

MUESTREO DE SEÑALES

Tipos de Señales de los Procesos Industriales

El tipo de señales usadas en control de procesos dependen del nivel en el que nos situemos. Así, a nivel alto se utilizan señales de comunicación entre PCs o buses de campo, mientras que a nivel mas bajo las señales son tensión o corriente procedentes de lecturas de variables o de actuaciones sobre válvulas, relés, etc.

En el campo del control industrial se diferencian dos tipos de sistemas:

Monitorización

Se capturan las señales con objeto de disponer de información del estado del proceso. No se controla el proceso, es decir, no existe actuación para modificar las condiciones. Se utilizan principalmente entradas, lectura de variables, excepto alguna salida de activación de alarmas en caso de necesidad. La figura 1 muestra un ejemplo de monitorización de un proceso. Se capturan señales de entrada tales como: Marcha/Paro de bombas, caudal, temperatura, etc. Las únicas salidas son una alarma y un visor del caudal producido, correspondientes a señales informativas no de actuación.

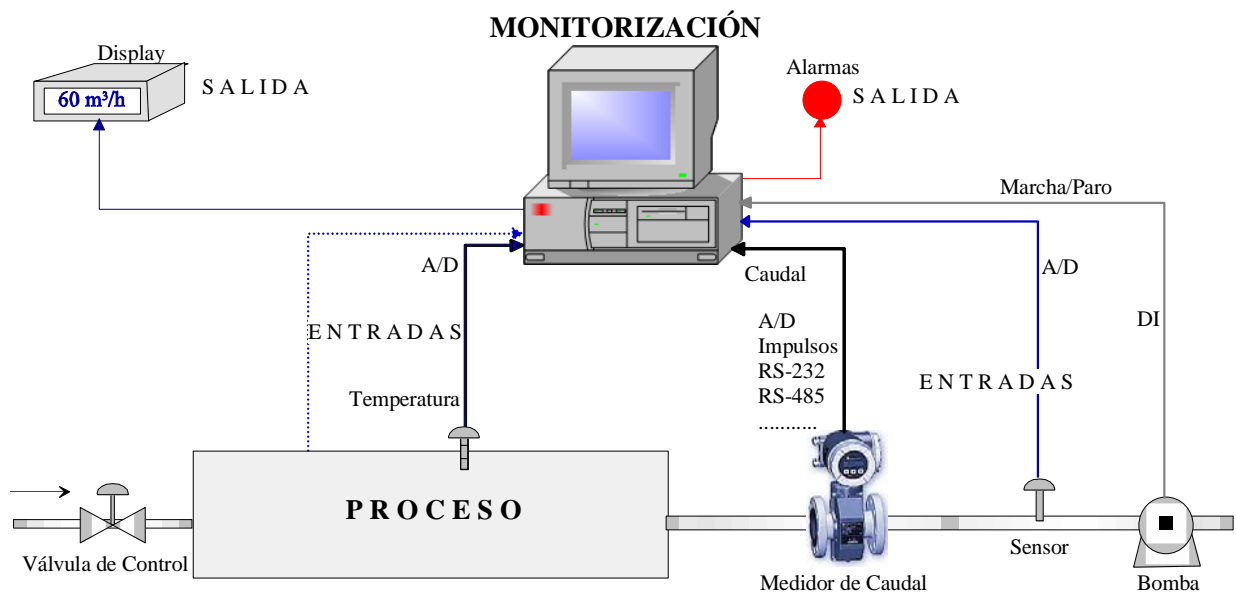


Fig.1 Esquema de Monitorización de Procesos

Control

Se capturan las señales con objeto de controlar el proceso, es decir, mantener las variables dentro de los valores de consigna fijados. Se requieren tres partes: Entrada de variables, un algoritmo de control y Salida de señales de actuación hacia las variables de control para corregir las variables controladas.

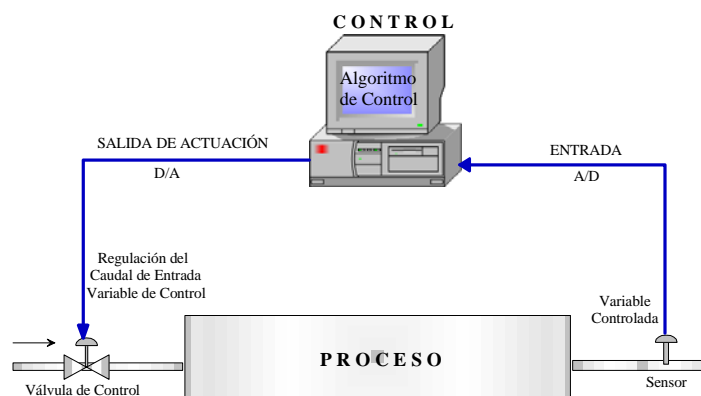


Fig. 2. Esquema de un sistema de Control de Proceso.

Ambos sistemas, Monitorización y Control, hacen uso de entradas y salidas de señales de proceso. En la monitorización, las salidas son puramente informativas, en cambio en control de procesos las salidas son actuaciones correctivas para mantener el proceso dentro de los márgenes de control previamente fijados.

Mientras que para monitorizar basta medir el valor de las variables, para controlar es preciso además, compararlas con el valor deseado, aplicar un algoritmo de control en función del error y enviar la señal de actuación para corregir las desviaciones. Como consecuencia existen dos señales, una de lectura (medida) y otra de escritura (actuación).

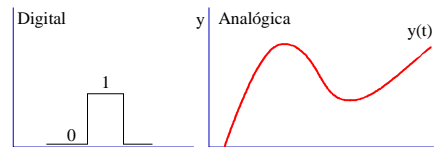


Fig. 3. Señal Digital y analógica continua.

Las señales analógicas continuas suelen corresponder a la medida de las variables de proceso y a las actuaciones sobre válvulas de control, potenciómetros, dosificadores, variadores de velocidad, etc. Estas señales son *analógicas continuas* con magnitud variable, por ejemplo, si el sensor es una PT100 calibrada de 0 á 100 °C, la señal transmitida será una corriente entre 4 mA (0 °C) y 20 mA (100 °C).

Asimismo, la señal de actuación enviada a la válvula también es continua, en general, entre 4 y 20 mA.

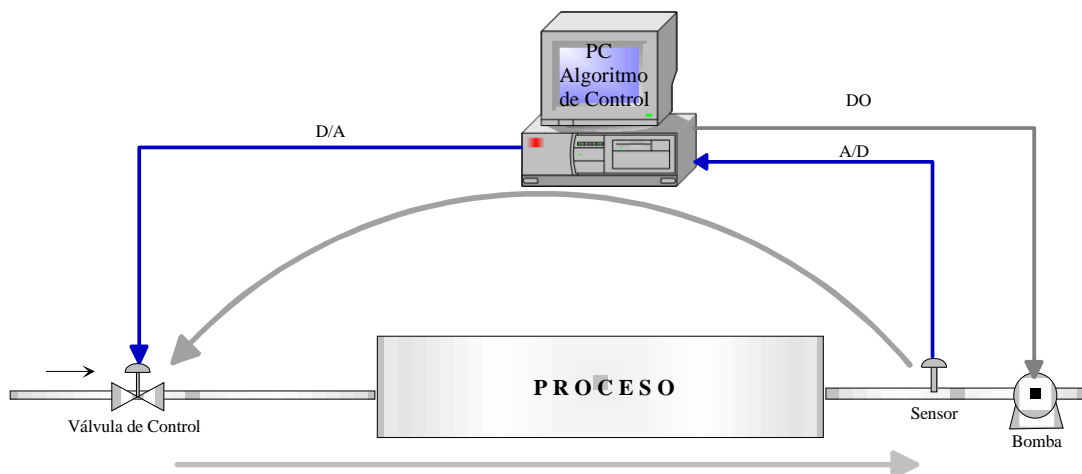


Fig. 4 Trayectoria de las señales en un proceso controlado por PC

Además de éstas existen otras, también necesarias, como es el arranque o paro de bombas, motores, agitadores, apertura o cierre de electroválvulas, activación/desactivación de alarmas, etc. Se denominan *digitales*. Estas señales presentan dos estados, por ejemplo, presencia o ausencia de tensión. El valor de la tensión suele ser de 24 V cc o ca, 12 V cc y 5 V cc.

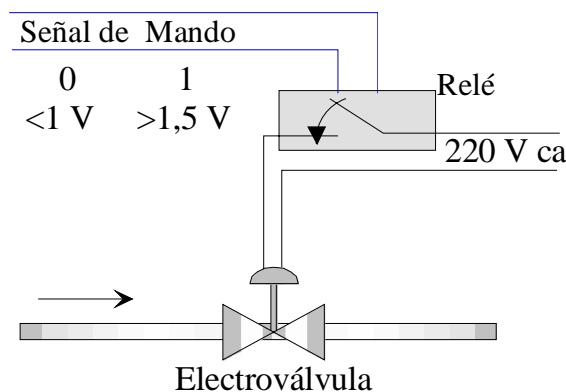


Fig. 5. Ejemplo de señal digital. Dos estados 0 / 1

Estas señales digitales deben interpretarse desde el punto de vista lógico de su estado: 0/1.

Hay tensión	Estado	EV ¹	Motor
Si	1	Abierta	Marcha
No	0	Cerrada	Paro

A veces se suele usar lógica negativa.

Hay tensión	Estado	EV	Motor
Si	0	Cerrada	Paro
No	1	Abierta	Marcha

Ej. 1. Poner ejemplos en los que este segundo caso representa una mejor opción.

Finalmente, existen señales digitales que se usan como contadores. Ver Fig. 6 y 7.

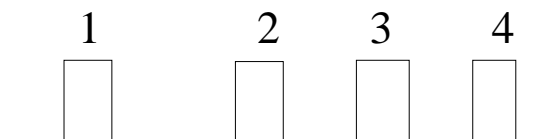


Fig. 6. Señales de un contador

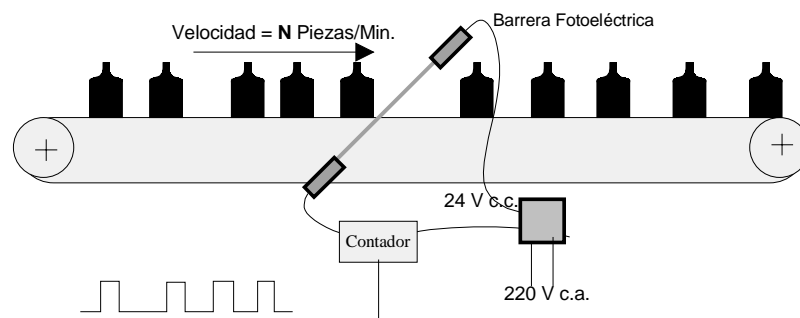
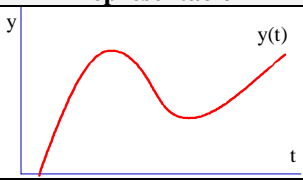
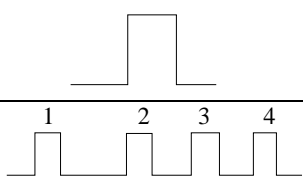


Fig. 7. Contador de piezas fabricadas

El cuadro siguiente muestra un resumen de las señales utilizadas en los procesos.

Tipo	Uso	Valores	Representación
Analógicas A/D D/A	Lectura: Temperatura, Presión, pH, Caudal, [], etc.	4 – 20 mA 1 – 5 V 3 – 15 psi ²	
	Actuación: Regulación de válvulas de control, variadores de velocidad, etc.		
Digitales DI DO	Presencia / Ausencia, 1 / 0 Lectura: Conocer el estado de un dispositivo. Actuación: Actuar sobre un dispositivo, marcha-para, abrir-cerrar, etc.	24 V cc 24 V ca 5 V cc	
	Contadores Contar sucesos, por ejemplo número de unidades fabricadas, número de eventos, etc.	24 V cc 5 V cc	

En general, las señales en la planta se transmiten mediante lazos de corriente de 0-20 mA y no en tensión, ya que así pueden alcanzarse distancias superiores a los 500 metros. La figura 8 muestra un esquema típico de captura de señales analógicas. El transmisor se encuentra próximo al sensor y existe una fuente de alimentación independiente. Dado que los convertidores A/D sólo pueden leer tensiones, debe utilizarse un acondicionador de señal corriente-tensión (no mostrado en la figura).

¹ EV = ElectroVálvula.

² En desuso. Se usa únicamente como accionamiento de válvulas de control neumáticas.

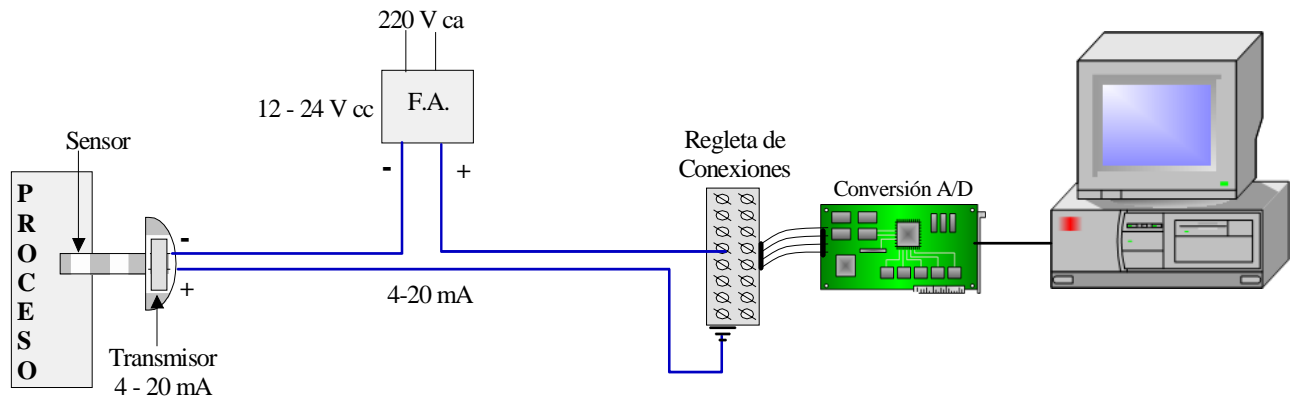


Fig. 8. Esquema típico de un sensor con transmisor incorporado. Alimentación externa.

Los acondicionadores que se encuentran en el mercado garantizan una conversión fiable independientemente de la temperatura y, además, suelen tener entradas y salidas configurables, por ejemplo: Entradas: -5 / +5 V, 0 / +5 V, -10 / +10 V, 0 / +10 V y Salidas: 0 / 20 mA, 4 / 20 mA, y viceversa.

Un convertidor con entrada: 0 / 20 mA o 4 / 20 mA y salida: 0 / 5 V o 1 / 5 V, puede hacerse con una simple resistencia de 250 Ω . Ver. Fig. 9.

Este sistema de acondicionamiento de la señal es válido si no se requiere mucha precisión puesto que presenta dos inconvenientes importantes, el primero es la precisión de la resistencia, que no suele ser mejor que un 5% y el segundo la variación de la resistencia con la temperatura.³

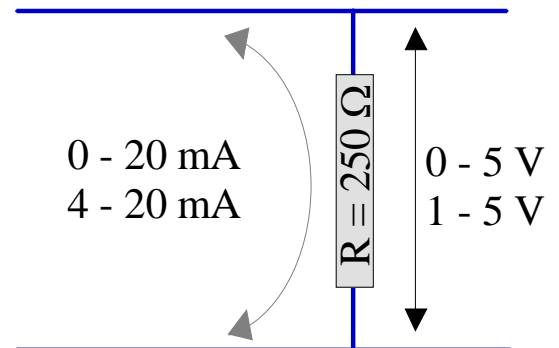


Fig. 9. Conversión Corriente-Tensión

Por tal motivo, en la industria se utilizan acondicionadores que autocompensan las variaciones y, tal como se ha mencionado anteriormente, aceptan diferentes configuraciones: Entrada tensión 1-5 V y salida corriente 4-20 mA, entrada corriente y salida tensión, etc.

Actualmente, la mayor parte de los sistemas incorporan módulos de entradas analógicas preparados para diferentes dispositivos, tales como PT100, Termopares J, K, R, etc., Termistores, 0-5 V, 0-10 V, etc. con fuente de alimentación de 24 V c.c. incorporada.

Existen dos formas de conexión en función de utilizar negativo común o individual. Ver figura.10.

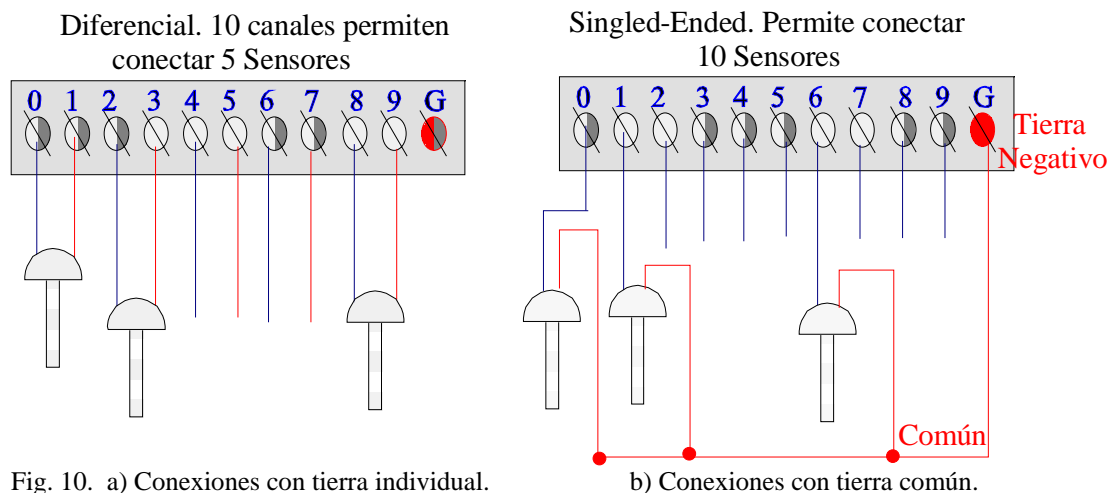


Fig. 10. a) Conexiones con tierra individual.

b) Conexiones con tierra común.

³ $R_{\theta} = R_0 (1 + \alpha \theta)$

La conexión single-ended proporciona el doble de canales que la diferencial, pero tiene el inconveniente que si se capturan varias señales simultáneamente se pueden producir interferencias debido a que comparten la misma tierra, mismo negativo. Por ejemplo, si una señal es débil, como la producida por un termopar y la otra presenta una gran amplitud o también, cuando los dispositivos que se conectan tienen diferentes negativos; el hecho de compartir un hilo común provoca interferencias y falsas señales.

En estos casos debe utilizarse la conexión diferencial que evita dichas influencias mutuas al no compartir el negativo.

Es recomendable siempre usar entradas diferenciales ya que se reduce el error y el ruido de las corrientes de tierra. En la figura 11 se muestra el mecanismo mediante el cual se cancela el ruido en entradas diferenciales.

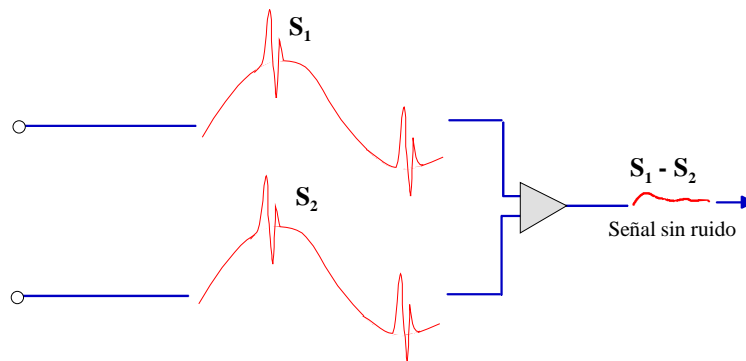


Fig. 11. Cancelación del ruido en entradas diferenciales.

Las interferencias provocan ruido que, en general, tendrá la misma polaridad, fase y magnitud en ambos cables, de tal forma que al restar ambas tensiones se cancelan mutuamente quedando solo las variaciones debidas a la señal real que se desea capturar.

El acondicionamiento de señales es la parte más importante de los sistemas de monitorización o control de procesos, ya que sino se realiza correctamente producirá lecturas erróneas de las variables, bien por interferencias o, por un acondicionamiento inadecuado. En general, el acondicionamiento implica los siguientes tratamientos de la señal:

- **Amplificación.**

Amplificación y acondicionamiento del sensor para proporcionar la señal adecuada: Termopar J, K, etc., PT100, 0-5 V, 0-20 mA, etc. Ver Transductor más adelante.

- **Aislamiento,** para evitar que un problema eléctrico en un circuito pueda provocar una avería en el sistema y viceversa. Los sistemas de aislamiento más utilizados son:

- Aislamiento óptico.
- Protección

El grado de aislamiento suele indicarse de varias formas, por ejemplo 500 VC, indica que la aplicación de 500 V de corriente continua no afecta al siguiente elemento conectado. Un buen aislamiento se traduce en una señal con menor ruido y más precisa.

El aislamiento es especialmente importante si se utilizan conexiones single-ended (negativo común). Además, si no es posible utilizar entradas diferenciales debe ponerse especial cuidado en conectar todos los dispositivos a la misma tierra.

- **Filtrado,** para evitar interferencias.

En una planta existen una gran variedad de interferencias que perturban las débiles señales procedentes de los sensores. Los principales dispositivos que generan interferencias son

variadores de frecuencia, arranque/paro de bombas, agitadores, etc., y, en mayor o menor grado, todos los equipos que no cumplan la normativa de compatibilidad electromagnética⁴. En general, presentan una frecuencia alta frente a las variaciones reales de las variables de proceso. En este caso, es conveniente realizar un prefiltrado de las mismas para *suavizar* el ruido provocado por las interferencias.

Supóngase que se ha producido un salto brusco en el valor de una variable. La figura 12 muestra la señal tal como se recibe y después de ser muestreada con y sin filtrado.

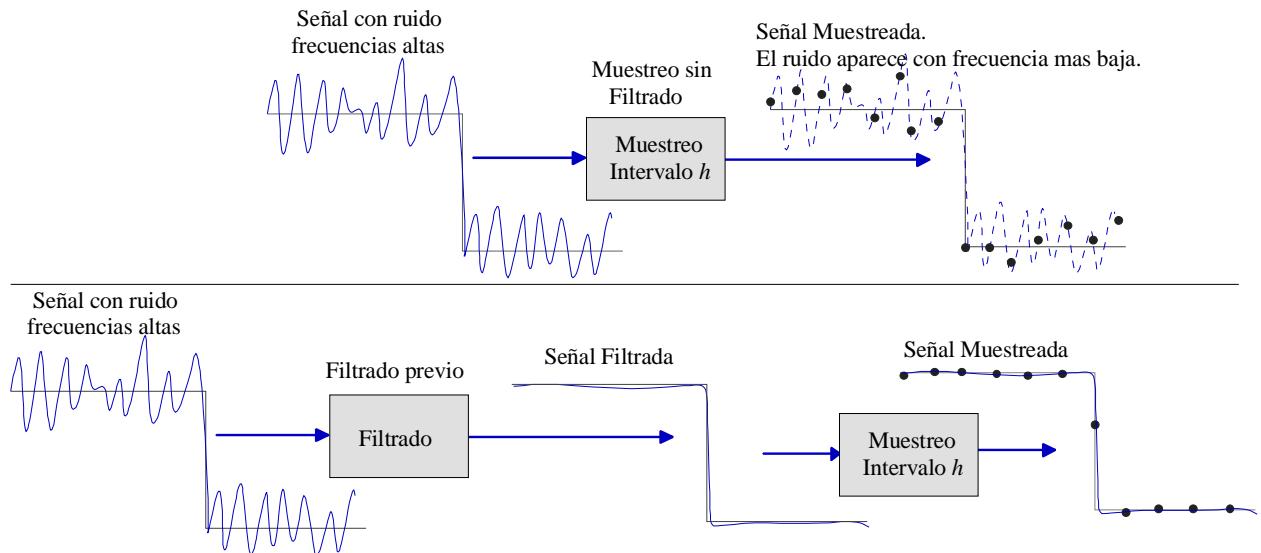


Fig. 12. Muestreo de señales filtradas y sin filtrar.

Obsérvese que si no se realiza un filtrado de la señal, las frecuencias altas del ruido aparecen en la señal muestreada como frecuencias mas bajas debido al enmascaramiento⁵. El filtrado elimina el ruido y la señal aparece prácticamente sin las variaciones debidas a las frecuencias bajas.

