alcance y el ruido de nivel negro en una cámara son ejemplos de errores aleatorios.

El error no suministra información sobre la calidad de la medición, es por esto que es necesario relacionarlo con el valor convencionalmente verdadero. Así, tenemos que el error de medición dividido entre un valor verdadero que se denomina como exacto le denominamos **error relativo**.

$$e_{rel} = \frac{\text{error}}{v_{exacto}}$$

La **precisión** a menudo se confunde con la exactitud, y ahora tenemos las herramientas para distinguir claramente estos dos términos. Intuitivamente, **la alta precisión se refiere a la reproducibilidad de los resultados del sensor**. Por ejemplo, un sensor que toma lecturas múltiples del mismo estado ambiental tiene una alta precisión si produce la misma salida. En otro ejemplo, varias copias de este sensor que toman lecturas del mismo estado ambiental tienen una alta precisión si sus salidas coinciden. **Sin embargo, la precisión no tiene ninguna influencia en la exactitud de la salida del sensor con respecto al valor real que se está midiendo**. Supongamos que el error aleatorio

de un sensor se caracteriza por algún valor medio μ y una desviación estándar σ . La definición formal de precisión es la relación entre el rango de salida del sensor y la desviación estándar:

$$\text{precisión} = \frac{\text{rango}}{\sigma}$$

Es importante notar que sólo σ y no μ tiene impacto en la precisión. Por el contrario, el error medio μ es directamente proporcional al error general del sensor e inversamente proporcional a la exactitud del sensor.

Sensores primarios

Los sensores primarios convierten mediciones de cantidades físicas a otras formas. Clasificamos aquí los sensores primarios de acuerdo a su medición. Los dispositivos que tienen salida eléctrica directa son sensores planos y se enuncian a continuación.

- Potenciómetros.
- Sensores de temperatura: Bimetales.
- Sensores de presión.
- Sensores de velocidad de flujo y de caudal.
- Sensores de nivel
- Sensores de fuerza y torque.
- Sensores de velocidad.
- Sensor de ultrasonido y sonido (efecto doppler).
- Visión–Luz estructurada(Sensor 2D)
- Sensores resistivos
 - I) Efecto piezoresistivo (Galgas extensiométricas)
 - II) RTD's

III) Termistores

IV) Magnetoresistencias

V) LDR's

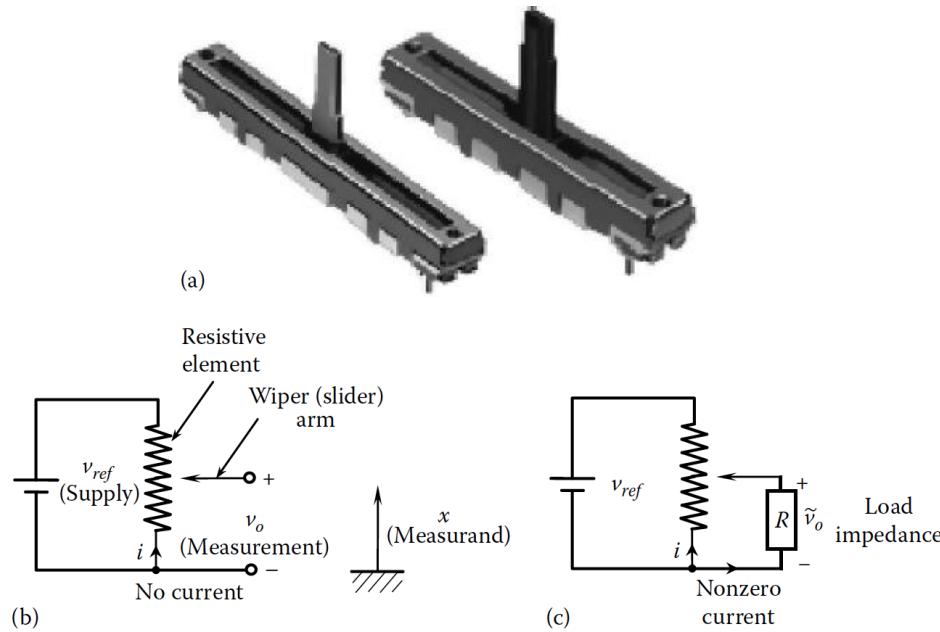
- Sensores capacitivos–Capacitor variable y Capacitor diferencial.
- Sensores inductivos –Reluctancia variable.
- Sensores basados en la Ley de Faraday
- Sensores de efecto Hall

