

INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN

- » Estas transparencias incluyen las transparencias del profesor César de Prada de la Universidad de Valladolid.

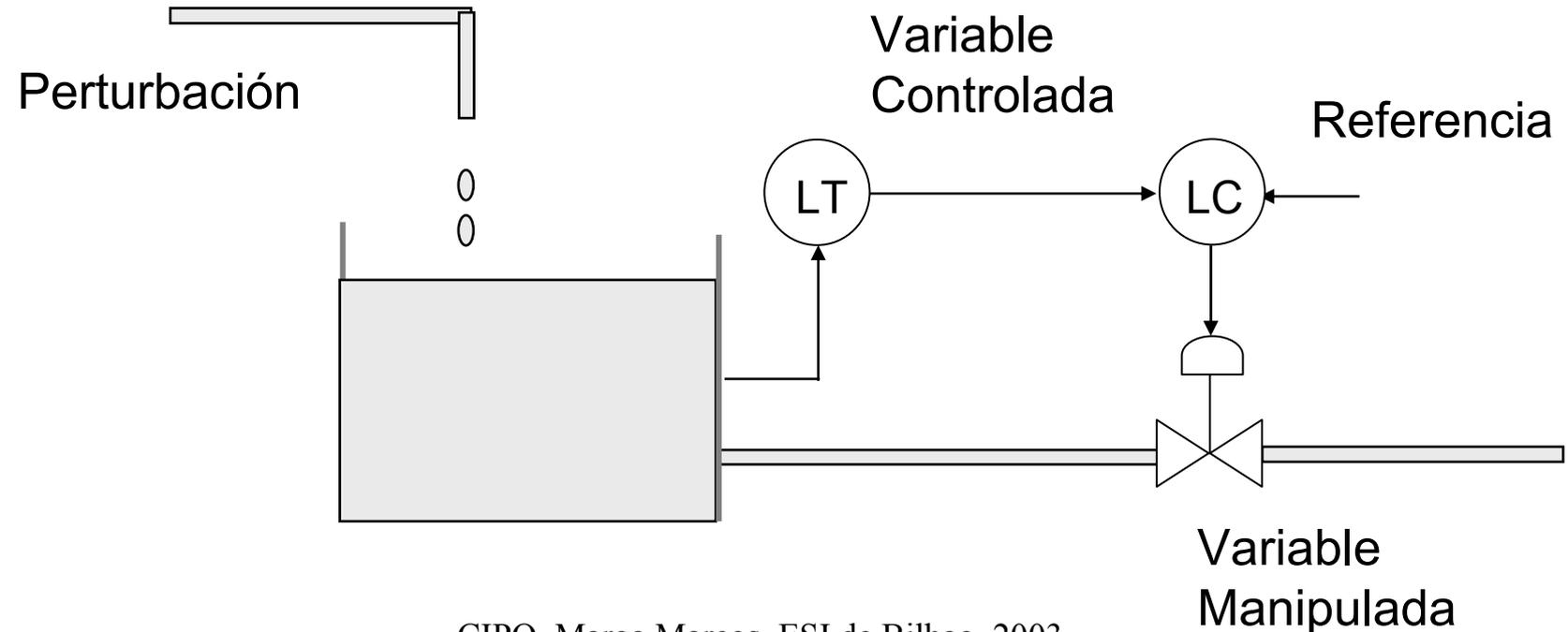
Introducción a la Instrumentación

INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN

- » Independientemente de la estrategia de control, la implementación del sistema de control conlleva:
 - medir variables de proceso (nivel, temperatura, caudal,...)
 - calcular acciones de control
 - manipular variables de entrada al proceso
- » Instrumentación necesaria:
 - Instrumentos de medida
 - Actuadores
 - Sistemas de transmisión de información
 - Controladores

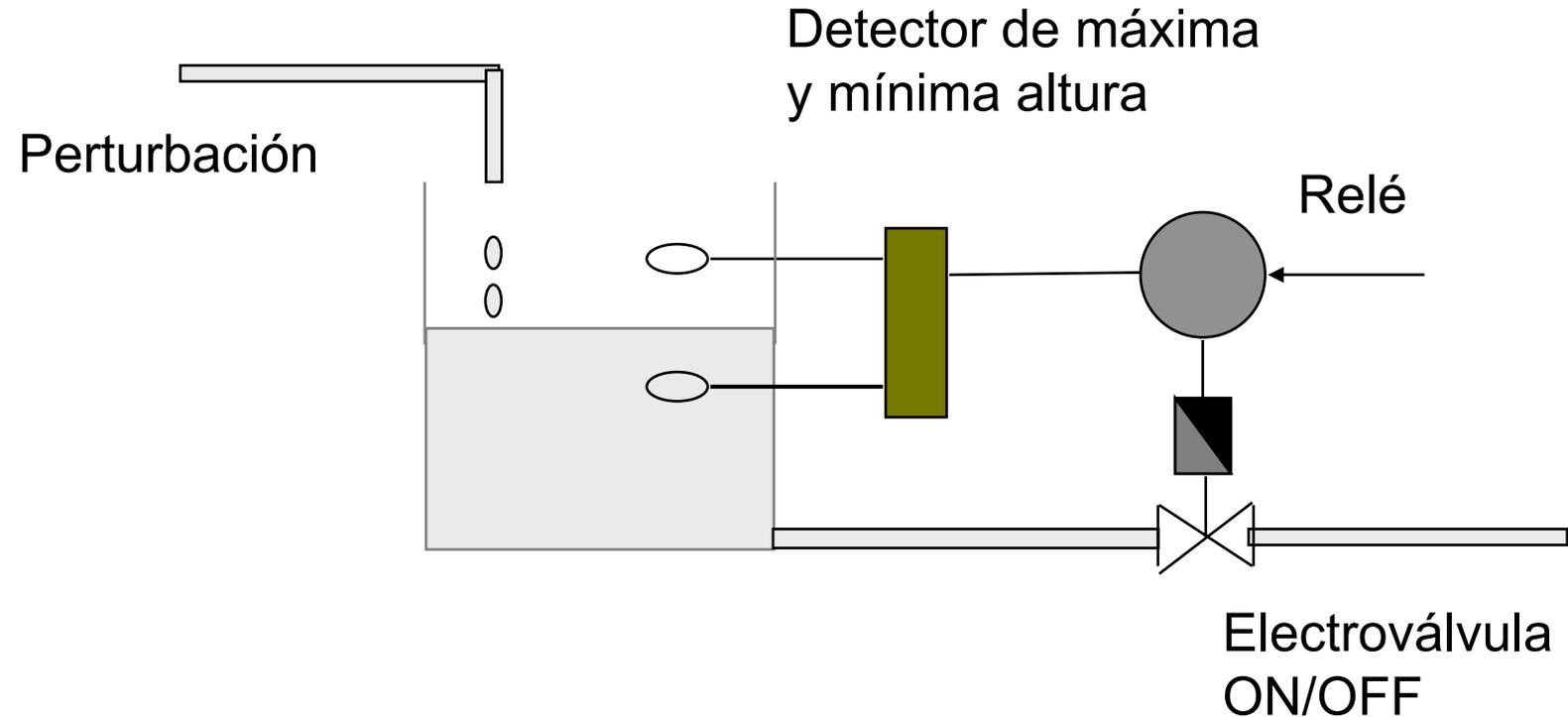
CONTROL CONTINUO

- La variable controlada toma valores en un rango continuo
- se mide continuamente la variable controlada
- se actúa continuamente sobre un rango de valores del actuador



CONTROL DISCRETO

- Las variables sólo admiten un conjunto de estados finitos

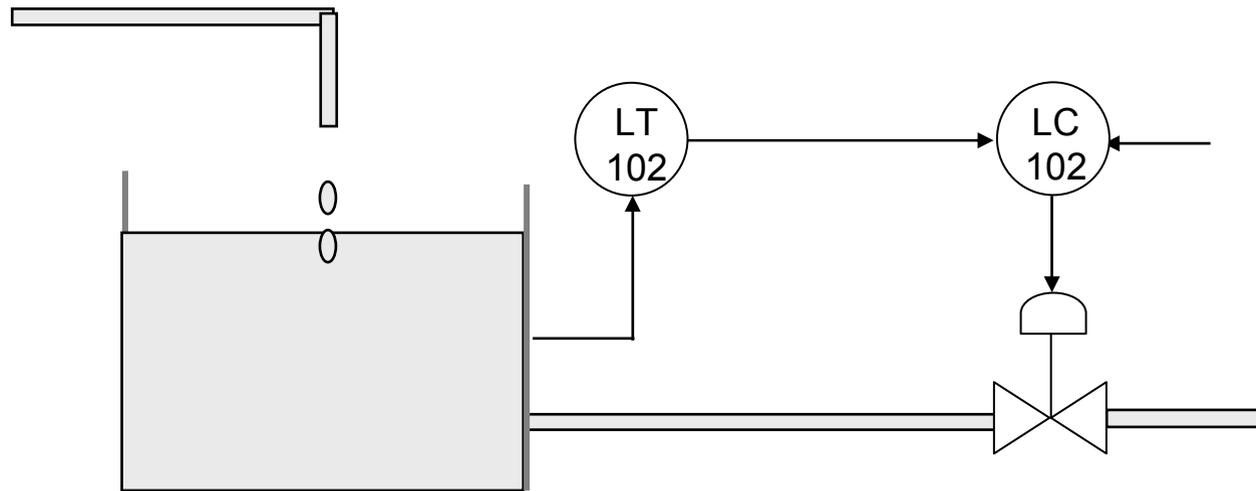


Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)

Unidades de proceso
actuadores
representados con
símbolos especiales

Instrumentos de
medida y regulación
representados por
círculos con
números y letras

Líneas de conexión



Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)

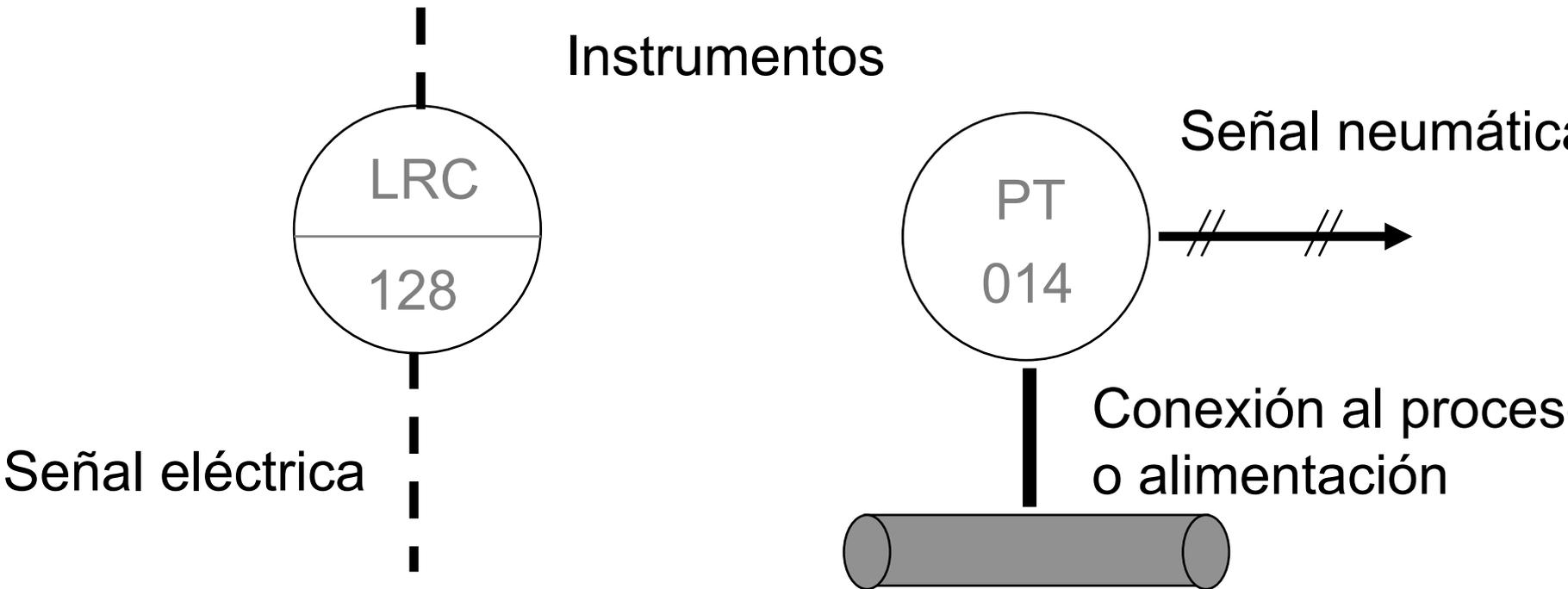
Instrumentos

- » Indicadores
- » Transmisores
- » Registradores
- » Convertidores
- » Controladores
- » Actuadores
- » Transductores

Conectados por líneas de transmisión:

- Neumáticas
- Eléctricas
- Digitales

Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)



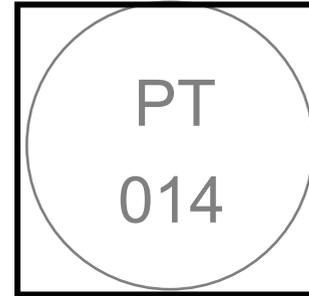
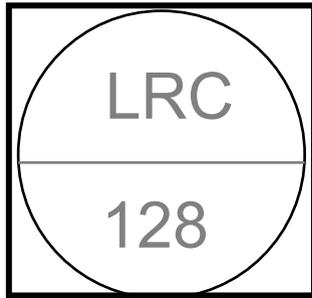
Montaje en panel

Montaje en campo

El número es el mismo en todos los instrumentos de un mismo bucle de regulación

Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)

Instrumentos digitales



- Comparte varias funciones: monitor, control, etc.
- Configurable por software
- Acceso por red

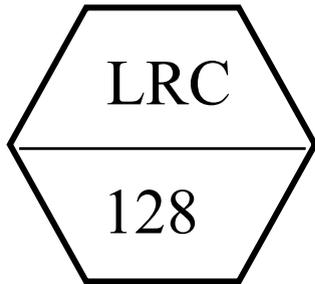
Accesible al operario —

Normalmente no accesible al operario

- Controlador de DCS, regulador por microprocesador,...

El número es el mismo en todos los instrumentos de un mismo bucle de regulación

Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)



Instrumentos digitales

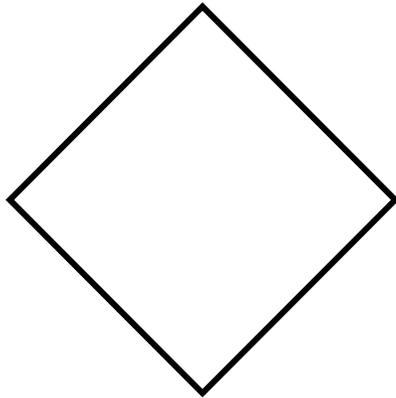


- Indica computador distinto del controlador de un DCS
- Varias funciones: DDC, registro, alarmas, etc.
- Acceso por red

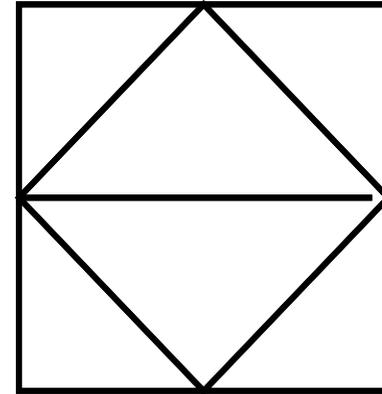
- Indica conexión software o por red digital

Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)

Instrumentos digitales

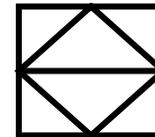


Control lógico o secuencial

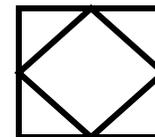


PLC o secuencias/ lógica de un DC

Accesible al operario



No accesible al operario



Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)

1ª letra

A	análisis
D	densidad
E	voltaje
F	caudal
I	corriente
J	potencia
L	nivel
M	humedad
P	presión
S	velocidad
T	temperatura
V	viscosidad
W	Peso
Z	posición

1ª letra: Variable medida o relacionada

2ª letra: puede cualificar a la primera

D diferencial

F relación

S seguridad

Q integración

3ª y siguientes: Función del Instrumento

I indicador

R registro

C control

T transmisor

V válvula

Y cálculo

H alto

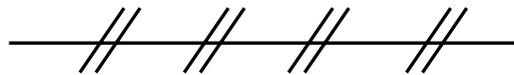
L bajo

Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)

- » Los sistemas de control de procesos se representan en los diagramas de proceso e instrumentos utilizando símbolos e iconos simples
- » Estos diagramas permiten entender el funcionamiento integrado del proceso y del sistema de control
- » En la norma ISA se emplean líneas sólidas para representar las conexiones del proceso y líneas a trazo discontinuo o líneas de trazo continuo con marcas para las comunicaciones entre instrumentos



Conexión del proceso



Transmisión de señal neumática



Transmisión de señal eléctrica



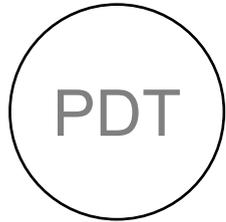
Transmisión de señal sin hilos

Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)

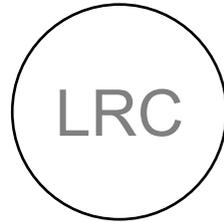
- » Los instrumentos de los lazos de control se representan por un círculo en cuyo interior se colocan las letras que designan al instrumento.
- » El bucle al que pertenece se identifica por un número y el símbolo indica la localización física del instrumento
- » La identificación del tipo de instrumento se realiza con dos o más letras:
 - La primera indica el tipo de variable que se mide, se indica, se transmite o se controla. p.e. T indica temperatura.
 - La segunda letra indica la función que realiza el instrumento en el bucle (control (C), indicación (I), registro (R), etc. Ejemplos:
 - » TC controlador de temperatura
 - » FT transmisor de caudal (*Flow transmitter*)
 - » PC controlador de Presión. (*Pressure controller*)
 - » LR registrador de nivel (*Level register*)
 - » TI indicador de temperatura (*Temperature indicator*)

Diagramas de Proceso e Instrumentos (P&I D)

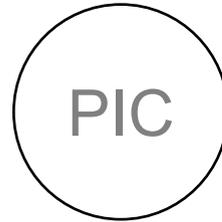
Instrumentos



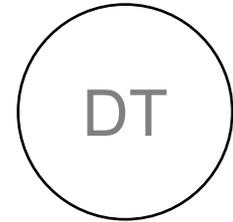
Transmisor diferencial de presión



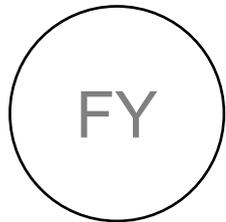
Controlador reg de caudal



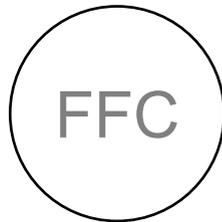
Controlador indicador de presión



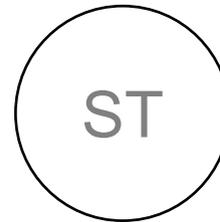
Transmisor de densidad



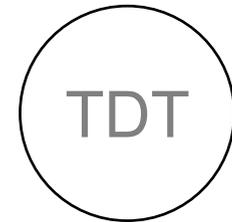
Cálculo de caudal



Controlador de Relación de caudal

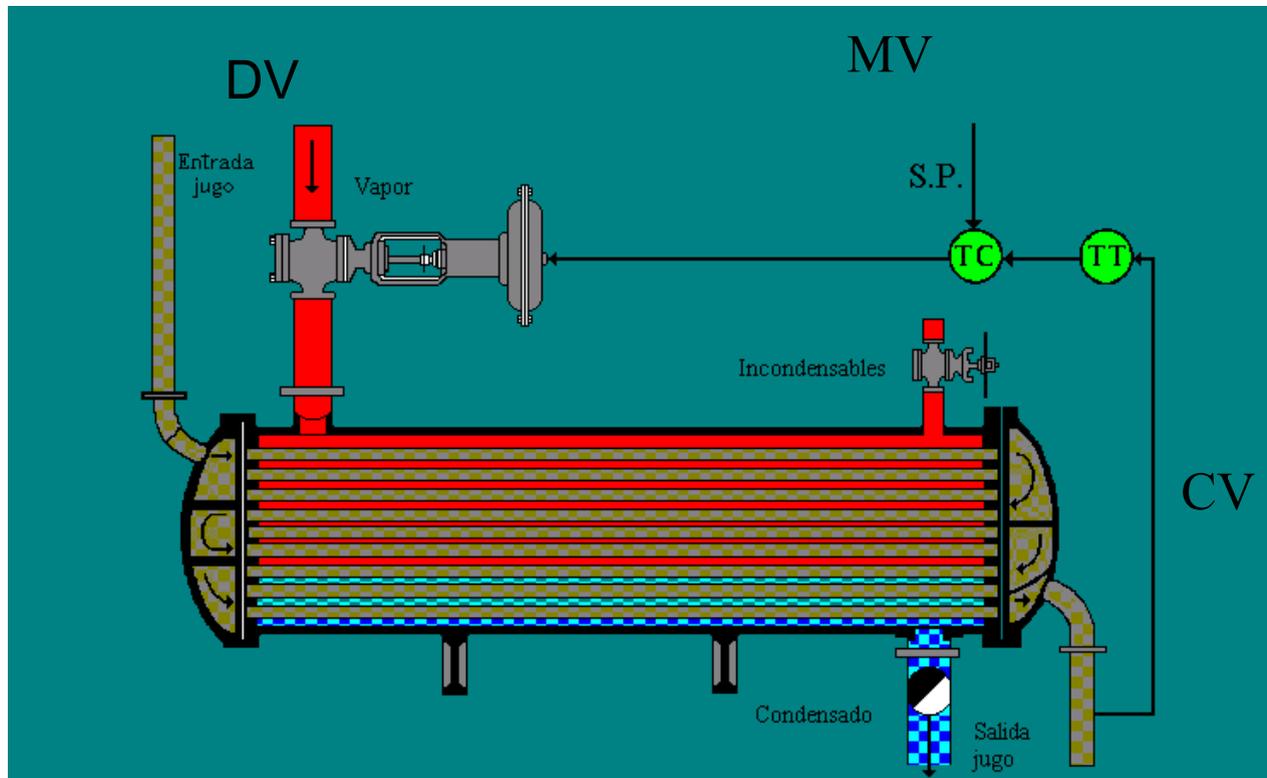


Transmisor de velocidad



Transmisor diferencial de temperatura

Intercambiador



EL PROCESO DE MEDIDA

- » Comparación de una variable con una unidad estándar o patrón de medida
 - Directa: comparación con patrón (p.e. regla en longitud)
 - Indirecta: utilización de principio físico-químico que relaciona la magnitud de la variable con la de otra más fácilmente medible.

Ejemplo: la medida de fuerza con un dinamómetro utiliza la ley que rige el comportamiento de los cuerpos elásticos. Se mide la deformación (o el desplazamiento) y se compara con un patrón.

ELEMENTOS NECESARIOS ENTRE MAGNITUD MEDIDA Y CONTROLADOR



» SENSOR

- dispositivo que está en contacto con la variable que se mide

» TRANSDUCTOR

- modifica la naturaleza de la señal que proporciona el sensor para hacerla más fácilmente medible

» TRANSMISOR

- convierte la señal del transductor en una señal estándar que se transmite al sistema de control (al ser estándar es compatible con cualquier instrumento de control con independencia de su marca comercial)

CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE MEDIDA

» Instrumentos de Monitorización y Control

- Monitorización:

- » Indican al operador el estado de la variable. p.e. termómetro de mercurio, manómetro de tubo en U

- Control:

- » El instrumento debe enviar la medida a un controlador. Proporcionan una señal eléctrica o neumática que puede ser utilizada directamente por un equipo de control. p.e. termopar,...

INSTRUMENTOS ACTIVOS Y PASIVOS

Cualquier instrumento de medida requiere cierta energía para realizar la medición

» Pasivos

- la energía necesaria para realizar la medida la aporta el proceso físico que se desea medir
 - » ejemplos: termómetro de mercurio, manómetro de tubo en U, amperímetro de resorte,...

» Activos

- utilizan una fuente de energía externa para producir la medida. La magnitud medida modula la fuente de energía externa

Medida por comparación y desplazamiento

» Por desplazamiento

Basada en la variación experimentada por una variable que es función de la magnitud medida.

Ejemplo: dinamómetro. Mide el peso de un cuerpo por la elongación experimentada por un muelle de determinada constante de elasticidad

» Por comparación

Comparan la magnitud medida con patrones conocidos (instrumentos de desplazamiento cero o de tipo nulo)

Ejemplo: balanza que mide el peso de un cuerpo añadiendo pesas calibradas

Medidores Analógicos y Digitales

» Medidor Analógico

La medida que proporciona varía de forma continua (p.e. termómetro que puede marcar cualquier valor comprendido entre la temperatura mínima y máxima)

» Medidor Digital

- La medida que proporciona sólo puede tomar un valor entre un conjunto finito de valores (p.e. tacómetro digital que mide la velocidad de rotación de un eje contando el número de vueltas por unidad de tiempo, que sólo puede ser un número entero)

Características de un instrumento de medida

- » Rango
- » Alcance (Span)
- » Error dinámico
- » Precisión
- » Sensibilidad
- » Repetitividad
- » Zona muerta e Histéresis

Características de un instrumento de medida

» ESTÁTICAS

- Rango. Conjunto de valores de la variable que puede medir el instrumento. Se especifica mediante el límite inferior y el superior.

Ejemplo: rango de termorresistencia para medir temperatura: 50-150°C

- Alcance (span). Se define como alcance de un dispositivo de medida a la diferencia entre los valores superior e inferior del rango.

Ejemplo: un instrumento de medida con rango 60-200°C tiene un alcance de 140°C

Características de un instrumento de medida

» ESTÁTICAS

- Rango sobre cero. Es un rango en el que el cero de la variable medida es mayor que el límite inferior del rango.
- Rango sin cero. Rango en el que el cero de la variable medida queda por debajo del límite inferior del rango.
- Elevación del cero. Diferencia entre el cero de la variable medida y el límite inferior del rango de medida. Se suele especificar como porcentaje del alcance.
- Precisión. Grado en que la medida que proporciona se aproxima a un valor patrón de medida o a medida ideal.
- Error de medida. Diferencia entre la medida producida por el instrumento y la medida ideal.

Características de un instrumento de medida

» ESTÁTICAS

- Grado de incertidumbre. Error máximo que se puede cometer al efectuar la medida con el instrumento.
- Precisión de referencia o tolerancia. Límite máximo del error de medida en condiciones nominales. Formas de expresarla:
 - » forma absoluta en términos de unidades de ingeniería de las variables medidas. p.e. $\pm 0,001$ v ó ± 1 °C
 - » forma relativa como porcentaje del alcance. p.e. $\pm 1\%$ del alcance
 - » forma relativa como porcentaje del límite superior del rango
 - » forma relativa como porcentaje del valor medido

Características de un instrumento de medida

» ESTÁTICAS

- Repetitividad. Grado de consistencia del instrumento. Es decir, en qué grado el dispositivo proporciona medidas iguales cuando mide el mismo valor en las mismas condiciones. Si no se exige que las condiciones de las medidas sean idénticas, esta característica se denomina reproducibilidad.
- Banda Muerta. Rango de variación de la variable medida que no produce un cambio perceptible en la salida del instrumento. La causa mas común es la fricción estática. Se suele especificar como porcentaje del alcance.

Características de un instrumento de medida

» ESTÁTICAS

- Sensibilidad. Relación que existe entre el incremento en la señal de salida del instrumento y el incremento correspondiente en la variable medida.

Ejemplo: un medidor de nivel que proporciona una variación de 10 mV por metro de altura tiene una sensibilidad de 10 mV/m

- Resolución. Incremento mínimo de la variable de entrada que produce un cambio observable en la salida. Este concepto está ligado al de banda muerta y sensibilidad. Se expresa en términos absolutos o porcentuales sobre el alcance.

Características de un instrumento de medida

» ESTÁTICAS

- Histéresis. Valor máximo de la diferencia entre las medidas de un mismo valor en sentido creciente y decreciente de la variable. Se suele expresar en forma porcentual sobre el alcance del instrumento.
- Linealidad. Mide en qué grado la característica entrada-salida del instrumento se puede aproximar a una línea recta. Se suele expresar como el error máximo que se cometería al aproximar la función por una línea recta. Esta cualidad es muy deseable ya que implica una sensibilidad similar en todo el rango de medida.

Características de un instrumento de medida

» ESTÁTICAS

- Sesgo (bias). Error constante que afecta a la medida en todo su rango. No tiene carácter aleatorio y puede ser corregido mediante la calibración del instrumento.
- Deriva. Variación experimentada por alguna de las características del instrumento en un periodo de tiempo determinado. Se debe a cambios que sufren algunos componentes o materiales del instrumento al variar la temperatura o la humedad.
- Umbral. Valor mínimo que tiene que alcanzar la variable para que el instrumento proporcione una señal de medida.

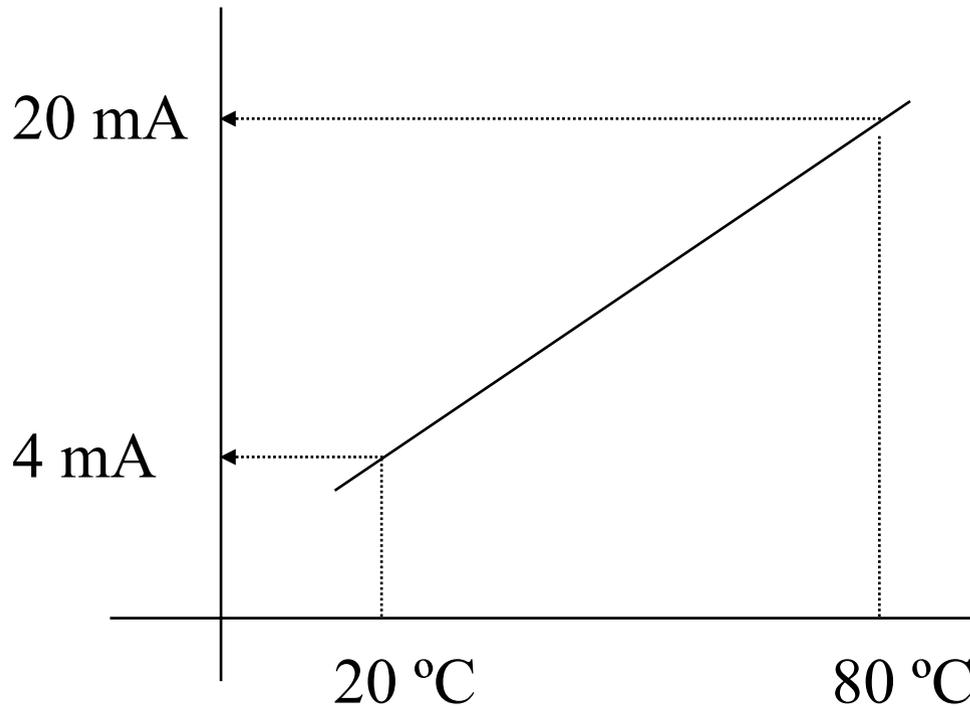
Características de un instrumento de medida

» DINÁMICAS

Los instrumentos de medida, como todos los sistemas, tienen un comportamiento dinámico que puede evaluarse en términos de tiempo de respuesta, tiempo de subida, constante de tiempo, factor de amortiguamiento, frecuencia natural, respuesta en frecuencia, ...

Características de un instrumento de medida

Transmisores



Calibrado:

lectura = f (valor real)

Ajustes de Cero y Span

Ecuación de la recta

$$y - y_0 \text{ (mA)} = m \cdot (x - x_0) \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$m = (20 - 4) / (80 - 20) = 0.2667 \text{ mA/}^\circ\text{C}$$

$$(x_0, y_0) = (20 \text{ }^\circ\text{C}, 4 \text{ mA})$$

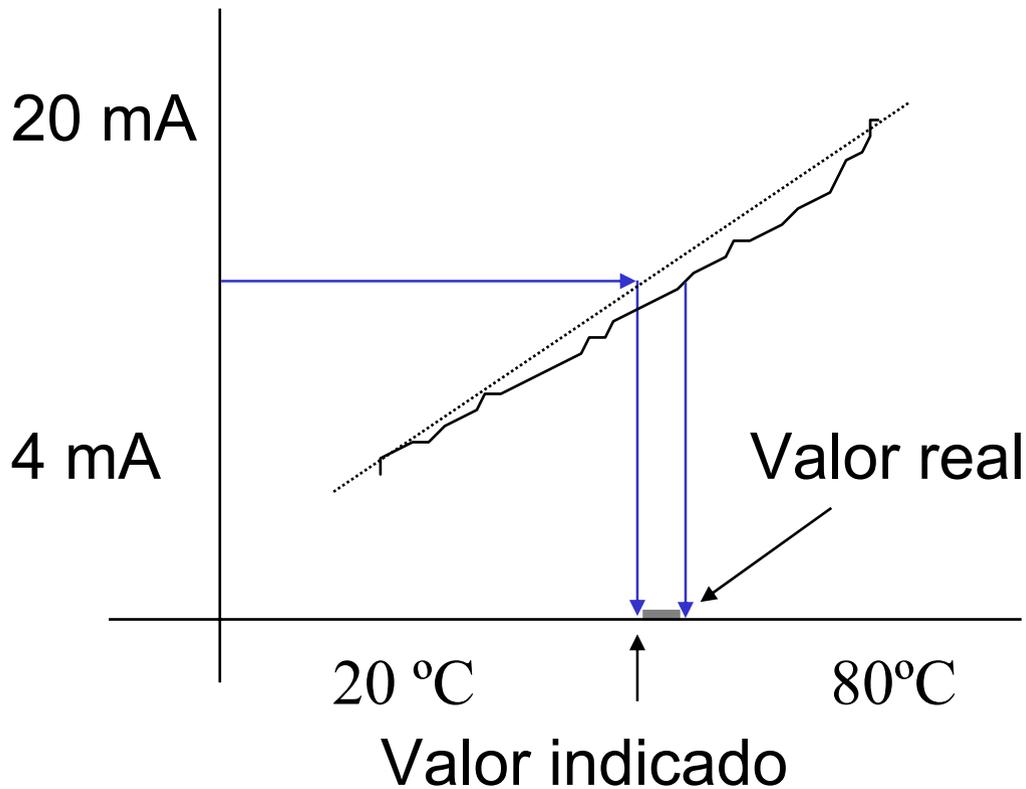
Rango: 20 ÷ 80 °C

Alcance (span): 80 - 20 = 60 °C

$$y \text{ (mA)} = 0.2667 \cdot (^\circ\text{C}) - 1.3333$$

Características de un instrumento de medida

Transmisores



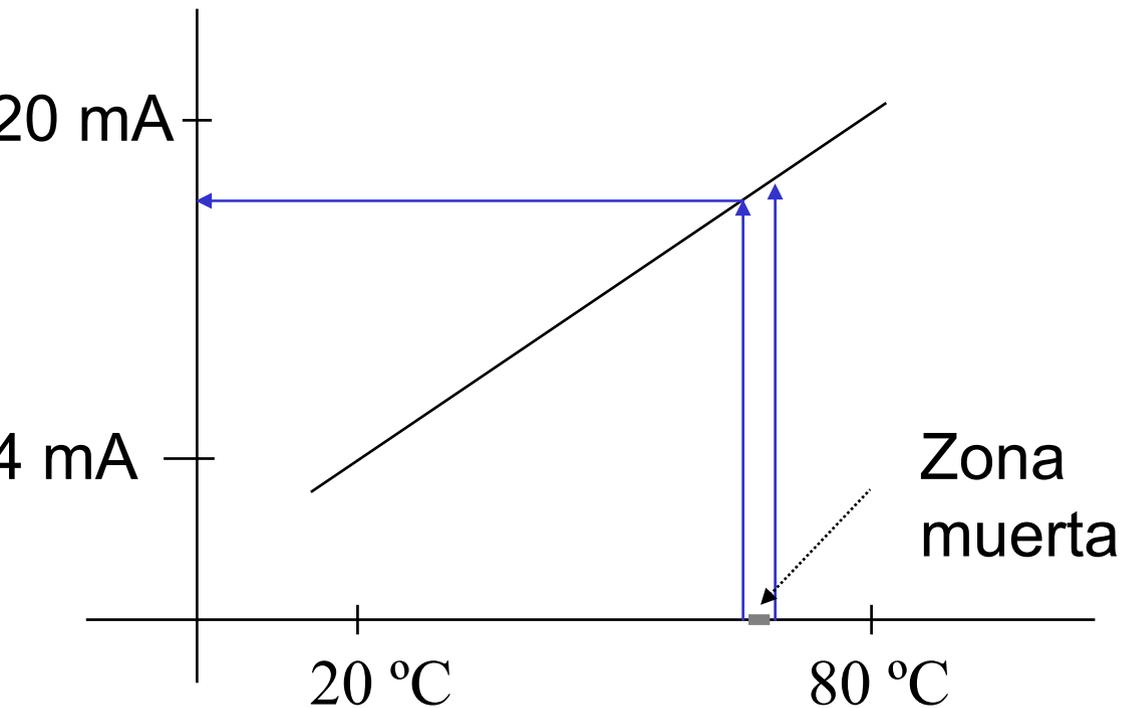
Error de linealidad

Debido a la no linealidad de la curva de calibrado real

Se mide en % alcance

Características de un instrumento de medida

Transmisores

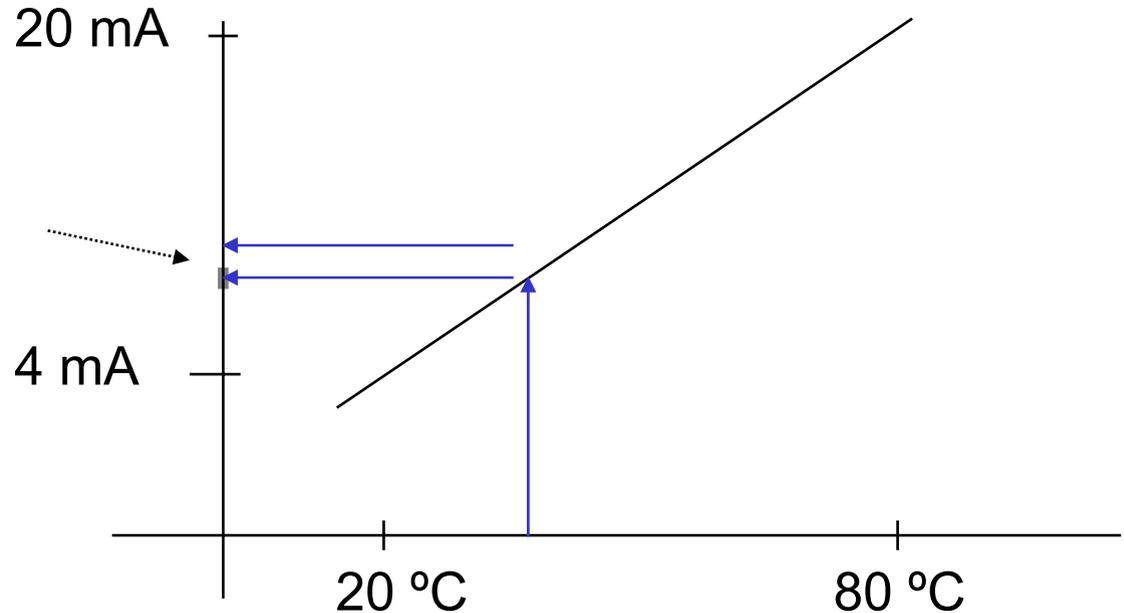


Banda muerta:
Cambio en la variable medida que no altera la lectura.
Se mide en % del alcance

Características de un instrumento de medida

Transmisores

Repetitividad



Repetitividad:

Capacidad de obtener la misma lectura al leer el mismo valor de la variable medida en el mismo sentido de cambio.

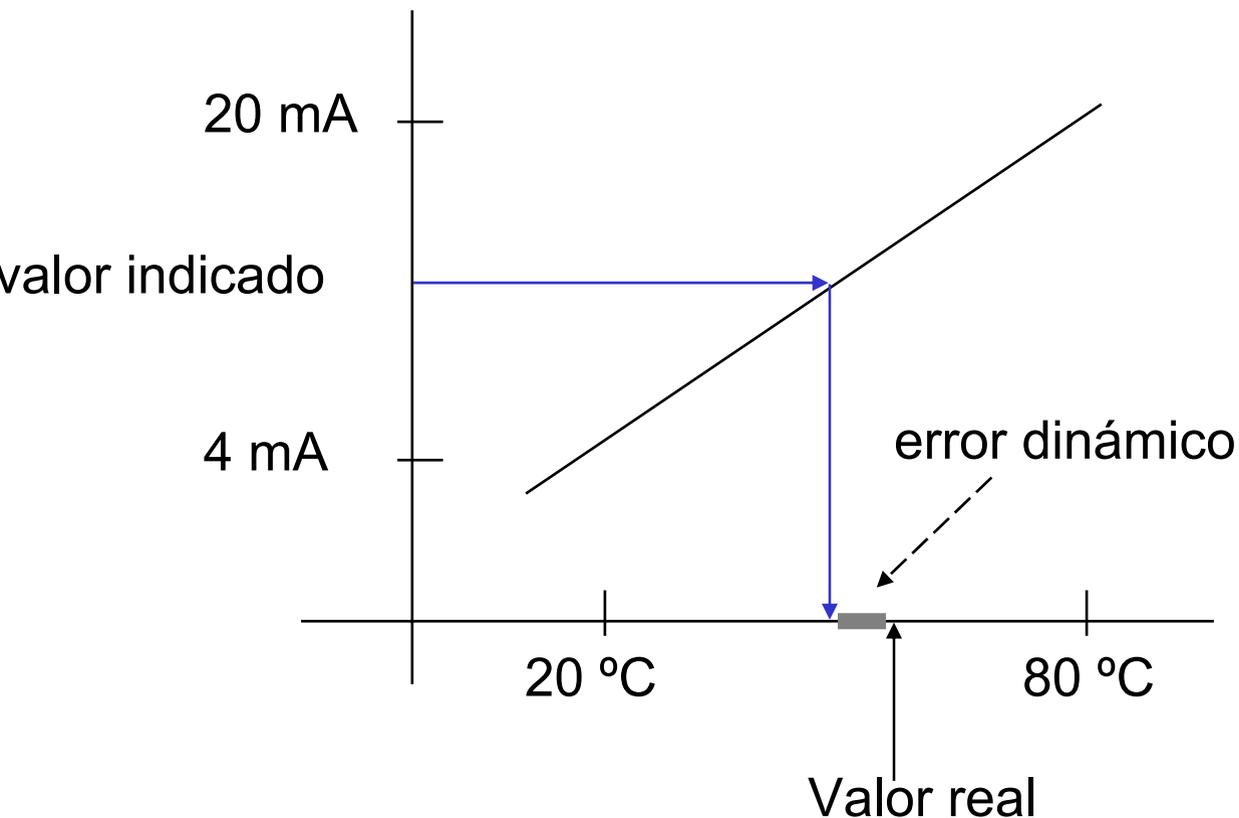
se mide en % del span

Histéresis:

Lo mismo pero en sentido creciente y decreciente

Características de un instrumento de medida

Transmisores



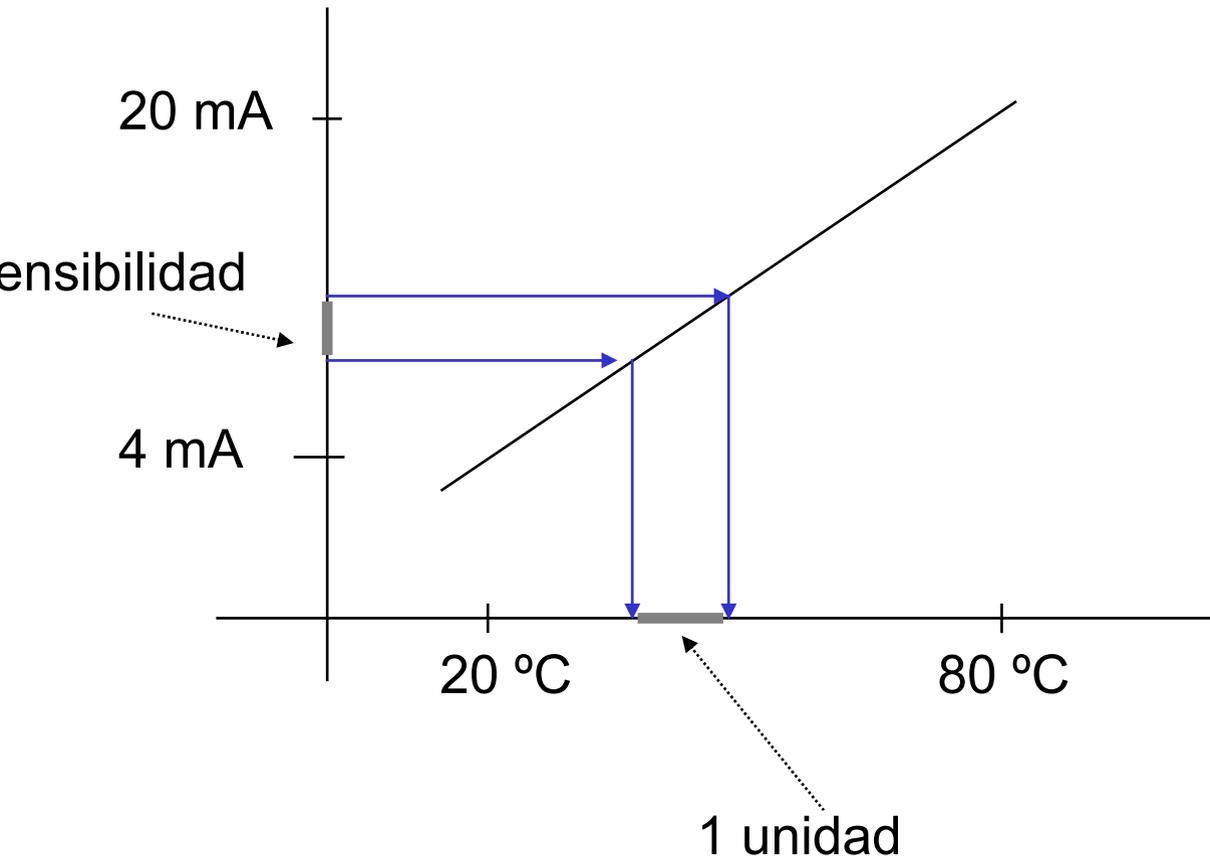
Precisión:

Limite máximo de error posible por linealidad, histéresis, etc....

% del span
% de la lectura
valor directo,...

Características de un instrumento de medida

Transmisores



Sensibilidad:
Cambio en la lectura correspondiente a un cambio unidad en la variable

% del span

La transmisión de la medida

- Normalmente los sensores y los actuadores se encuentran próximos al proceso
- Los controladores pueden estar:
 - » en un armario de control (a varios metros del equipo de medida)
 - » en la sala de control (a decenas de metros)
 - » en otro edificio (a centenares de metros)
- Es necesario transmitir la medida hasta los controladores y desde éstos al actuador. Para ello se requiere:
 - » medio de transmisión
 - » código de interpretación de la información

Medios de transmisión

- Tuberías por las que se transmite alguna propiedad del fluido (línea de transmisión neumática)
- Cables eléctricos por los que se transmite alguna propiedad eléctrica (líneas de transmisión eléctrica)
- El espacio por el que se transmiten ondas
- Fibras ópticas, que son canales de comunicación por los que se transmiten ondas luminosas de forma muy eficiente

Medios de transmisión

» Factores a tener en cuenta:

- Capacidad del canal
- Atenuación de la señal
- Inmunidad al ruido

» Utilización típica:

- transmisión por radio: procesos alejados del centro de control y supervisión
- fibras ópticas: al ser canales de gran capacidad se utilizan cuando hay que transmitir gran cantidad de datos
- en sistemas de control de procesos se utilizan más los sistemas de transmisión neumáticos y eléctricos

Sistemas de Control de Procesos

» Transmisión neumática

- normalizada por ISA (Instrument Society of America) en dos rangos: 3-15 psi (3-27 psi)
 - » 3 psi valor inferior del rango de medida (0%)
 - » 15 psi valor superior (100%)
- el valor mínimo $\neq 0$ se denomina cero vivo. Se utiliza por:
 - » 0 psi, menor que el cero vivo puede identificar tubería desconectada, atascada o con fugas, o bien sensor estropeado
 - » es más fácil calibrar el instrumento si existe presión por debajo del punto mínimo de calibración
- Las distancias deben ser relativamente cortas

Sistemas de Control de Procesos

» Transmisión eléctrica

- Es más utilizada:
 - » mejora las características dinámicas de la transmisión neumática (mejores tiempos de respuesta \Rightarrow mayor capacidad del canal)
 - » menor coste de la línea (cables en lugar de tubos)
 - » menor coste de la instrumentación asociada (hoy en día tanto la instrumentación como los controladores son en su mayoría electrónicos)
 - » introducción masiva de computadores en control y supervisión, a los que se suministra información en forma de señal eléctrica
- Rango: 4-20 mA (cero vivo)

Codificación de la información

» Analógica:

- Por amplitud. La variable que se quiere transmitir es una función (normalmente lineal) de la amplitud que se transmite. Poco inmune al ruido
- Por ancho de pulso (PWM - Pulse Width Modulation). La línea transmite una señal de dos valores (alto y bajo). Más inmune al ruido
- Por frecuencia. La frecuencia de la onda es función de la señal que se quiere transmitir. Muy inmune al ruido.

Codificación de la información

» Digital:

- Se traduce la señal a digital (binario)
- Es mucho más inmune al ruido
- Se utilizan códigos para detección de errores en la transmisión (paridad, CRC (codigos cíclicos redundantes), ...)

Calibración de Instrumentos

» Definición:

- Conjunto de operaciones que determinan la relación entre el valor del instrumento de medida y el valor de la variable

» Resultado:

- Ajuste de instrumento
- Factor, tabla o curva de calibración (que permiten corregir la medida del instrumento)
- Certificado (hacia terceros) indicando si el instrumento realiza la medida con la tolerancia especificada

» Realización:

- Mediante instrumento de tipo nulo

Los instrumentos de medida utilizados en control de procesos deben ser calibrados periódicamente y deben tener su hoja de calibración

Clasificación de los instrumentos

» Según su función

- ciegos. No tienen indicación visible de la variable
- indicadores: disponen de índice y escala graduada donde se puede leer el valor medido (también existen digitales)
- registradores: registran a trazo continuo o a puntos la evolución de una variable
- elemento primario: están en contacto con la variable medida
- transmisores: transmiten a distancia la variable captada por el elemento primario (generalmente en forma electrónica)
- transductor: traducen la magnitud de entrada en la de salida
- receptores: indican o registran la señal que reciben de los transmisores
- elemento final de control: recibe la señal de control y actúa sobre el proceso

Clasificación de los instrumentos

» Según la variable medida

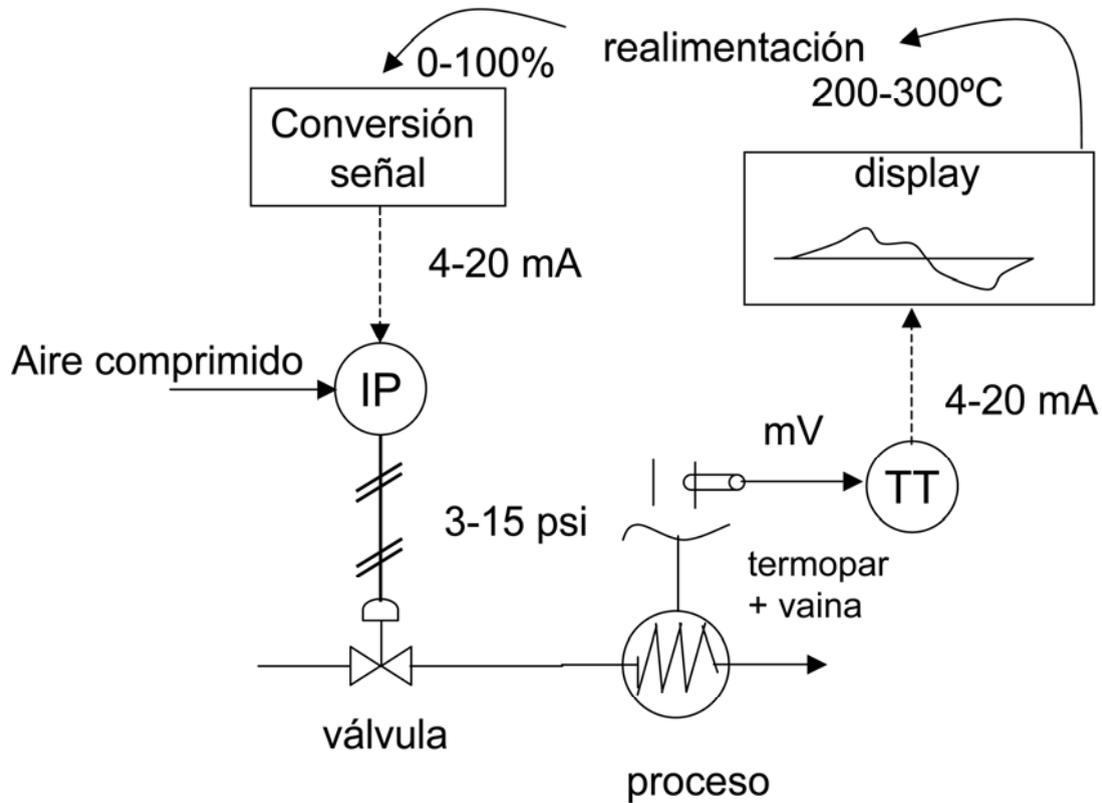
MAGNITUD DETECTADA	TRANSDUCTOR	CARACTERÍSTICAS
Posición lineal o angular	Potenciómetro	Analógico
	Encoders	Digital
Pequeños desplazamientos o deformaciones	Transformador diferencial	Analógico
	Galga extensiométrica	Analógico
Velocidad lineal o angular	Dinamo tacométrica	Analógico
	Encoders	Digital
	Detector inductivo u óptico	Digitales
Aceleración	Acelerómetro	Analógico
Fuerza y par	Medición indirecta (galgas)	Analógicos
Presión	Membrana + detector despl.	Analógicos
	Piezoeléctricos	Analógicos
Caudal	De turbina	Analógico
	Magnético	Analógico

Clasificación de los instrumentos

» Según la variable medida

MAGNITUD DETECTADA	TRANSDUCTOR	CARACTERÍSTICAS
Temperatura	Termopar	Analógico
	Resistencia PT100	Analógico
	Resistencias NTC	Analógico
	Resistencia PTC	Todo-nada
	Bimetálicos	Todo-nada
Sensores de presencia o proximidad	Inductivos	Todo-nada. Analógicos
	Capacitivos	Todo-nada
	Ópticos	Todo-nada. Analógicos
	Ultrasónicos	Analógicos
Sensores táctiles	Matriz de contactos	Todo-nada
	Matriz capacitiva u óptica	Todo-nada
Sistemas de visión artificial	Cámara de vídeo y tratamiento de imagen	Procesamiento digital por puntos o pixels
	Cámaras CCD	

Elementos del Bucle de Control (Instrumentación y Proceso)



Elementos del Bucle de Control (Instrumentación y Proceso)

- » Los elementos del bucle pueden afectar al comportamiento del bucle de control
- » A continuación se introducen los bloques de un bucle de control de temperatura y se da información cuantitativa de su dinámica
- » Esto permite llegar al diagrama de bloques analizando cuál de ellos aporta dinámica
 - Señal de realimentación (salida controlador/operador) rango: 0-100% (normalmente)
 - » Transmisión:
 - Electrónica (4-20 mA) distancias largas (hasta 1,5 km). Transmisión instantánea
 - Neumática (3-15 psi) distancias cortas (hasta 400 m si no se refuerza). La transmisión puede necesitar varios s

Elementos del Bucle de Control (Instrumentación y Proceso)

- » Ajuste del elemento final de control. La salida del controlador (operador) rango 0-100% se envía al elemento final de control. Generalmente es una válvula
 - Motor eléctrico. No es habitual (por peligro de explosión)
 - Normalmente se utiliza aire comprimido
 - » Es necesario convertir la señal eléctrica a neumática. Proceso rápido y preciso
 - » La señal neumática se transmite a corta distancia a la válvula de control
 - » Las válvulas de control responden relativamente rápido (constantes de tiempo de 1 a 4 s)

Elementos del Bucle de Control (Instrumentación y Proceso)

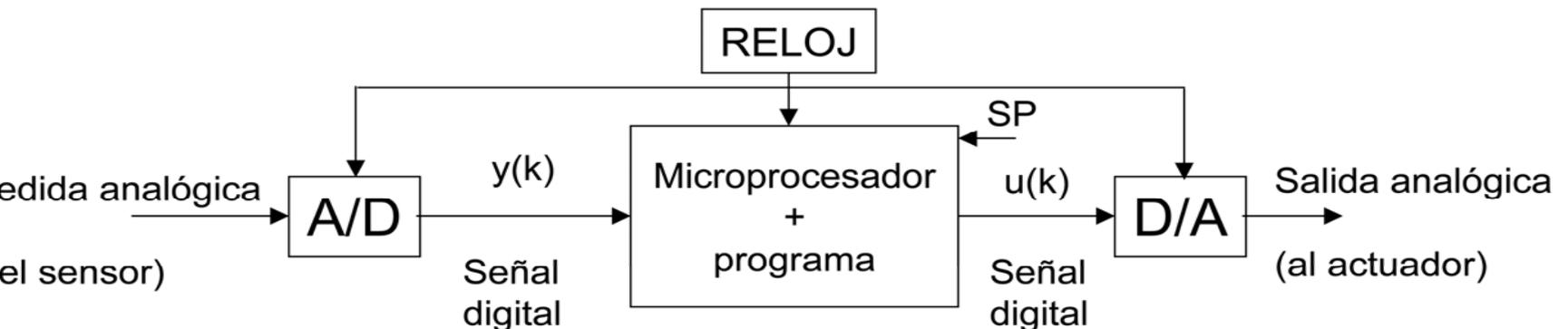
- » El proceso responde al cambio. La dinámica del proceso varía dependiendo del equipamiento en la industria de proceso. Viene definida por:
 - Tiempo muerto. Tiempo en que el proceso comienza a responder a un cambio a su entrada
 - Constante de tiempo. Tiempo en que la respuesta alcanza el 63% de su valor final
 - Estos tiempos pueden variar de pocos segundos (o menos) a horas
- » Cuando el proceso es (con diferencia) el elemento más lento del bucle de control, la dinámica del resto de elementos se puede despreciar
 - Esta situación es muy común pero no siempre se cumple

Elementos del Bucle de Control (Instrumentación y Proceso)

- » Medida de la variable controlada. Normalmente los sensores no están en contacto directo con el material de proceso. El equipamiento que lo protege debe ser incluido en la dinámica.
 - Por ejemplo, un termopar responde rápidamente a cambios en T, pero la vaina que lo protege puede tener constantes de tiempo de 5 a 20 s.
 - La mayoría de los sensores de caudal, presión y nivel tienen constantes de tiempo de segundos.
 - Los analizadores (realizan análisis físico-químicos complejos) tienen respuestas mucho más lentas, de 5 a 30 m (o mayores).
- » Transmisión de la señal medida. Se transmite al controlador (que puede estar localizado en una sala de control remoto).
 - Transmisión eléctrica (4-20 mA) o neumática (3-15 psi)

Elementos del Bucle de Control (Instrumentación y Proceso)

- » Controlador. Recibe la señal y la procesa de acuerdo al algoritmo de control que implementa.
- Analógico. Recibe señales analógicas, las procesa y genera la señal de control. Su respuesta se puede considerar instantánea
 - Digital. Están equipados con convertidores A/D y D/A que los capacitan para entender, procesar y generar señales analógicas. Su respuesta se puede considerar instantánea



» **Bibliografía:**

- P. Ollero, E. F. Camacho. Control e instrumentación de procesos químicos. Ed Síntesis (1997). Capítulo 15
- Process Control. T.E. Marlin. Ed. Me Graw Hill (1995). pp. 234-239
- D. Orive. Transparencias Tema 13: Instrumentación. Automatización de Procesos Industriales.
- Rafael Gonzalez-Martin. Transparencias de Instrumentación. Dpto. Control Avanzado. PETRONOR S.A.
- César de Prada. Universidad de Valladolid. Transparencias de Instrumentación.