De todas formas se pueden dar situaciones en control de procesos químicos en las que no se puede realizar un prefiltrado. Por ejemplo, cuando debe tomarse una muestra cada cierto intervalo de tiempo para enviarla a un instrumento de análisis situado en el laboratorio. En este caso deben tomarse varias muestras, de diferentes sitios si fuera posible, y mezclarlas previamente.

¿Puede considerarse tal mezcla como una especie de filtro?

- **Multiplexado.** En general, la conversión A/D está multiplexada.

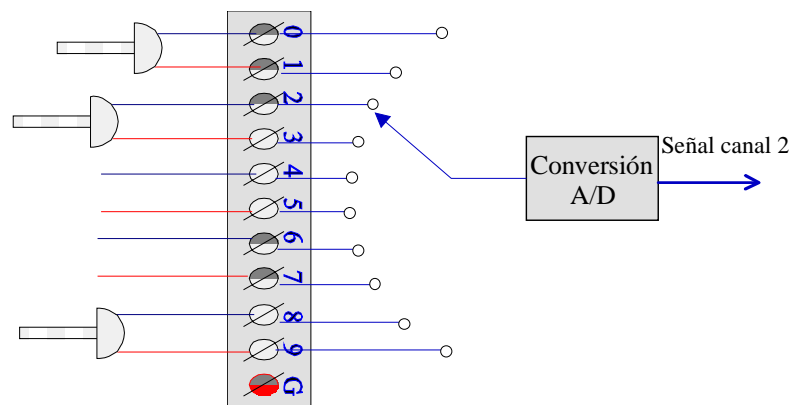


Fig. 13. Multiplexado de señales.

⁴ EMC, ElectroMagnetic Compatibility, compatibilidad electromagnética.

⁵ Ver Enmascaramiento (Aliasing)

Multiplexar consiste en que varios canales de entrada de señales de proceso comparten un único sistema de conversión A/D. Al seleccionar un canal de lectura, se conmuta durante un breve instante el canal correspondiente para que pase hacia el conversor A/D.

La figura 14 muestra el esquema típico de captura de señales analógicas utilizando módulos de Entrada/Salida (I/O) con acondicionadores y fuentes de alimentación incorporadas en los módulos.

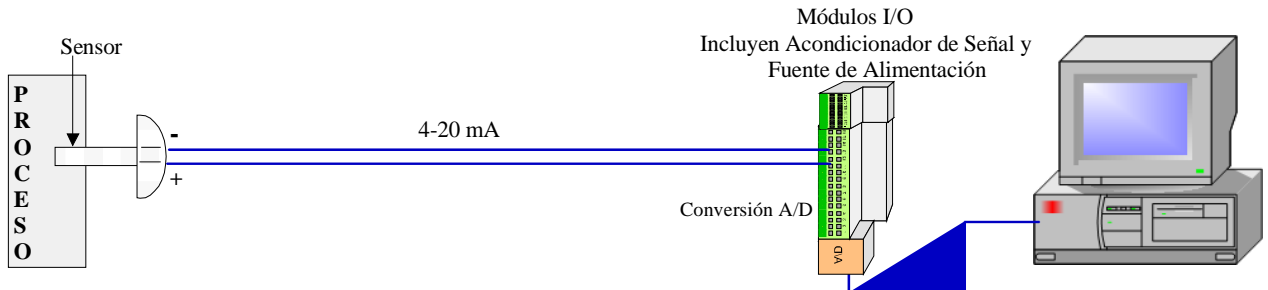


Fig. 14. Esquema de captura de señal analógica con módulos I/O

Convertidor de Señal. Conversión de una variable de un tipo a otro, por ejemplo: Corriente a Tensión, Tensión a Corriente, Neumática a Corriente, etc.



Fig. 15. Un convertidor de Señal convierte una señal de un tipo a otra señal de otro tipo.

X_{Max} Máximo de la escala para la variable de entrada X
 X_{Min} Mínimo de la escala para la variable de entrada X
 Y_{Max} Máximo de la escala para la variable de salida Y
 Y_{Min} Mínimo de la escala para la variable de salida Y

$$\frac{Y_{Max} - Y_{Min}}{X_{Max} - X_{Min}} = \frac{Y - Y_{Min}}{X - X_{Min}}$$

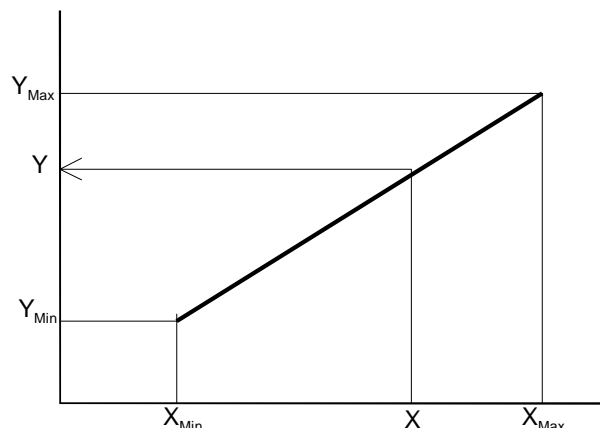


Fig. 16. Relación lineal entre dos variables.

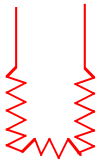
De donde se obtiene la ecuación general del cambio de variable:

$$Y = Y_{Min} + \frac{Y_{Max} - Y_{Min}}{X_{Max} - X_{Min}} (X - X_{Min})$$

Transductor. Un medidor está compuesto por tres elementos:

Elemento primario. Es el elemento que ‘siente’ la variable, es decir, presenta la propiedad de que una de sus características, una resistencia, un voltaje, una dilatación, una vibración, etc., varía proporcionalmente con la variación de la variable que se desea medir.

Por ejemplo, una PT100 no es más que una resistencia de Pt enrollada cuya resistencia a 0°C, es 100 Ω . Para medir la presión puede usarse una galga cuya resistencia varía con la presión, etc.



Si la propiedad que varía es una corriente o un voltaje, como el caso de un termopar, basta simplemente con amplificar dicha señal, mientras que si es otra variable deberá ser convertida a una corriente o tensión proporcional a la misma. El dispositivo que realiza esta función se denomina:

Fig. 17.

Transductor o Amplificador. Se encarga de convertir la señal del elemento primario en una corriente o una tensión. Si la señal del elemento primario es eléctrica recibe en nombre de amplificador y en caso contrario transductor.

Transmisor. En general, convierte la señal del transductor a una corriente 4-20 mA. Los transductores suelen incorporar el transmisor.



Fig. 18. Funciones de un medidor.

Muestreo

Actualmente el control de procesos moderno es control digital, por lo que las señales anteriores deben ser convertidas previamente para que puedan ser tratadas por el algoritmo de control del PC. Dado que el PC opera en forma discreta (no continua), esta operación recibe el nombre de *muestreo* de señales.

Las señales digitales, puesto que sólo tienen dos estados, en función de que haya o no tensión, no presentan problema alguno. Existen dispositivos de adquisición de datos en el mercado para tales señales conocidos con el nombre de *tarjetas digitales de entrada/salida*, o abreviadamente, **DIO**⁶. En realidad, estas señales ya son discretas, así por ejemplo una EV o una lámpara sólo tienen dos estados, abierta o cerrada, o encendida o apagada respectivamente, no pueden existir valores intermedios entre ambos estados.

Por el contrario, las señales analógicas varían continuamente dentro de un rango de valores, por ejemplo, entre 0 °C y 200 °C, existiendo infinitos valores entre los extremos. En realidad, la variable temperatura no está acotada, es el sensor el que sí lo está, ya que se ha diseñado para operar dentro de un rango de valores.

El muestreo consiste en medir periódicamente el valor de la señal y asignarle un conjunto de valores. Este conjunto de valores es finito, por ejemplo, entre 0 y 1023, o 0 y 65535, etc. El número asignado es siempre entero.

La cantidad de números que pueden asignarse depende de la resolución de la tarjeta de adquisición de datos. En la práctica suelen ser de 10, 12, 16, 20 y 24 bits.

Una tarjeta de n bits permite asignar un total de 2^n , es decir de 0 a $2^n - 1$

Nº Bits	Mínimo	Máximo	Total Números
10	0	$2^{10}-1 = 1.023$	1.024
12	0	$2^{12}-1 = 4.095$	4.096
16	0	$2^{16}-1 = 65.535$	65.536
20	0	$2^{20}-1 = 1.048.575$	1.048.576
24	0	$2^{24}-1 = 16.777.215$	16.777.216

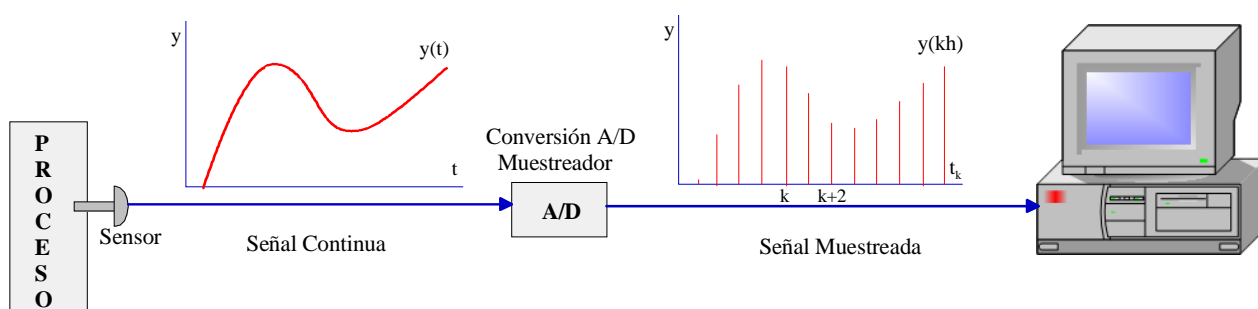


Fig. 19. Muestreo de una señal analógica.

Las señales analógicas en los procesos no suelen comenzar en 0 V o 0 mA, sino en 1 V o 4 mA. De esta forma, si la señal leída es menor que 1 V o 4 mA se deduce que existe un problema en el sensor, transmisor, cable, etc., se conoce con el nombre de *detección de cable cortado*.

En la siguiente tabla se indican los rangos en función del número de bits de la tarjeta.

⁶ DIO = Digital Input Output

Nº Bits	Mínimo	Máximo	Total Números disponibles
10	205	$2^{10}-1 = 1.023$	819
12	819	$2^{12}-1 = 4.095$	3.277
16	13.107	$2^{16}-1 = 65.535$	52.429
20	209.715	$2^{20}-1 = 1.048.575$	838.861
24	3.355.443	$2^{24}-1 = 16.777.215$	13.421.773

La ventaja de reservar el 25% inferior de la señal implica también un pequeño inconveniente, ahora el conjunto de números posibles para asignar a la señal es menor, disminuyendo también la resolución final del muestreo.

Por ejemplo, si se muestrea la temperatura del flujo de entrada a un cambiador y se utiliza una PT100 con un transmisor 4 – 20 mA calibrado de 0 á 100 °C y una tarjeta A/D de 10 bits, entonces se tiene:

Resolución si fuese 0 – 20 mA:

$$(\text{Rango Temperatura}) / (\text{Rango Números}) = 100 / 1023 = 0,0098 \text{ °C de Resolución}$$

Resolución para 4 – 20 mA:

$$(\text{Rango Temperatura}) / (\text{Rango Números}) = 100 / 818 = 0,122 \text{ °C de Resolución}$$

Actualmente esta pérdida de resolución no es importante ya que se trabaja con convertidores A/D de 16 o más bits proporcionando suficiente resolución para casi todos los casos.

El muestreador actúa como un interruptor interrumpiendo la línea que lleva la señal.

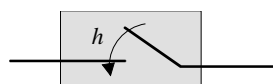


Fig. 20. Muestreador

Cada h segundos se cierra durante un tiempo muy breve dejando pasar la señal hacia el convertidor A/D. El tiempo que permanece cerrado es finito aunque en la práctica es tan pequeño que teóricamente se considera un punto.

Durante el muestreo⁷ las señales analógicas en tiempo continuo se reemplazan por una secuencia de números proporcionales al valor de la señal en el instante de muestreo. En lugar de *muestreo* se puede utilizar el concepto equivalente de *discretización*.

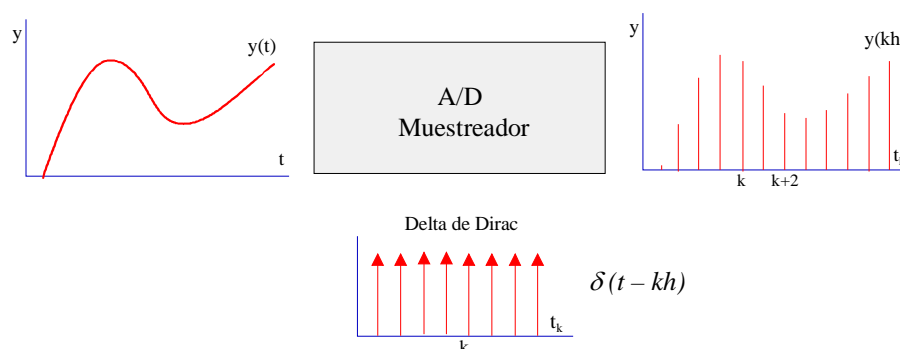


Fig. 21. Generación de la señal muestreada a partir de la señal continua.

Desde el punto de vista matemático, discretizar una señal continua se consigue multiplicando la señal continua por la delta de Dirac. La delta de Dirac dada por:

$$\delta(t - kh)$$

Sólo tiene valores en los instantes en que t es igual a kh , donde k es un entero 0, 1, 2, etc., que representa el instante de muestreo. Dato que para los demás valores la función vale cero, la señal resultante sólo presentará valores en los instantes de muestreo.

⁷ Muestrear = Simple, Muestreador = Sampler

11

Existen mantenedores de orden superior, por ejemplo de orden uno consistente en predecir el siguiente punto a partir de la pendiente obtenida con los dos puntos anteriores. El mantenedor de orden uno necesita un muestreo de iniciación.

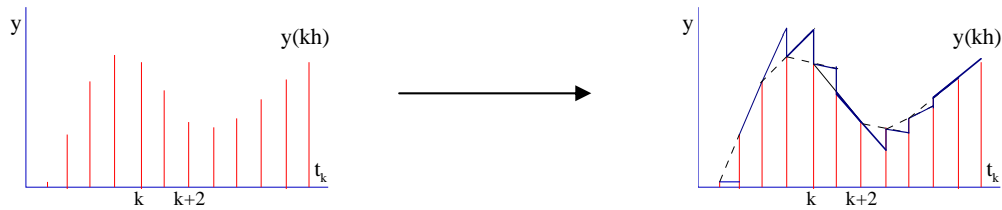


Fig. 24. Mantenedor de orden uno.

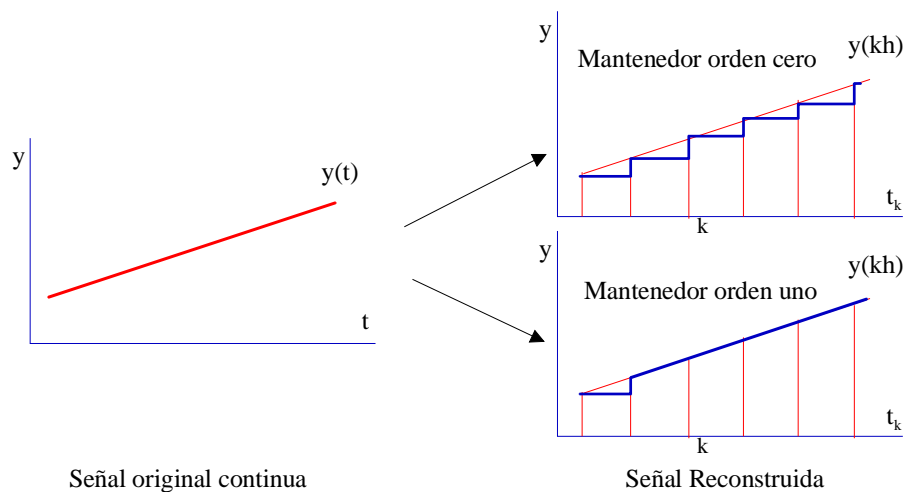


Fig. 25. Comparación entre mantenedores de orden cero y uno para una señal lineal.

La reconstrucción que se logra con un mantenedor de orden uno cuando la variación de la señal es lineal, es muy buena, como se observa en la fig. 25, pero presentan un mal comportamiento cuando la señal presenta máximos o mínimos, es decir, cambios acentuados en la pendiente, fig. 26.

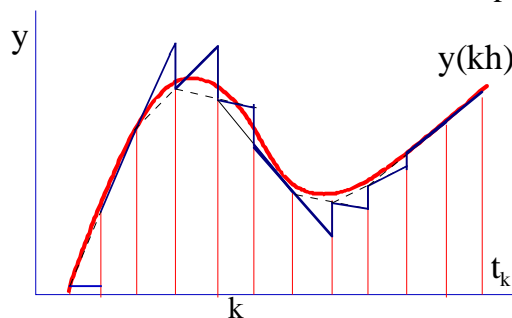


Fig. 26. El mantenedor de orden uno no es eficiente cuando la señal tiene cambios acentuados

Un mantenedor de orden 2, 3, etc., necesita 2, 3, etc., muestreos de iniciación y se incrementa el esfuerzo de cálculo. Si se necesita una buena reconstrucción de la señal, es mejor elección disminuir el intervalo de muestreo, h , y usar un mantenedor de orden cero que trabaje con mantenedores de orden superior. Debido a este problema el mantenedor de orden cero es el más usado en los procesos industriales.

Finalmente, una vez que la aplicación de control recibe el valor de la variable utiliza el algoritmo de control y calcula el valor de la señal que debe enviar a la válvula para corregir el error con respecto al valor de consigna.

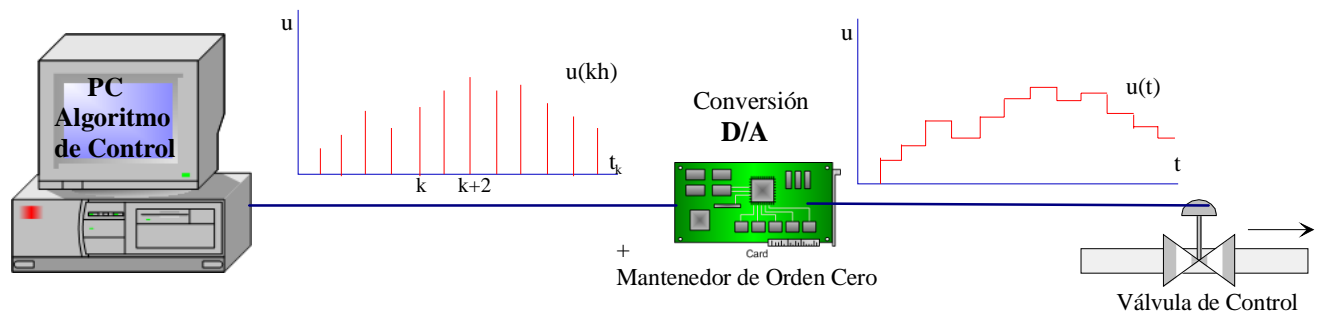


Fig. 27. Señal de control generada por el algoritmo de control. La señal discreta procedente del algoritmo debe convertirse en continua mediante un mantenedor de orden cero.

Puesto que válvula u otro dispositivo de actuación debe recibir continuamente la señal, es preciso convertir la señal discreta procedente del PC en una señal continua. De forma similar al caso anterior, se utiliza un mantenedor de orden cero, generando una señal secuencialmente continua.

La figura 28 corresponde a un esquema general que muestra el flujo de información de las señales desde el punto de vista del control de procesos indicando el tipo de señal utilizado por cada dispositivo (continuo o discreto). En la figura puede observarse las trayectorias directas e inversas (realimentación).⁹

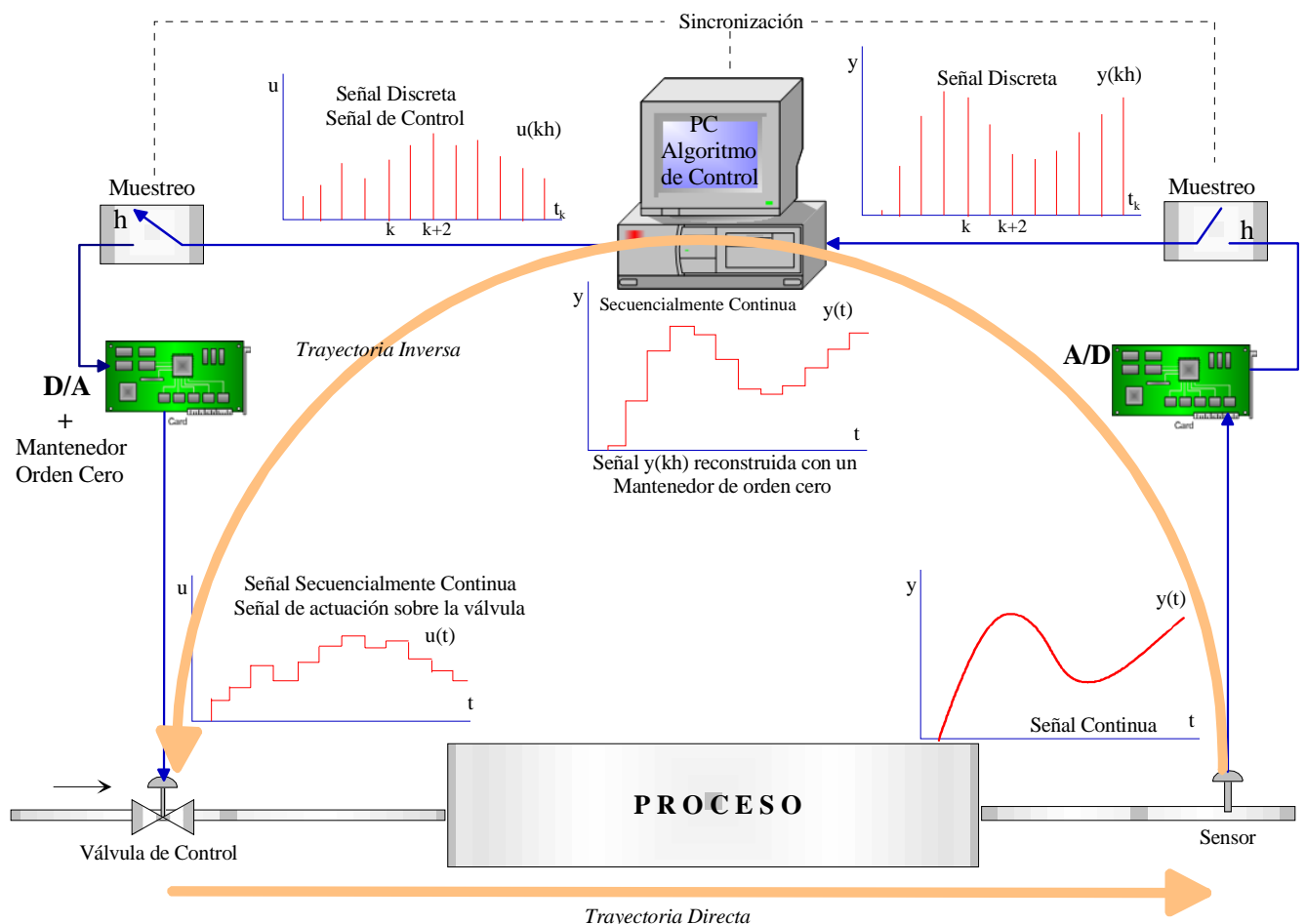


Fig. 28. Señales Continuas y Discretas en un control digital de un proceso

⁹ Realimentación = Feedback

En resumen:

1. Las señales continuas deben ser convertidas a señales discretas en el tiempo para que puedan ser leídas por el PC. Para ello se muestrean cada cierto intervalo de tiempo, h . Cuanto menor es el valor de h , mejor reproducirá la señal original pero más esfuerzo de cálculo requiere. Por el contrario, al aumentar el valor de h , se generan menos puntos pero puede perderse información de la señal, de tal forma que su reconstrucción sea errónea¹⁰ o imposible.
2. La aplicación de control en el PC determina la señal de salida óptima para controlar el proceso. Esta operación se realiza mejor con modelos discretos que continuos.
3. La señal discreta de control, proporcionada por el algoritmo, debe ser convertida a una señal continua para actuar sobre los elementos finales de control, generalmente una válvula. Esta operación la realiza el mantenedor o dispositivo de retención.

¹⁰ Ver capítulo de Enmascaramiento.