Potenciómetros

A pesar de que, inicialmente, un potenciómetro (pot) se usaba principalmente como un dispositivo para suministrar un voltaje variable o una resistencia variable a un circuito o alguna aplicación (girando un botón manualmente), abordaremos su uso como un sensor de desplazamiento. Este es un sensor activo que consiste en una bobina de alambre uniforme o una película de materiales de alta resistencia, como carbono, platino, cermet (elemento de resistencia metálico sobre un sustrato cerámico) o plástico conductor, *cuya resistencia es proporcional a su longitud*. Este principio se puede usar para medir tanto el desplazamiento rectilíneo (con un potenciómetro lineal) como los desplazamientos angulares (utilizando un pot giratorio). En la siguiente figura (a) se muestra un potenciómetro comercial lineal. Se aplica un v_{ref} de voltaje constante a través de la bobina (o película) utilizando una fuente de voltaje de corriente continua (corriente continua). La señal de salida v_o del transductor es la tensión de CC entre el contacto móvil (brazo limpiador o deslizador) que se desliza sobre la bobina y el terminal de tensión de referencia de la bobina, como se muestra esquemáticamente en la figura (b). El desplazamiento del deslizador x es proporcional a la tensión de salida

$$v_o = kx. \quad (1)$$

Errores de carga: la ecuación (1) supone que los terminales de salida están en circuito abierto; es decir, una carga de impedancia infinita (o resistencia en el presente caso de CC) está presente en los terminales de salida, por lo que la corriente de salida es cero. Sin embargo, en la práctica real, la carga eléctrica (los circuitos en los que se alimenta la señal del pot, por ejemplo, los circuitos de acondicionamiento, interconexión, procesamiento o control) tiene una impedancia finita. Por consiguiente, la corriente de salida (la corriente a través de la carga) es distinta de cero, como se muestra en la figura (c). A este fenómeno se le conoce como el efecto de carga del transductor (específicamente, carga eléctrica). En estas

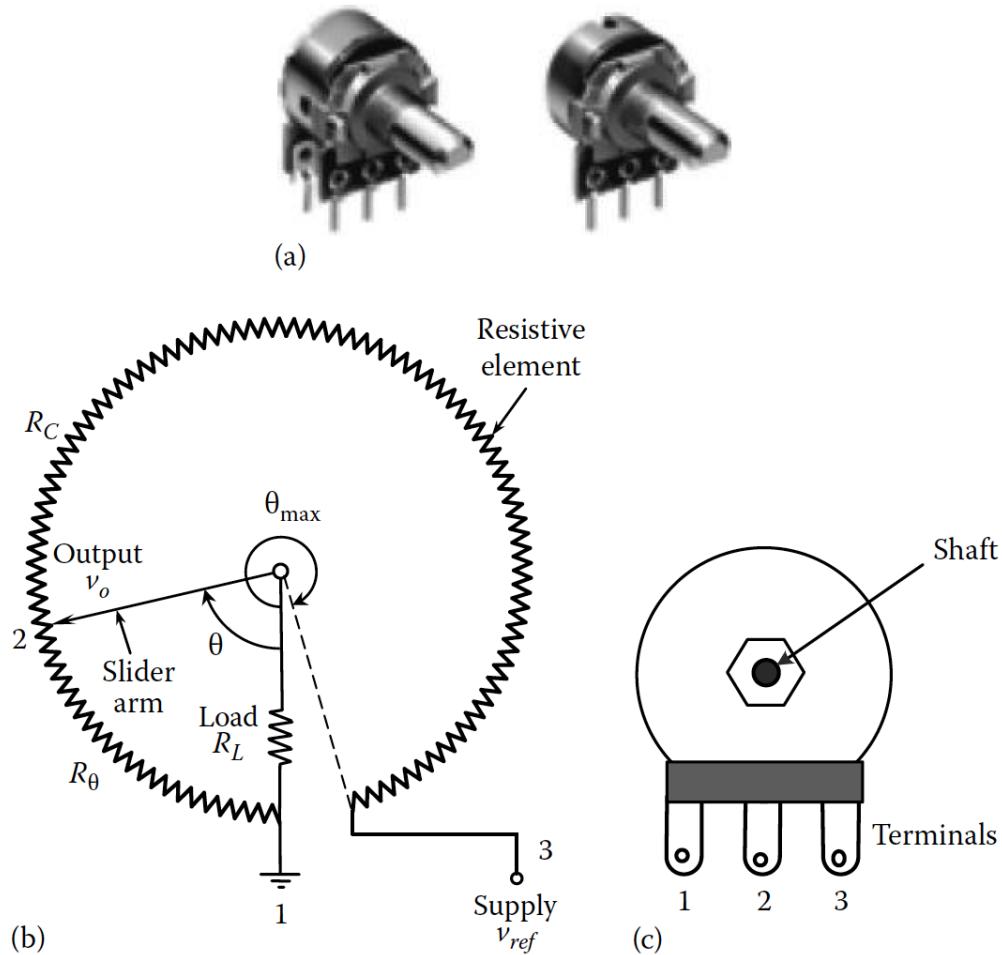


condiciones, la relación lineal dada por (1) ya no sería válida, causando un error en la lectura de desplazamiento.

Potenciómetros Rotatorios

Los potenciómetros que miden los desplazamientos angulares (rotatorios) son más comunes y convenientes, ya que en los diseños convencionales rectilíneos, la longitud del elemento resistivo debe aumentarse en proporción al rango de medición o carrera. Estos elementos resistivos puede variar desde un valor bajo del orden de 10Ω hasta un máximo de $1 M\Omega$. La potencia nominal puede ser 10 mW a varios vatios. Pueden venir en tamaños pequeños (tan pequeños como 5 mm de diámetro). La figura (a) muestra un pot rotatorio comercial. La Figura (b) muestra un circuito para un “potenciómetro” rotativo y la figura (c) indica el aspecto externo, incluidos los tres terminales, que corresponden a las terminales de voltaje de referencia 1 (tierra) y 3 (voltaje) para alimentar el potenciómetro así como la salida (2) dando la lectura del potenciómetro (en voltios). Los potenciómetros giratorios de tipo hélice están disponibles para medir ángulos absolutos que superan los 360° . La misma función se puede lograr

con un potenciómetro rotatorio de un solo ciclo simplemente al incluir un contador para registrar rotaciones completas de 360° .



Tenga en cuenta que los transductores de desplazamiento angular, como los potenciómetros giratorios, se pueden utilizar para medir mayores desplazamientos rectilíneos.

- **Carga no lineal.**

Considere el potenciómetro rotatorio de la figura anterior, veremos la importancia del error no lineal causado por la carga eléctrica de una carga puramente resistiva conectada al pot. Para una posición general θ del brazo deslizante del pot, suponga que la resistencia en el segmento de salida (terminal de extracción 2) de la bobina es R_θ . Suponiendo una

bobina uniforme, uno tiene

$$R_\theta = \frac{\theta}{\theta_{max}} R_c$$

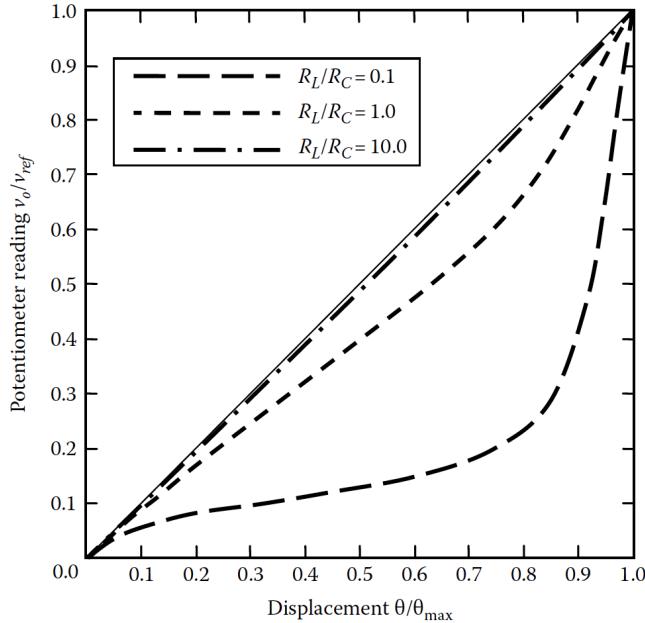
donde R_c es la resistencia total del bobinando del potenciómetro. El balance de corriente en el punto de contacto deslizante (nodo 2) es dado por

$$\frac{v_{ref} - v_0}{R_c - R_\theta} = \frac{v_0}{R_\theta} + \frac{v_0}{R_L}$$

donde R_L es la resistencia de la carga. Utilizando álgebra básica

$$\frac{v_0}{V_{ref}} = \left[\frac{\left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \left(\frac{R_L}{R_c} \right)}{\left(\frac{R_L}{R_c} + \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) - \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right)^2} \right]$$

El comportamiento de esta ecuación se muestra en la siguiente figura.



Los errores de carga parecen ser grandes para valores grandes de radio R_L/R_c . Buena exactitud es posible para $R_L/R_c > 10$, particularmente para valores pequeños de θ/θ_{max} .

Debe quedar claro que se pueden tomar las siguientes acciones para reducir el error de carga en los potenciómetros: