



---

# Instrumentación para Control de Procesos

Prof. Cesar de Prada

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática

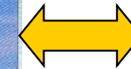
EII, Sede Mergelina

Universidad de Valladolid

[prada@autom.uva.es](mailto:prada@autom.uva.es)



El control de procesos trata de mantener, mediante un sistema automático, las principales variables de un proceso en valores próximos a los deseados a pesar de las posibles perturbaciones.



Sala de control

Control room



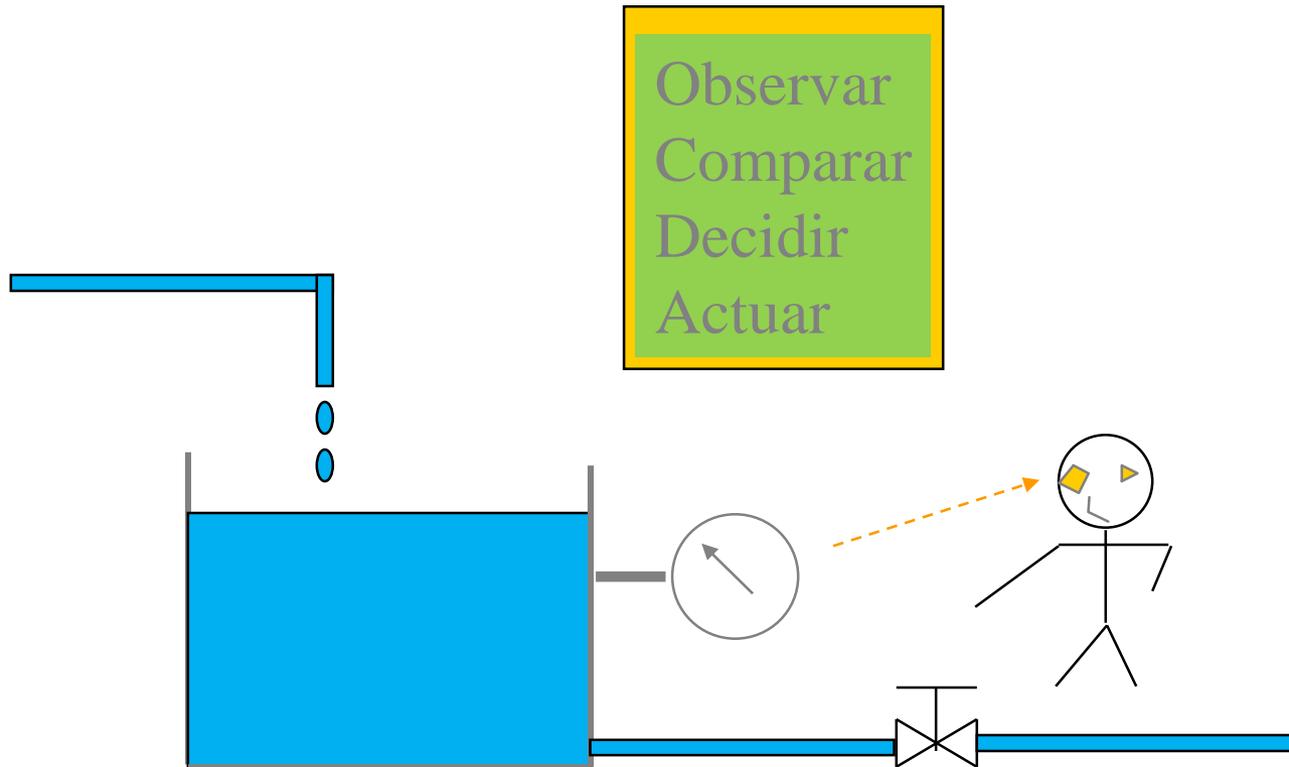
# Introducción

---

- ✓ ¿Como gobernar un proceso de forma automática?
- ✓ Nociones básicas de Control
- ✓ Nociones básicas de Instrumentación



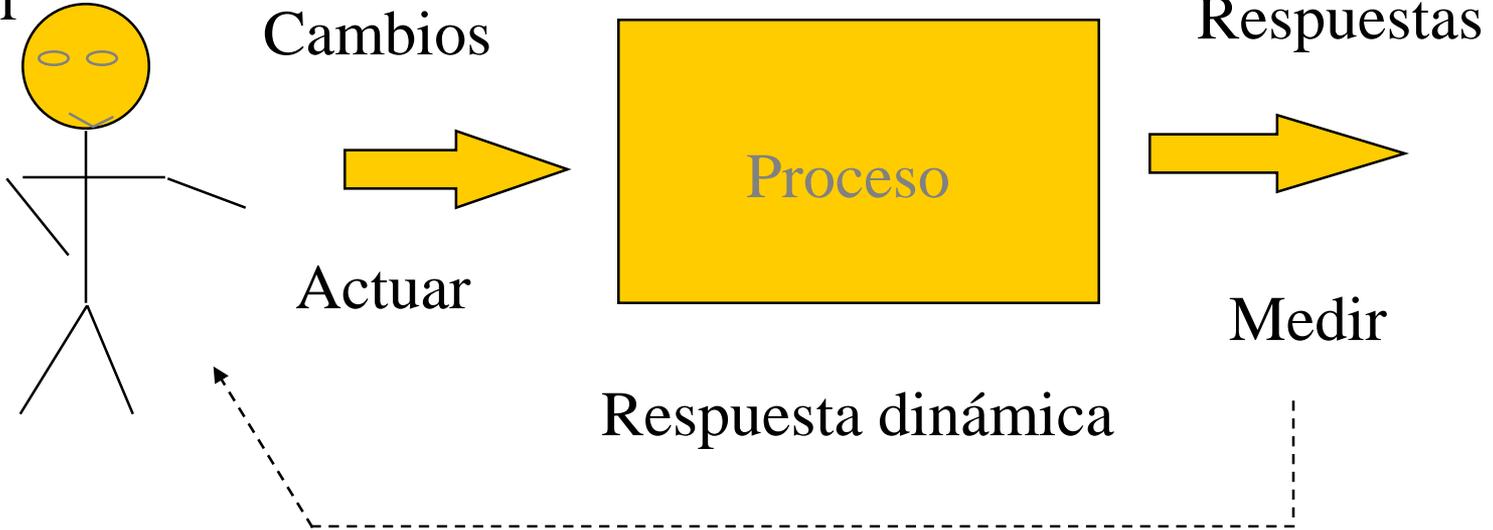
# Operación manual de un proceso





# Operación de un proceso

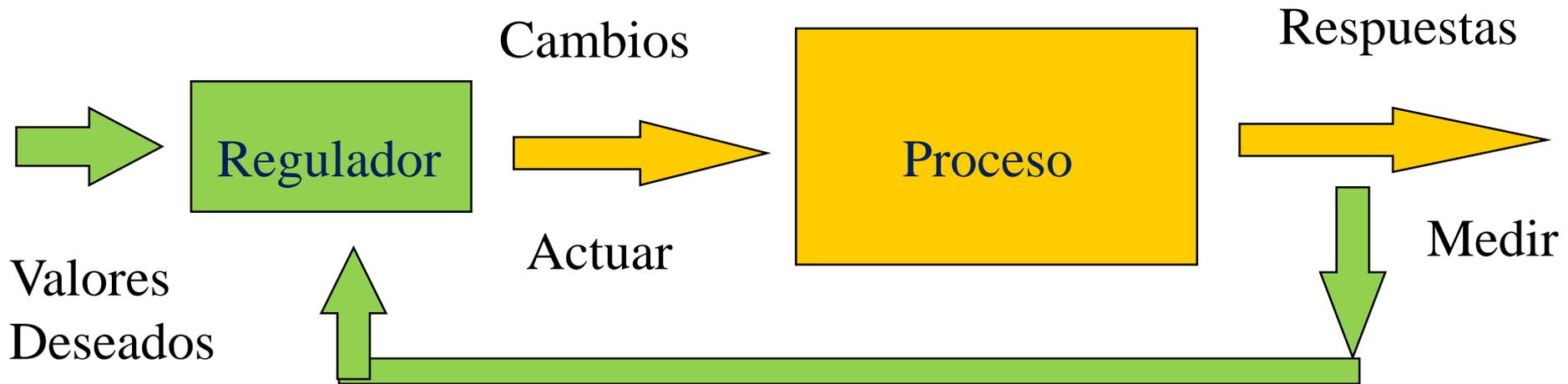
Comparar  
Decidir



Operación manual o en lazo abierto



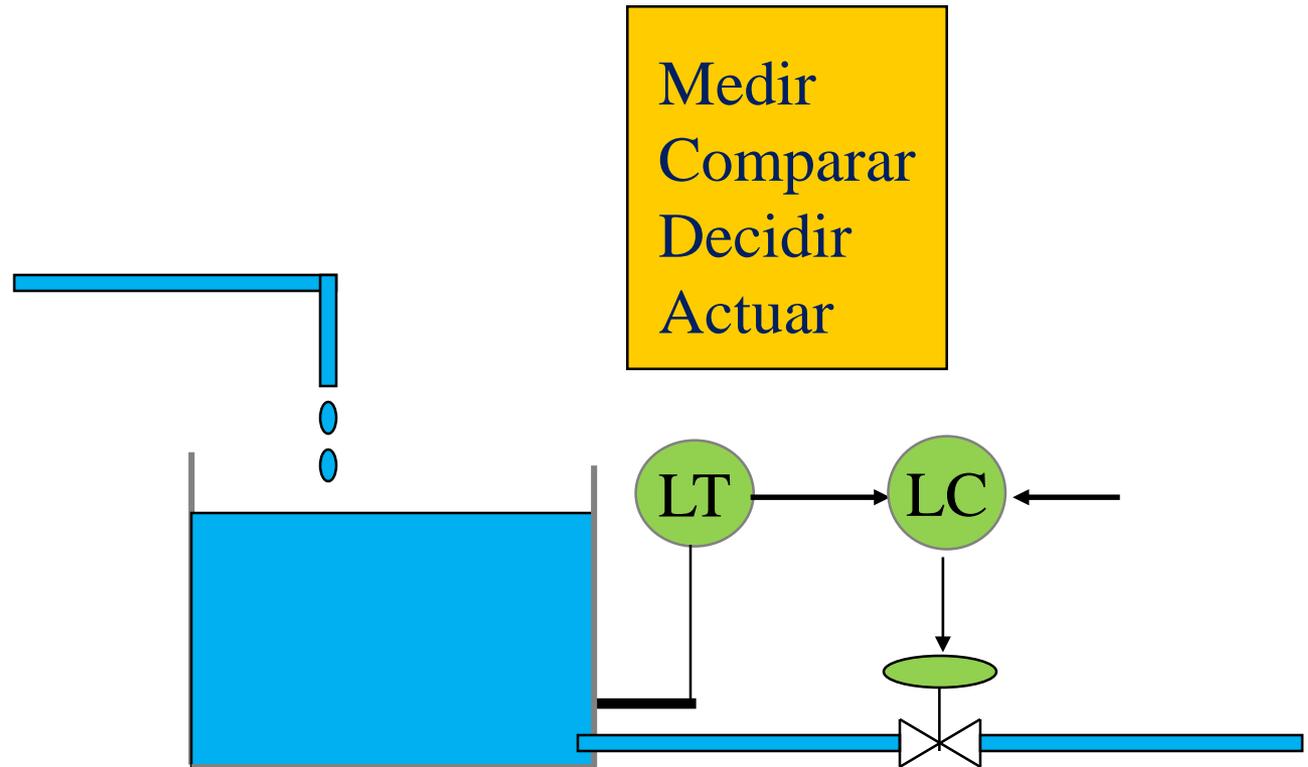
# Operación automática



Operación en lazo cerrado

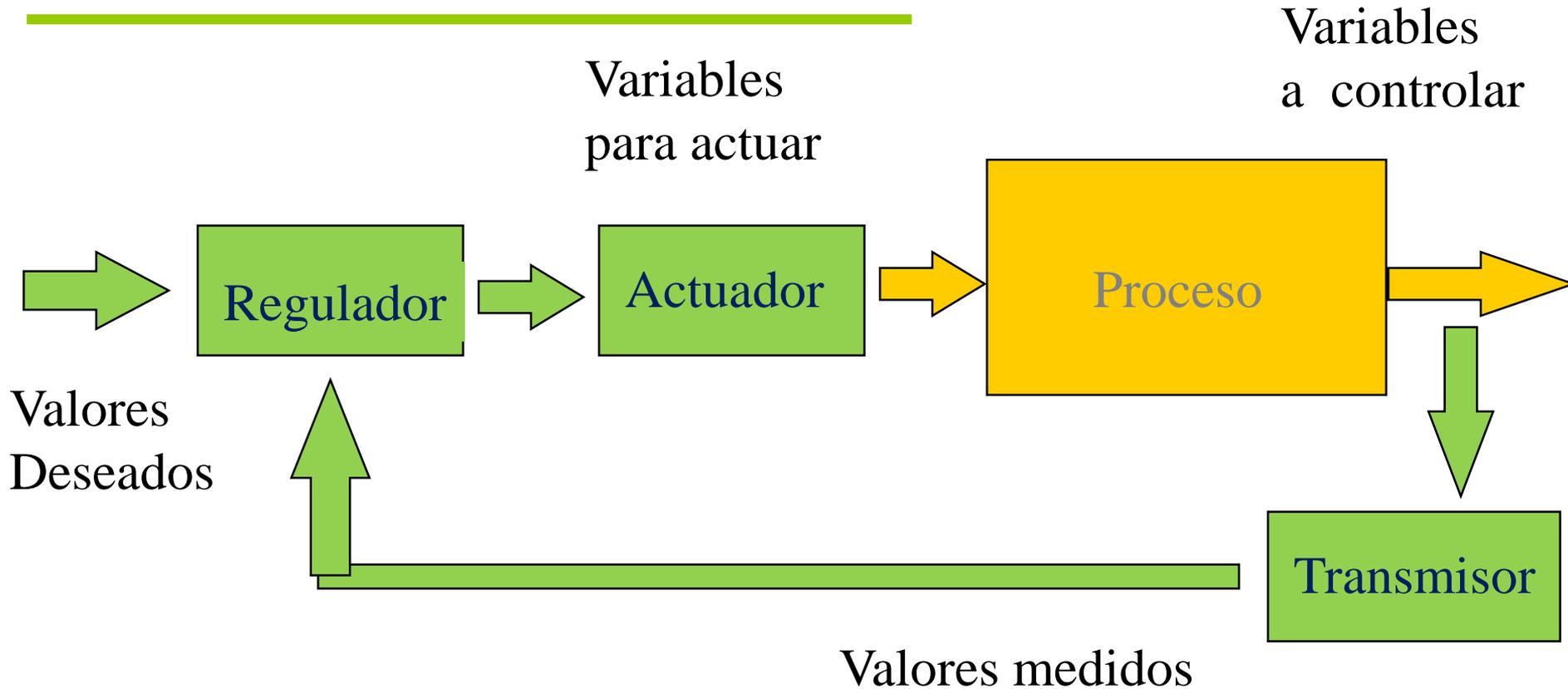


# Operación Automática



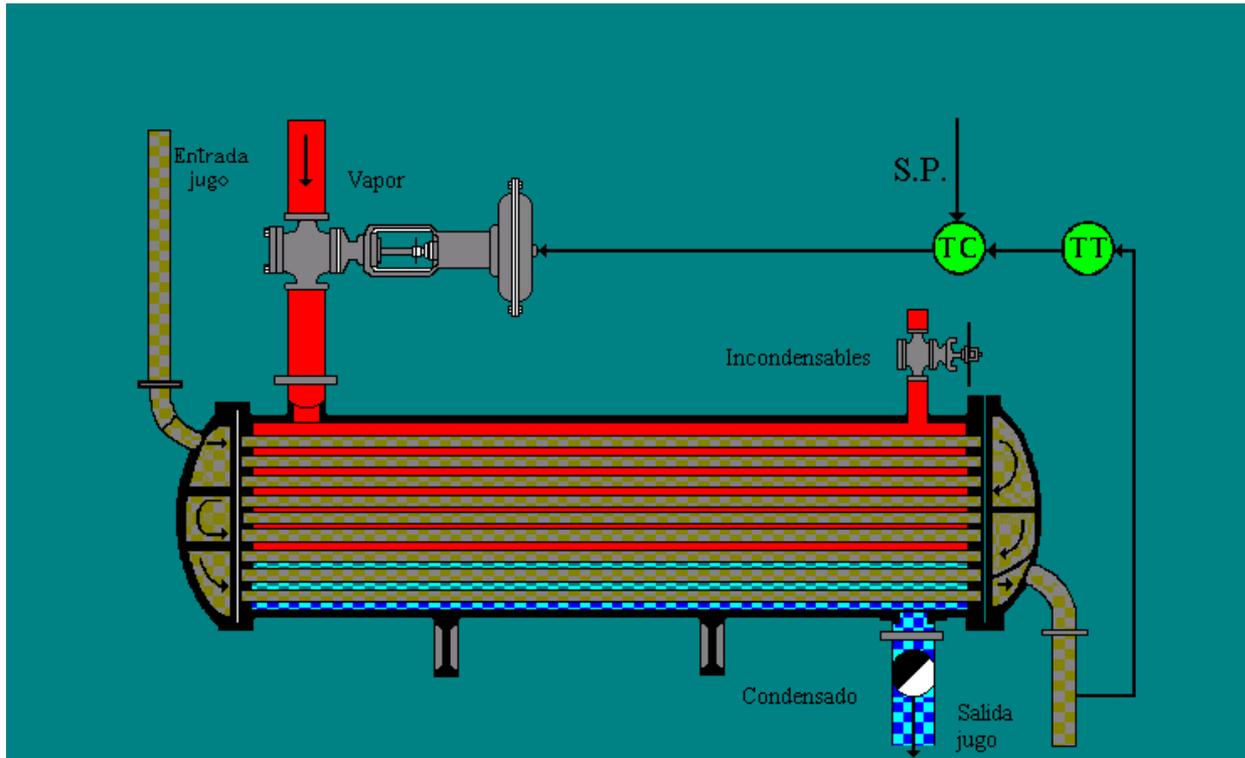


# Componentes





# Control de temperatura



Medir  
Comparar  
Decidir  
Actuar



# Indice

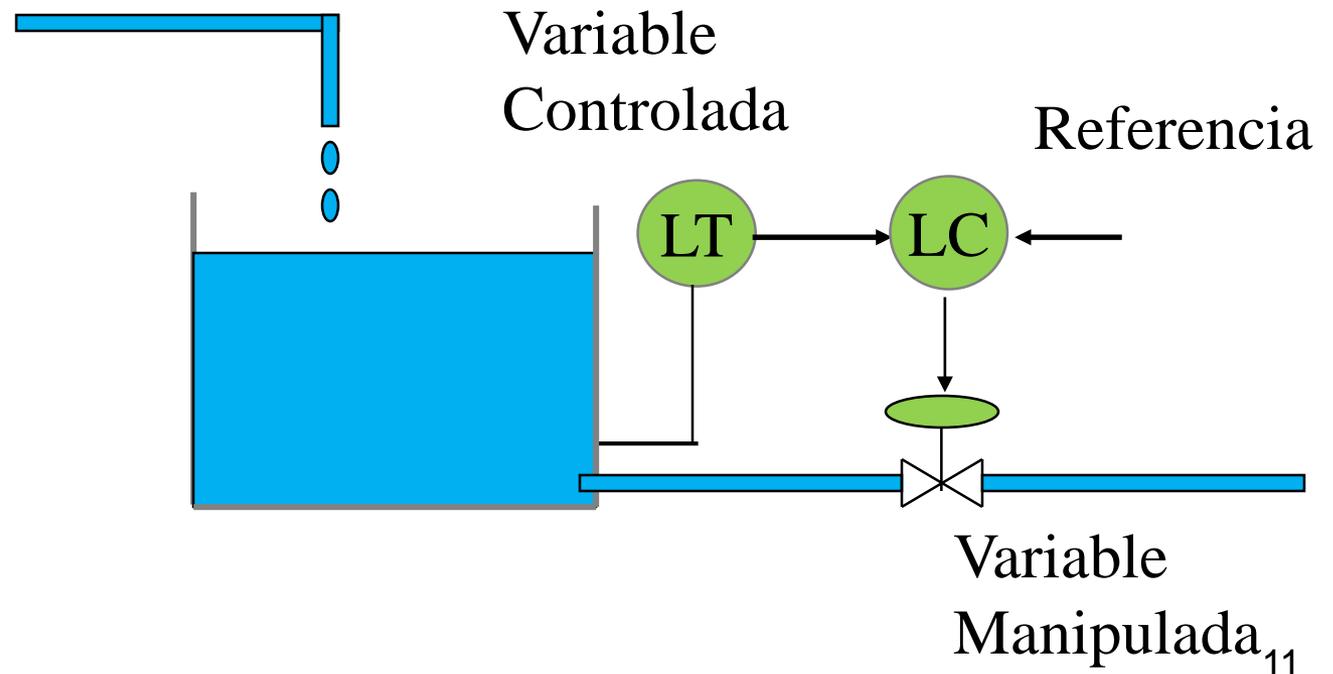
---

- ✓ Sistemas de Control: Terminología
- ✓ Control Continuo / Discreto
- ✓ Transmisores
  - Definiciones y tipos
  - Nivel, Presión, Caudal, Temperatura...
- ✓ Actuadores:
  - Válvulas
  - Bombas y Compresores
- ✓ Dinámica de sistemas



# Terminología

Perturbación





Variable manipulada  
Manipulated Variable MV  
Output to Process OP  
Entrada (al proceso)

Perturbaciones  
Deviation Variables DV

Referencia  
Consigna

$w$   
Set Point SP

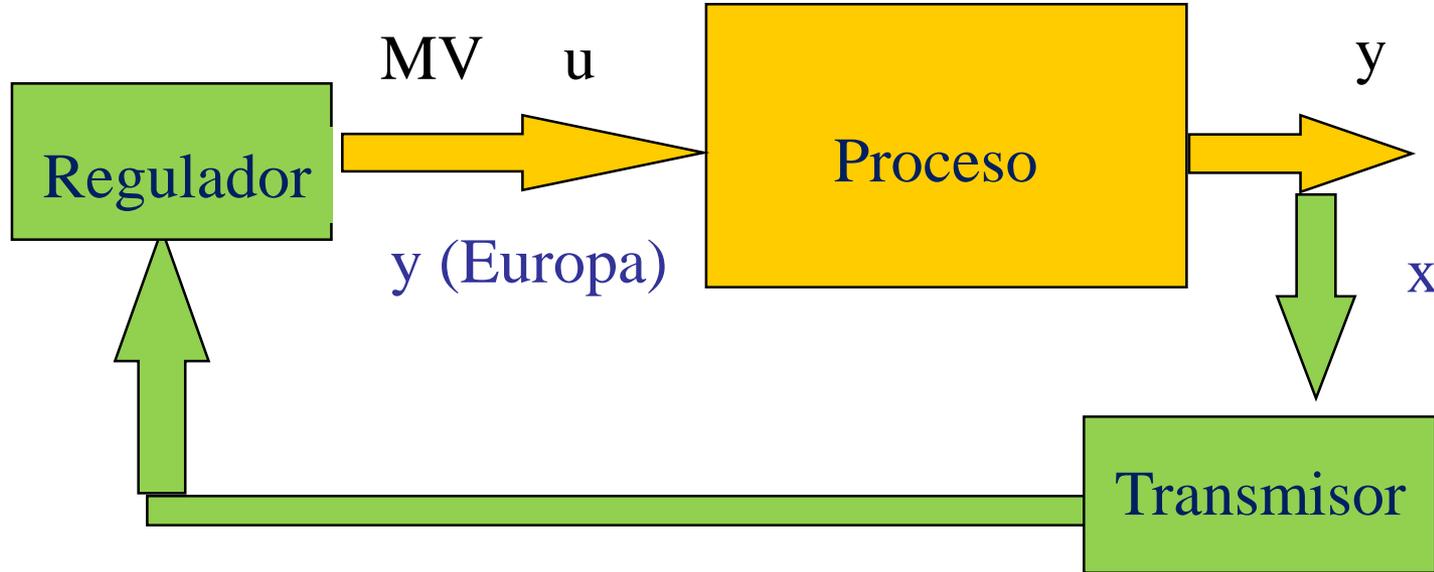


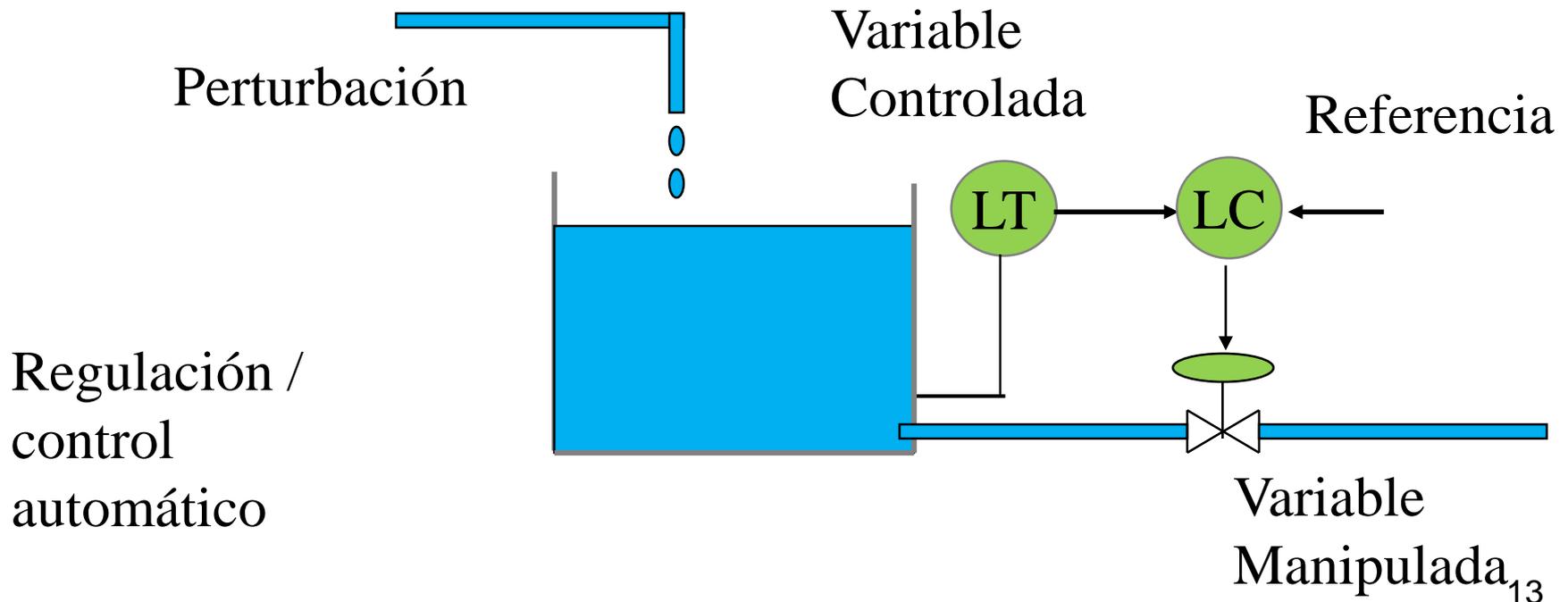
Diagrama de bloques

Variable Controlada  
Controlled Variable CV  
Process Variable PV  
Salida (del proceso)



# Control Continuo

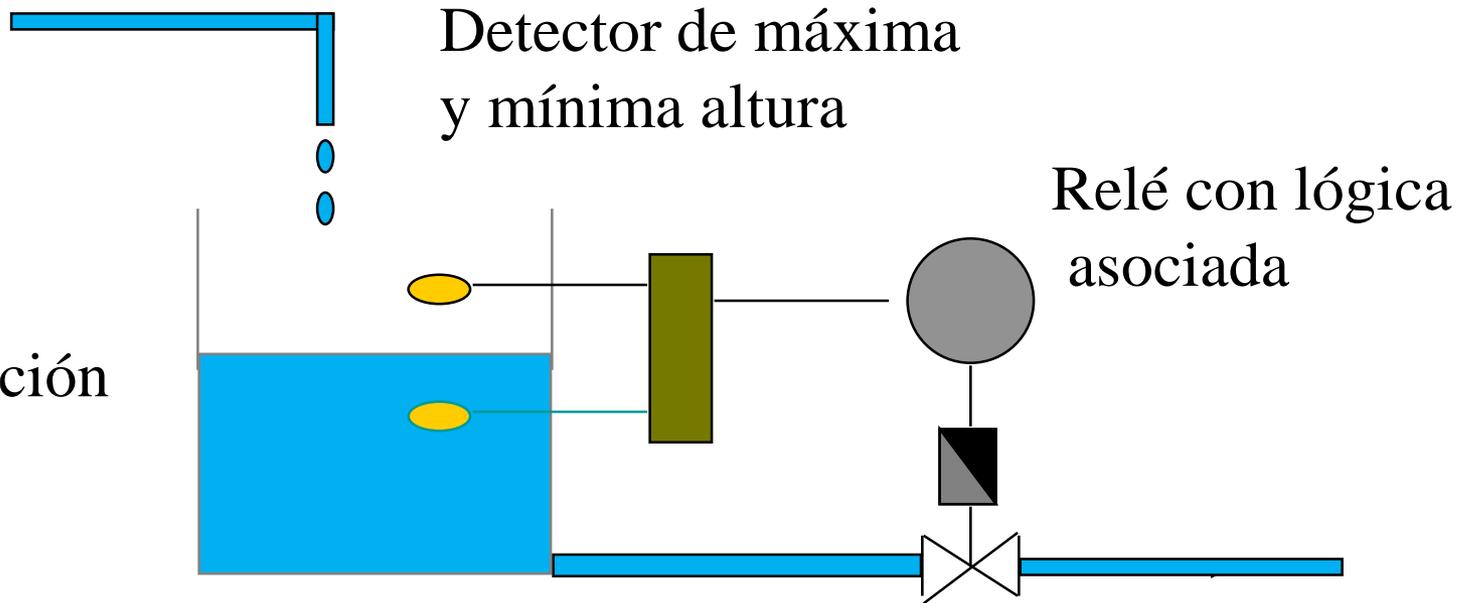
La variable controlada, toma valores en un rango continuo, se mide y se actúa continuamente sobre un rango de valores del actuador





# Control discreto

Alarmas  
Secuencias  
Automatización



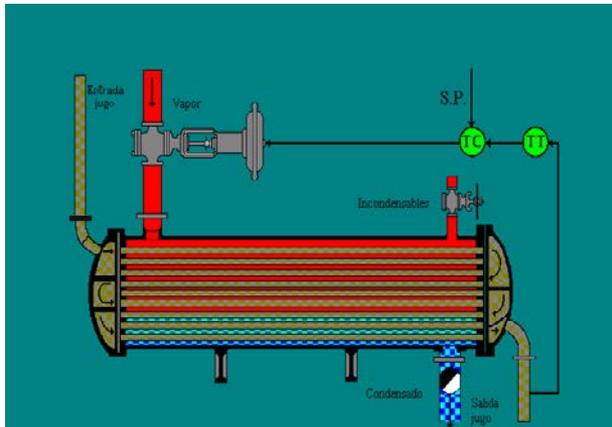
Las variables solo admiten un conjunto de estados finitos

Instrumentación más sencilla y barata

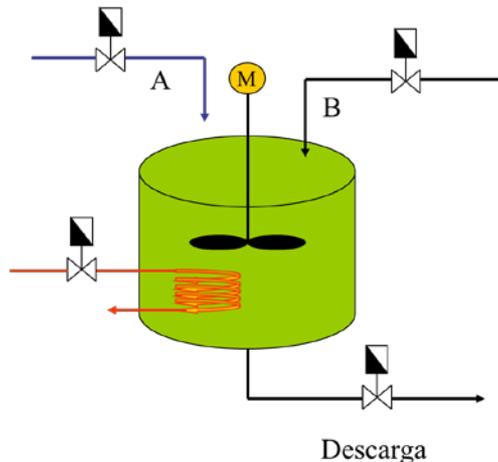
Electroválvula  
ON/OFF



# Procesos continuos / por lotes



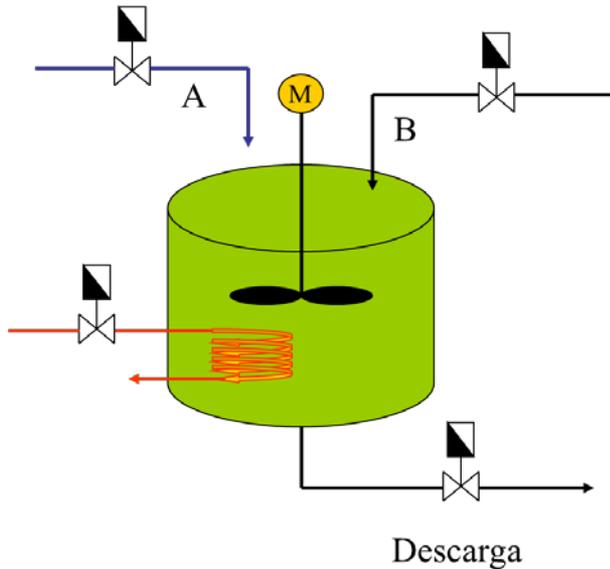
Hay un flujo continuo de materiales entrando a la unidad, donde son procesados, y con un flujo continuo de productos saliendo de la misma



Hay una carga inicial de materiales que se procesan en la misma durante un tiempo siguiendo una receta, descargándose los productos al final de la misma



# Procesos por lotes (batch)



Diagramas de escalera  
Grafcet

Autómatas programables

Sucesión de etapas  
de operación con  
acciones específicas  
y condiciones de  
transición entre ellas

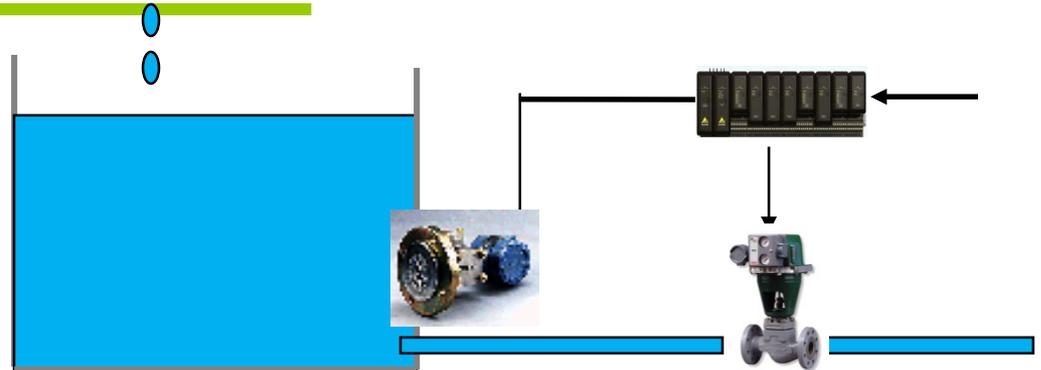
- 1 Espera
- 2 Carga
- 3 Operación
- 4 Descarga

Procesos batch y semi-batch



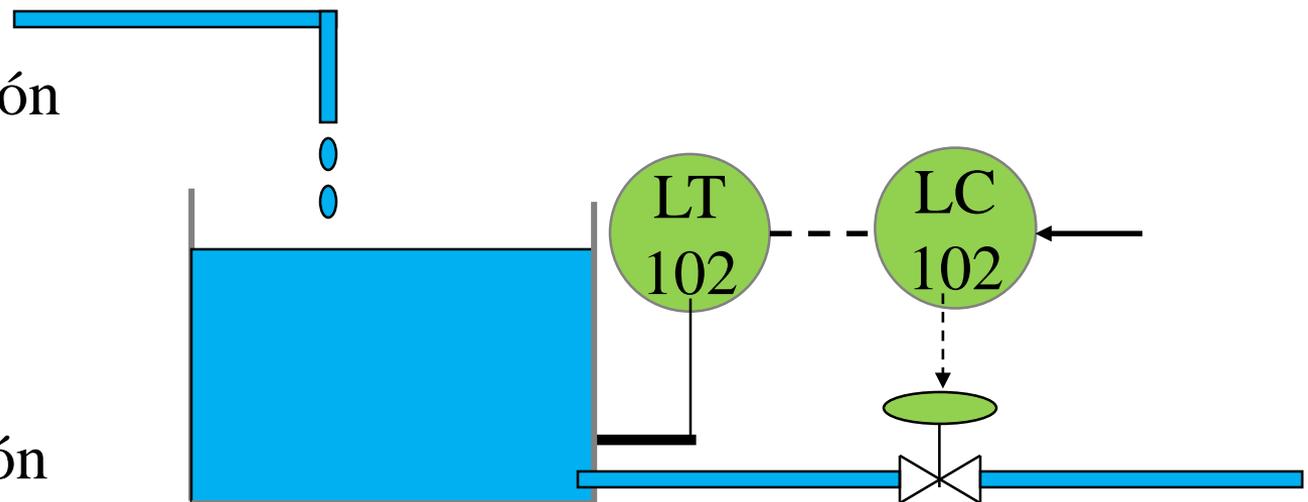
# Diagramas de proceso P&I

Unidades de proceso  
y actuadores  
representados con  
símbolos especiales



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

Lineas de conexión





# Instrumentos

---

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

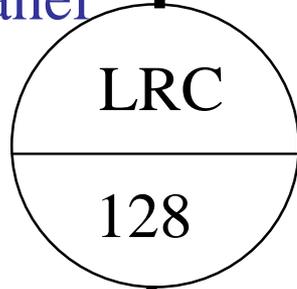
Conectados por líneas de transmisión:

- Neumáticas
- Eléctricas
- Digitales



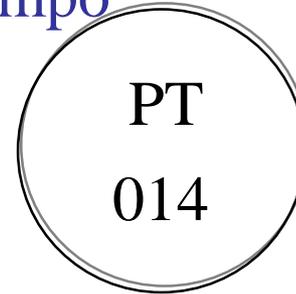
# Instrumentos

Montaje en panel



Señal eléctrica

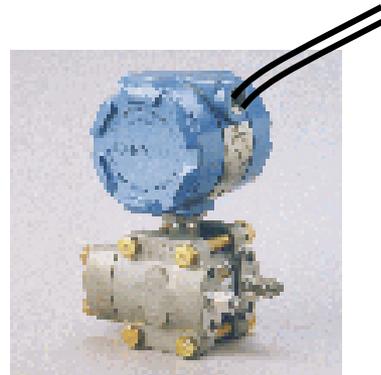
Montaje en campo



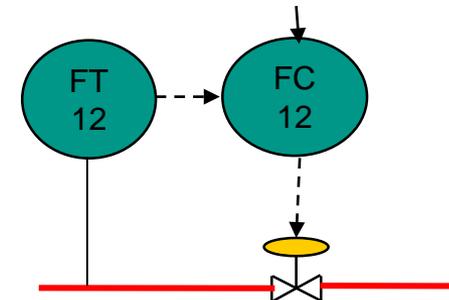
Señal neumática



Conexión al proceso  
o alimentación

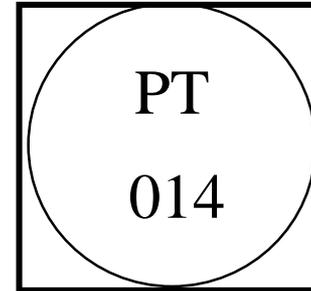
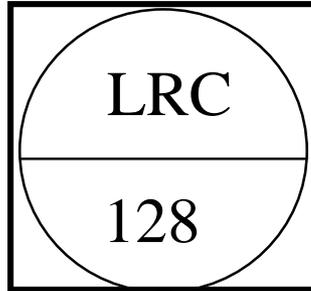


El número es el mismo en todos los instrumentos de un mismo lazo de regulación





# Instrumentos digitales



Comparte varias funciones:  
display, control, etc.

Configurable por software

Acceso por red

Accesible al operario —

Normalmente no  
accesible al operario

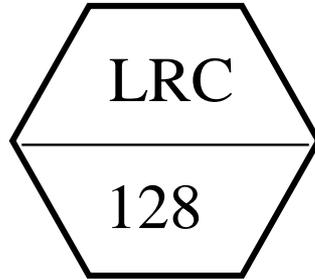
Controlador de DCS,  
regulador por  
microprocesador,...

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

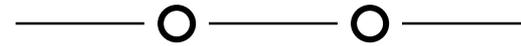


# Instrumentos digitales

---



Computador  
Distinto del controlador  
de un DCS  
Varias funciones: DDC,  
registro, alarmas, etc.  
Acceso por red



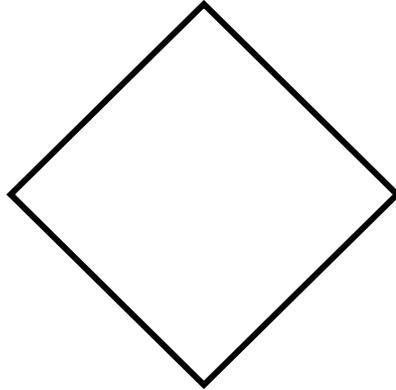
Conexión software  
o por red digital



Fibra óptica



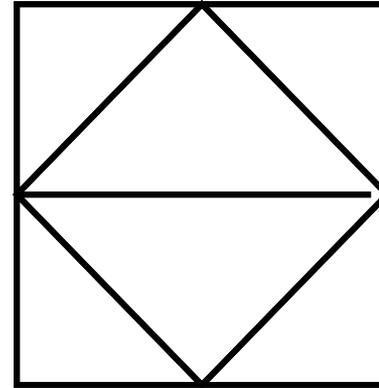
# Instrumentos digitales



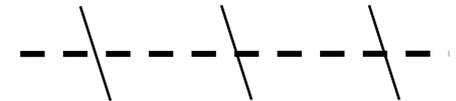
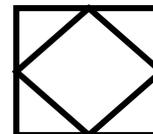
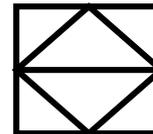
Control lógico o  
secuencial

Accesible al operario

No accesible al operario



PLC o secuencias/  
lógica de un DCS



Señal eléctrica  
binaria



# 1ª letra



1ª letra:

2ª letra:

variable medida o relacionada

puede cualificar a la primera

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

3ª y sig:

X, Y, Z

D	diferencial	E	elemento
F	relación		
S	seguridad		
Q	integración		
X, Y, Z	posición		
K	velocidad de cambio		
<b>Función del Instrumento</b>			
I	indicador		
R	registro		
C	control		
T	transmisor		
V	válvula		
Y	cálcu <b>l</b> o, aparato auxiliar		
H	alto		
L	bajo	M	medio



# Instrumentos

---

PDT

LRC

PIC

DT

FY

FFC

ST

TDT



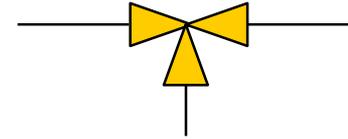
# Actuadores



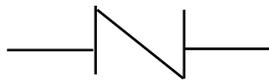
Válvula genérica  
(on –off, abierta)



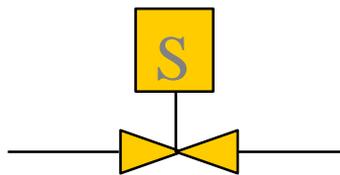
Válvula genérica  
(on –off, cerrada)



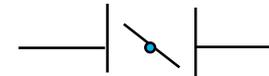
Válvula genérica  
de tres vías



Válvula  
de  
Retención



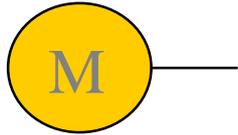
Válvula con  
actuador de  
soleniodes (on –off)



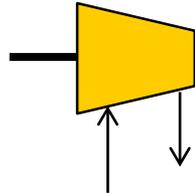
Válvula  
de  
mariposa



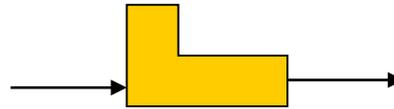
# Actuadores



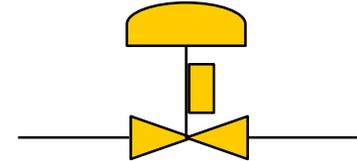
Motor



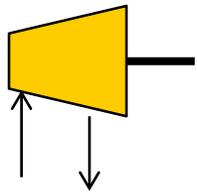
Compresor  
centrífugo



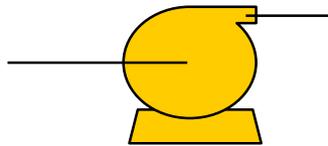
Compresor  
alternativo



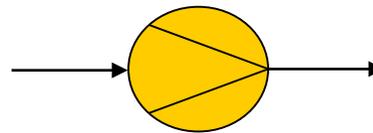
Válvula de control  
con posicionador



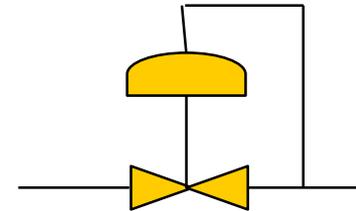
Turbina



Bomba  
centrífuga



Bomba

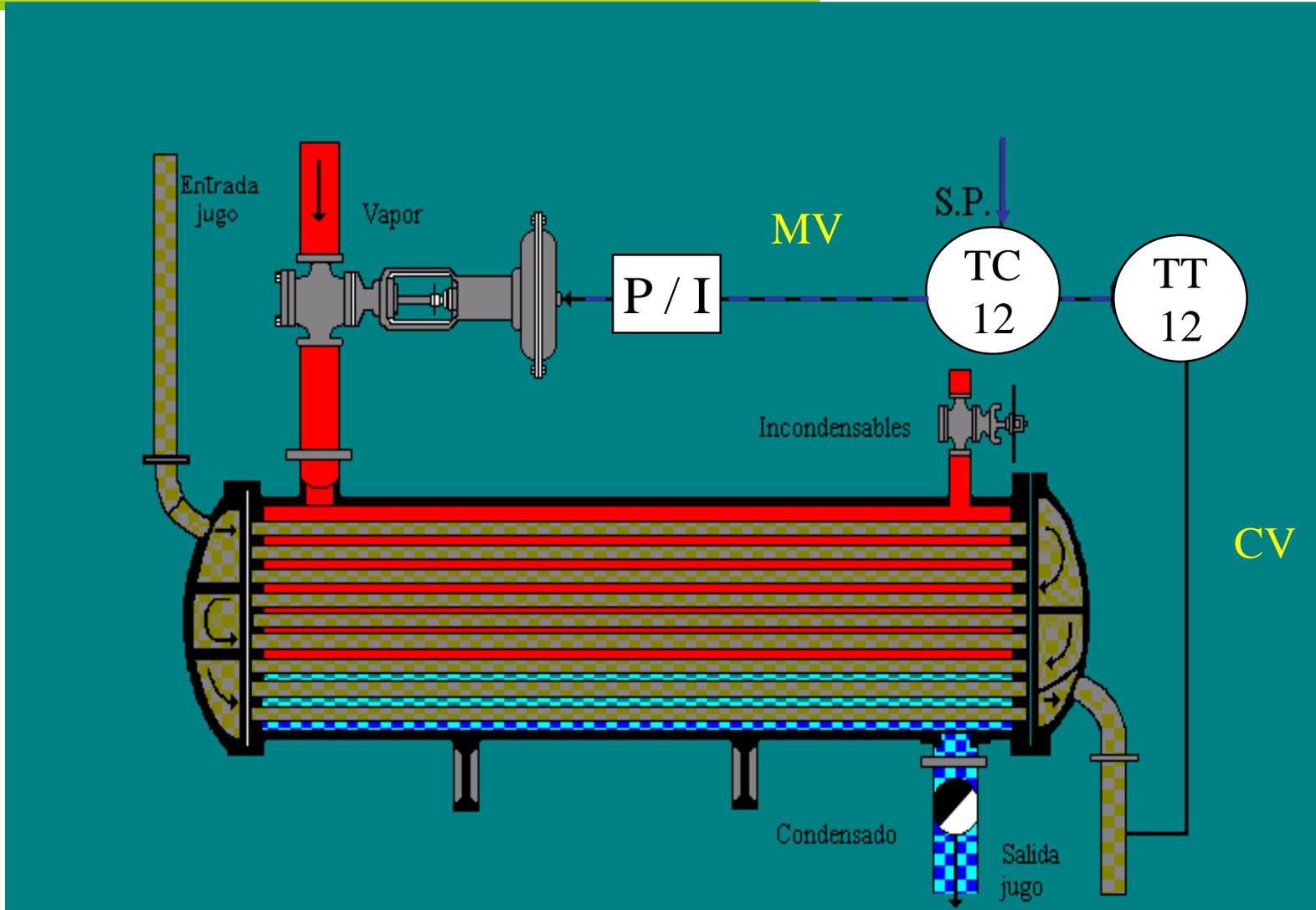


Con regulación de  
presión



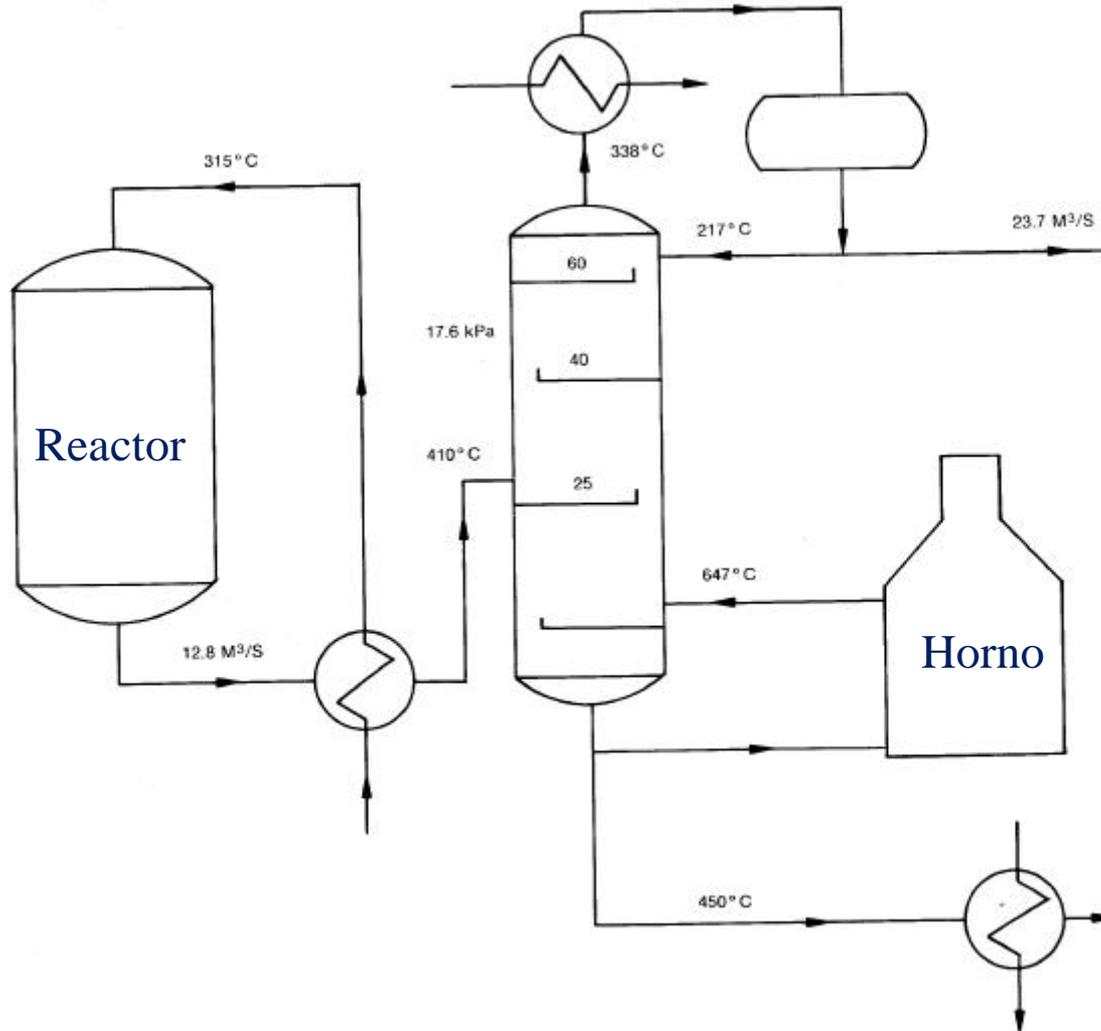
# Intercambiador de calor

DV



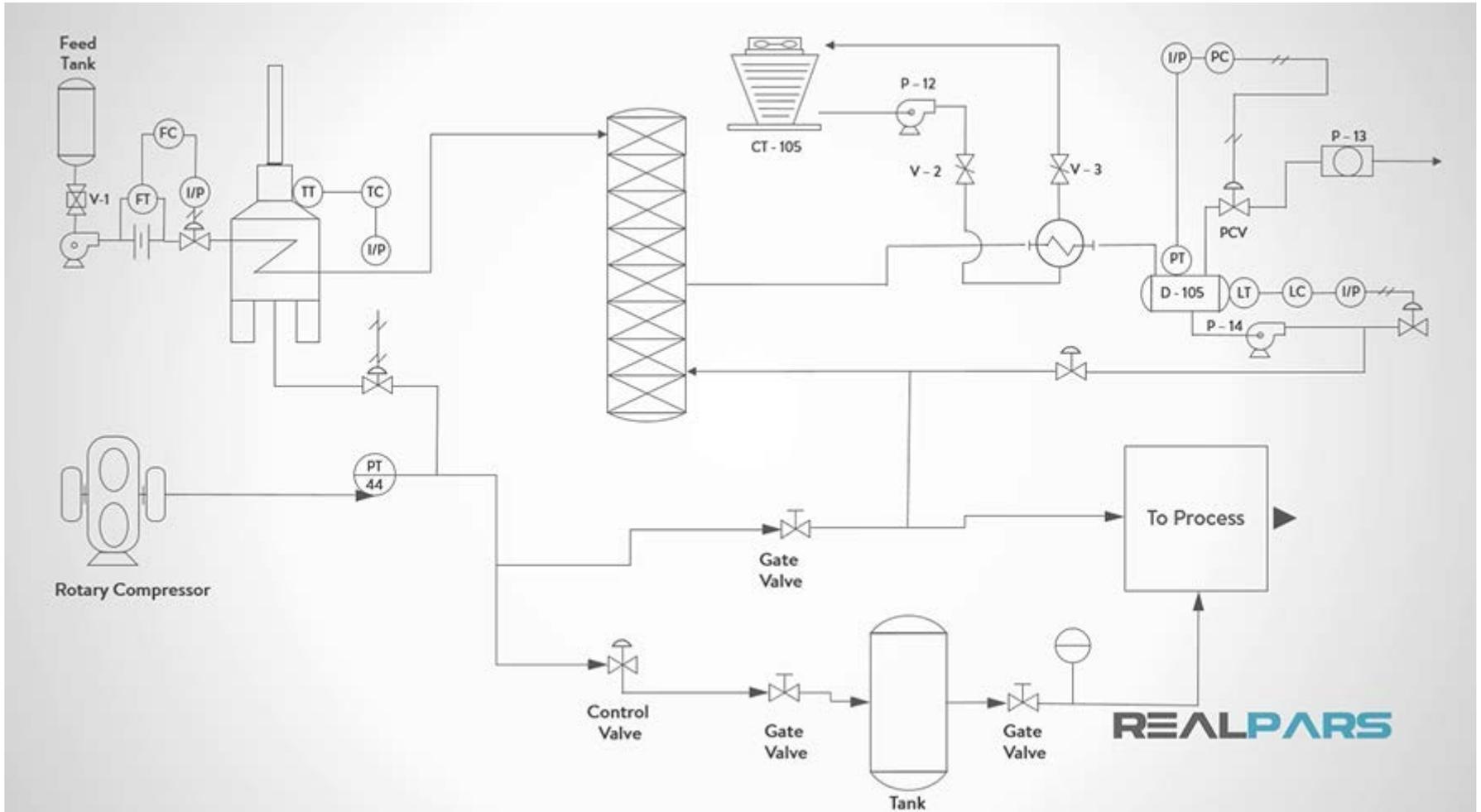


# Ejemplo





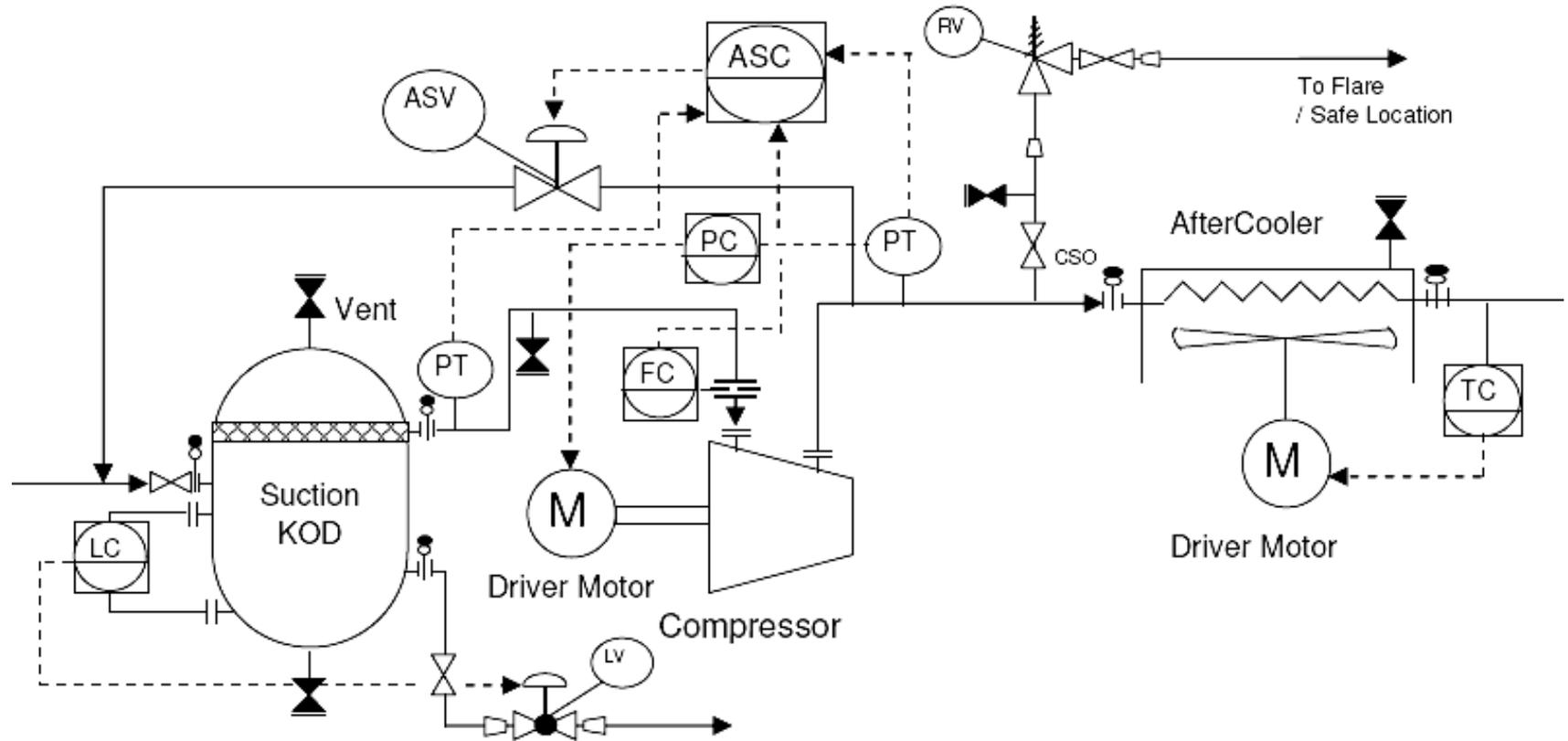
# Ejemplo







# Ejemplo



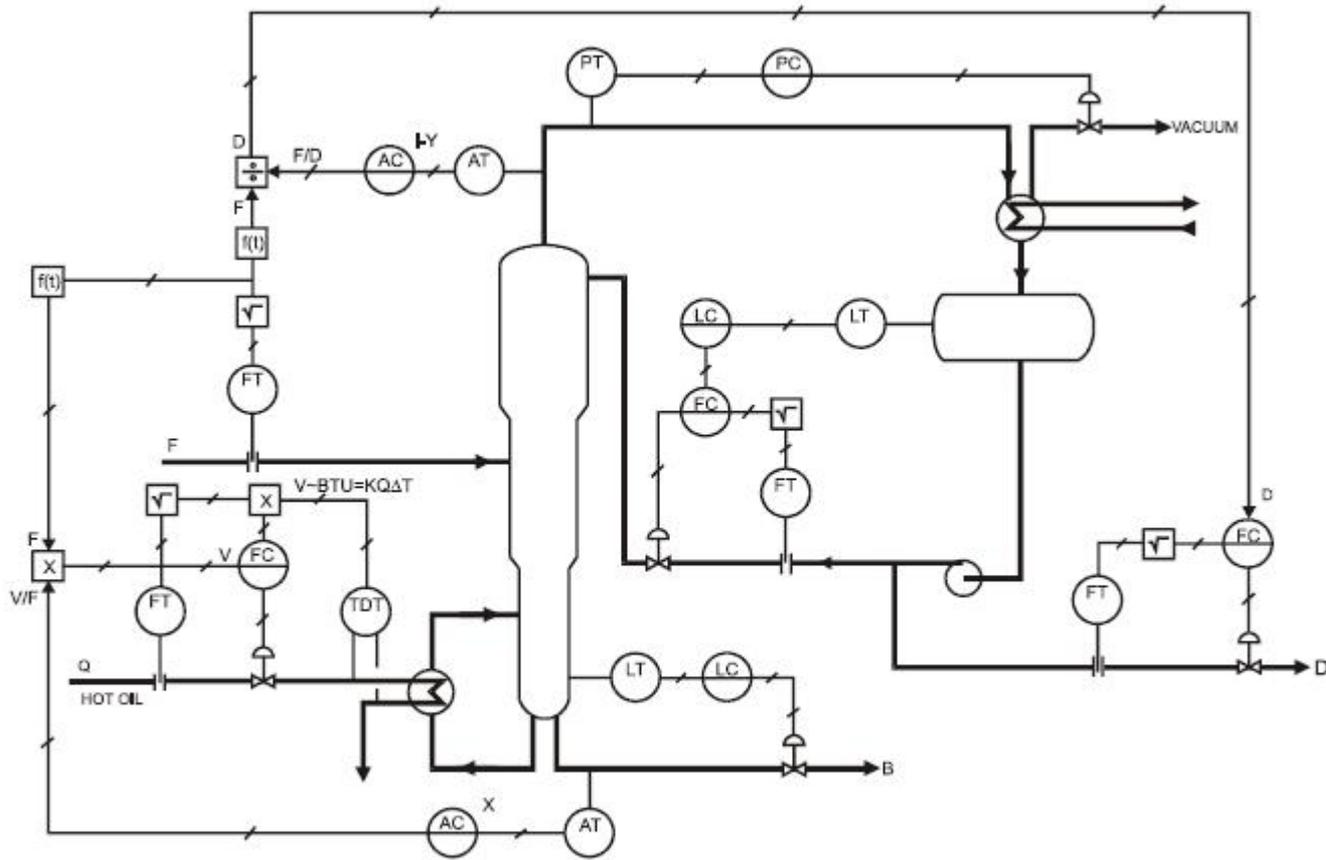
ASC : Anti Surge Controller  
ASV : Anti Surge Valve

TC : Temperature Controller  
PC : Pressure Controller

FC : Flow Controller  
LC : Level Controller



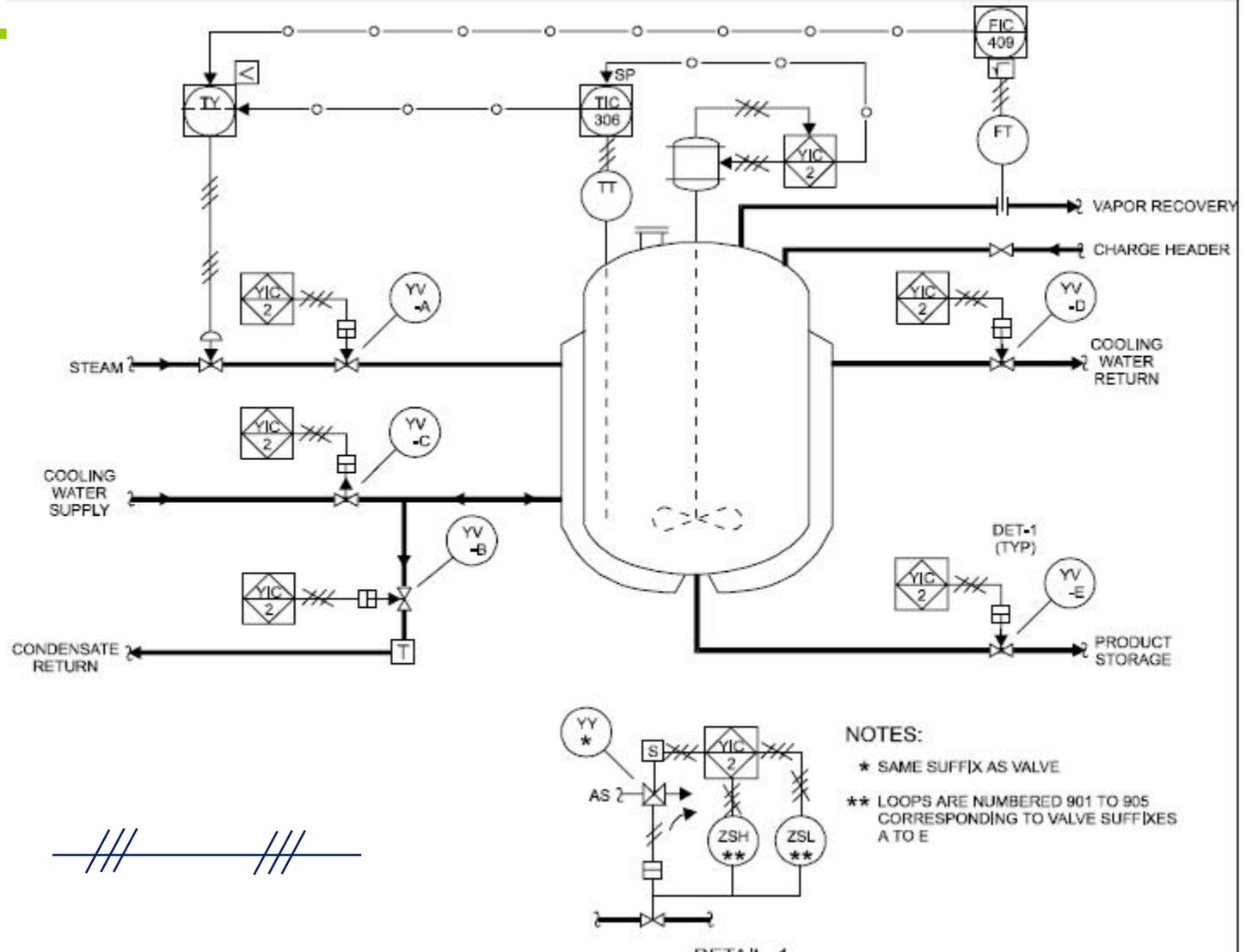
# Ejemplo



Functionally oriented symbolism and abbreviated identification used to develop control concepts without concern for specific hardware.



# Ejemplo





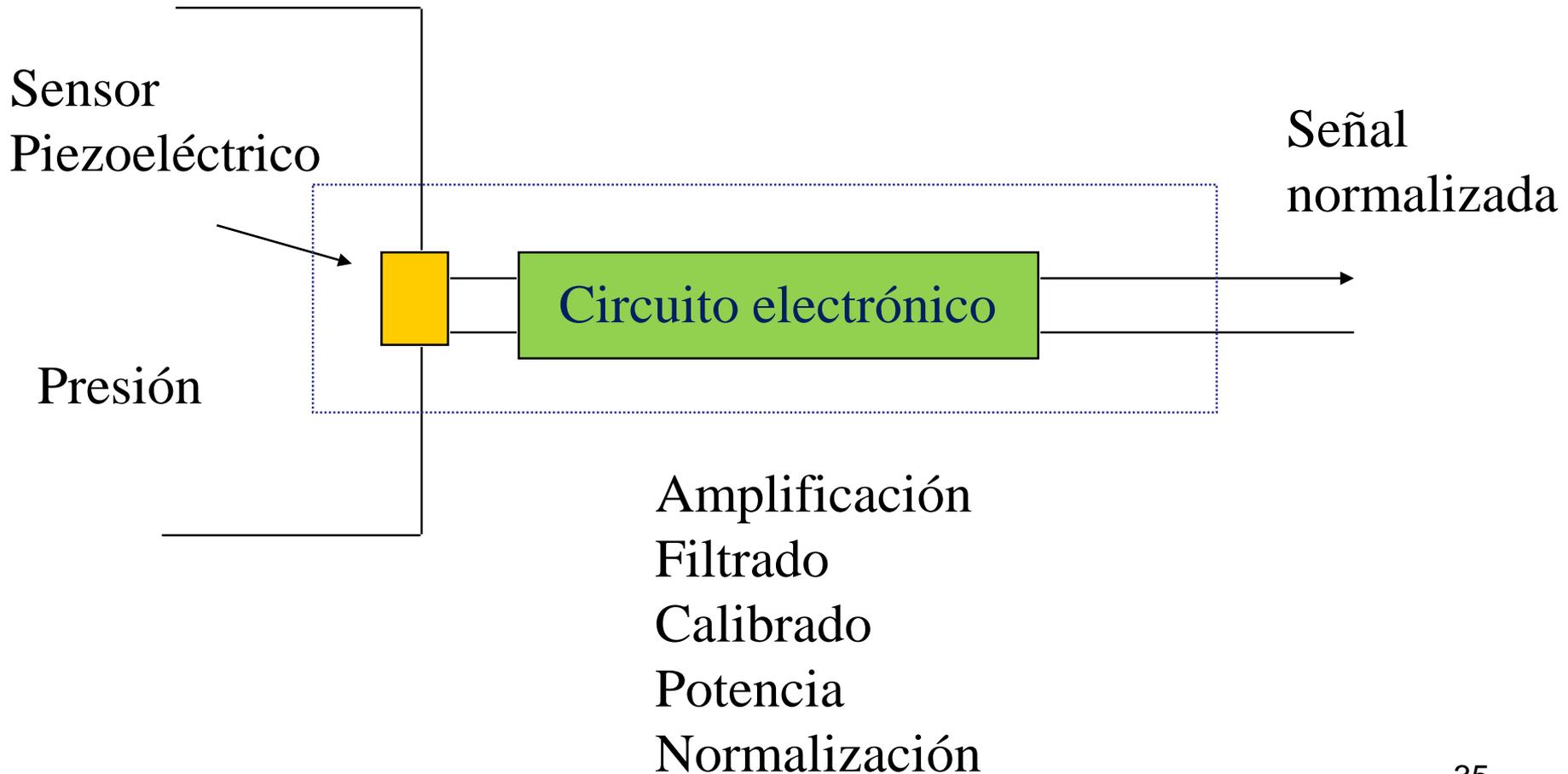
# Transmisores

---

- ✓ Sensor: Elemento primario sensible a una propiedad física relacionada con la variable que se quiere medir.
- ✓ Transmisor: Sistema unido al sensor que convierte, acondiciona y normaliza su señal para transmitirla a distancia.
- ✓ Indicador: Combina un sensor y un sistema de medida analógica o digital.



# Transmisor de presión





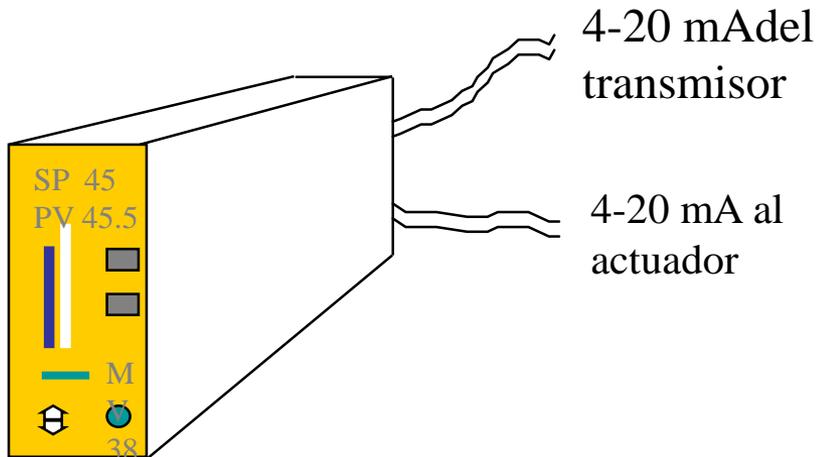
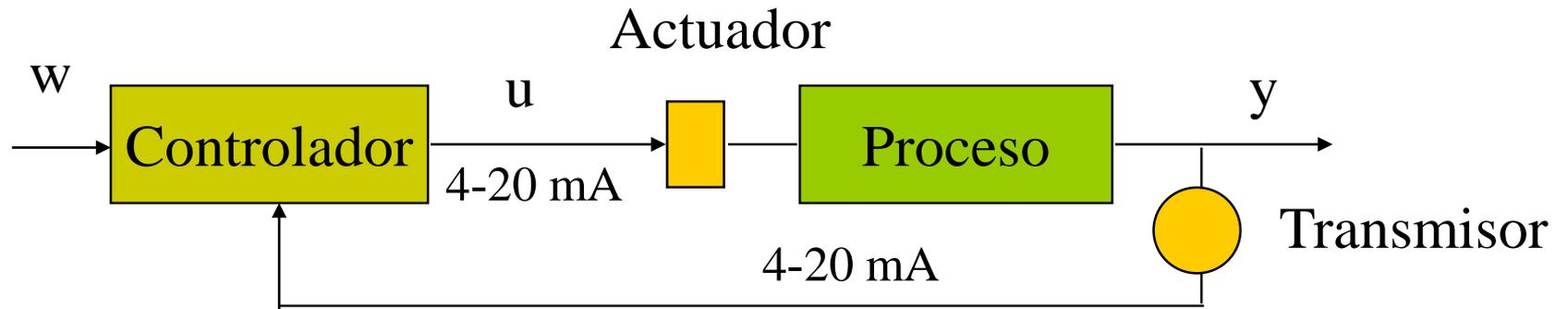
# Transmisores (Señales)

---

- ✓ Señal neumática: 0.2 - 1 Kg/cm<sup>2</sup>  
3 - 15 psi
- ✓ Señal eléctrica: 4 - 20 mA  
1 - 5 V cc, ....
- ✓ Frecuencia: pulsos/tiempo
- ✓ Otras: RTD, Contactos,...
- ✓ Señal digital: HART, Fieldbus,  
RS-232...

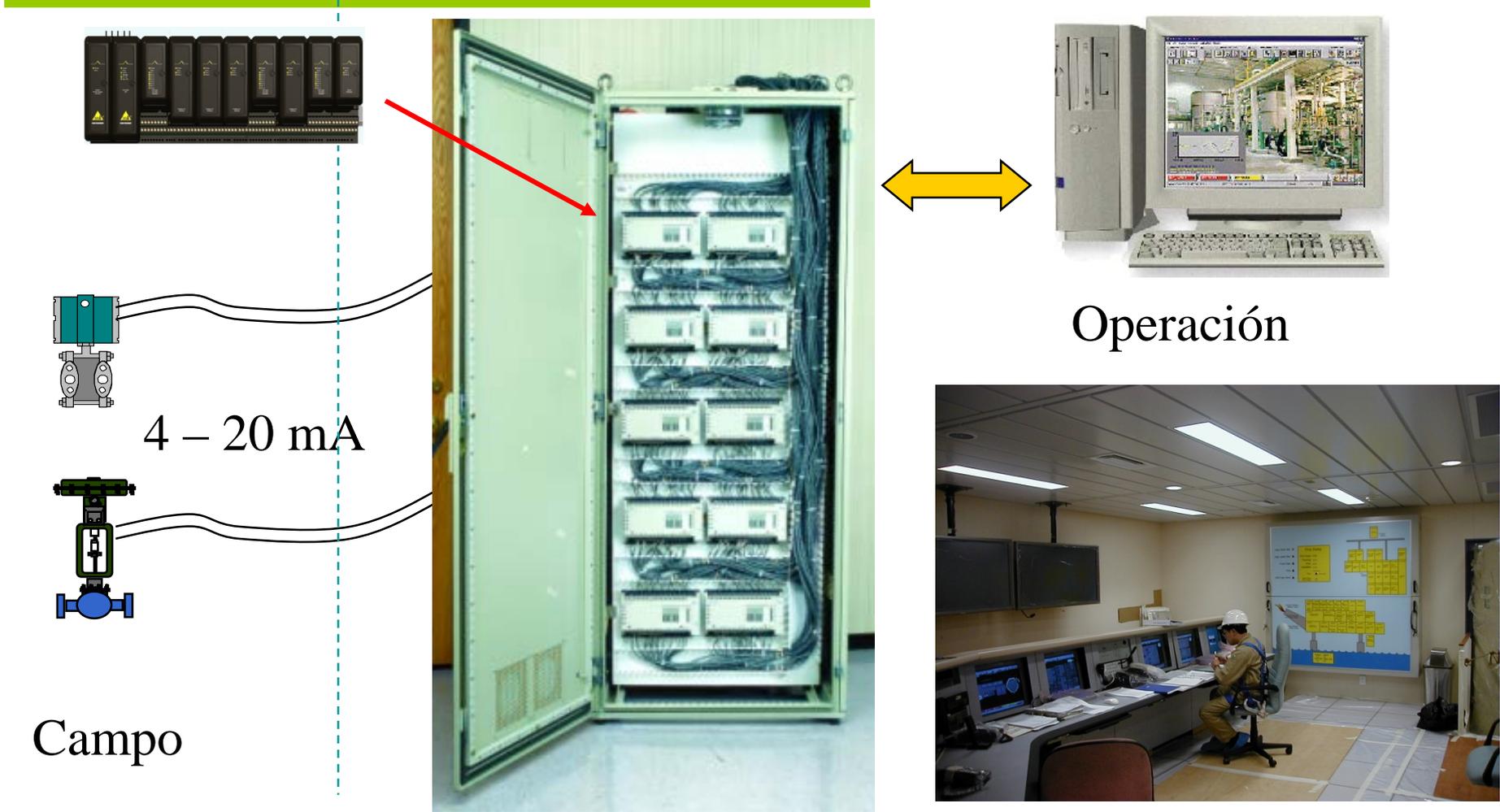


# Señales normalizadas





# Sala de Control



Campo

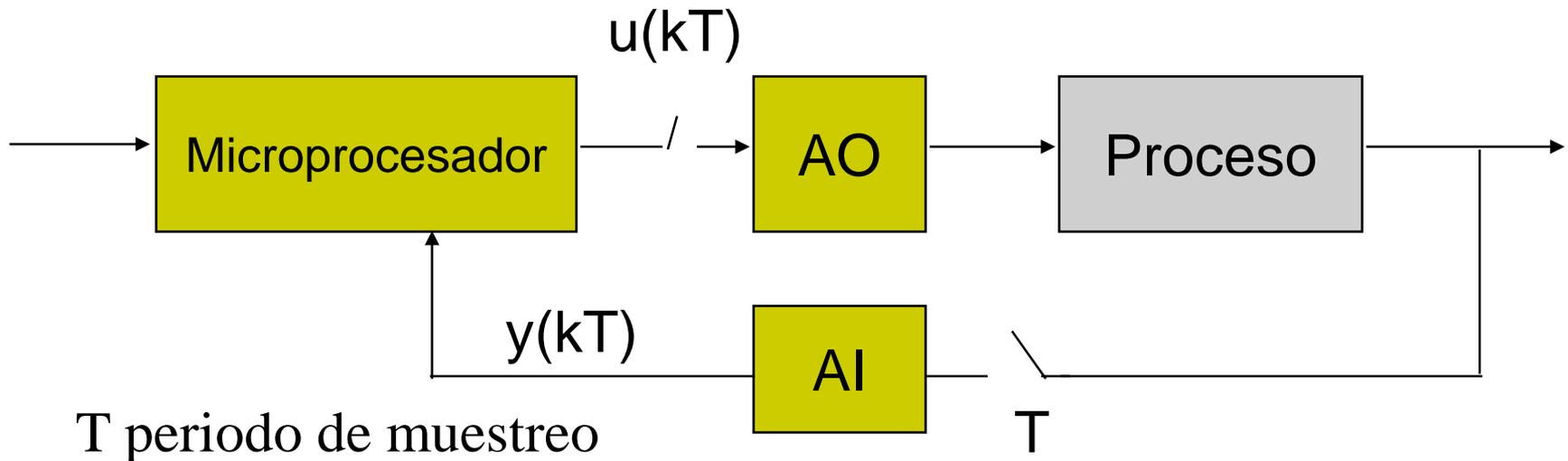
4 – 20 mA

Operación



# Control por computador

Potencia, Ethernet AI AO Controlador DI DO



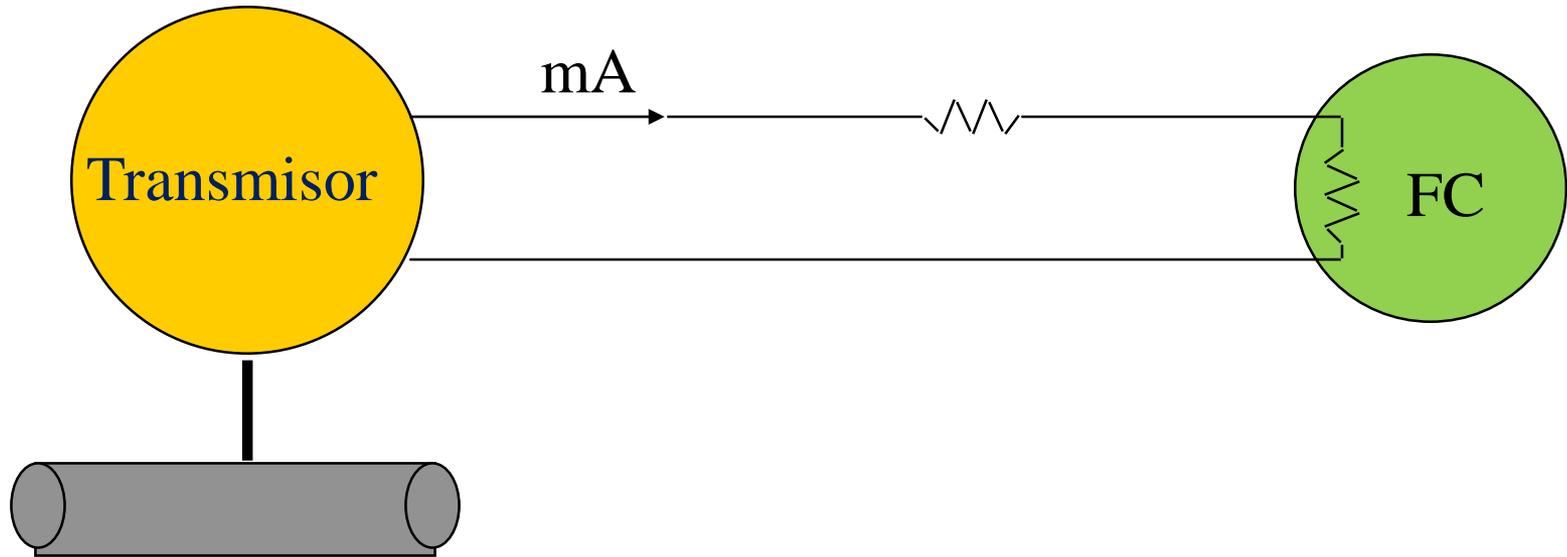


# Sala de control





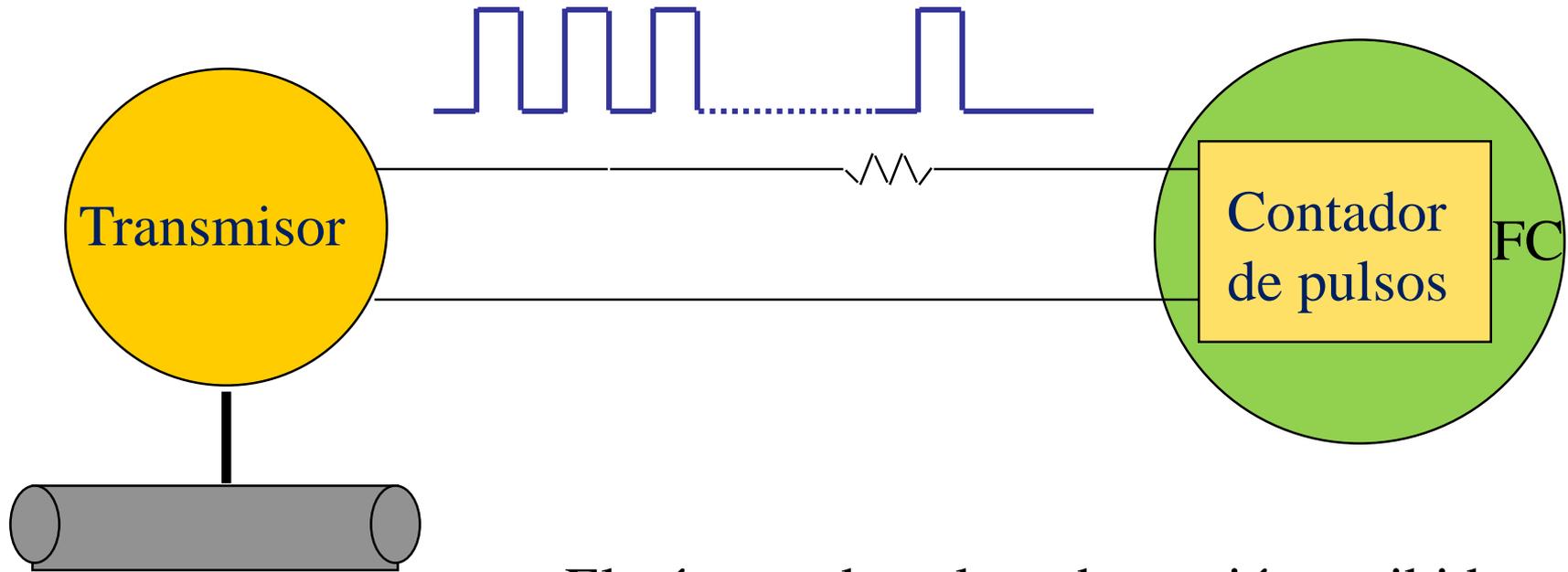
# 4-20 mA



- La señal de corriente es la misma en cualquier punto de la línea
- Puede diferenciarse una avería o ruptura de línea del rango inferior de medida
- Pueden conectarse un número máximo de cargas o instrumentos



# Pulsos/Frecuencia



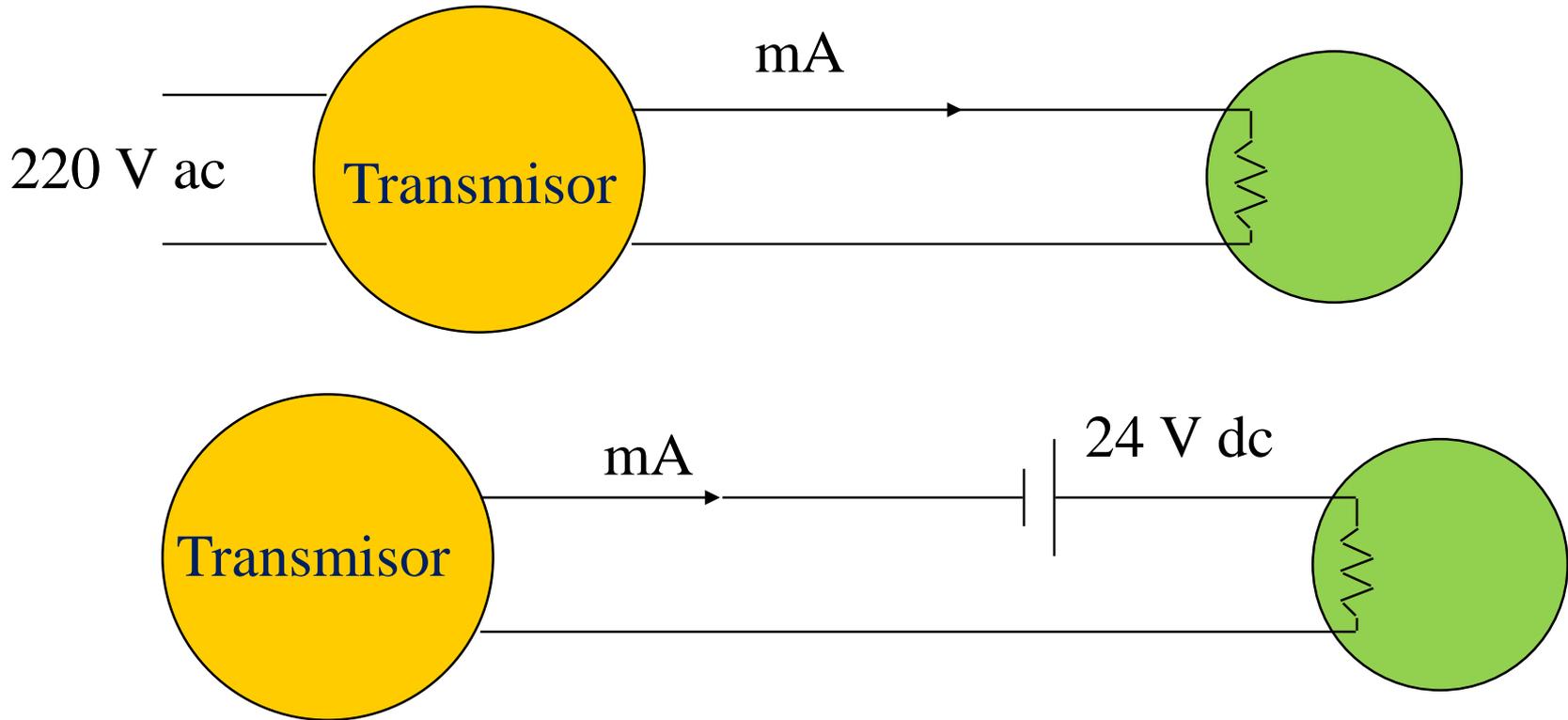
El número de pulsos de tensión recibidos por unidad de tiempo es proporcional al valor de la magnitud medida



# Alimentación

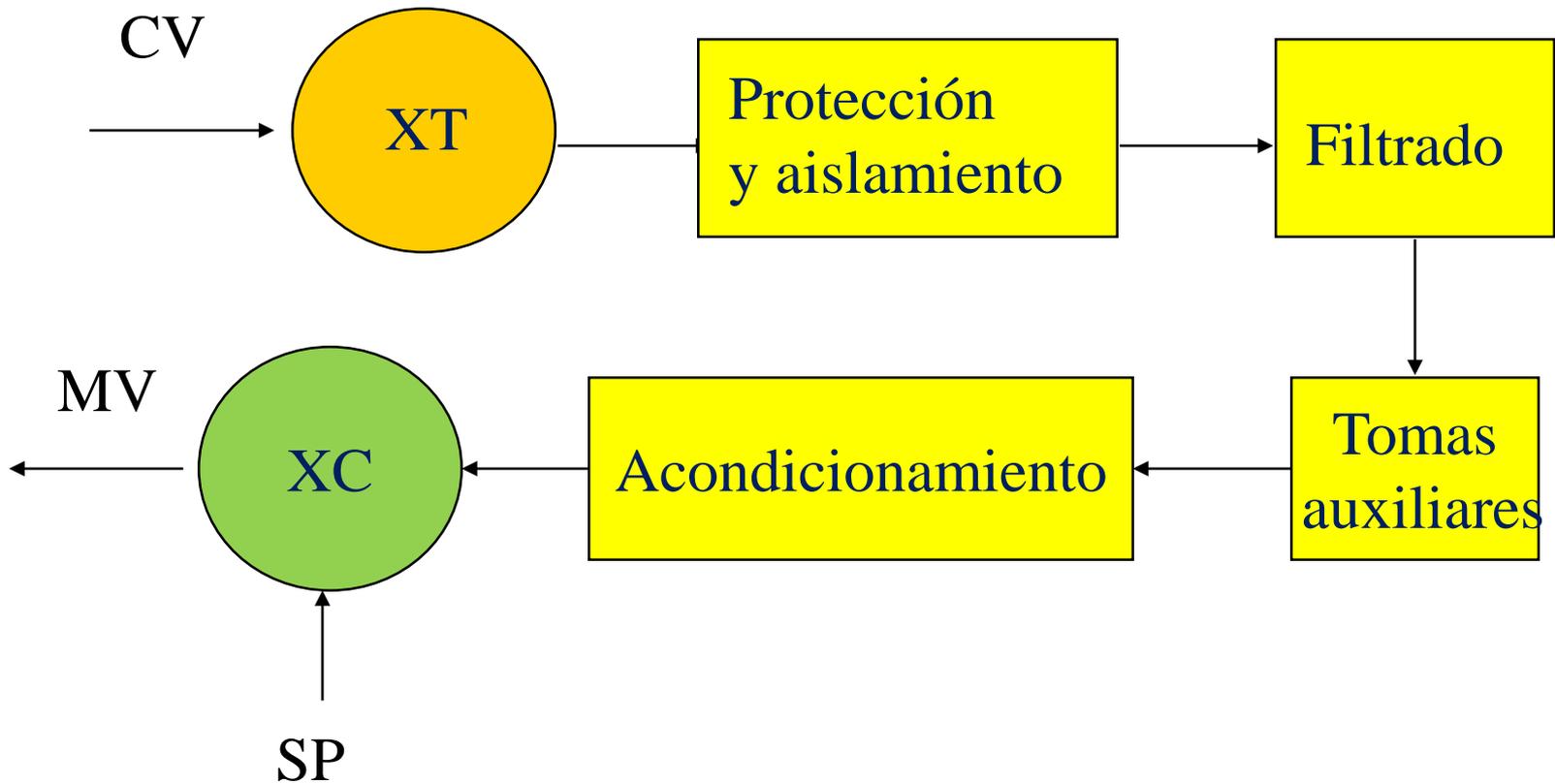


- Consumo
- Conectores
- Condiciones de trabajo
- Protecciones
- Montaje



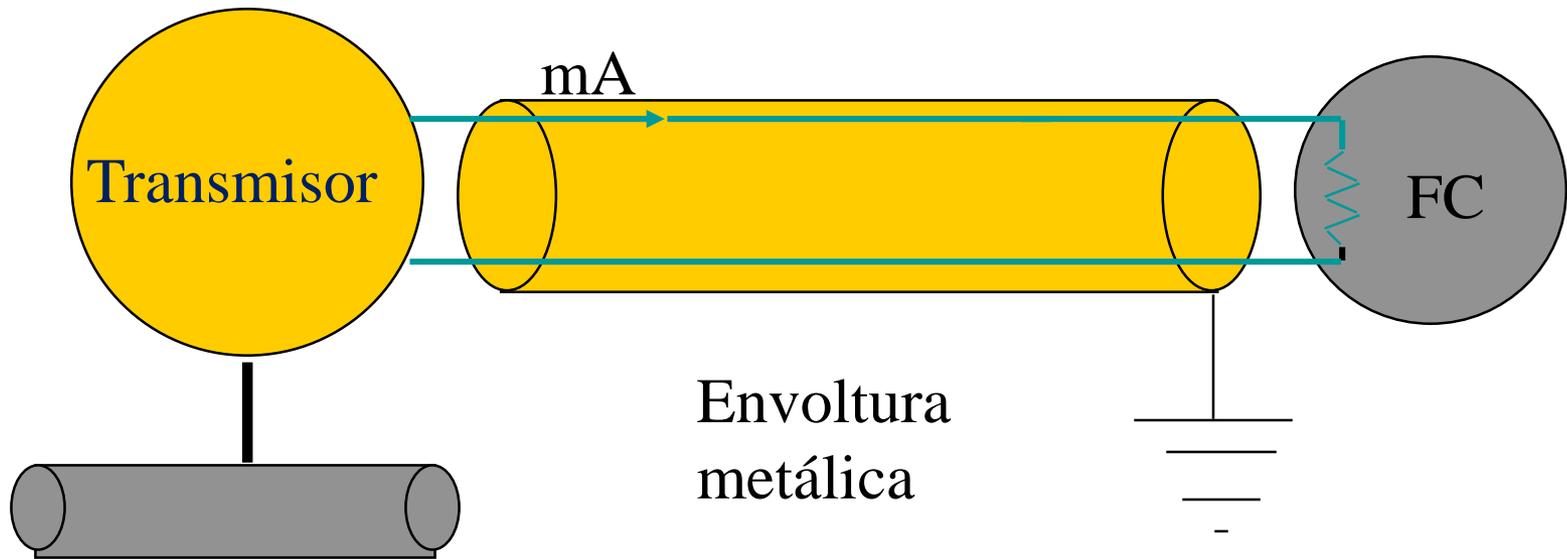


# Conexionado



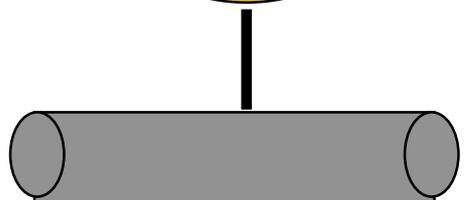
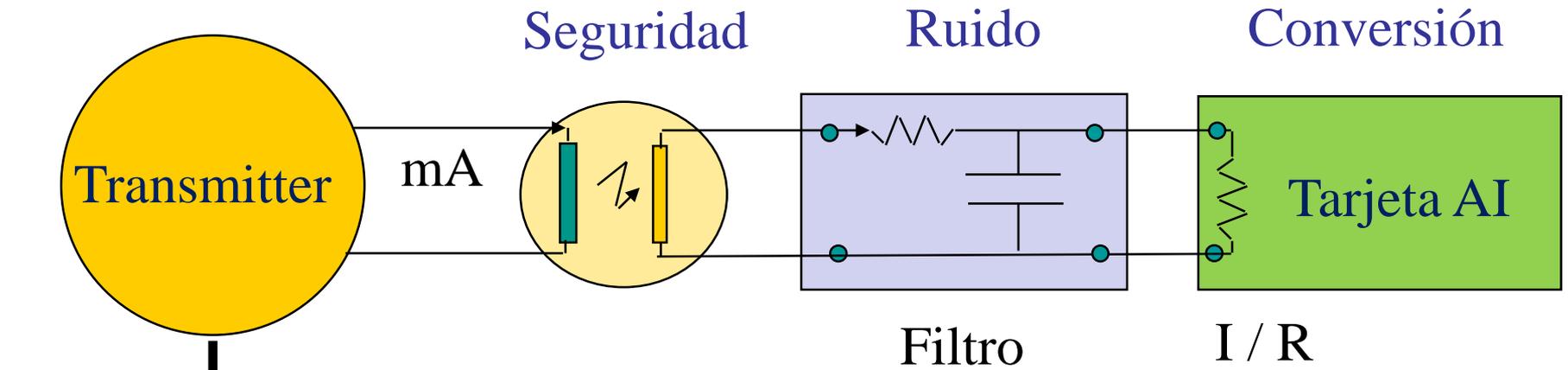


# Apantallamiento





# Acondicionamiento / Protección

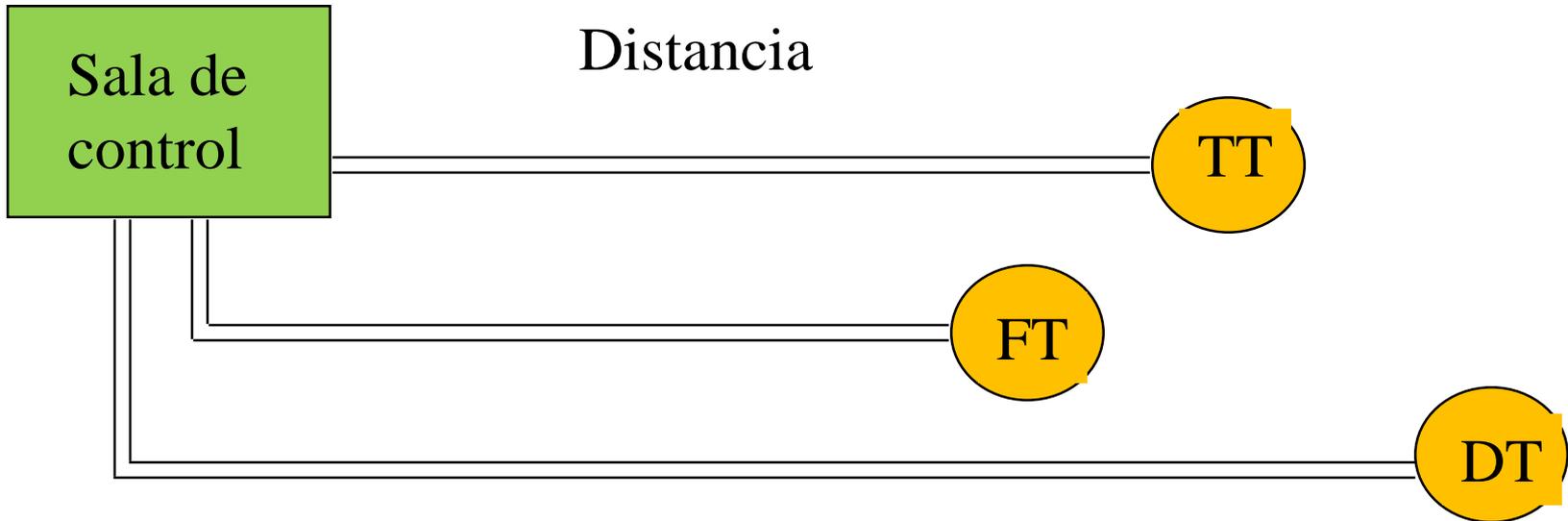


Optoacoplador  
Diodos Zener  
Fusibles





# Cableado,...



- Costos de cableado
- Ruidos
- Fiabilidad de los equipos
- Calibrado, mantenimiento,...

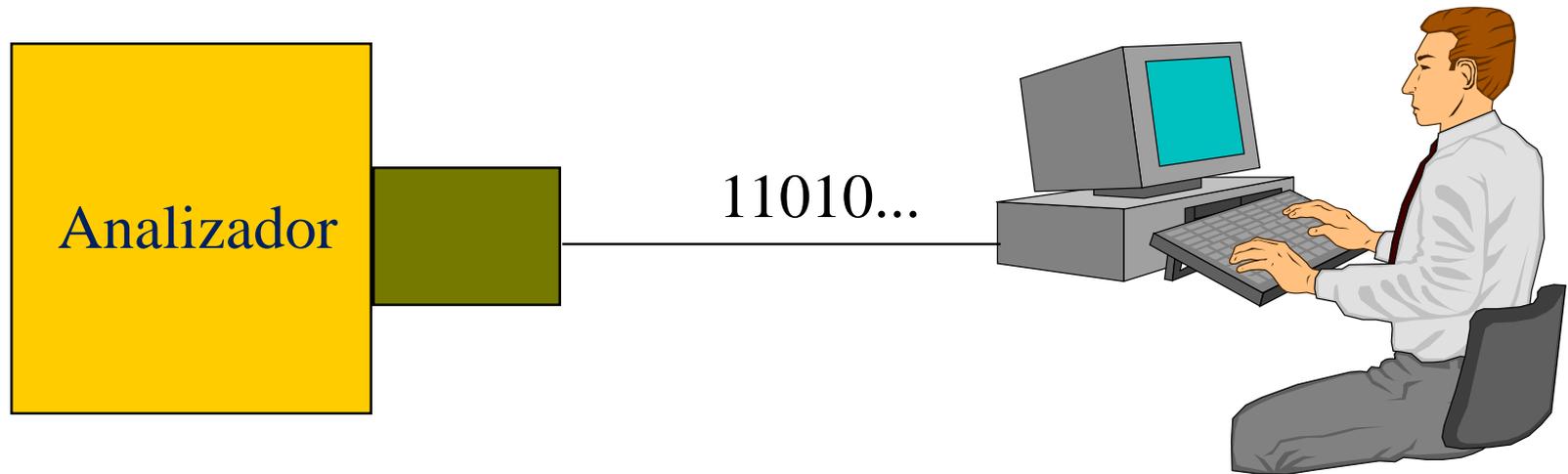


# Cableado





# Conexión serie



Conversión A/D

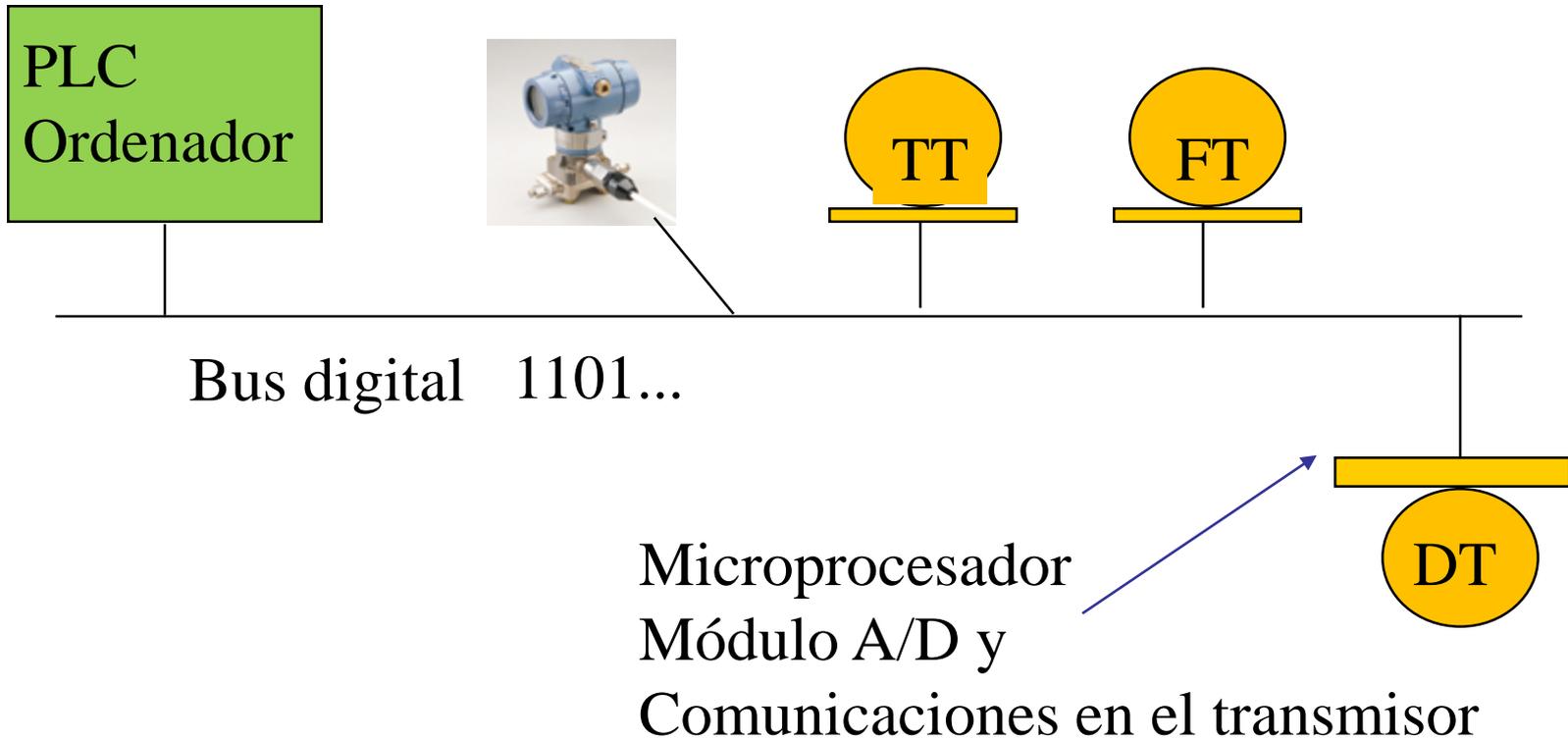
Protocolo de comunicación

Punto a punto RS-232, RS-422

Bus RS-485



# Buses de Campo





# Instrumentación Inteligente

---

- ✓ Lleva incorporado un microprocesador
- ✓ Esto le dota de capacidad de cálculo y almacenamiento de la información:
  - Datos del Instrumento
  - Datos dinámicos
- ✓ Dispone de un sistema de comunicaciones digitales que pueden ser bidireccionales
- ✓ Proporcionan nuevas funcionalidades





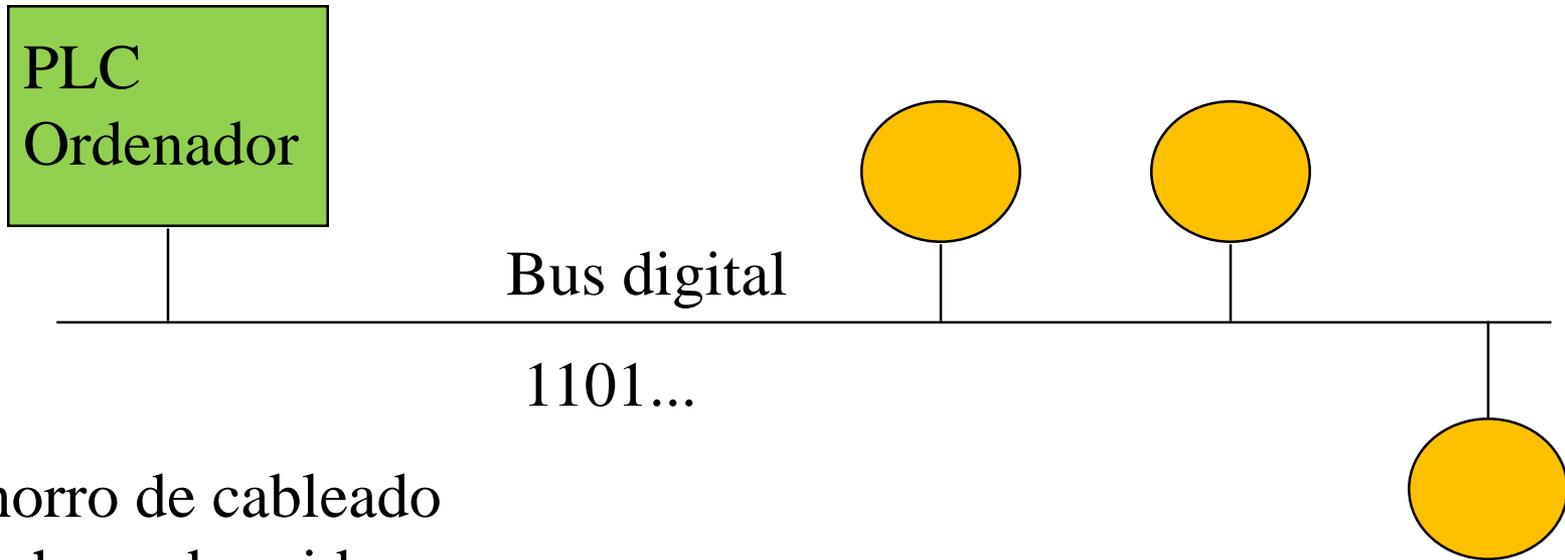
# Instrumentación Inteligente

---

- ✓ Totalmente digital:  
Buses de campo
- ✓ Comunicaciones entre todos los elementos conectados al bus:  
instrumentos y sistemas de control
- ✓ Híbrido: Combina transmisión de señal analógica y digital:  
Protocolo HART
- ✓ Comunicaciones entre transmisores y sistemas de control



# Buses de Campo



- Ahorro de cableado
- Rechazo de ruidos
- Nuevas funciones: Ajuste remoto de rangos, test, documentación,....
- Información más elaborada
- Arquitecturas y Protocolos



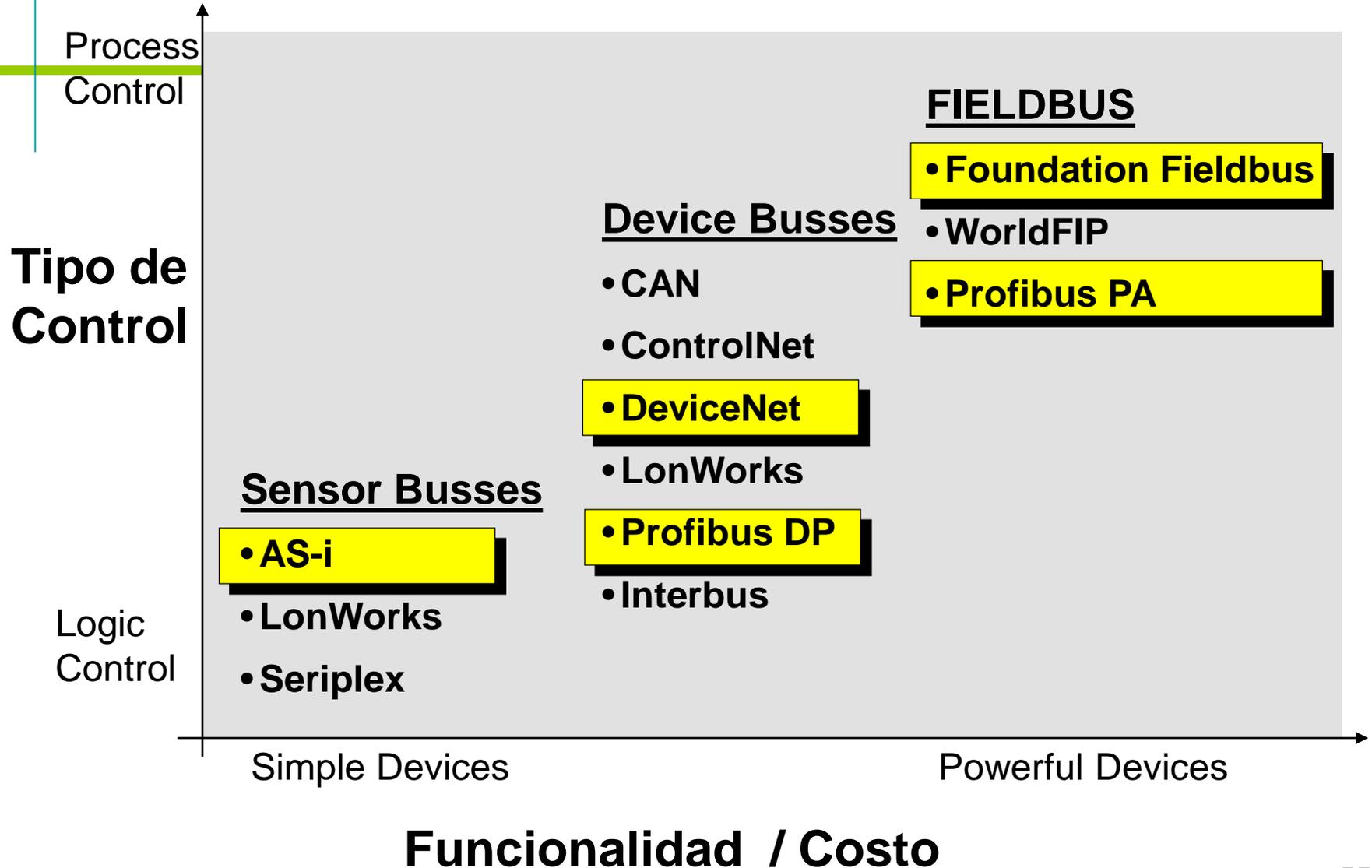
# Buses de campo

---

- ✓ Fieldbus Foundation (Niveles H1 y H2)
- ✓ Profibus DP, PA
- ✓ WorldFIP
- ✓ CAN
- ✓ DeviceNet
- ✓ .....

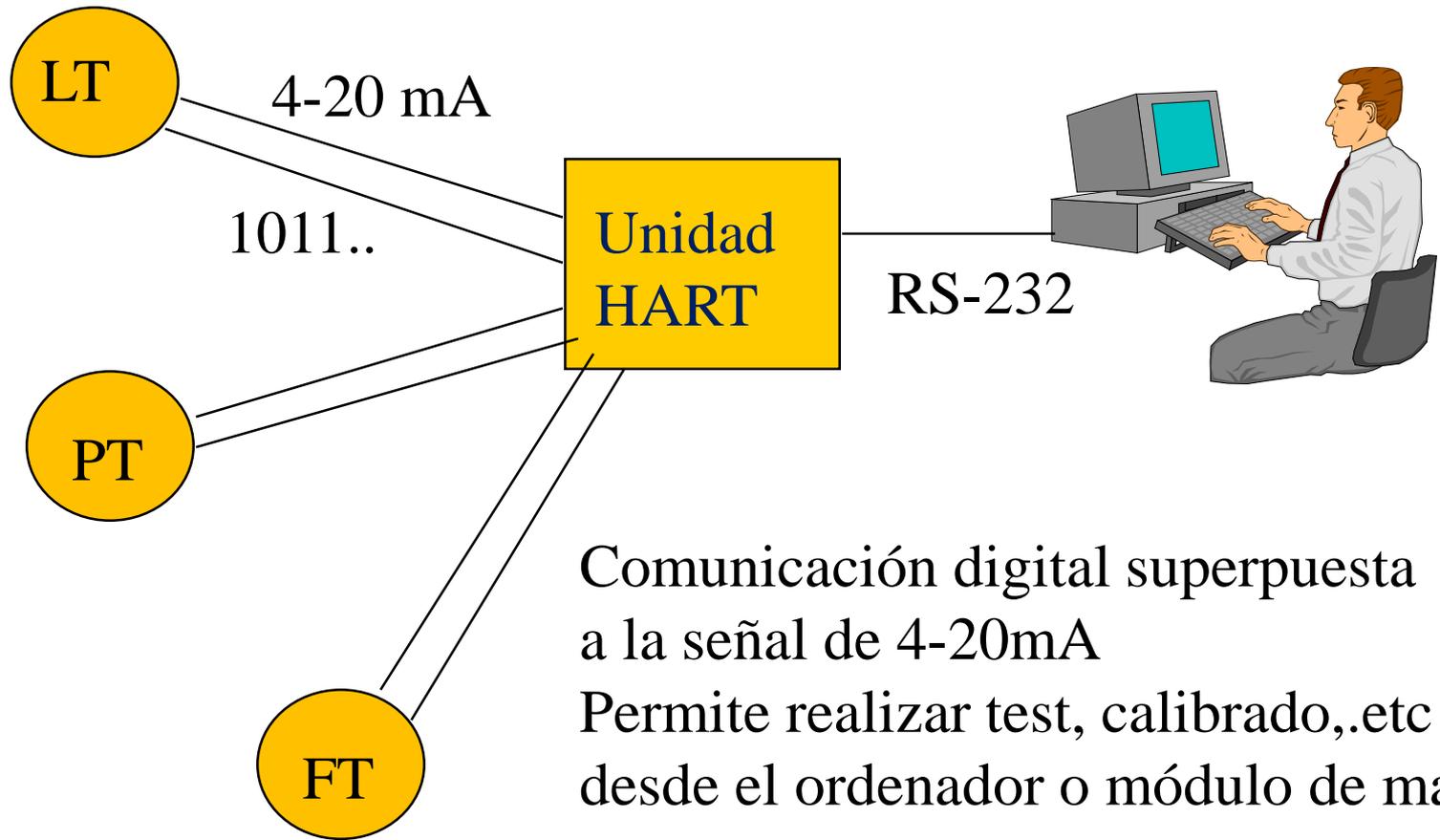


# Redes- Fieldbus



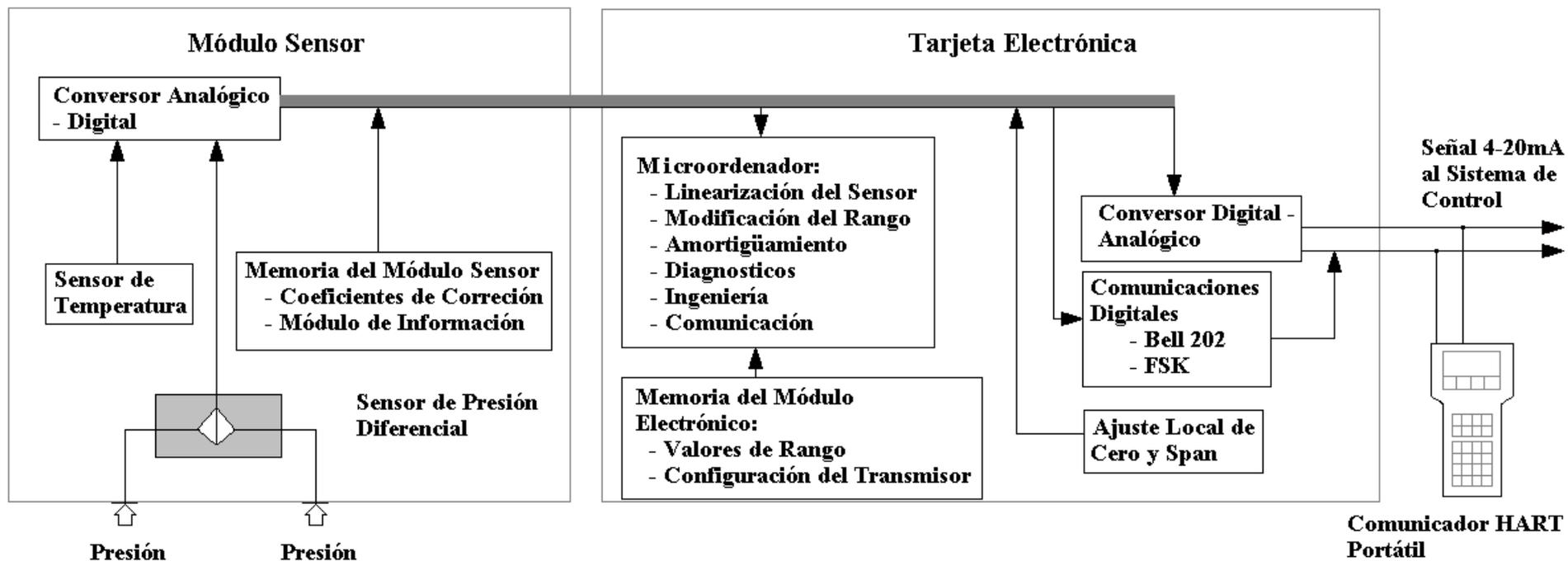


# HART



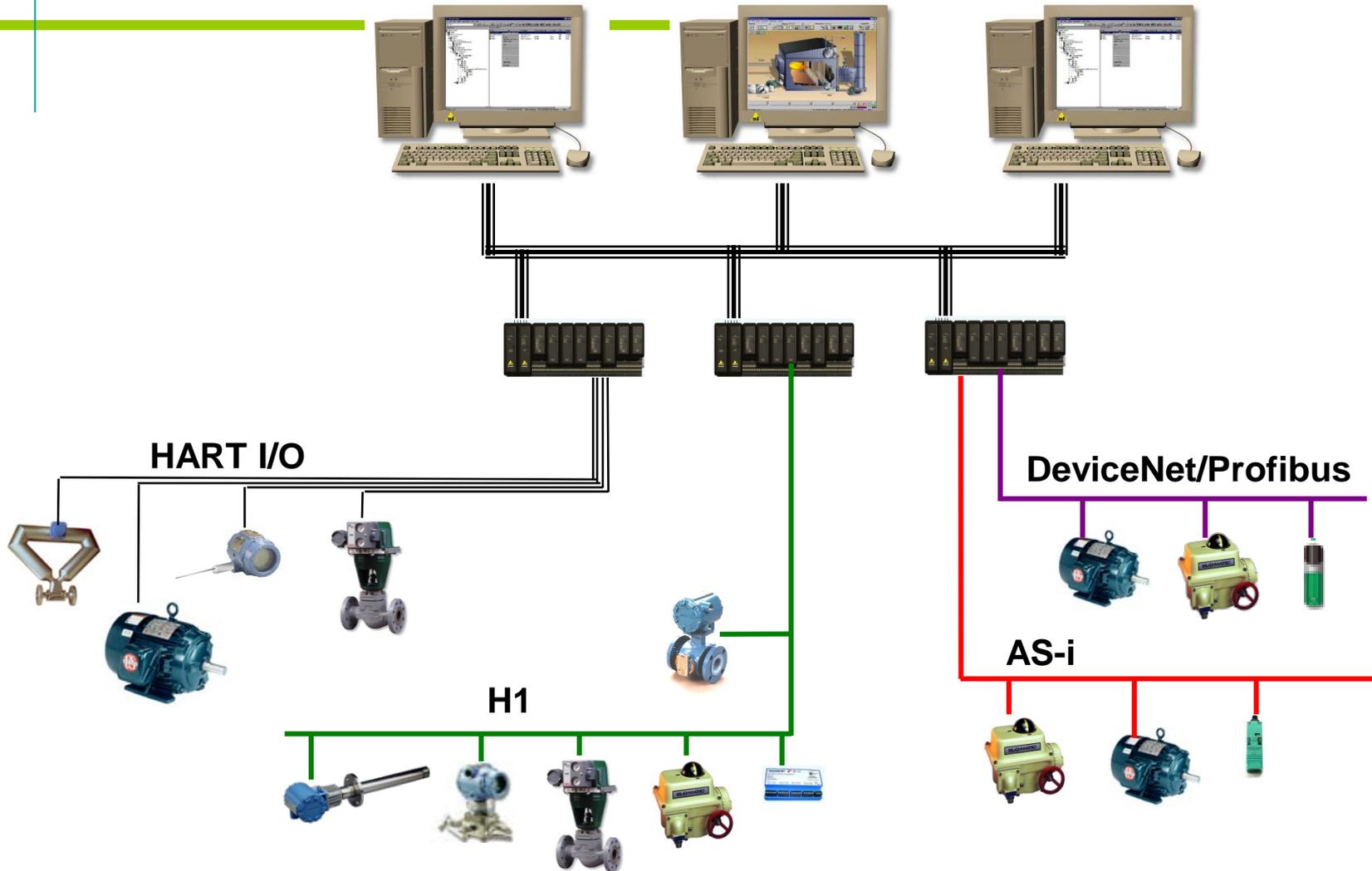
# TRANSMISOR INTELIGENTE

## ESTRUCTURA FUNCIONAL





# Arquitecturas





# Diagnosis, configuración



**TESTER958 Pro+**  
Exploring DeltaV  
File Edit View Object Applications Tools  
REV8  
All Containers

- CTLR1
  - Assigned Modules
  - I/O
    - C01
      - P01
        - Decommission
        - REV7
        - REV8
        - REVISION7
      - P02
    - C04
    - C05
    - C06
    - C07
    - C09
    - C10
    - C11
    - C12
    - C13
    - C14
    - C15
    - C16
    - C17
    - C18
    - C19
    - C20
    - C21
    - C22
    - C23
    - C24
    - C25
    - C27

**Status - REV8**  
Tag Diagnostics Spec Sheet Tools Customize ValveLink Help

ValveLink VL2000 Revision B459

- CTLR1/I01/C01/P01
  - REV7
  - REV8
  - REVISION7
- Database

Datasets: <new>

Alarms - Resource Monitor	Device - Transducer	Device - Resource	Notes
Monitor	Alarms - Failed	Alarms - Maintenance	Alarms - Advisory
Travel Accumulator	1438628 %	23.08 C	100 C
Drive Signal	65.96 %	99.46 %	125 %
Cycle Count	163396	16.19 psi	20 psi
Travel Accumulator	1438628 %		
Temperature	23.08 C		
Input Characteristic	Linear		
Output Block Mode	OOS		
Resource Block Mode	AUTO		
Fault State	Clear		
Output Block Mode	OOS		

Current Value

Temperature: 23.08 C, -60 C  
Travel: 99.46 %, -25 %  
Actuator Pressure: 16.19 psi, 0 psi

End Monitoring Save Dataset Delete Dataset Close Tag Help

For Help, press F1 REV8

User: ADMINISTRATOR 6 object(s) CAN-CONFIGURE CAN-DOWNLOAD

valve\_signature.bmp - Paint

Start Document.doc ... Diagnostics - Delt... Control Panel Exploring DeltaV Status - REV8 valve\_signature.b... Exploring - C:\ 10:33 AM



# Configuración $\Rightarrow$ Descarga



[AREA\_A/MPC\_TEST\_1] - Control Studio

File Edit View Object Diagram Layout Tools Graphics Window Help

100%

MPC\_TES

- TI-101
- FI-110
- LI-324
- CV-101
- CV-110
- CV-324
- COL-1

Filtered by: [Icons]

Alphabetic Categorized

Parameter	Default
[-] Alarm	
ABNORM_...	False
BAD_ACTI...	False
[-] Tuning	
MCOMMA...	In Service
MERROR...	
MSTATUS...	
[-] Operating	
MERROR	
MSTATE	In Service
MSTATUS	

TI-101 #4

FI-110 #5

LI-324 #6

COL-1 #7

CV-101 #1

CV-110 #2

CV-324 #3

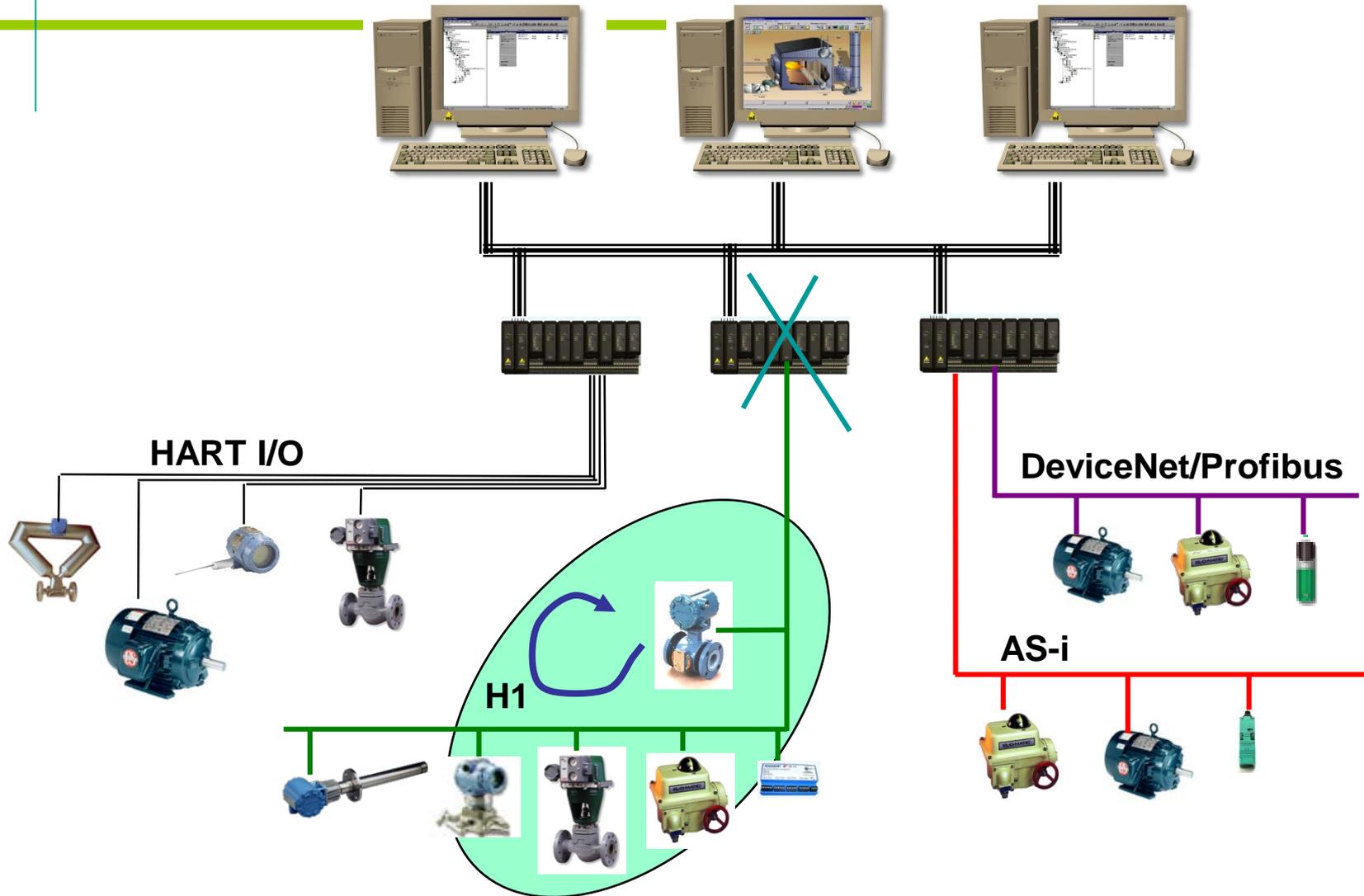
For Help, press F1

Assigned to: CTRL1

NUM



# Control en los instrumentos





# Instrumentación inalámbrica





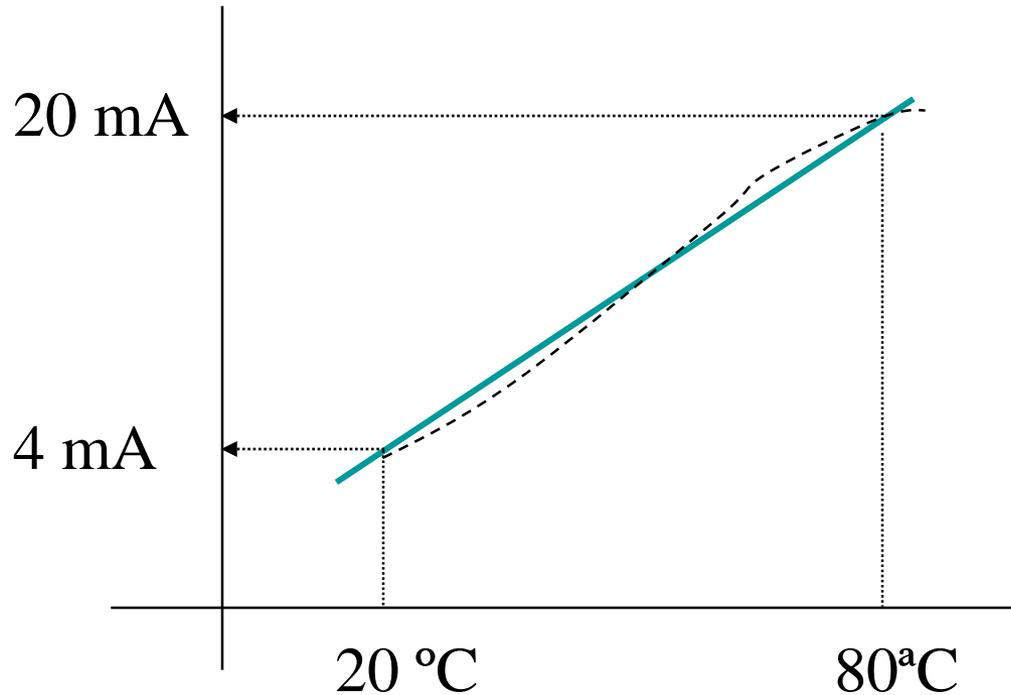
# Terminología (SAMA)

---

- ✓ Rango
- ✓ Span
- ✓ Error dinámico
- ✓ Precisión
- ✓ Sensibilidad
- ✓ Repetitividad
- ✓ Zona muerta e Histéresis



# Transmisores



Calibrado:

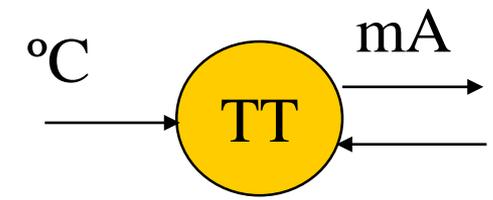
lectura = f ( valor real )

Ajustes de Cero y Span

$$\text{mA} = 0.2667 \text{ } ^\circ\text{C} - 1.3333$$

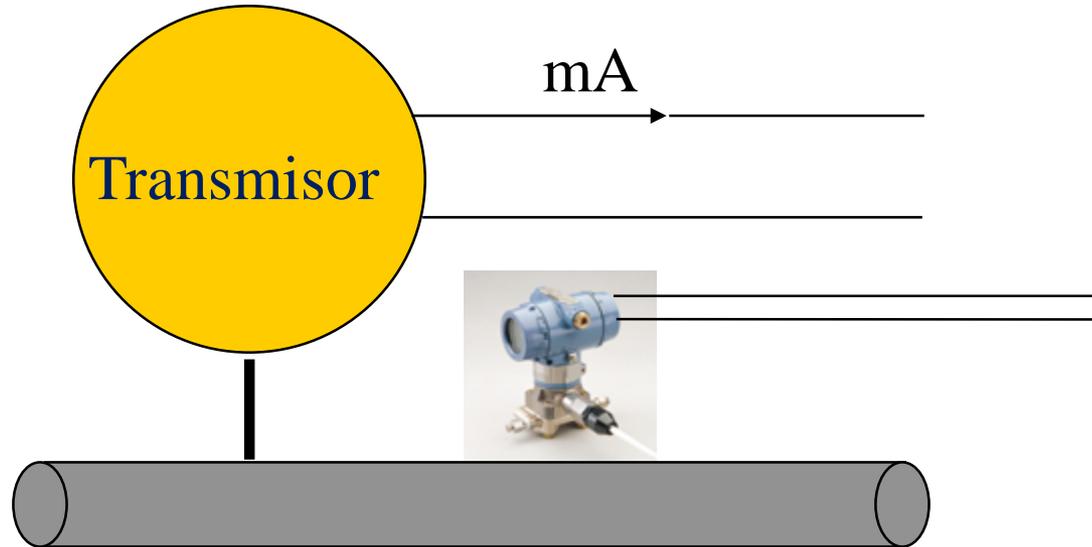
Rango: [20 , 80] °C  
Span: 80-20 = 60 °C

(Alcance)





# Transmisores

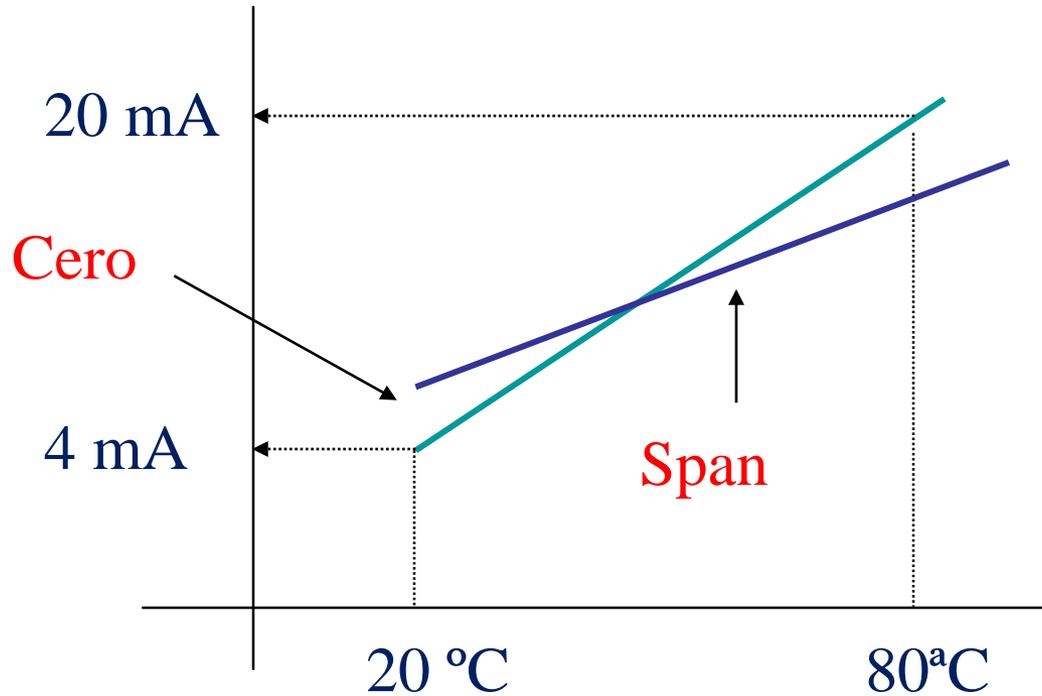


Para la calibración de un transmisor se necesita poder comparar su señal con la de un instrumento patrón bajo condiciones estables en la variable a medir

Existen instrumentos (calibradores) que garantizan una alta precisión en la medida preparados para realizar esta función



# Transmisores



Calibrado:

lectura = f ( valor real )

Ajustes de Cero y Span

$$\text{mA} = 0.2667 \text{ } ^\circ\text{C} - 1.3333$$



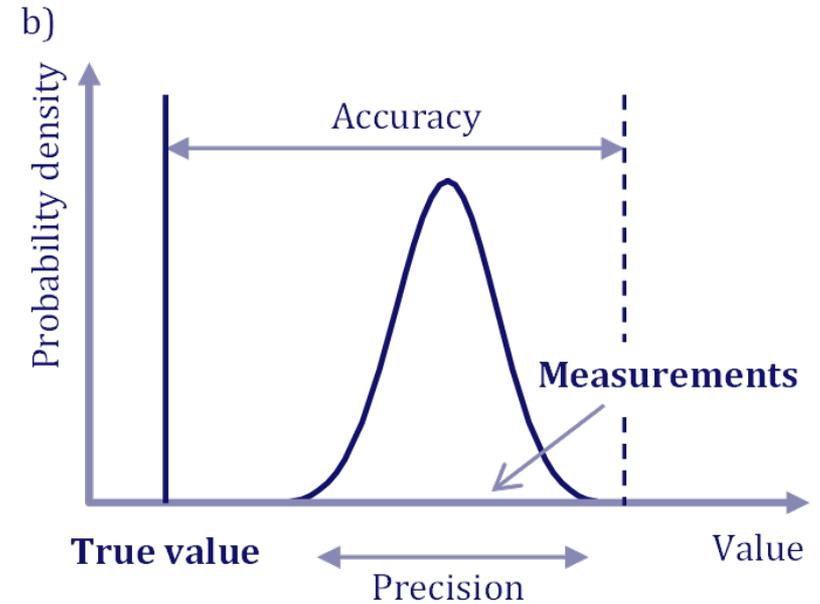
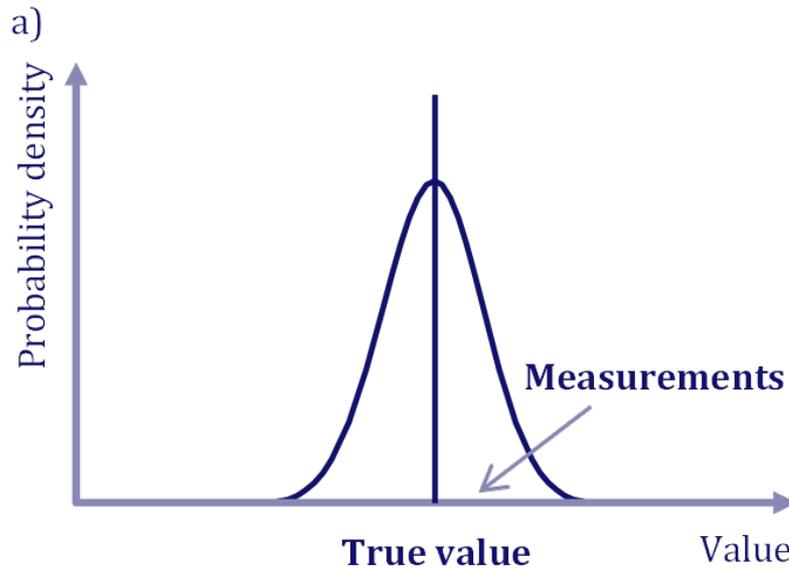
# Fuentes de error

---

- ✓ Debidas al instrumento
  - linealidad, zona muerta, repetitividad,...
- ✓ Debidas al medio ambiente
  - ruido electromagnético, temperatura, vibraciones, ...
- ✓ Debidas a la lectura de la señal
  - Paralaje, resolución del convertidor, cables, ....

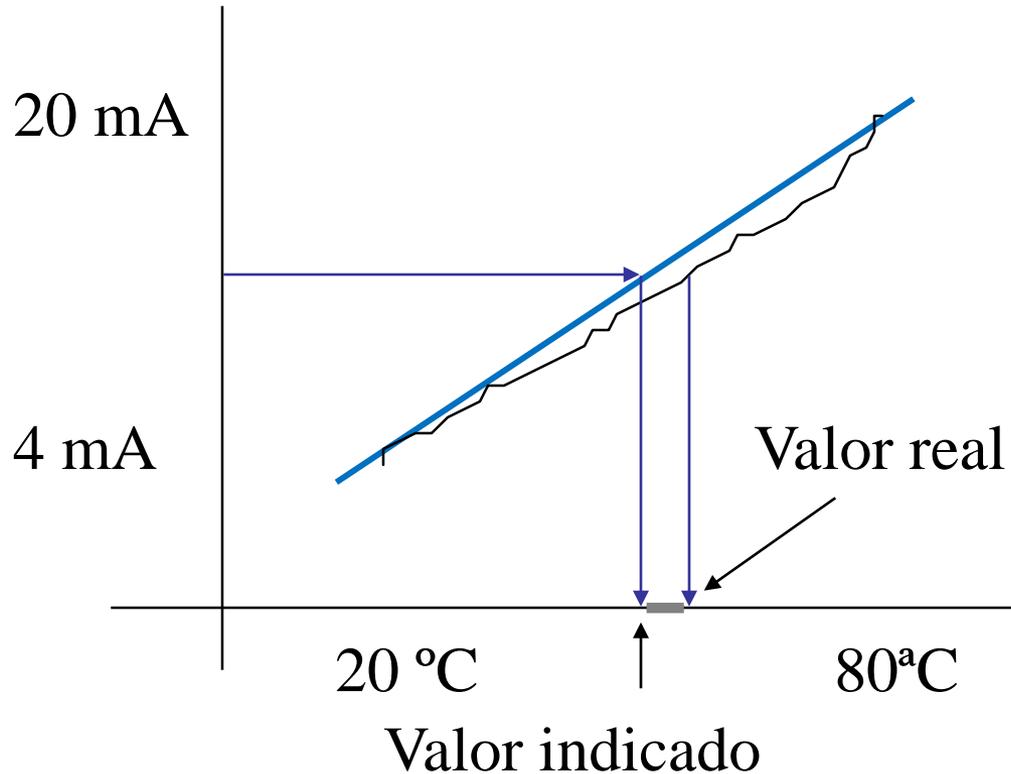


# Exactitud / Precisión Accuracy / Precision





# Transmisores



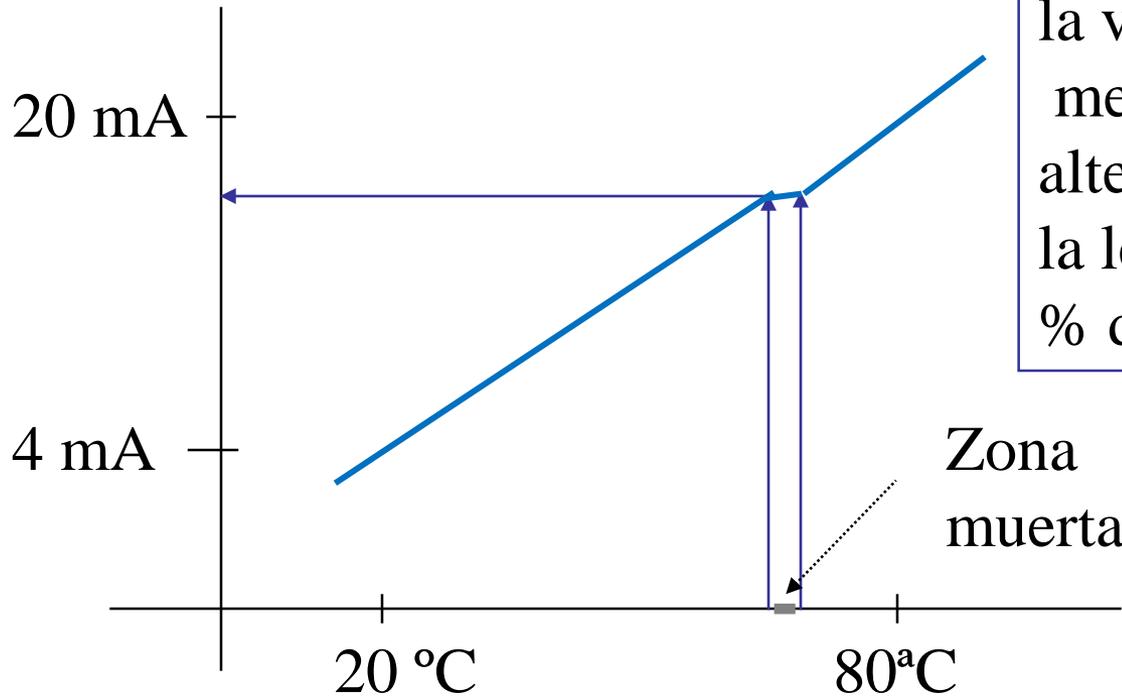
Error de linealidad

Debido a la no linealidad de la curva de calibrado real

% span



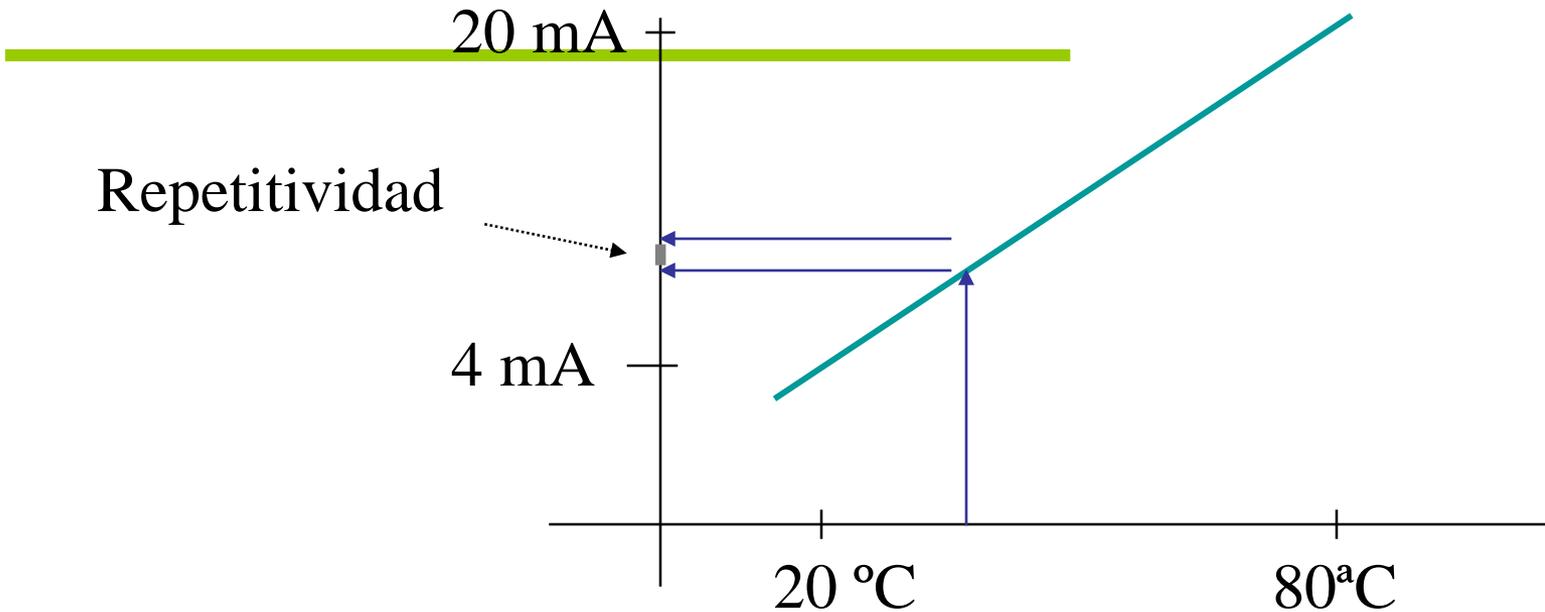
# Transmisores



Zona muerta:  
Zona de cambio en  
la variable  
medida que no  
altera  
la lectura.  
% del span



# Transmisores



## Repetitividad:

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

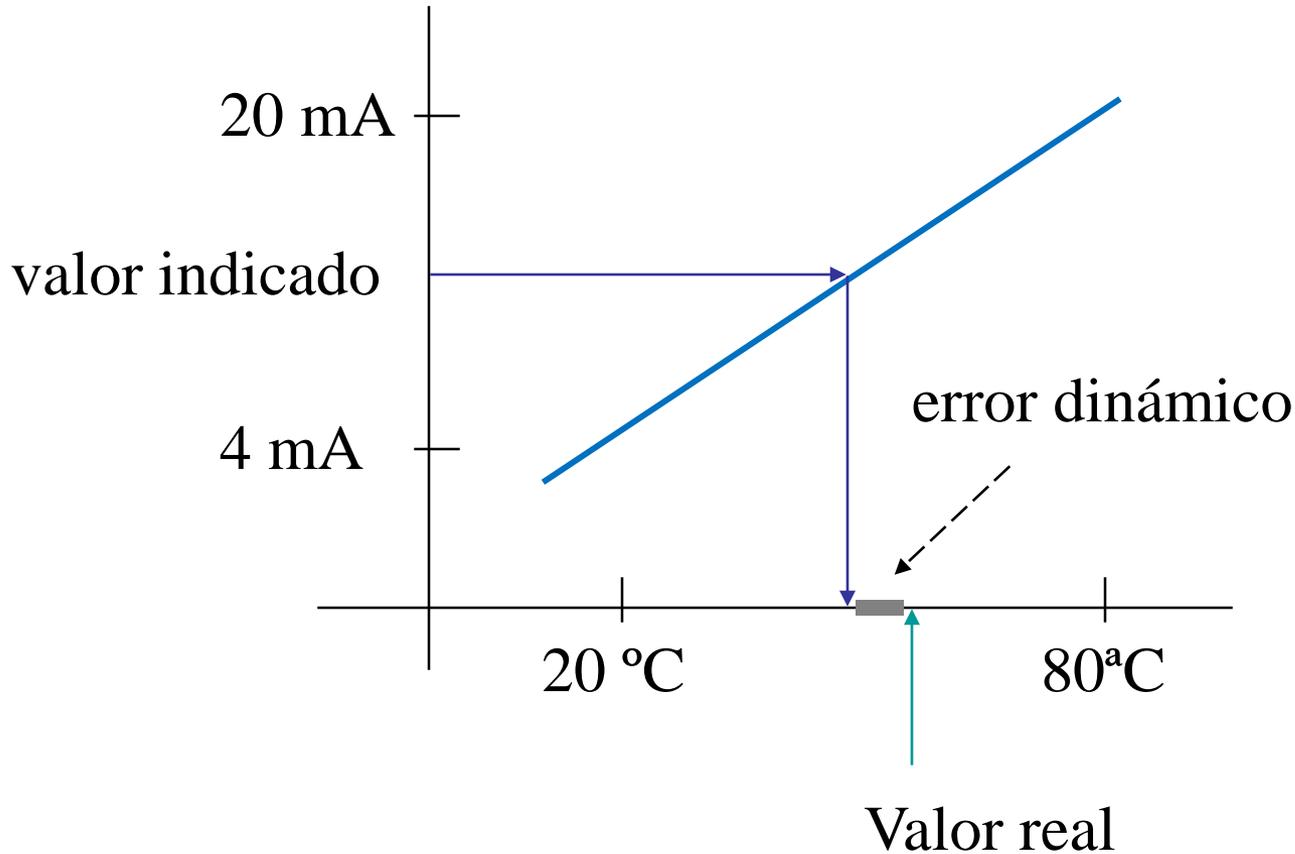
% del span

## Histéresis:

Lo mismo pero en sentidos distintos de cambio.



# Transmisores



**Precisión:**  
Limite máximo de error posible por linealidad, histéresis, etc....

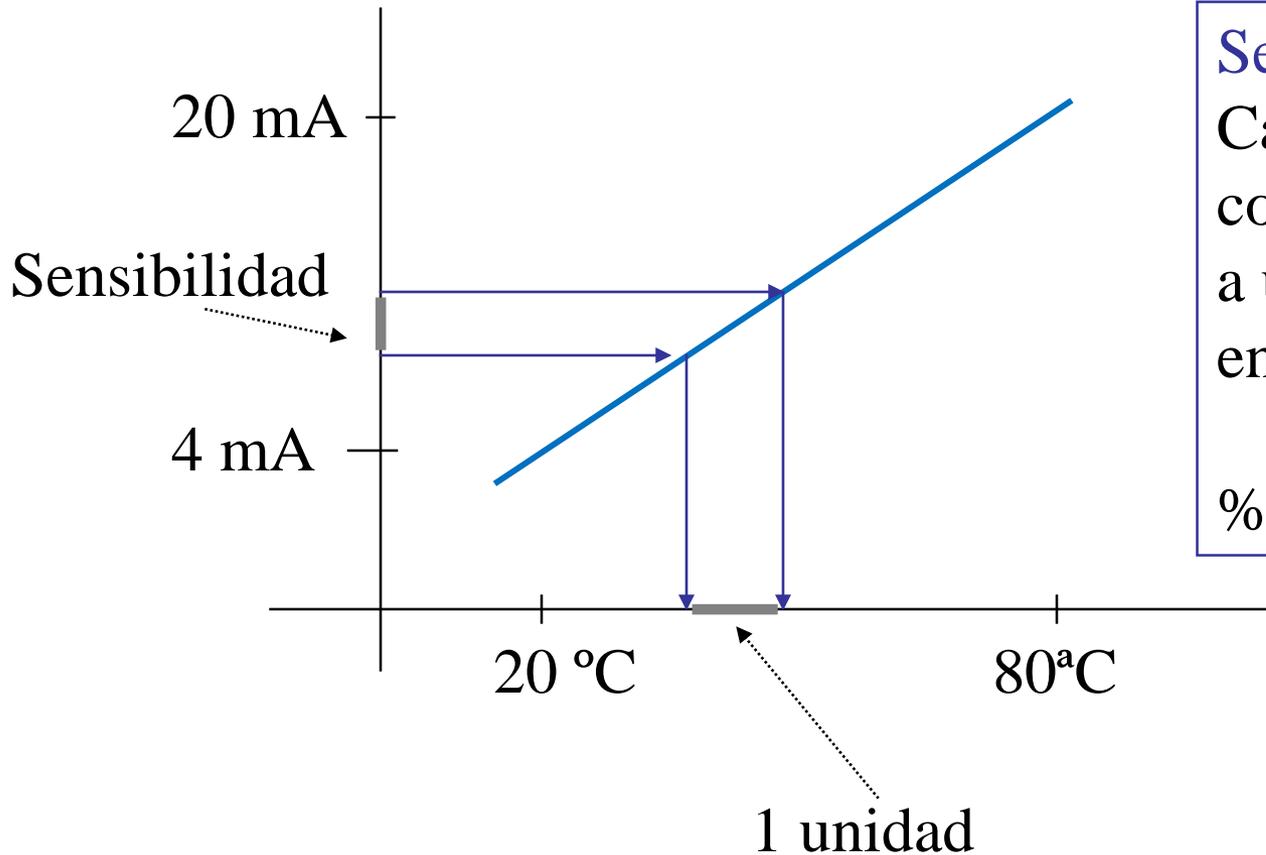
% del span  
% de la lectura  
Valor directo,...

(Accuracy)

(Tolerance)



# Transmisores

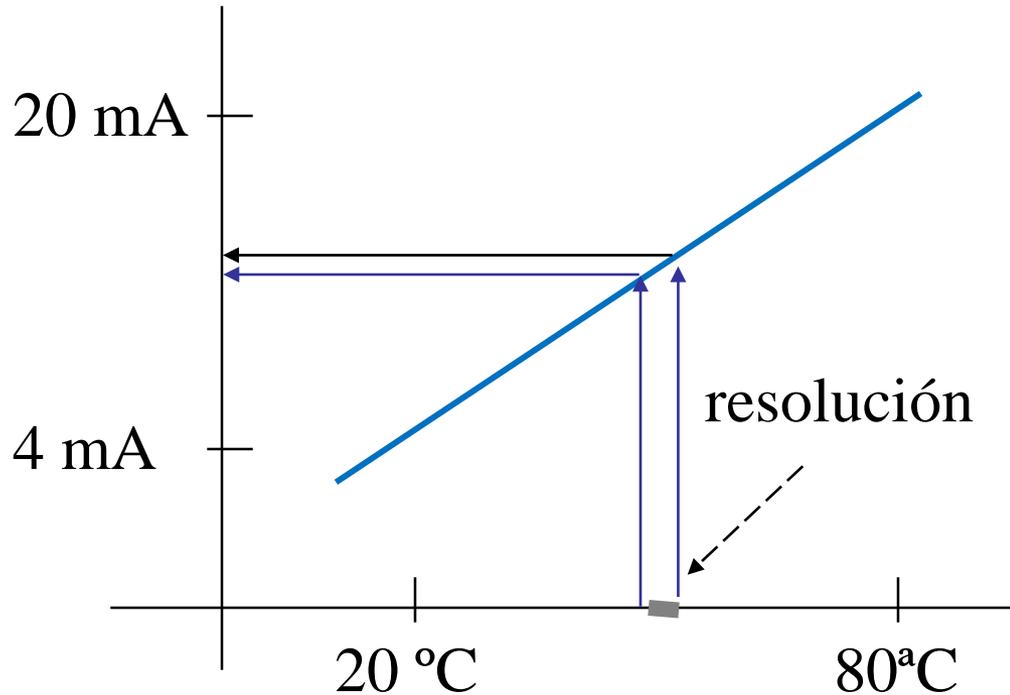


**Sensibilidad:**  
Cambio en la señal correspondiente a un cambio unidad en la variable

% del span



# Resolución



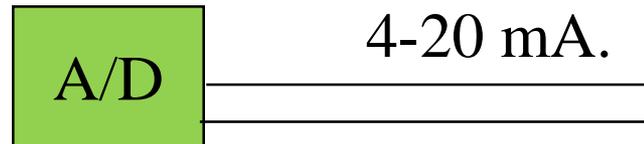
**Resolución:**  
Cambio mínimo  
en la entrada  
necesario para que  
se produzca un  
cambio observable  
en la salida

% del span  
Valor directo,...

Ha de tenerse en cuenta toda la cadena de medida



# Resolución



Magnitud mas pequeña de la señal que puede ser observada. Viene determinada por el conversor A/D

Bits

12 bits = 1 parte en 4096

Dígitos

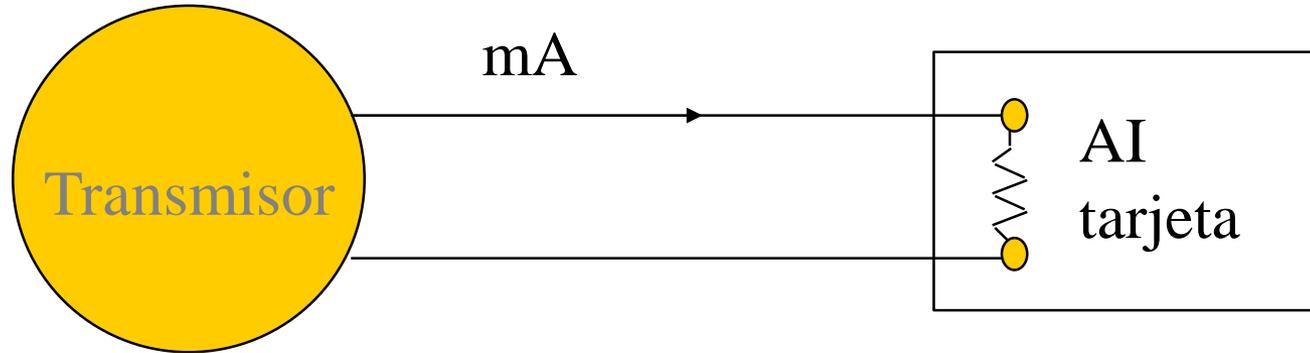
1/2 dígito: dígito más significativo puede tomar valores 0 ó 1

3 1/2 dígitos = 1 parte en 2000 cuentas (0000 a 1999)

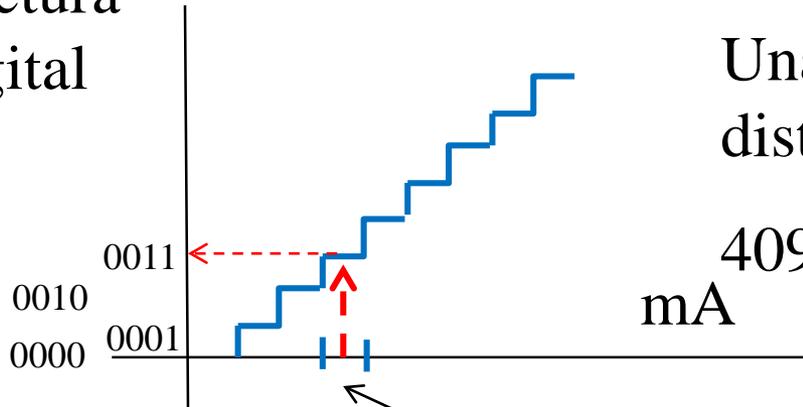
rango unipolar, 1 en 2x2000 si es bipolar



# Resolución



Lectura digital



Una tarjeta AI con 12 bits puede distinguir

$$4096 = 2^{12} \text{ números diferentes}$$

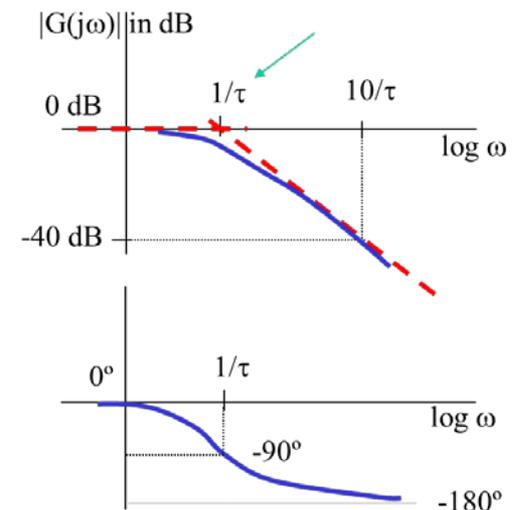
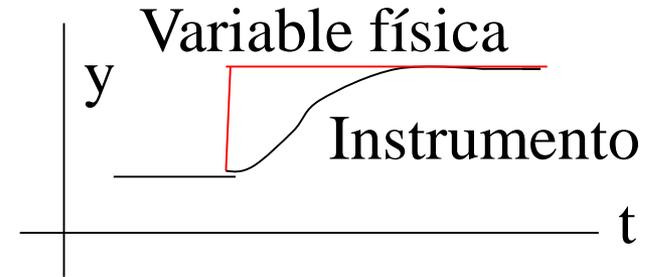
Resolución: 16/4096 mA

Todas las señales en este intervalo tienen la misma lectura en el DCS



# Características dinámicas

- ✓ Respuesta transitoria
  - Tipo
  - Tiempo de asentamiento, retardo
- ✓ Respuesta en frecuencia
  - Ancho de banda
- ✓ Filtrado de ruidos
  - Frecuencia de corte del filtro





# Incertidumbre de medida

---

- ✓ Toda medida dada por un instrumento calibrado lleva asociada una incertidumbre
- ✓ La calibración debe indicar un valor estimado de la magnitud medida y un intervalo de confianza dentro del cual se supone que está el verdadero valor con una alta probabilidad (95%)

✓  $y \pm \Delta y$



# Fuentes de incertidumbre

---

- ✓ Tipo A: Las que pueden estimarse a partir de cálculos estadísticos con los valores medidos
- ✓ Tipo B: Las provenientes de otras fuentes (hojas de calibrado, .....)
- ✓  $y \pm \Delta y = y \pm k \sigma_c$
- ✓  $\sigma_c$  desviación típica combinada de los errores tipo A y B
- ✓ k factor de cobertura



# Cálculo de $\sigma_c$

- ✓ Si la variable de interés  $y$  se obtiene mediante una fórmula en función de otras variables medidas  $x_1$ ,  $x_2$ , ..., las cuales son independientes:

$$y = f(x_1, x_2, \dots)$$

$$\sigma_{cy}^2 = \sum_i \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \sigma_{cx_i}^2$$

La varianza combinada de cada medida  $x_i$  tiene en cuenta los dos tipos de errores, A y B



# Cálculo de $\sigma_c$

- Varianza combinada de cada medida  $x_i$  :

$$\sigma_{cx_i}^2 = \sigma_{Ax_i}^2 + \sigma_{Bx_i}^2$$

$$\sigma_{Ax_i}^2 = \frac{\hat{\sigma}_{x_i}^2}{n} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (x_i(j) - \bar{x}_i)^2$$

$$\sigma_{Bx_i}^2 = \frac{(\text{error máximo})^2}{3}$$

El error máximo viene dado por la hoja de calibrado del instrumento



# Cálculo de k

- $y \pm \Delta y = y \pm k \sigma_c$ ,  $\sigma_c$  desviación típica combinada de los errores tipo A y B
- Para un número de muestras  $n \geq 10$   $k = 2$
- Para un número menor  $k = t_{\alpha, v}$  siendo t la distribución de Student,  $\alpha = 5\%$  y  $v = n^\circ$  de grados de libertad efectivos

$v_i = n^\circ$  de grados de libertad de cada variable

$$v = \frac{\sigma_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{\left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^4 \sigma_{cx_i}^4}{v_i}}$$



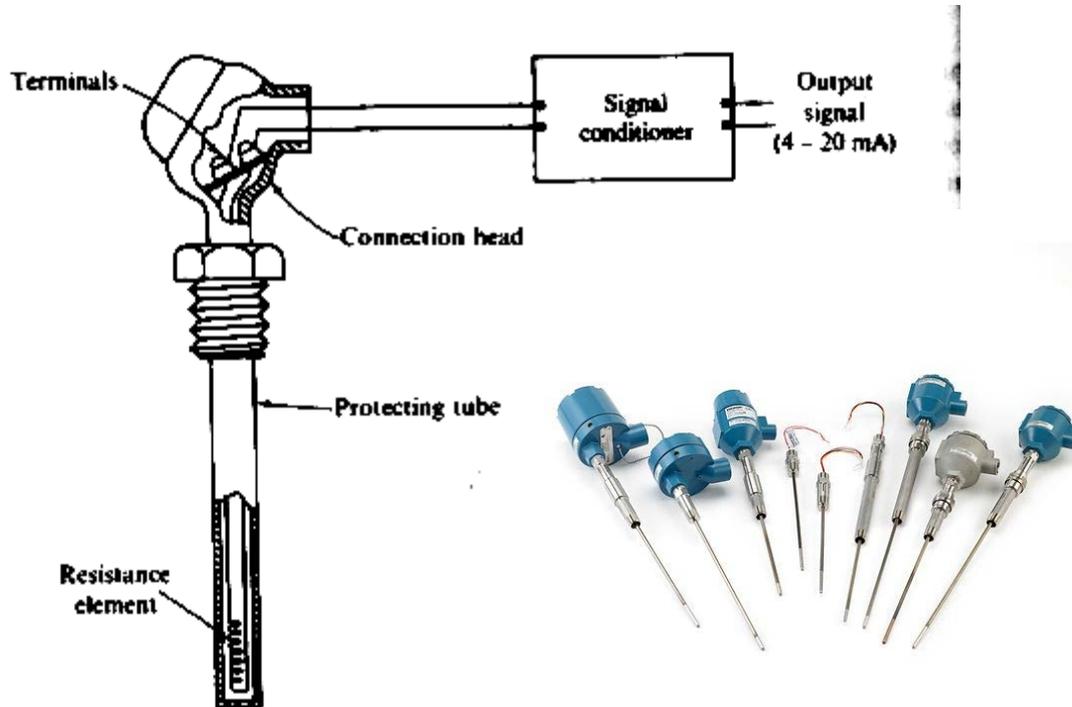
# Transmisores de Temperatura

---

- ✓ De bulbo
- ✓ RTD (Pt100 0°C 100  $\Omega$ )
- ✓ Termistores (Semiconductores)
- ✓ Termopares E, J, K, RS, T
- ✓ Pirómetros (altas temperaturas, radiación)



# Pt-100



0°C      100Ω

La resistencia eléctrica cambia con la temperatura

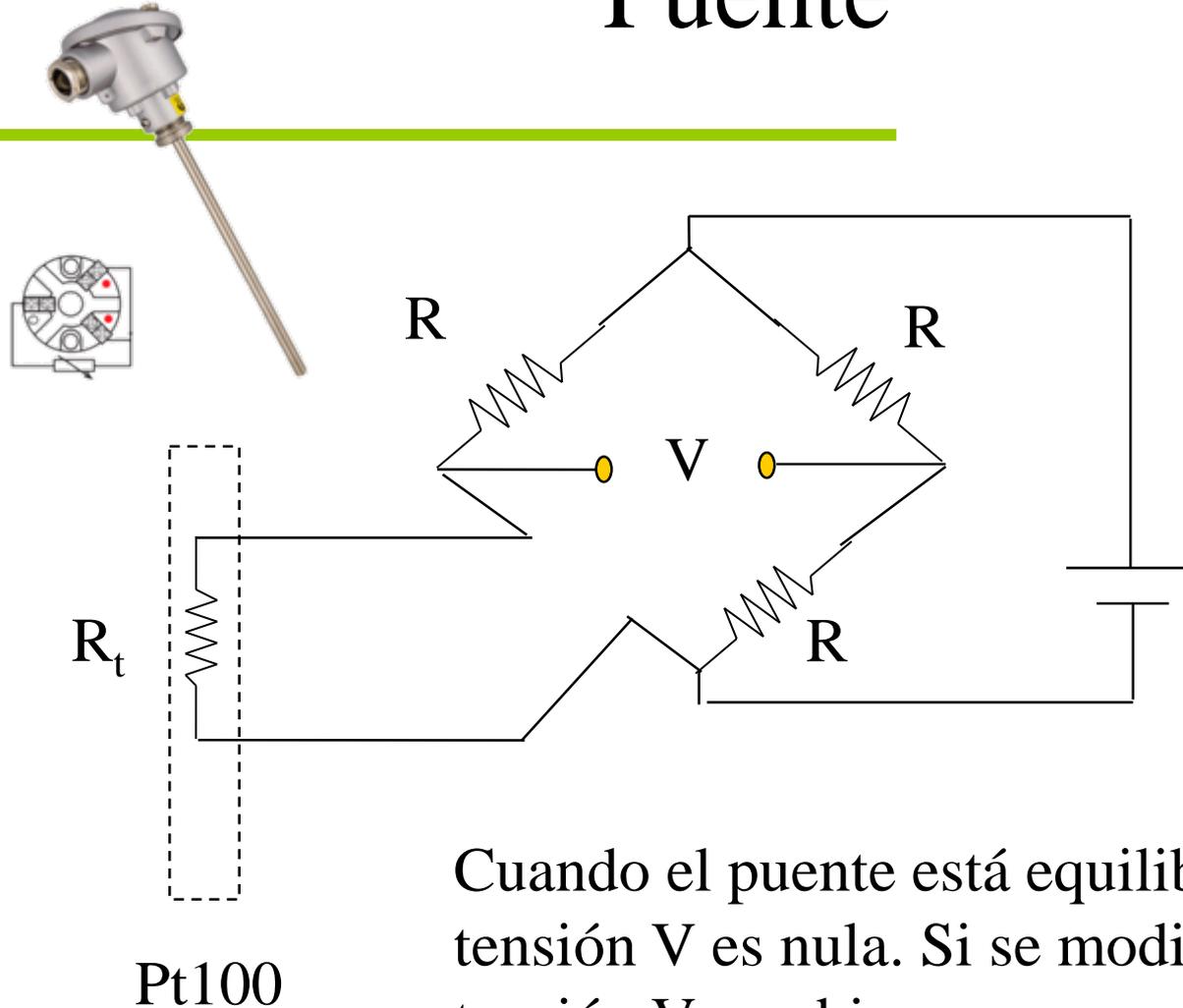
Puente eléctrico para la conversión a señal eléctrica de tensión

Margen de empleo: -200 500°C      Sensibilidad: 0.4 Ω/°C

Precisión: 0.2%



# Puente



Cuando el puente está equilibrado, la tensión  $V$  es nula. Si se modifica  $R_t$  la tensión  $V$  cambia.

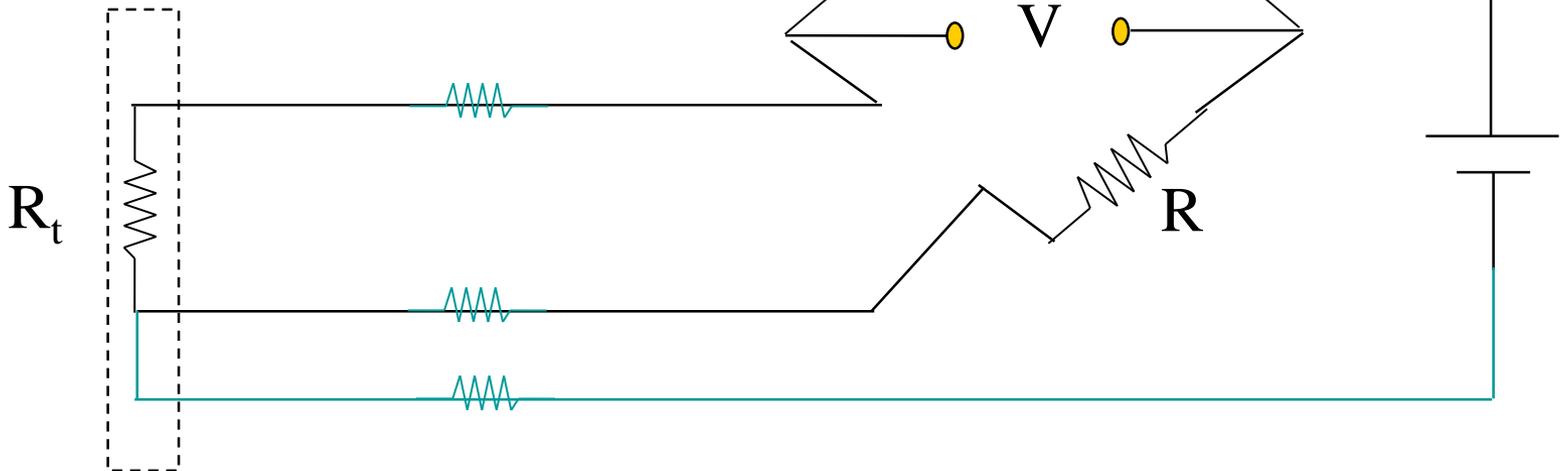


# Conexión a tres hilos

Muchos TT  
incorporan una  
cabeza con  
salida 4-20mA



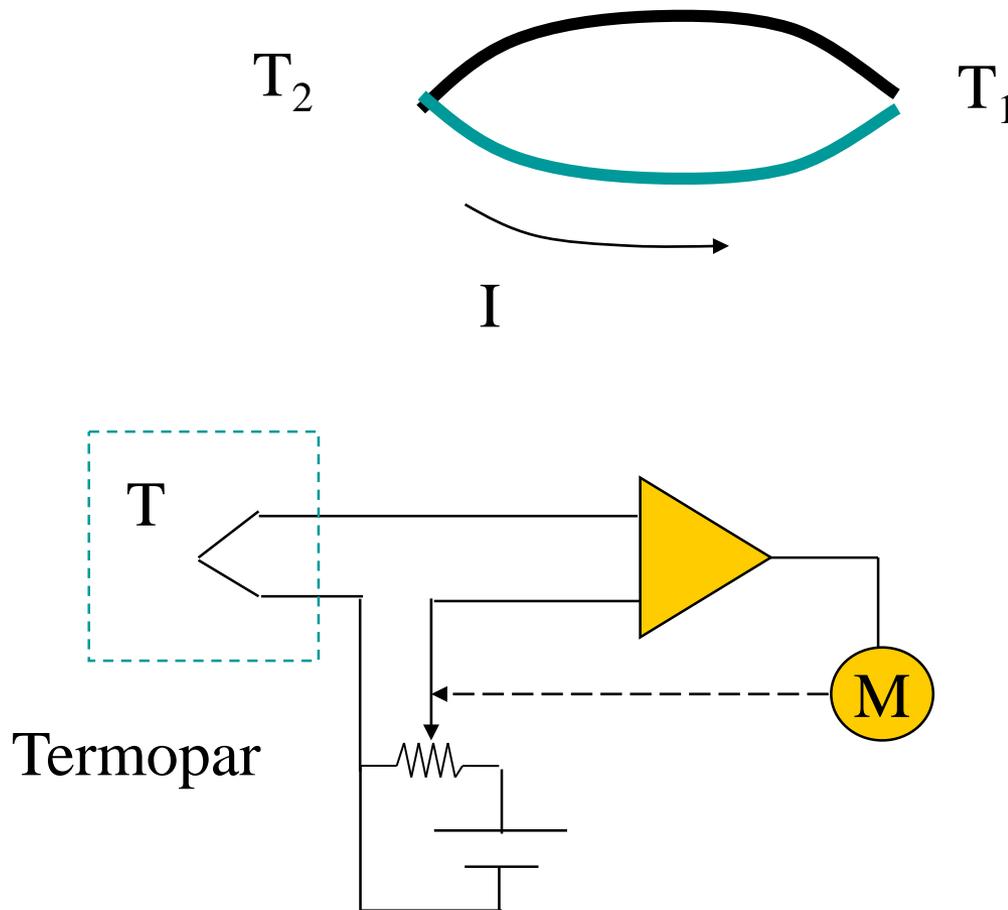
Pt100



La longitud de los hilos de conexión influye en la medida, la conexión del tercer hilo a la Pt100 hace que se añada la misma resistencia a cada rama y se compensa el desequilibrio producido en el puente por los hilos



# Termopares



En la unión de ciertos metales se genera una f.e.m. si los extremos están a temperaturas diferentes. La f.e.m. depende de la diferencia de temperatura

Medida: Se opone una tensión conocida a la del termopar hasta que la salida del amp. diferencial es nula



# Termopares

---

Tipo	Rango	Precisión
T	-200 250°C	2%
J	0 750°C	0.5%
K	0 1300°C	1%
R / S	0 1600°C	0.5%
W	0 2800°C	1%



# Transmisores de presión

---

- ✓ Presión absoluta
- ✓ Presión manométrica
- ✓ Presión diferencial

Medidas basadas en:

- Desplazamiento
- Galgas extensiométricas
- Piezoelectricidad



$$1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bar}$$

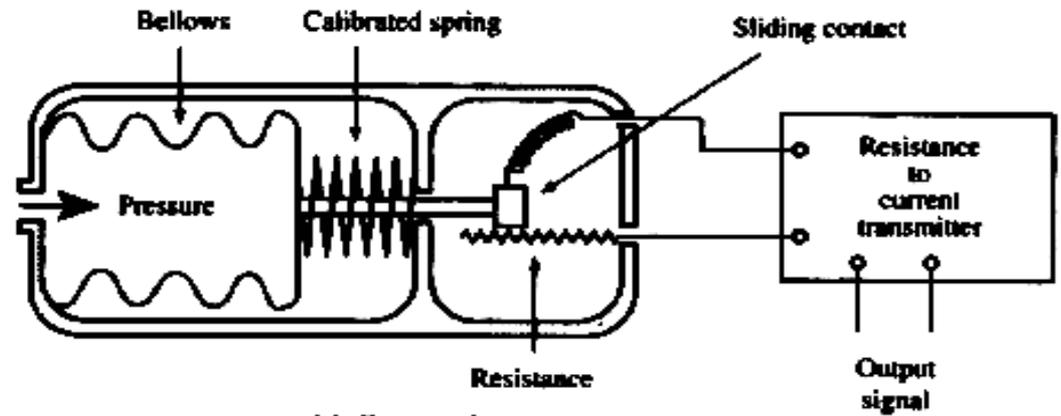


# Potenciómetro

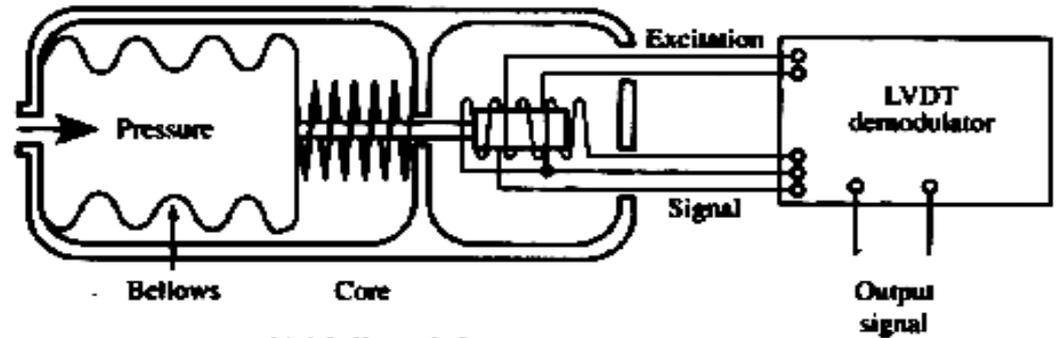
## Sensor de desplazamiento

### Inducción

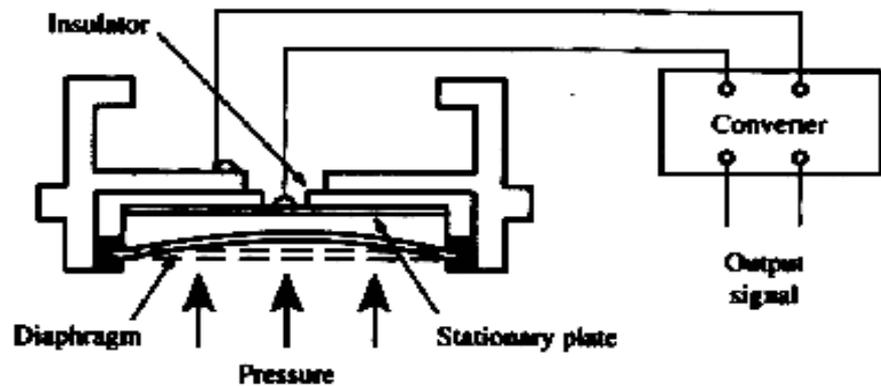
### Capacidad



a) A bellows-resistance pressure sensor



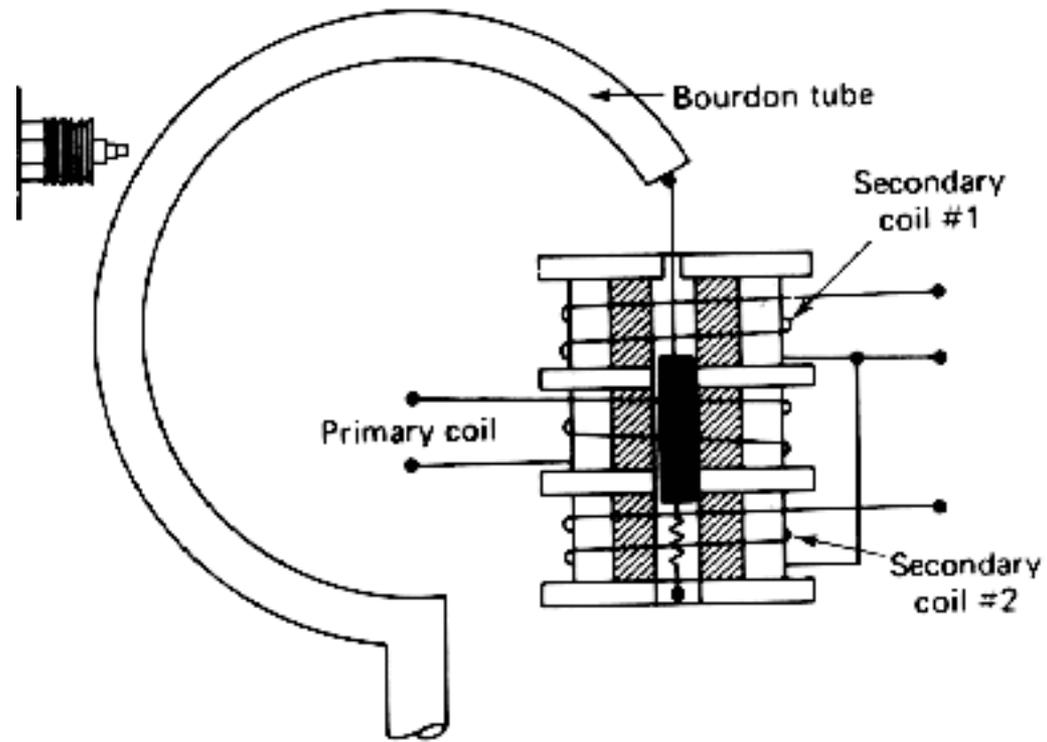
b) A bellows-inductance pressure sensor





# Presión

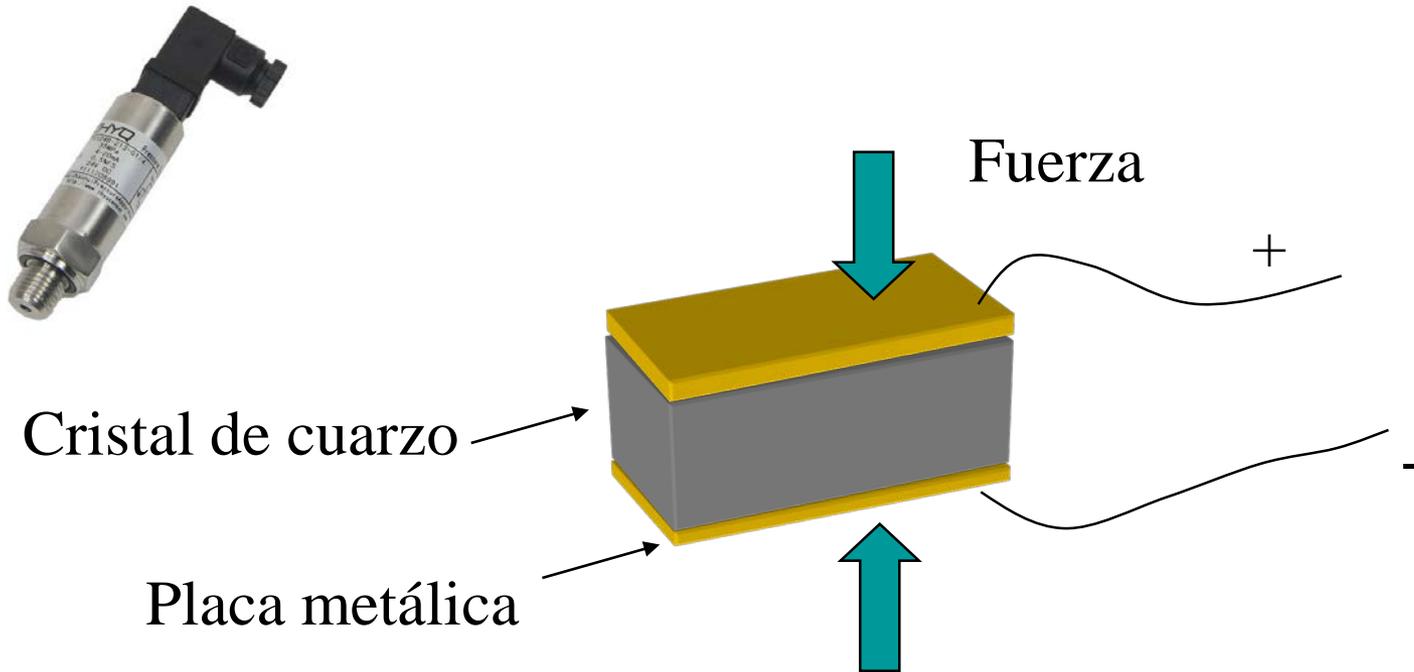
Chapter 3



(B)



# Sensor piezoeléctrico

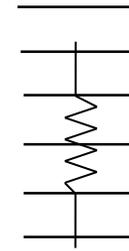


Temperatura máxima de  
operación “Temperatura  
de Curie”



# Galgas / Efecto Hall

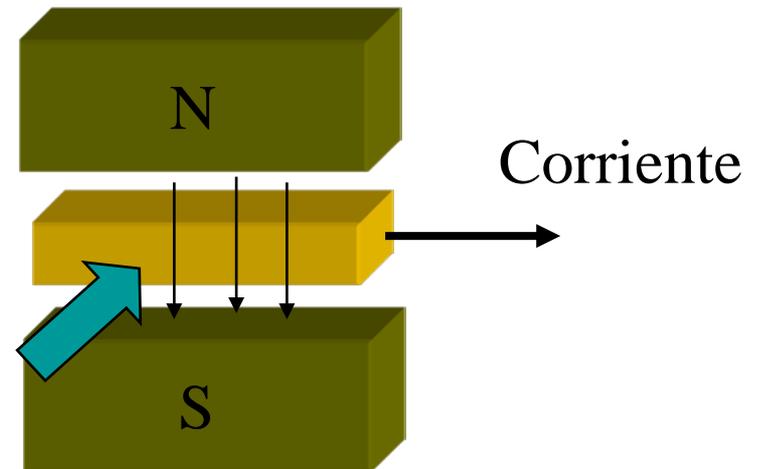
Galgas  
extensiométricas



La  
deformación  
varia R

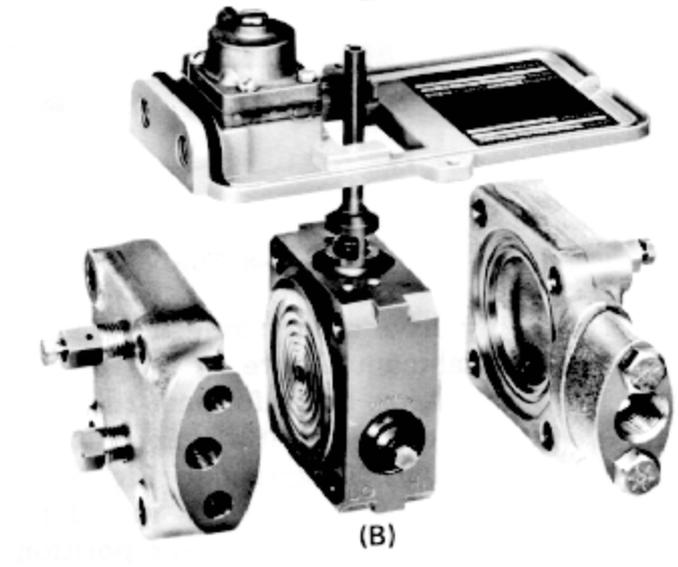
Efecto Hall

Fuerza





# Transmisor de presión





# Transmisores de nivel

---

- ✓ Desplazamiento
  - Flotador
  - Fuerza: Principio de Arquímedes
- ✓ Presión diferencial
- ✓ Capacitivos
- ✓ Ultrasonidos
- ✓ Radar





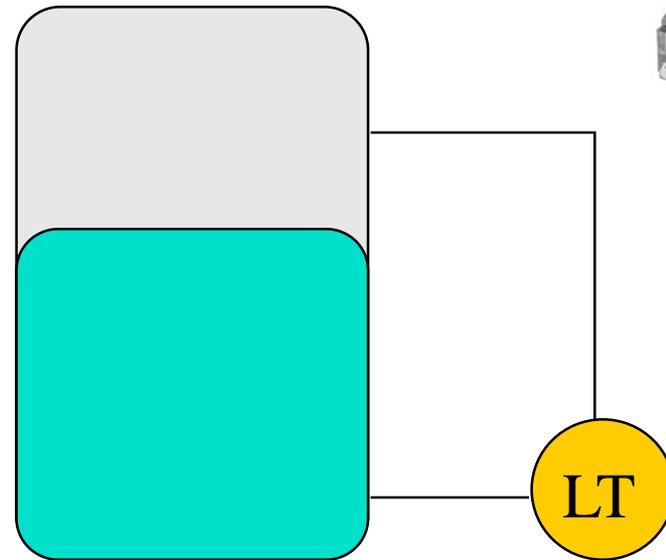
# Nivel: presión diferencial

Se mide la diferencia de presión entre ambas ramas

Se supone la densidad constante

Condensación en los tubos

En depositos abiertos una rama queda al aire

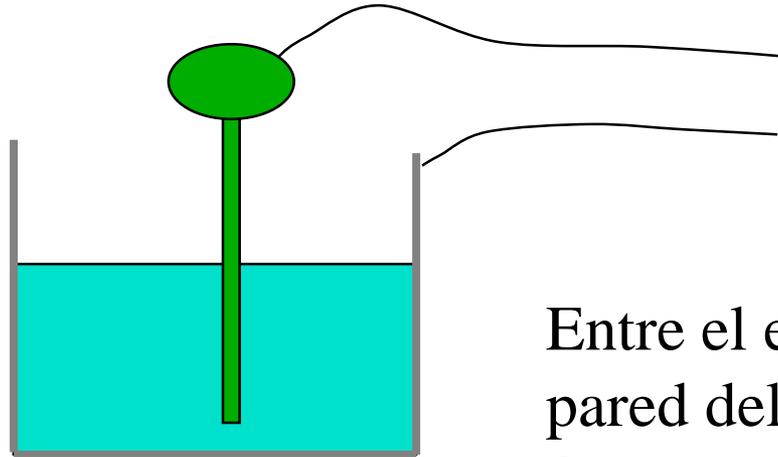
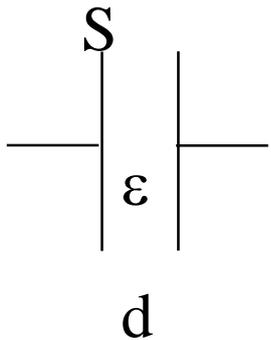


$$(p_0 + \rho gh) - p_0$$



# Capacitivos

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

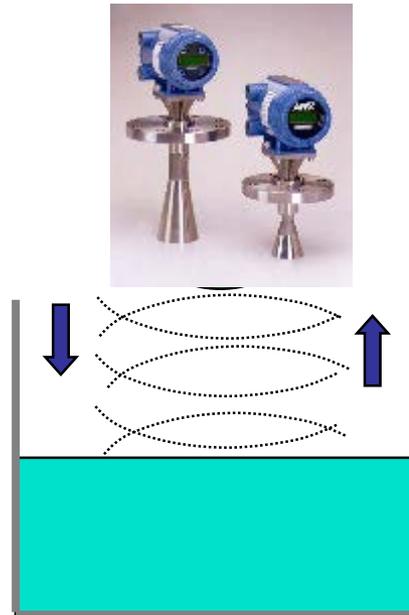


Entre el electrodo y la pared del depósito se forma un condensador cuya capacidad depende del nivel de líquido



# Nivel: Ultrasonidos, Radar

---



El tiempo entre la emisión y la recepción de las ondas de alta frecuencia es proporcional al nivel



# Transmisores de Caudal

- ✓ Presión diferencial
- ✓ Electromagnéticos
- ✓ Turbina
- ✓ Vortex
- ✓ Efecto Doppler
- ✓ Másicos (Coriolis) .....





# Transmisores de Caudal

4. Caudal MIC l.pdf - Adobe Acrobat Pro

Archivo Edición Ver Ventana Ayuda

Abrir Crear Herramientas Rellenar y firmar Comentario

5 / 95 111%

Sección Española **CLASIFICACIÓN f (Tipo de Medidor)** REPSOL

- Porcentaje de medidores instalados en varios tipos de industrias. Datos obtenidos consultando más de 500 suministradores y usuarios a lo largo de todo el mundo.
  - Fuente. Flow Control Magazine, 14 Septiembre 2006

Tipo de Medidor	Porcentaje
Pres. Diferencial	44,5%
Magnéticos	10,5%
Coriolis	9,6 %
Turbina	9,5%
Desp. Positivo	6,7 %
Térmicos	5,0 %
Area Variable	4,7%
Ultrasonidos	4,2%
Vortex	3,3 %
Otros	2,0 %

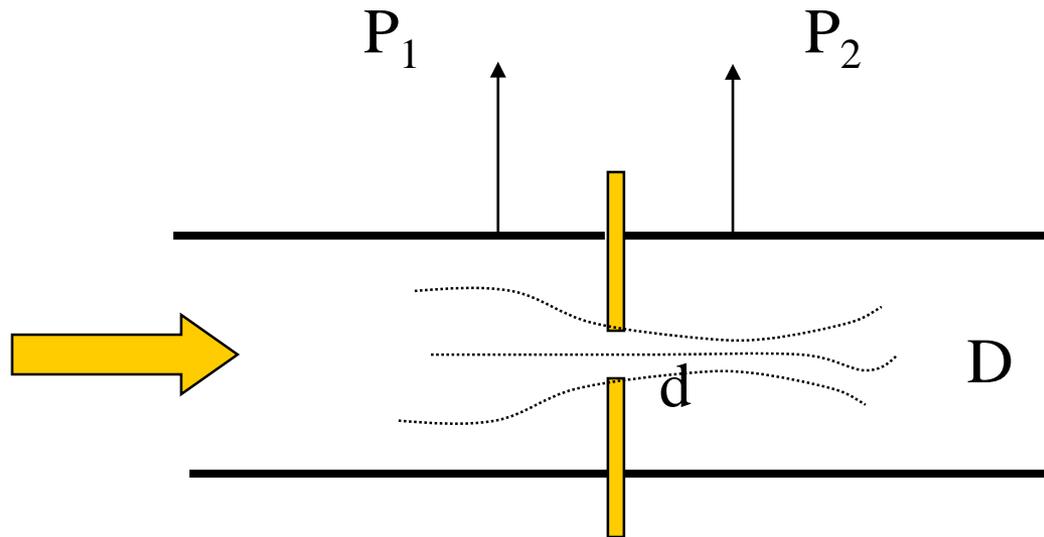
2A 1-4 - Variables de proceso. Caudal  
Master ISA de Instrumentación y Control

5

Programas 9:56 15/02/2017



# Placas de orificio



Basada en la medida de presión diferencial



$$q = C \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad \beta = \frac{d}{D}$$



# Placas de orificio

---

- Es el método más utilizado para la medida de caudal.
- Cuando el fluido alcanza el orificio aumenta ligeramente la presión. Después de atravesarlo disminuye súbitamente.
- Existe pérdida de carga permanente.

## Ventajas

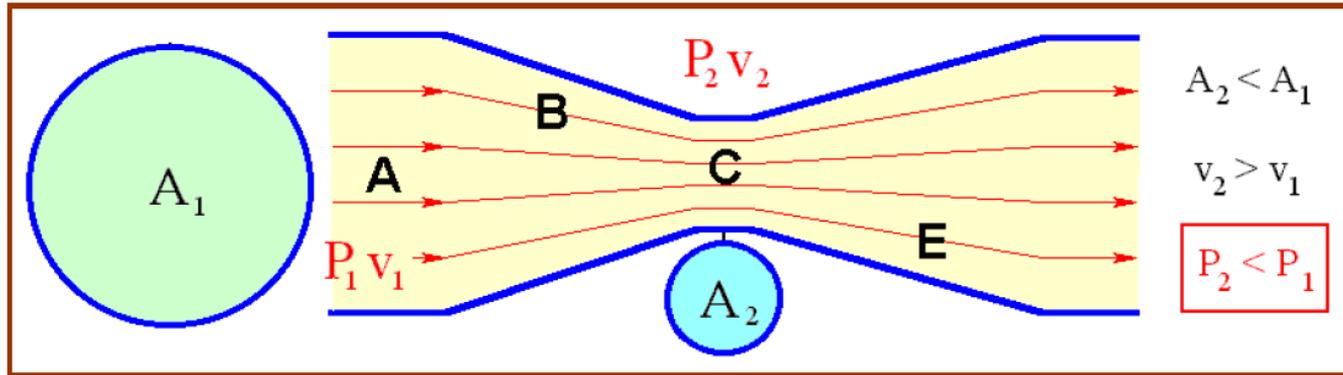
- Apto para la mayoría de gases, líquidos y vapor de agua.
- Simplicidad
- Bajo coste.
- Fácil de instalar
- Fácil de reemplazar

## Desventajas

- Alta pérdida de carga. Parte de la cual no se recupera.
- Rangeabilidad limitada, 4:1.
- La exactitud se ve afectada por las condiciones del fluido.
- Puede tener problemas con productos con mucha viscosidad (slurry).



# Tubo Venturi



Mismo principio físico

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_1$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \uparrow v \quad \downarrow P$$

**Caudal = Sección \* Velocidad**





# Tubo Venturi

---

- Es un medidor de caudal volumétrico

## Ventajas

- Entrada y salida cónica para impedir que se forme turbulencia.
- Baja pérdida de carga.
- Se puede utilizar con fluidos sucios.
- Resiste bien la erosión, impidiendo la acumulación de partículas.
- Costes de mantenimiento bajos.

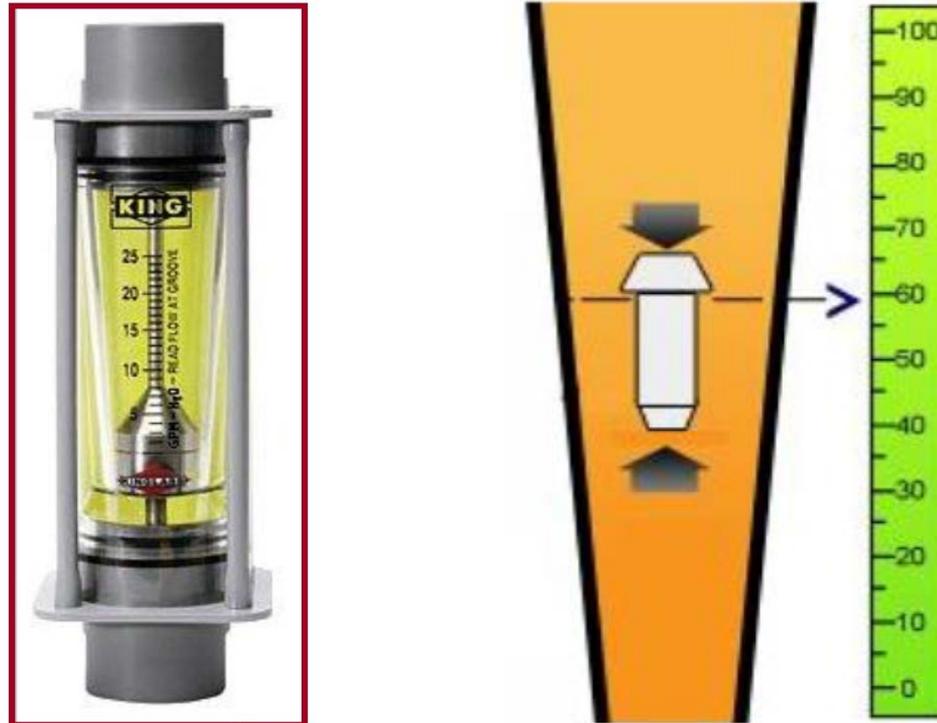
## Limitaciones

- Ocupa mucho espacio.
- El coste es mayor que el de un conjunto de placa de orificio.



# Medidor de área variable

- Consta básicamente de un tubo troncocónico en cuyo interior se desplaza un flotador
- Se conoce con el nombre de **ROTÁMETRO**
- El fluido entra por la parte inferior y al aumentar el caudal se produce un empuje ascendente del flotador





# Medidor de área variable

---

- Se utilizan fundamentalmente donde se requiere indicación local de fluidos limpios y bajos caudales.

## Ventajas

- Bajo coste
- Simplicidad
- Apto para caudales muy pequeños.
- Caída de presión constante y muy pequeña.
- Rango de caudal 10:1
- Lectura lineal
- El fluido puede ser transparente u opaco.

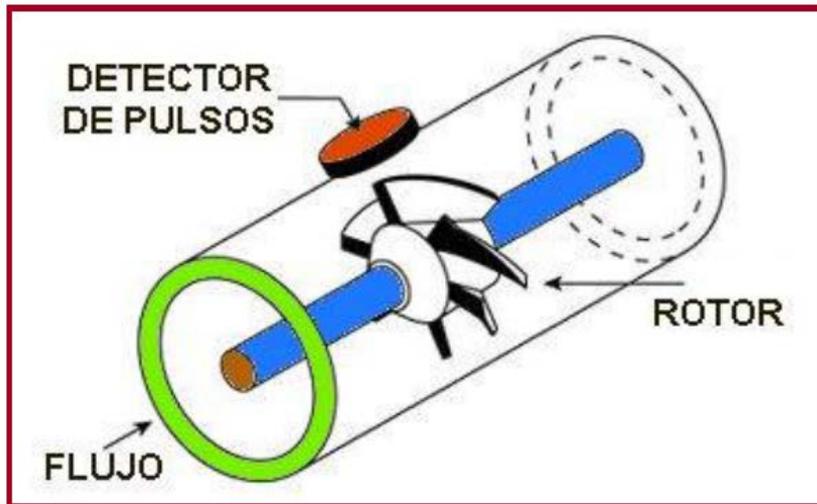
## Limitaciones

- La escala está referida al agua o al aire. Para otros productos necesita compensación.
- Debe estar montado verticalmente.
- Capacidad limitada para caudales altos
- La exactitud se ve afectada por las condiciones del fluido.
- Sólo se puede utilizar para fluidos limpios.
- La suciedad sobre el cristal dificulta la lectura.



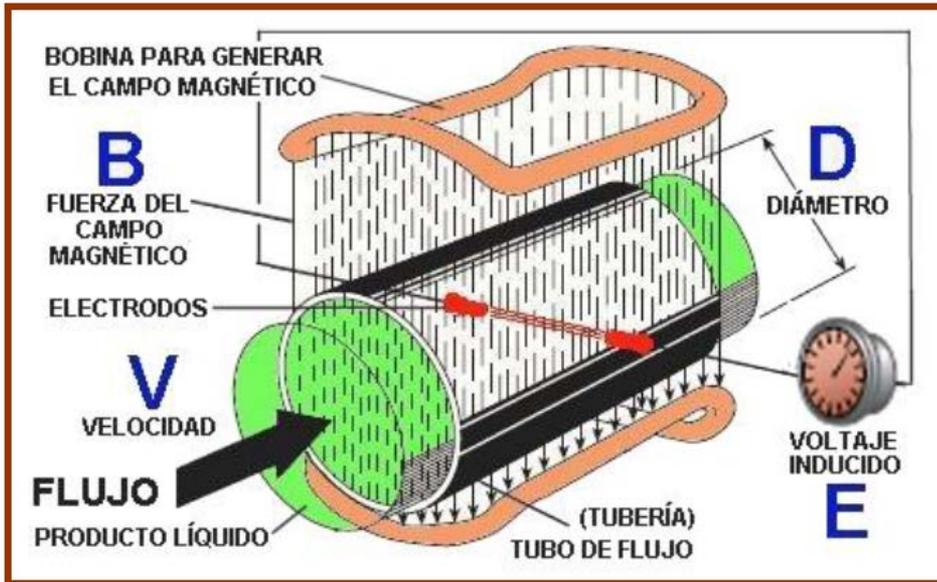
# Medidor de turbina

- La turbina utiliza la energía mecánica del fluido para hacer girar un rotor introducido en la corriente.
- El movimiento de las paletas se detecta con un sistema magnético.

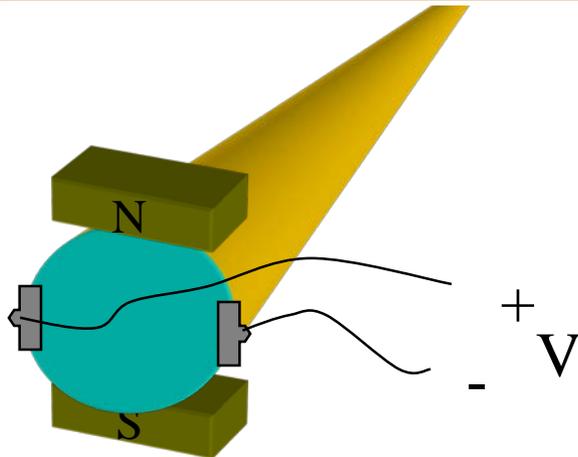




# Caudalímetros electromagnéticos



En el conductor (líquido) que circula a una velocidad en el seno del campo  $B$  se induce una f.e.m. proporcional a la velocidad, que se recoge en los electrodos





# Caudalímetros Vortex



Cuando una corriente fluida rodea un obstáculo, se forman remolinos alternativamente a cada lado del mismo

La frecuencia a la que se forman los remolinos es directamente proporcional a la velocidad del fluido y por tanto al caudal.

$$v = 4.167 d \text{ frequency}$$

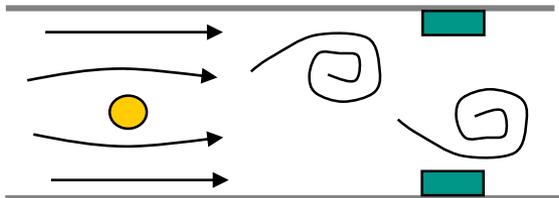
d = diámetro del obstáculo



# Caudalímetros Vortex



$$v = 4.167 \text{ d frecuencia}$$

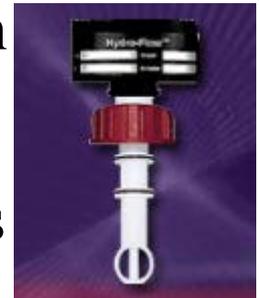


Los caudalímetros vortex industriales tienen un obstaculo que genera remolinos.

Contaje del número de remolinos generados por unidad de tiempo: perturbaciones en sensores de presión, capacidad, ultrasonidos, etc.

Válido para gases y líquidos en amplio rango.

No válido para flujos pequeños



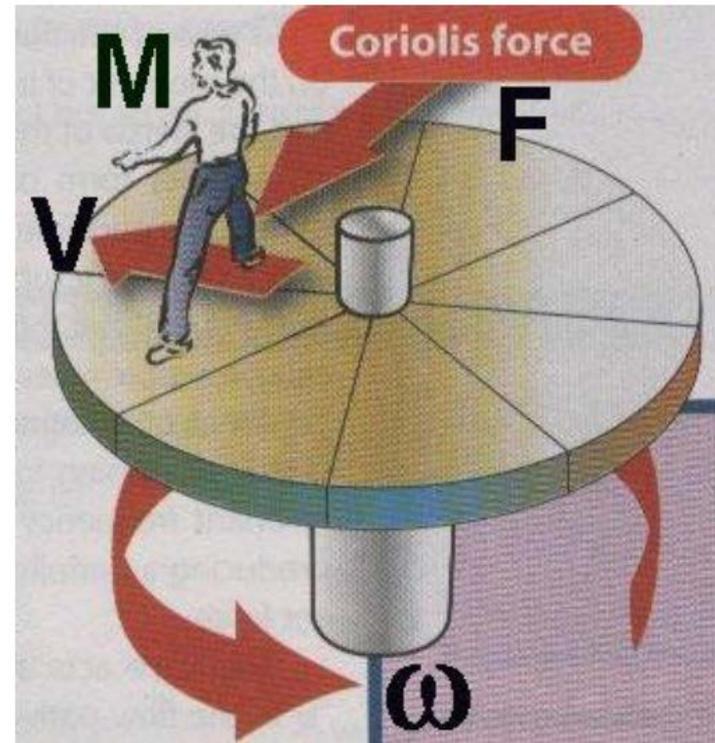


# Caudalímetros Coriolis

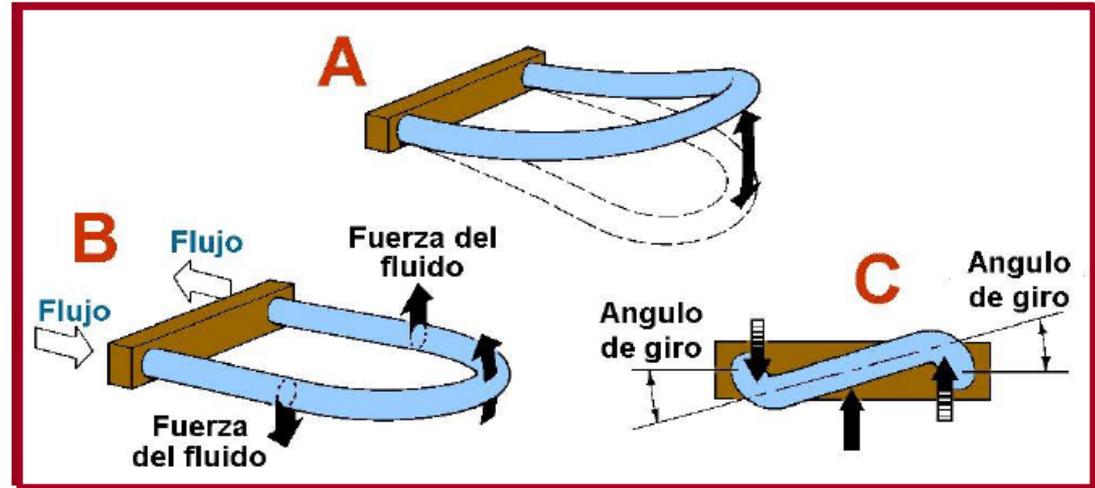


## ***EFFECTO CORIOLIS***

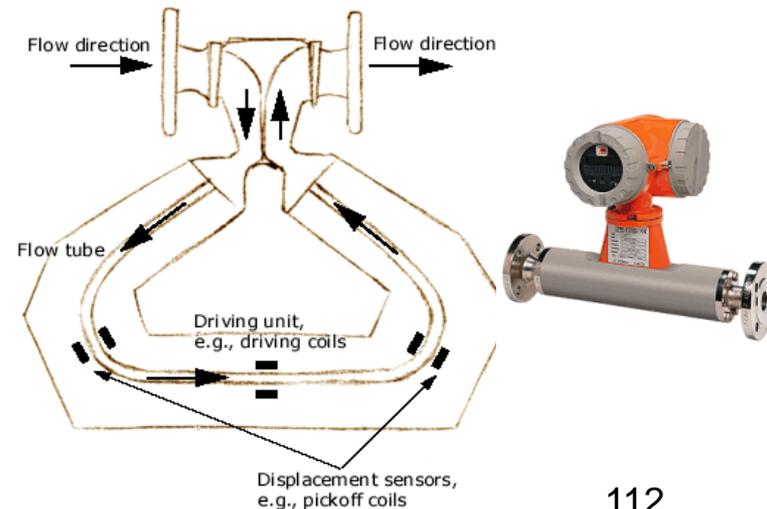
“ Un objeto que se mueve en un sistema de coordenadas que rota con velocidad angular, experimenta una fuerza Coriolis proporcional a la masa y velocidad del fluido, así como a la velocidad angular del sistema”



# Caudalímetros Coriolis

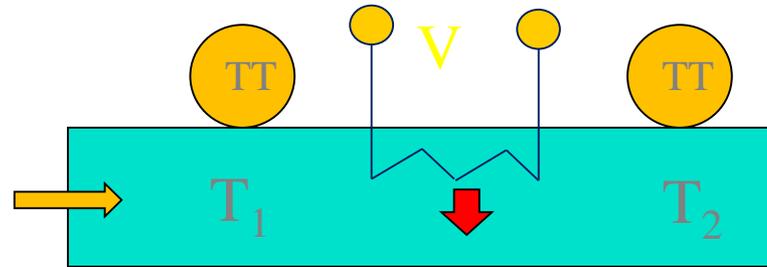


Se fuerzan oscilaciones en la tubería cuyo diseño en forma de U induce fuerzas (de Coriolis) opuestas en ambos lados. Hay un desfase entre el lado de entrada y el de salida que depende del flujo másico. Se usan sensores magnéticos para medir el desfase.





# Caudalímetros másicos para gases (Medidor Eldridge)



Para un suministro constante de calor por energía eléctrica, la diferencia de temperaturas depende del flujo másico



# Caudalímetros Coriolis y Eldridge

---

- Miden caudal en unidades de masa

## Ventajas

- El Coriolis es válido para líquido y gas
- Los sensores Eldridge solo miden gas
- Buena exactitud.
- Lectura directa en unidades de masa sin necesidad de compensación.
- Costes de mantenimiento reducidos.
- Amplia rangeabilidad, 25:1
- Salida lineal

## Limitaciones

- Conjunto relativamente caro.
- El Coriolis tiene pérdida de carga media y costes de instalación altos.
- El Coriolis no es utilizable en tuberías de gran tamaño.
- Los sensores Eldridge deben ser calibrados para cada gas en particular porque la masa depende de las características de ese gas.



# Selección de Transmisores de caudal

- **EXACTITUD:** el más exacto es el de efecto coriolis y le sigue el de turbina.
- **PÉRDIDA DE CARGA PERMANENTE:** los magnéticos son los que menos pérdida de carga ocasionan al no oponer ninguna restricción al paso del fluido.
- **COSTE:** el de menor coste es el de placa de orificio y el Coriolis el de mayor coste.

R = Recomendado  
L = Limitado  
N = No recomendado

	Líquido limpio	Líquido sucio	Líqu. viscoso	Líqu. corrosivo	Slurry	Gas limpio	Gas sucio	Vapor agua
Área variable	R	L	L	L	N	R	N	N
Desplazamiento positivo	R	L	R	L	N	R	N	N
Coriolis	R	R	R	L	R	L	L	L
Tubo Venturi	R	L	N	L	L	R	L	L
Turbina	R	N	L	L	N	R	N	N
Tubo Pitot	R	R	N	L	N	R	N	N
Magnéticos	R	R	R	R	R	N	N	N
Ultrasonidos (Transit/Doppler)	R/N	N/R	L/L	R/R	N/R	R/N	N/L	N/N
Vortex	R	L	N	L	N	R	L	R
Presión diferencial	R	L	L	L	L	R	L	R



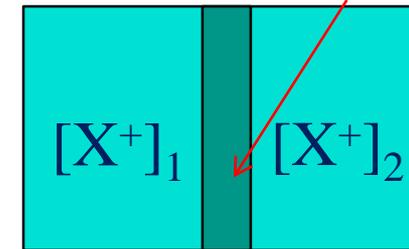
# pH

El pH de una solución puede medirse mediante un peachímetro, o dispositivo que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos en una celda electroquímica, uno de referencia insensible a la solución (típicamente cloruro de plata/plata) y otro de membrana de vidrio sensible al ión hidrógeno  $H^+$



Sensores con los dos electrodos

Membrana

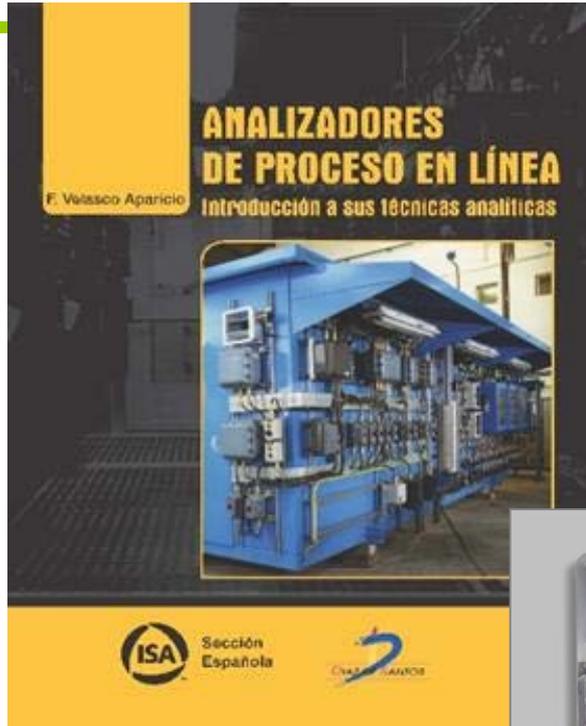


Electrodo de membrana

Potencial entre los dos lados de la membrana con diferentes concentraciones  $[x^+]$ ,  $z$  carga eléctrica,  $F$  constante de Faraday

$$E = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[X^+]_1}{[X^+]_2}$$

# Analizadores



Sistema automatizado de toma de muestras y análisis químico para conocer la composición de un fluido

Diversas técnicas:  
cromatográficas,  
electroquímicas, fotométricas,  
espectroscópicas,...

Caros y difíciles de mantener



# Analizadores



Armario de sistemas de emisiones



# Analizadores



Rack de analizadores y caseta abierta



# Escogiendo un transmisor...

Configuration Data Sheet  
February 2004  
Revision JA  
Rosemount 644

## Configuration Data Sheet

\* = Default Configuration

### HART TRANSMITTER

Customer Information	
Customer	P.D. No.
Model No.	Line Item

### Input - Output Information (software selectable)

Sens or Type		No. of Leads	
<input type="checkbox"/> Pt100 a = 0.00385	<input type="checkbox"/> 2-Wire	<input type="checkbox"/> NIST Type B T/C	
<input type="checkbox"/> Pt100 a = 0.003916	<input type="checkbox"/> 3-Wire	<input type="checkbox"/> NIST Type E T/C	
<input type="checkbox"/> Pt200 a = 0.00385	<input type="checkbox"/> 4-Wire*	<input type="checkbox"/> NIST Type J T/C	
<input type="checkbox"/> Pt500 a = 0.00385		<input type="checkbox"/> NIST Type K T/C	
<input type="checkbox"/> Pt1000 a = 0.00385		<input type="checkbox"/> NIST Type N T/C	
<input type="checkbox"/> Ci 10		<input type="checkbox"/> NIST Type R T/C	
<input type="checkbox"/> Ni 120		<input type="checkbox"/> Type W5Re/W26Re	
<input type="checkbox"/> Transmitter Sens or matching (C20 Optio)		<input type="checkbox"/> NIST Type S T/C	
		<input type="checkbox"/> NIST Type T T/C	
		<input type="checkbox"/> DIN Type L T/C	
		<input type="checkbox"/> DIN Type U T/C	
		<input type="checkbox"/> mV	
		<input type="checkbox"/> 0ims	
4-20 mA Pulse and Damping	4 mA Valve	20 mA Valve	Damping
	<input type="checkbox"/> 0°C*	<input type="checkbox"/> 100°C*	<input type="checkbox"/> 5 Seconds*
	<input type="checkbox"/> °C	<input type="checkbox"/> °C	<input type="checkbox"/> Other
	<input type="checkbox"/> °F	<input type="checkbox"/> °F	(value must be less than 32 seconds)
	<input type="checkbox"/> °R	<input type="checkbox"/> °R	
	<input type="checkbox"/> K	<input type="checkbox"/> K	
<input type="checkbox"/> mV	<input type="checkbox"/> mV		
<input type="checkbox"/> 0ims	<input type="checkbox"/> 0ims		

Configuration Data Sheet  
February 2004  
Revision JA  
Rosemount 644

Tagging
Hardware Tag (13 characters maximum)
Software Tag (8 characters maximum - default is first 8 characters of the hardware tag)

Transmitter Information	
Integral Meter (644H Only-MS option)	With Meter (choose as many as desired)
	<input type="checkbox"/> Engineering Units* <input type="checkbox"/> mA*
	<input type="checkbox"/> Percent Range
NOTE: If an Integral meter is ordered with the transmitter, the default configuration alternates between "Engineering Units" and "mA".	
Descriptor (C1 Optio)	(16 characters maximum)
Message (C10 Optio)	(2 Lines x 16 characters max)
Date (C1 Optio)	<input type="checkbox"/> Day (numeric) <input type="checkbox"/> Month (alphabetic)
	<input type="checkbox"/> Year (numeric)

Failure Mode and Software Security
Failure Mode High
Software Security Off
Continued on Next Page

<http://www.flowexpertpro.com/>

<http://www.emersonprocess.com/rosemount/>

<http://www.yokogawa.com/fld/fld-top-en.htm>



# Actuadores

---

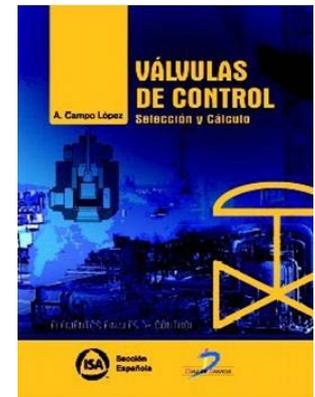
- ✓ Elementos finales de control. Modifican la variable manipulada del proceso de acuerdo a la señal del controlador.
  - Válvulas
  - Motores
  - Bombas de velocidad variable
  - Amplificadores de potencia
  - ....



# Válvulas

✓ Dispositivos que permiten variar el caudal que pasa por una conducción modificando la pérdida de carga en la misma mediante una obturación variable.

- Cierre manual
- Retención
- Seguridad
- On/Off
- Regulación

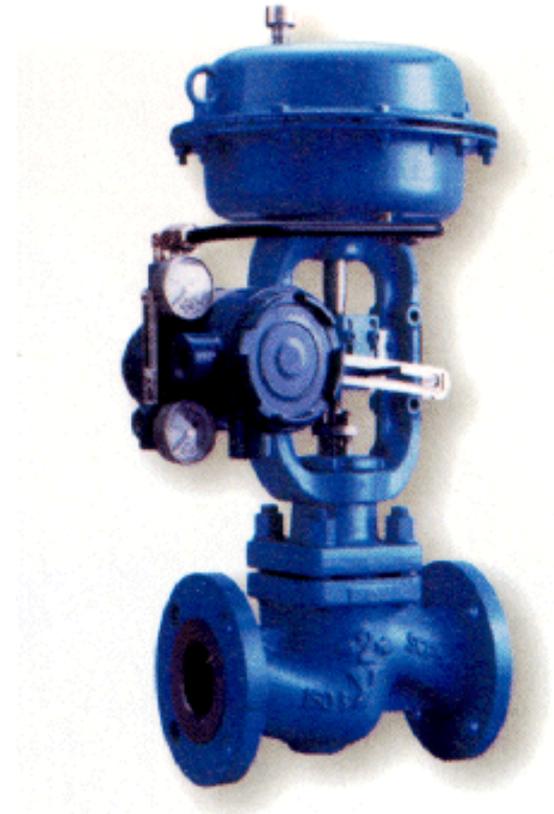




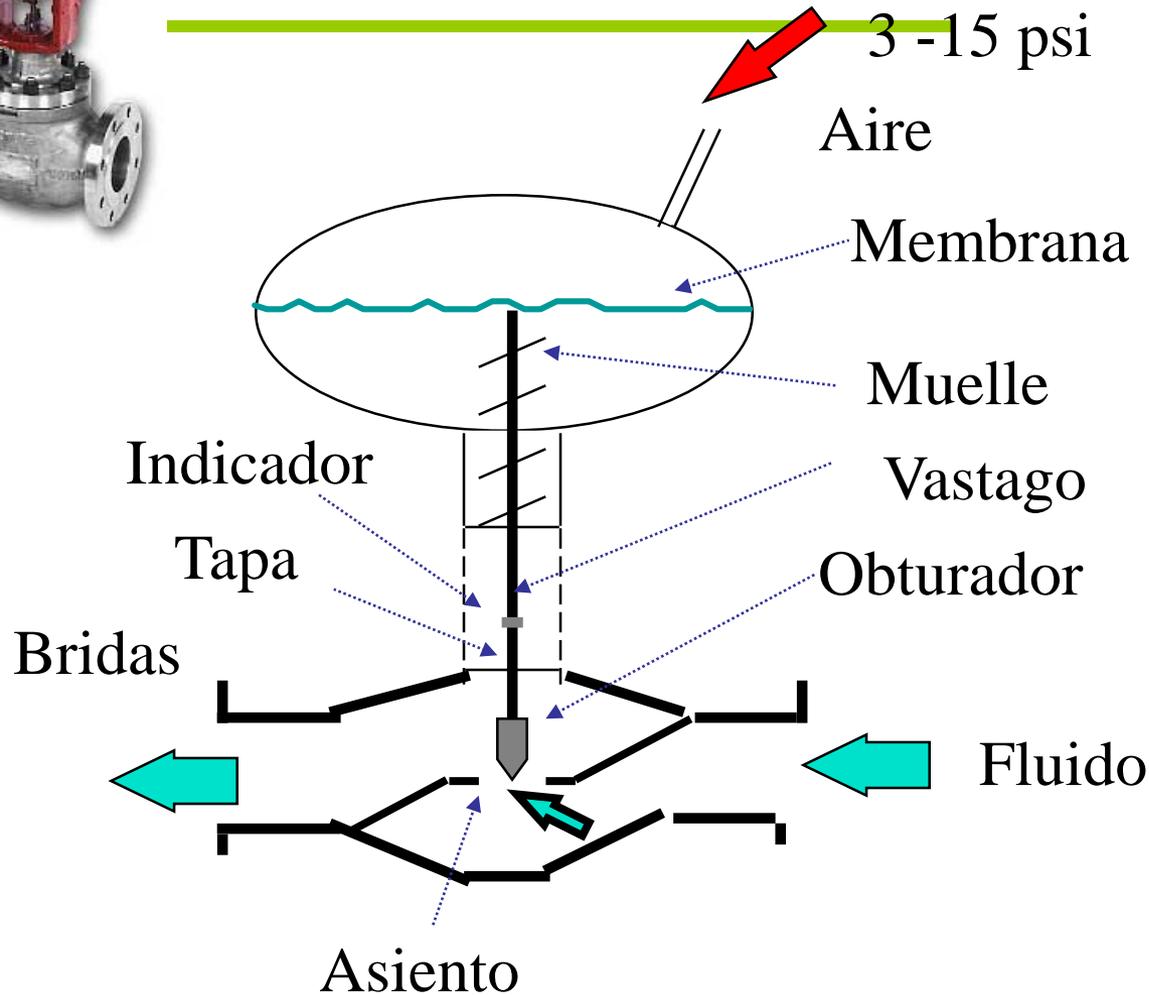
# Válvulas de regulación

---

- ✓ Estructura y funcionamiento
- ✓ Tipos de válvulas
- ✓ Fórmulas de cálculo
- ✓ Características estáticas
- ✓ Cavitación
- ✓ Características instaladas
- ✓ Dinámica de una válvula



# Válvula neumática de asiento

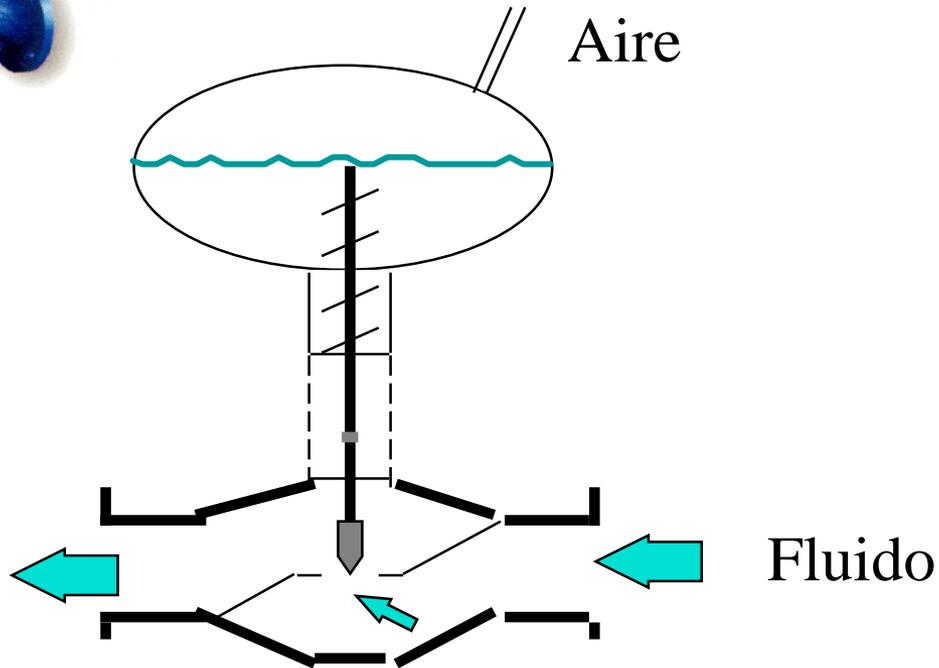
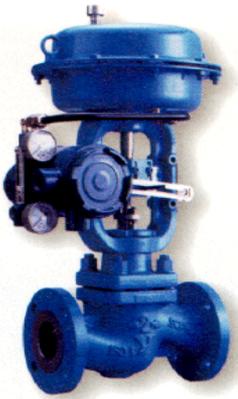


Servomotor

Neumático  
Electrico

Cuerpo

# Válvulas de regulación



- Estanqueidad
- Presión máxima
- Capacidad de caudal
- Tipo de fluido

Asiento o globo  
Doble asiento  
Aguja  
Saunders  
Compuerta  
Bola  
Mariposa  
Camflex II

2 -3 vias



# Mariposa / Bola / Camflex



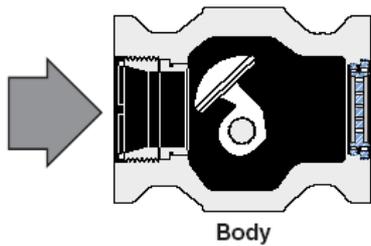
Butterfly (Mariposa)



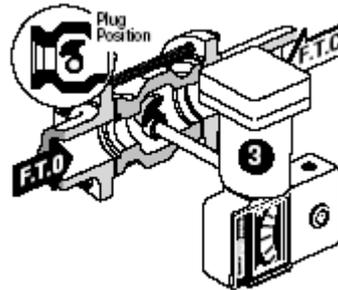
Compuerta



Ball Valves



Body



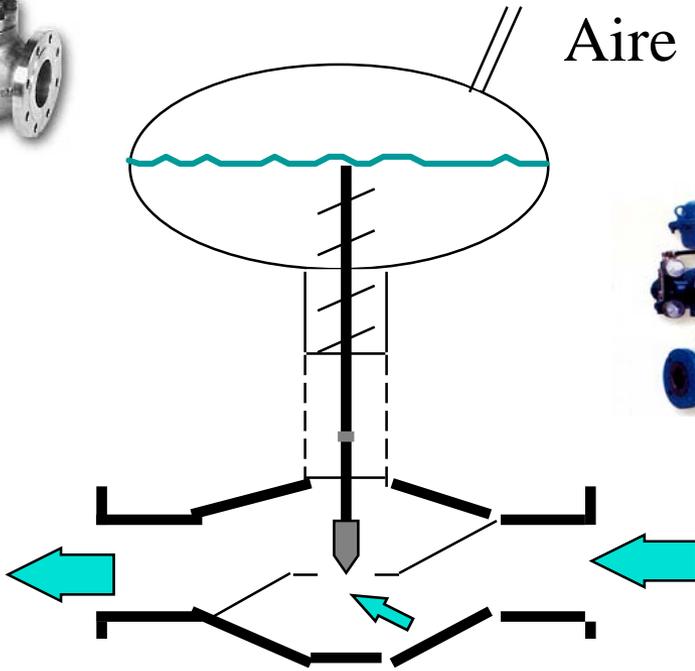
Camflex II



# Aire abre/cierra

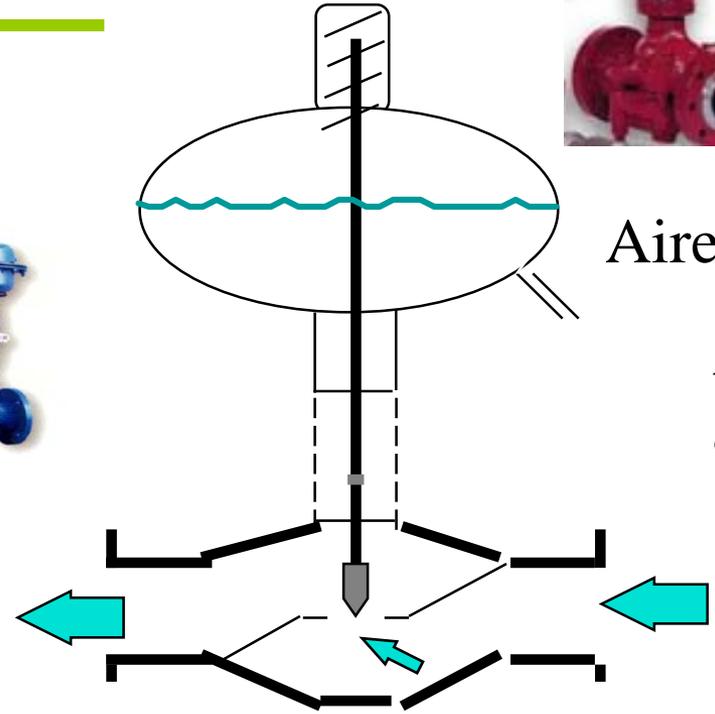


Aire  
cierra

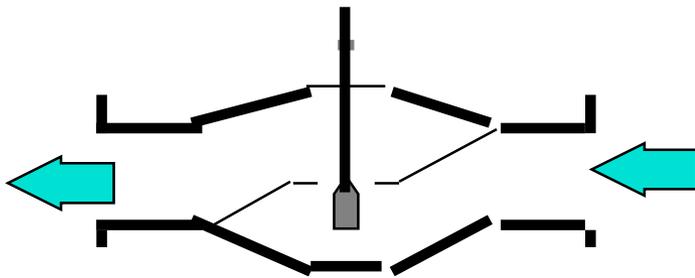


Aire

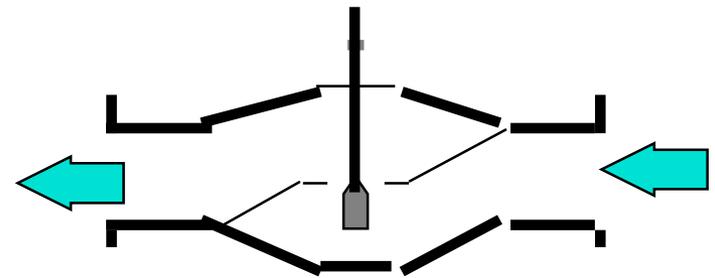
Aire  
abre



Aire  
abre

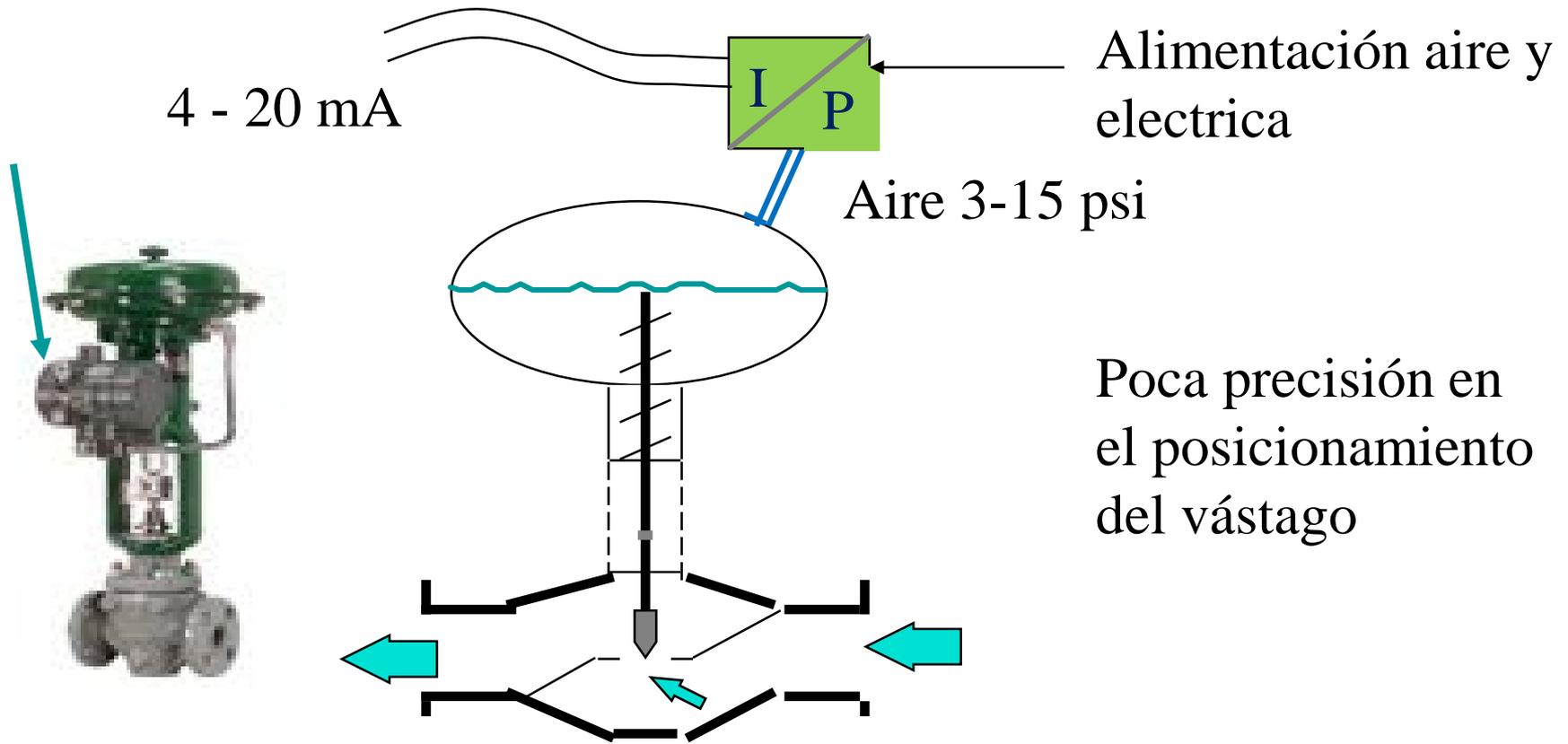


Aire  
cierra



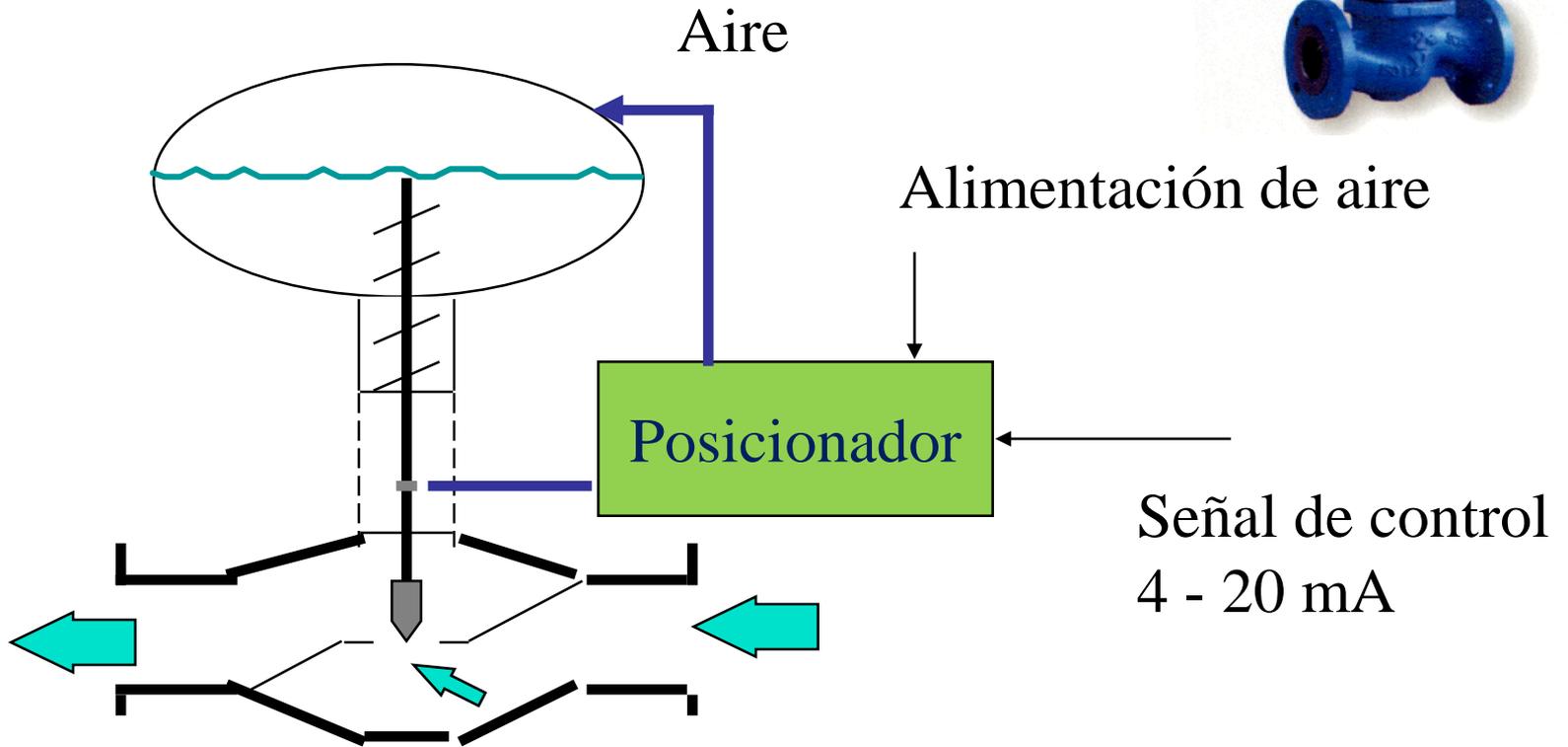
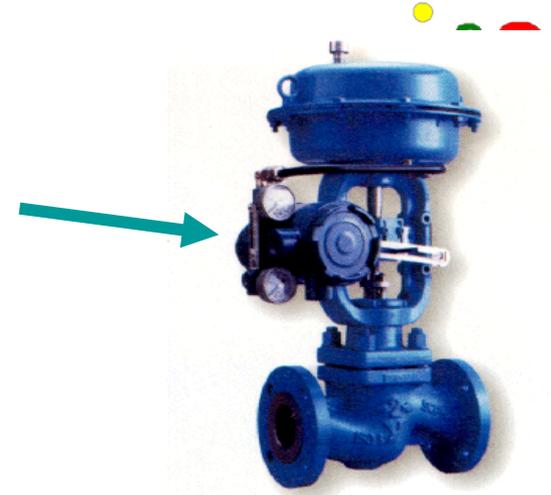


# Convertidor I/P



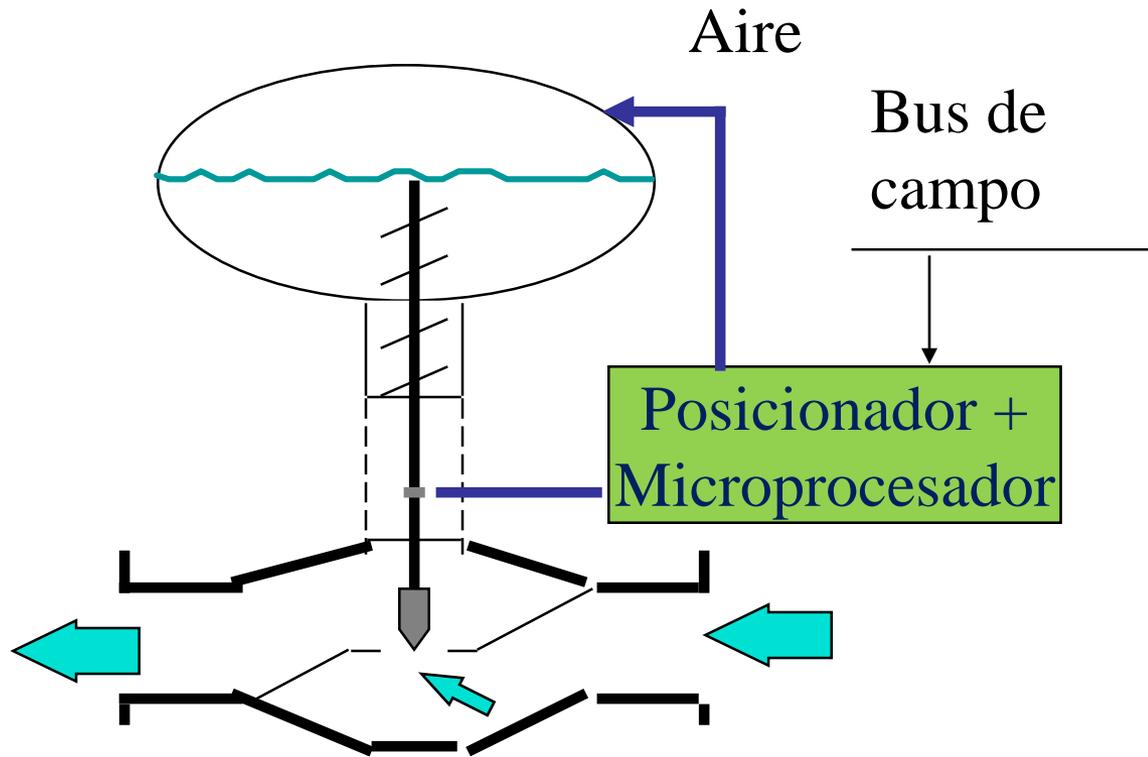


# Posicionador





# Válvulas inteligentes



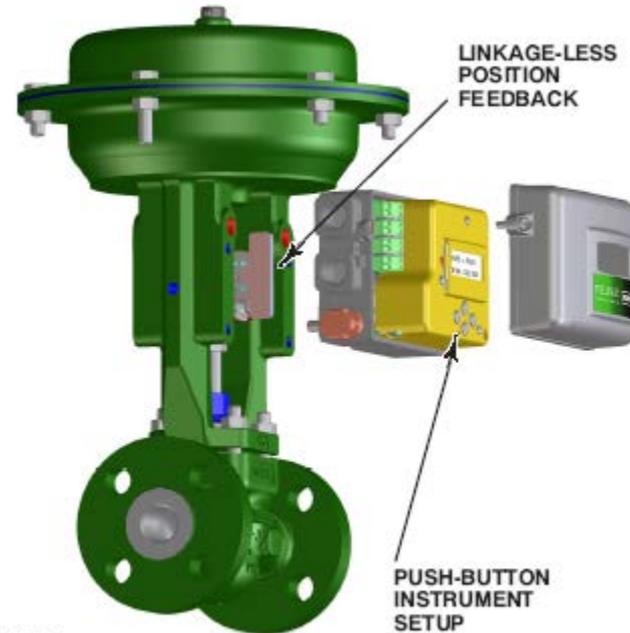
- Caracterización
- Diagnósticos
- Alarmas
- Bloques de control, etc.



# Posicionador digital



WIS 00/L



WIS 00/L

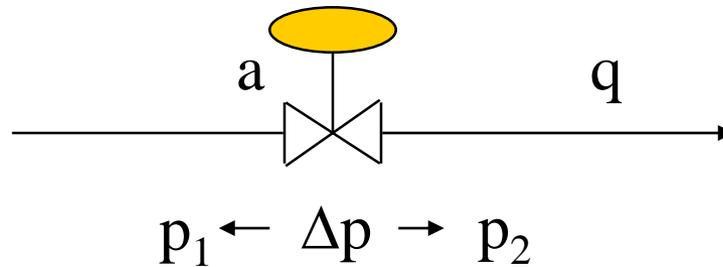
Sin contacto



# Perdida de carga

---

$$\Delta p_v = \frac{1}{a^2 C^2} q^2 \rho$$



$\Delta p$  pérdida de carga  
 $q$  caudal  
 $a$  fracción de apertura  
 $C$  coeficiente  
 $\rho$  densidad



# Fórmulas de cálculo

$$q = aC_v \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}$$

q gpm

p psi

## Líquidos

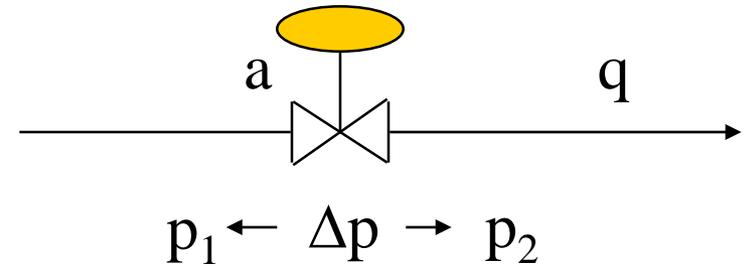
q m<sup>3</sup>/h

p bares

ρ densidad  
relativa

a tanto por uno

$$q = \frac{aC_v}{1.16} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}$$



Cv coeficiente de caudal

## Vapor saturado

q T/h

p bares

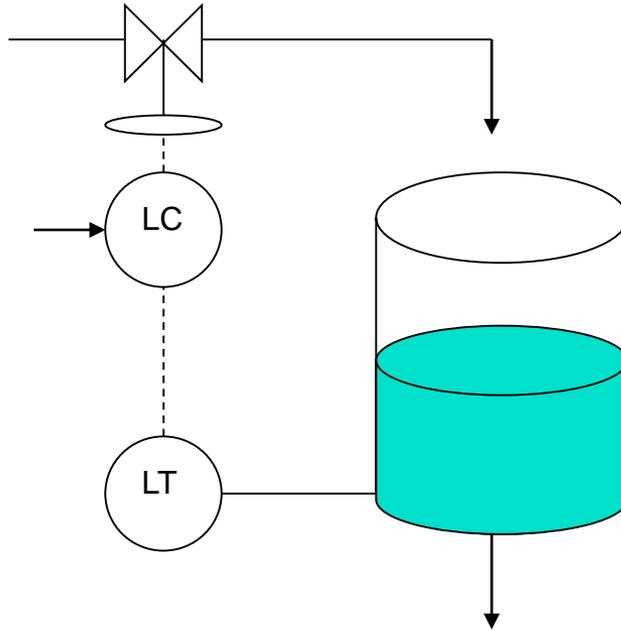
a tanto por uno

$$q = \frac{aC_v}{72.4} \sqrt{\Delta p_v (p_1 + p_2)}$$

Corrección por viscosidad



# Cálculo de la instrumentación



Caudal máximo: 120 m<sup>3</sup>/h  
Caudal de trabajo: 60 m<sup>3</sup>/h  
Altura máxima: 4 m  
Temp max: 80 °C  
Temp de trabajo: 50 °C  
Diámetro tubería: 10 cm.  
Presión en la línea: 2 bar  
Líquido: Agua

Dado que la altura máxima en el depósito son 4 m, eso implica que la presión diferencial  $P$  a la salida será:

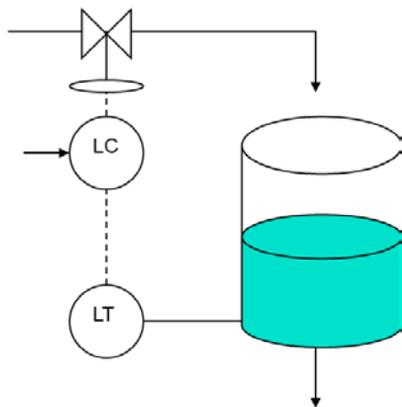
$$P = \rho g h = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 4 \text{ m} \approx 4000 \text{ Pa} = 0.4 \text{ bar}$$

Esto nos será útil para encontrar un transmisor de nivel adecuado.



# Cálculo de la instrumentación

Aplicamos la fórmula del Cv de una válvula, considerando el caudal de trabajo  $q=60 \text{ m}^3/\text{h}$ , una apertura de la válvula en las condiciones de trabajo de  $a=0.5$  (es decir, un 50% de apertura), un  $\Delta p_v = 2 - 1 = 1 \text{ bar}$  (ya que la presión en la línea, antes de la válvula, es 2 bar, y la presión después de la línea será 1 bar ya que descarga a la atmosfera) y una densidad relativa  $\rho=1$  (ya que es agua):



$$q = \frac{aC_v}{1.16} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}$$

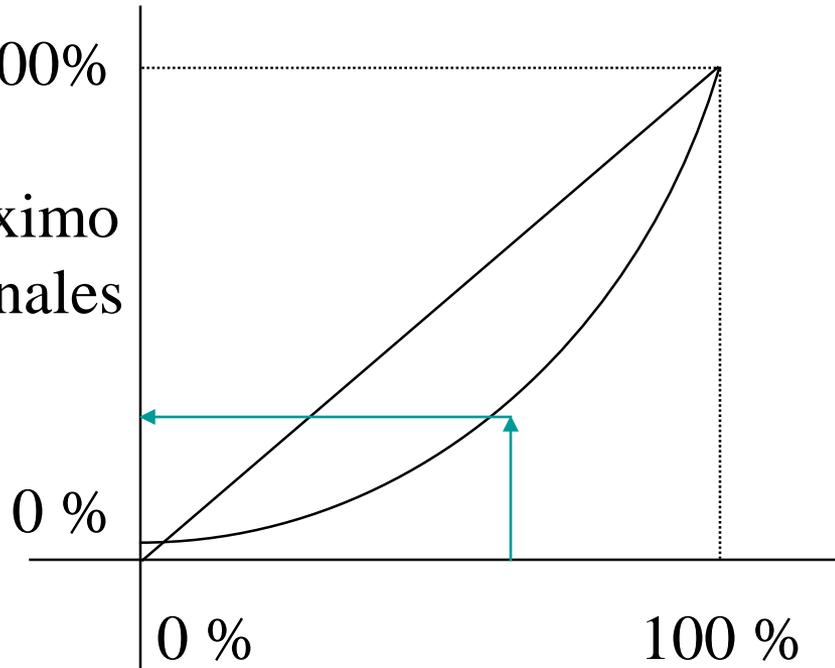
$$C_v = \left( \frac{a}{1.16q} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}} \right)^{-1} =$$
$$= \left( \frac{0.5}{1.16 \cdot 60} \sqrt{\frac{1}{1}} \right)^{-1} = 139.2$$

Se escogería la mas cercana en el catálogo del fabricante ligeramente superior



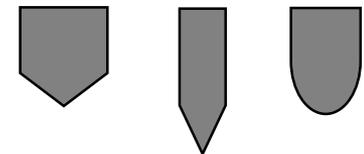
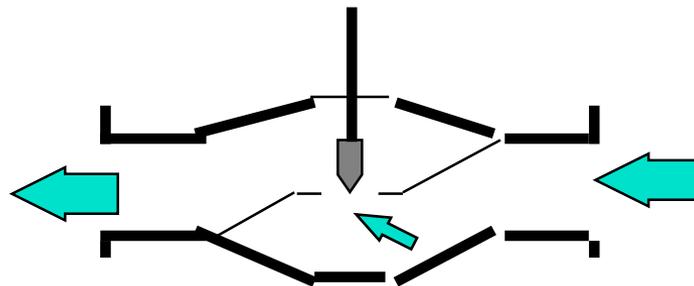
# Características estáticas

% de área del asiento 100%  
% de flujo máximo en cond. nominales a  $\Delta p$  constante



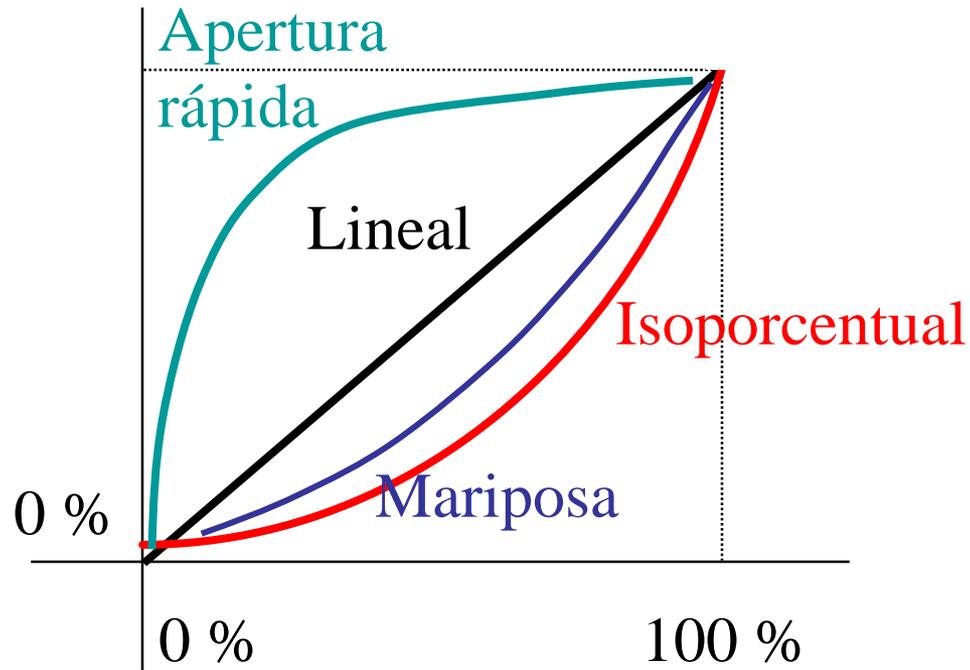
- Lineales
- Isoporcentuales
- Apertura rápida
- Mariposa
- Camflex

% de posición del vastago



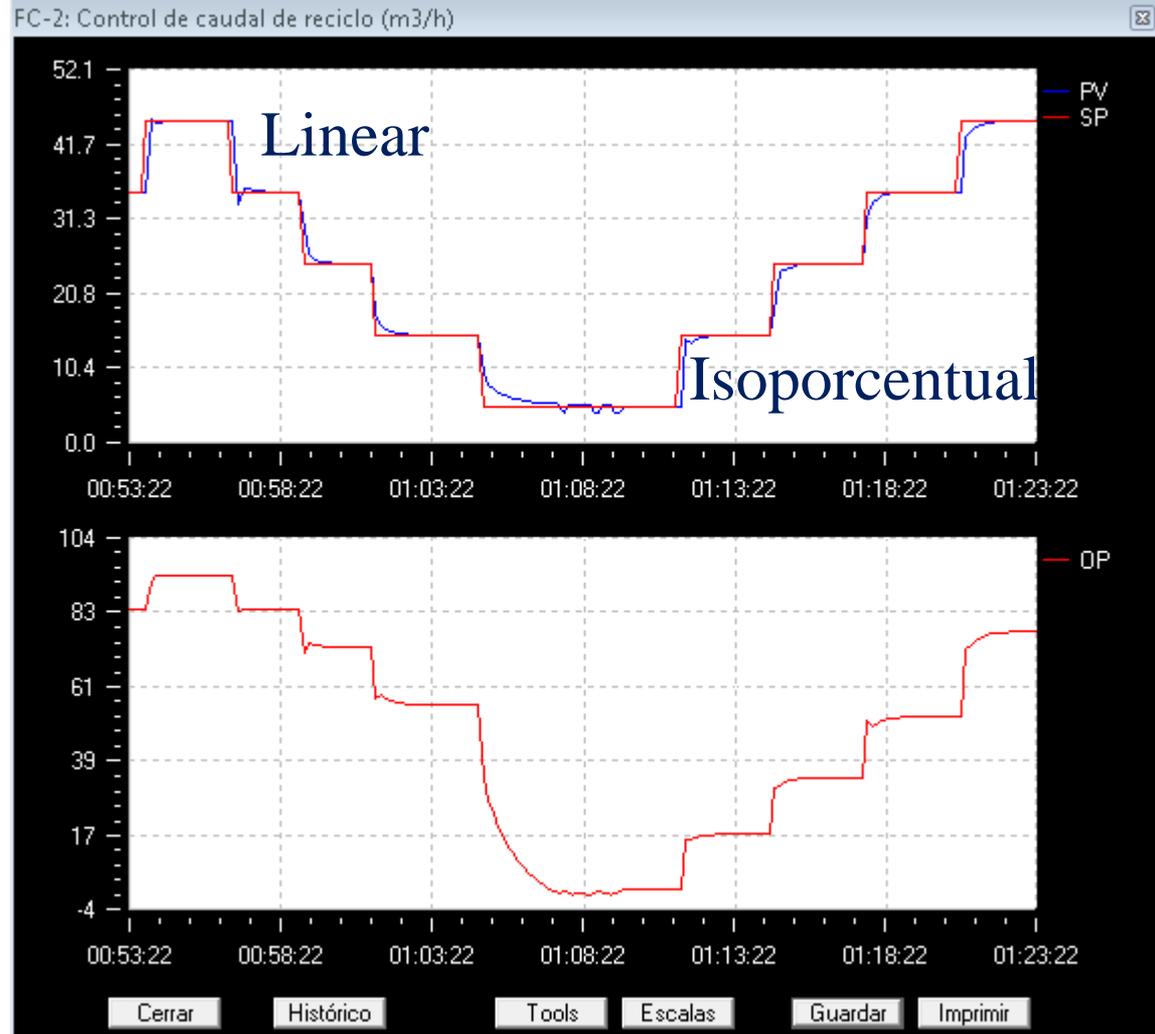
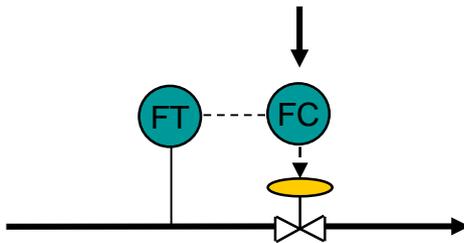


# Características estáticas



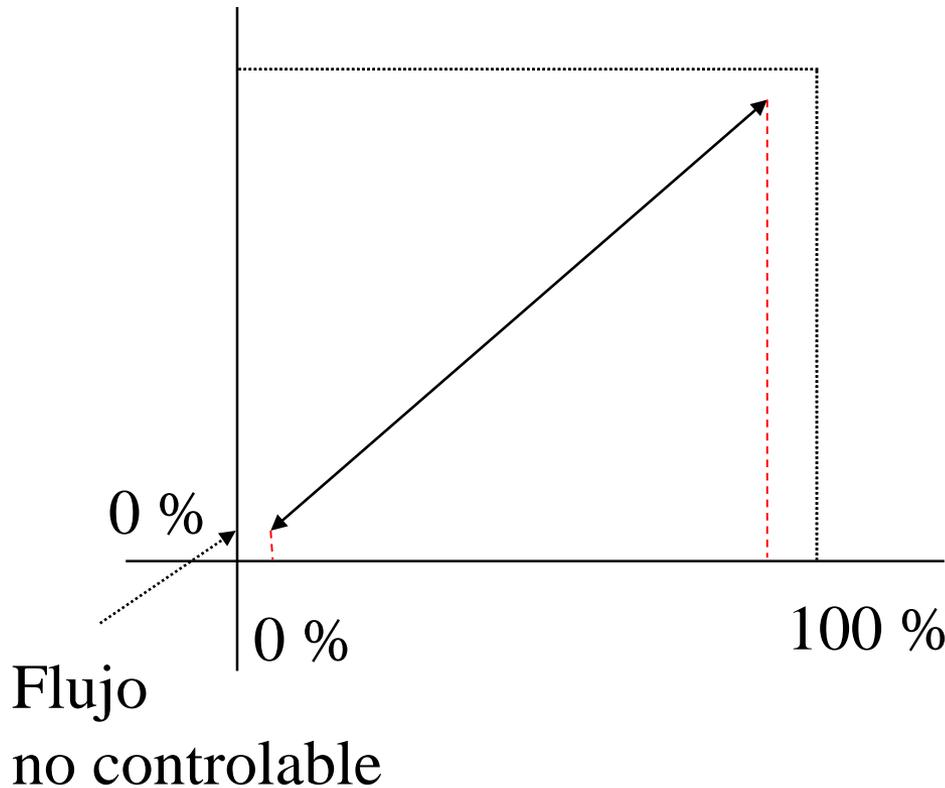


# Control de flujo





# Rangeability



$$R = \frac{\text{m\u00e1ximo flujo controlable}}{\text{m\u00ednimo flujo controlable}}$$

$$R = 100, 50 \dots 20$$

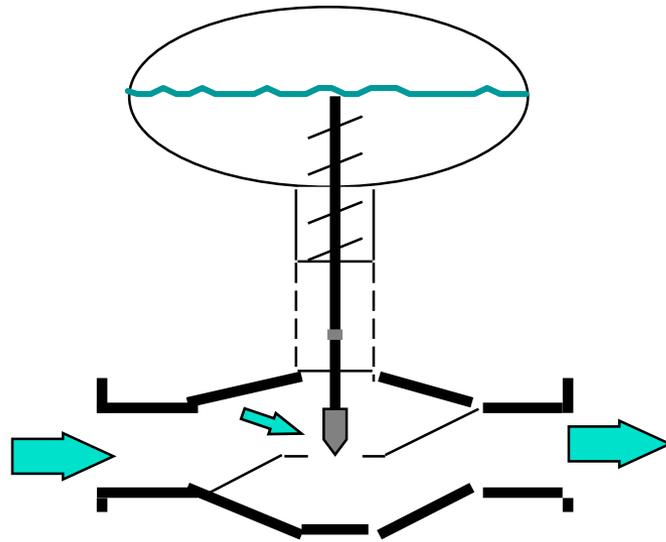
% posici\u00f3n del vastago

Ejemplo: Asumiendo que el 2% en ambos extremos no sigue la curva caracter\u00edstica, y  $\Delta p_v$  constante:

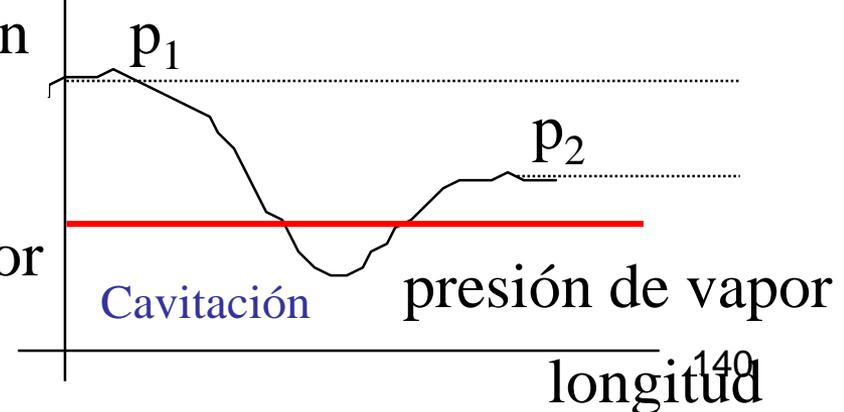
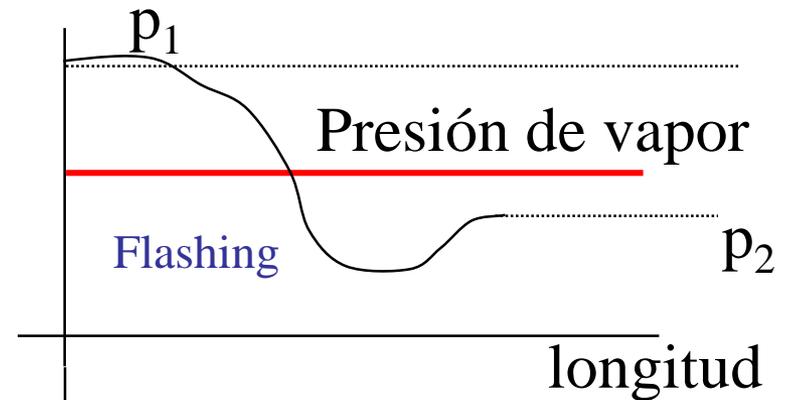
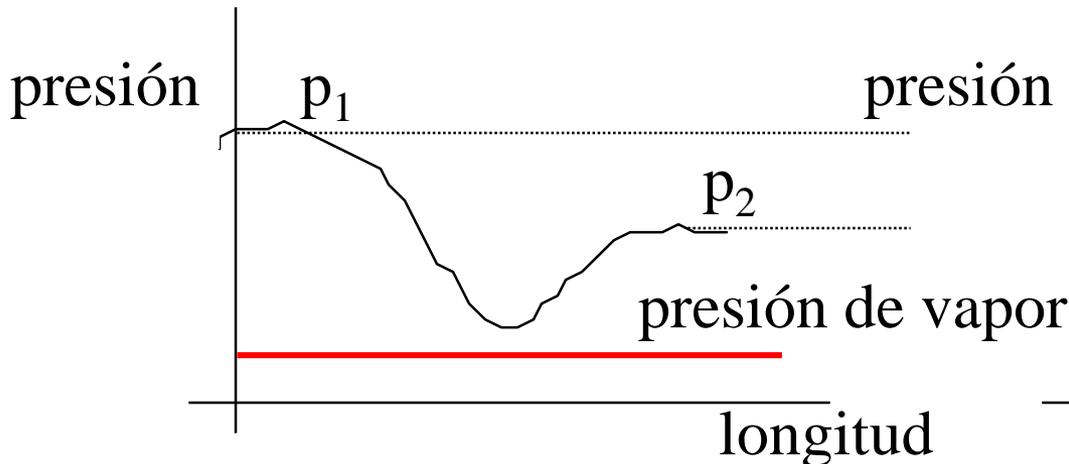
$$R = \frac{\frac{0.98C_v}{1.16} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}}{\frac{0.2C_v}{1.16} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}} = 49$$



# Cavitación / Flashing



Presión de vapor:  
Presión a la que hierve el líquido  
a la temperatura de trabajo





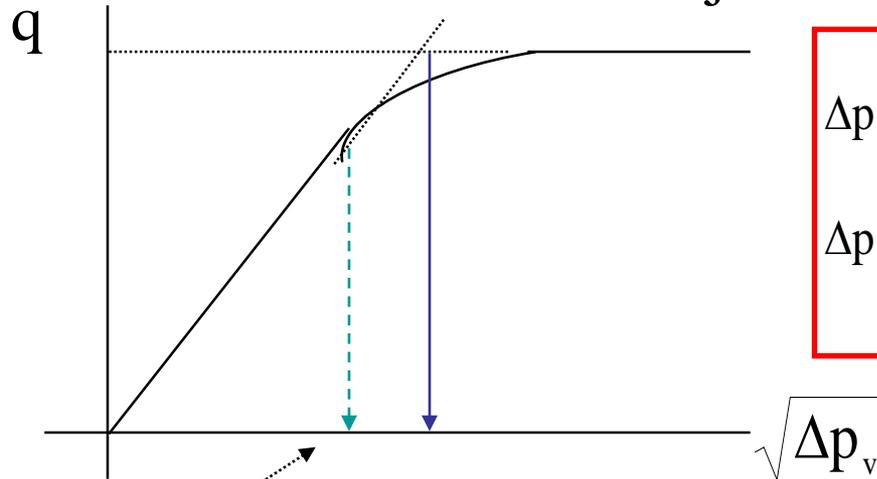
# Cavitación

$$q = \frac{aC_v}{1.16} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}$$

$K_c$  Coeficiente de cavitación incipiente

$$\Delta p_v \leq K_c (p_1 - p_v)$$

Flujo crítico



$$\Delta p_M = C_f^2 \left[ p_1 - p_v \left( 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{p_v}{p_c}} \right) \right]$$

$\Delta p_M$  Máxima caída de presión admisible

Cavitación incipiente

Máxima  $\Delta p$  para regular flujo

$C_f$  Factor de flujo crítico

$p_c$  presión del punto crítico



# Fórmulas de cálculo

$$q = \frac{a C_f C_v p_1 \sqrt{\rho} (y - 0.148y^3)}{54.5} \quad \text{gas}$$

$$y = \frac{1.63}{C_f} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{p_1}} \quad y \leq 1.5$$

q  
p

T/h  
bares

$$q = \frac{a C_f C_v p_1 (y - 0.148y^3)}{83.7} \quad \text{vapor saturado}$$

$$q = \frac{a C_f C_v p_1}{83.7} \quad \text{flujo critico}$$

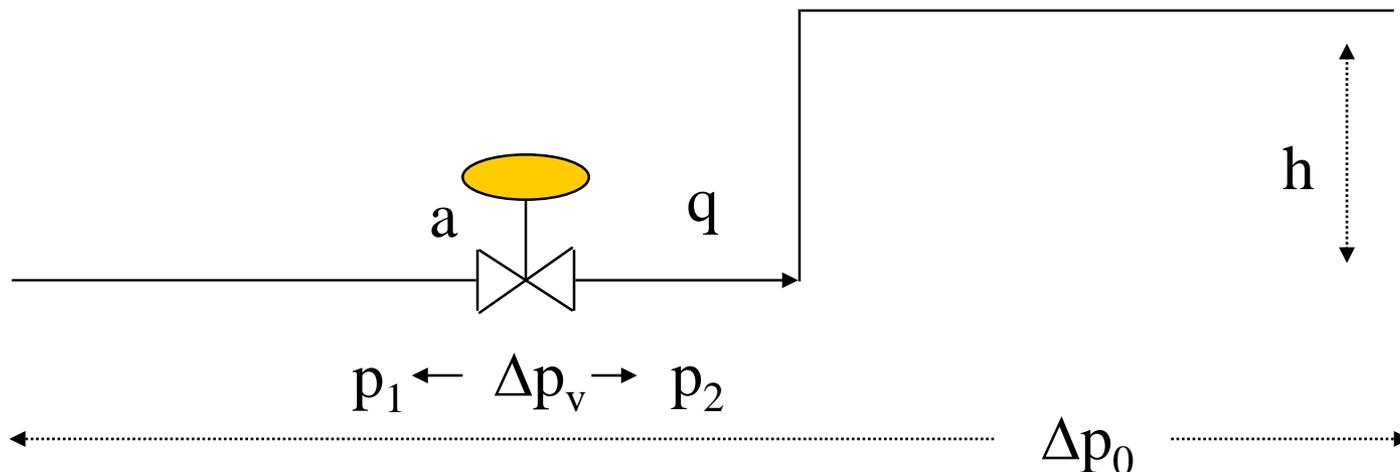


# Características Instaladas

$$q = \frac{aC_v}{1.16} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}$$

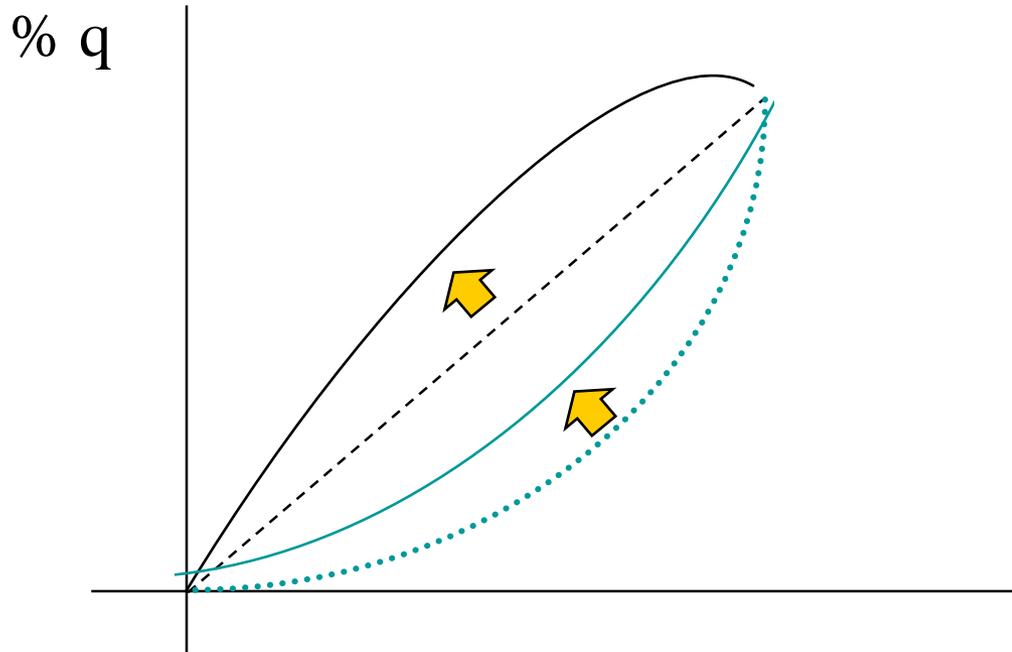
$$q = \frac{1}{1.16} \sqrt{\frac{\Delta p_0 - \rho gh}{\rho \left( K_L + \frac{1}{a^2 C_v^2} \right)}}$$

$$\Delta p_0 = \Delta p_v + K_L \rho q^2 + \rho gh$$





# Características instaladas



$$q = \frac{1}{1.16} \sqrt{\frac{\Delta p_0 - \rho g h}{\rho \left( K_L + \frac{1}{a^2 C_v^2} \right)}}$$

% posición del vastago



# Dimensionamiento de válvulas

---

- Crítico en muchos lazos de control
- Encontrar el tipo de válvula y  $C_v$  adecuados
- Software Comercial disponible

Fisher

Masoneilan

<http://www.emersonprocess.com/fisher/>

<http://www.masoneilan.com/>



# Bombas

---

- ✓ Desplazamiento positivo
- ✓ Centrifugas
- ✓ Instalación
- ✓ Potencia y rendimiento
- ✓ Curvas características
- ✓ Cavitación



# Bombas

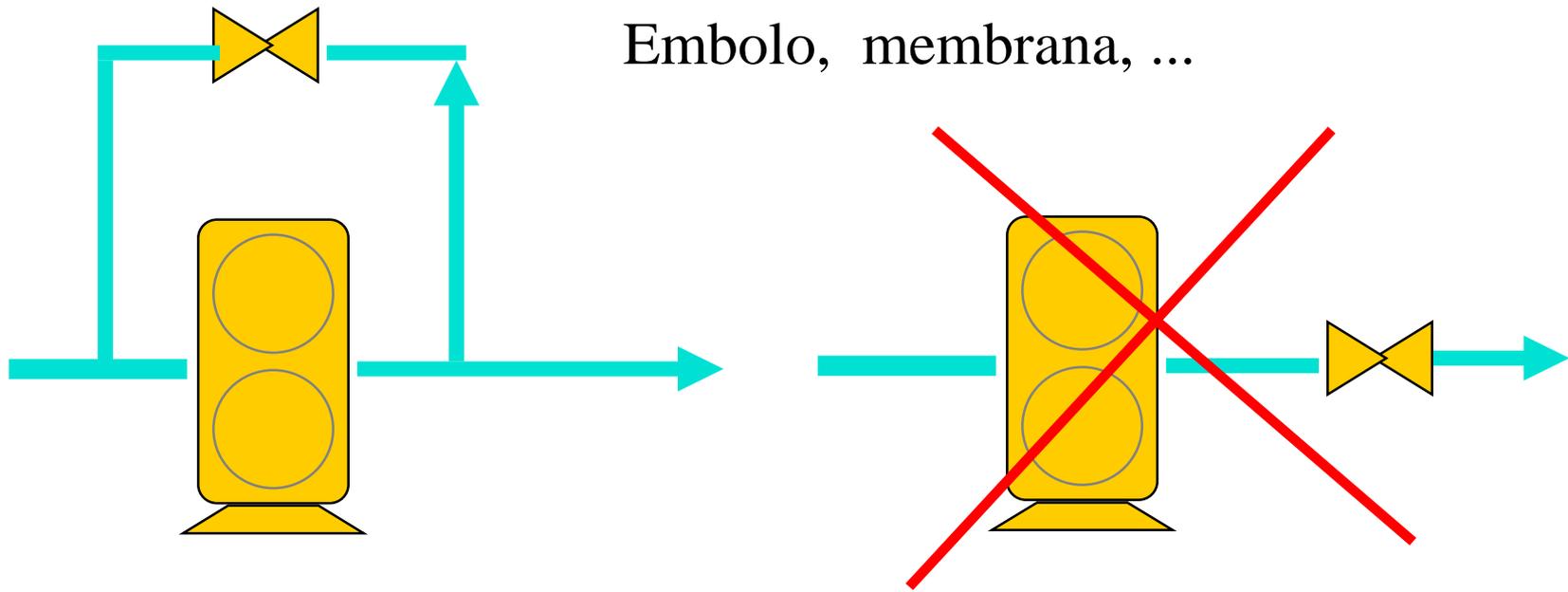
- ✓ Máquinas en las cuales se produce una transformación de la energía mecánica en energía hidráulica (velocidad y presión) comunicada al fluido (incompresible) que circula por ellas.





# Desplazamiento positivo

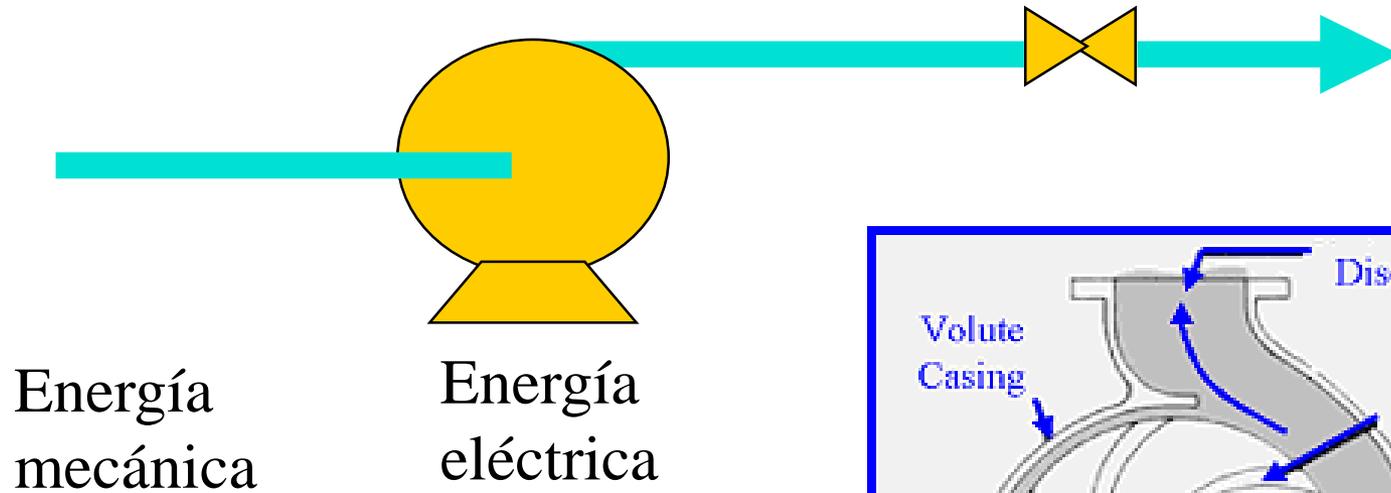
- Cede energía de presión al fluido mediante volúmenes confinados. Se produce un llenado y vaciado periódico, produciéndose el trasiego de cantidades discretas de fluido desde la aspiración hasta la impulsión.



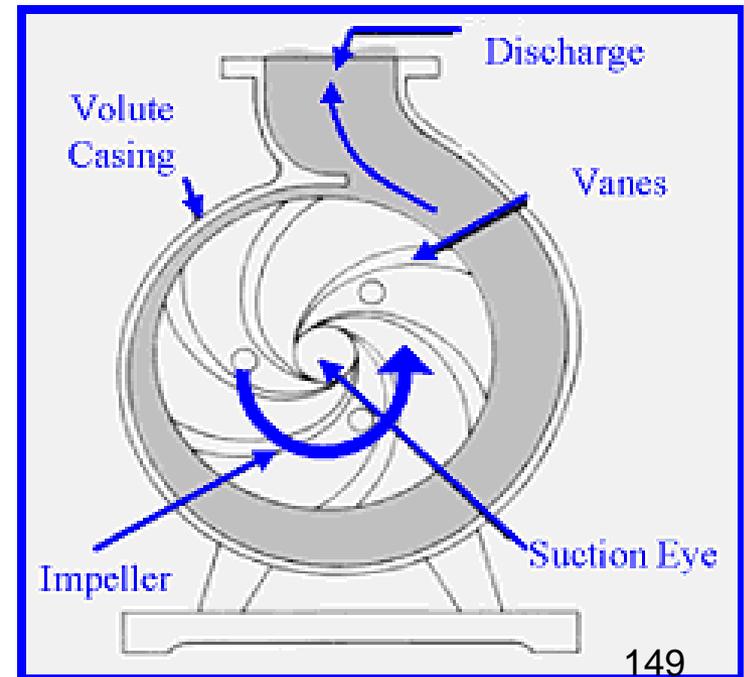


# Centrífugas

- Se cede energía de presión al fluido mediante la variación del momento cinético producido en el impulsor o rodete.



rodete





# Bombas centrífugas

Incremento de energía = energía suministrada - pérdidas

$$\Delta p_b = \rho(a\omega^2 - bq^2)$$

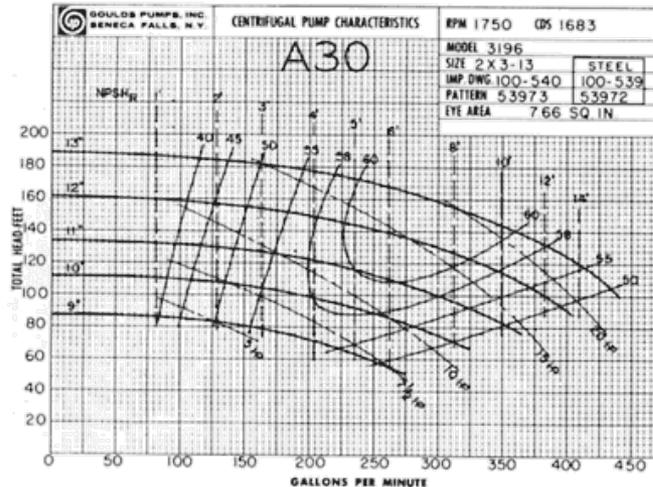
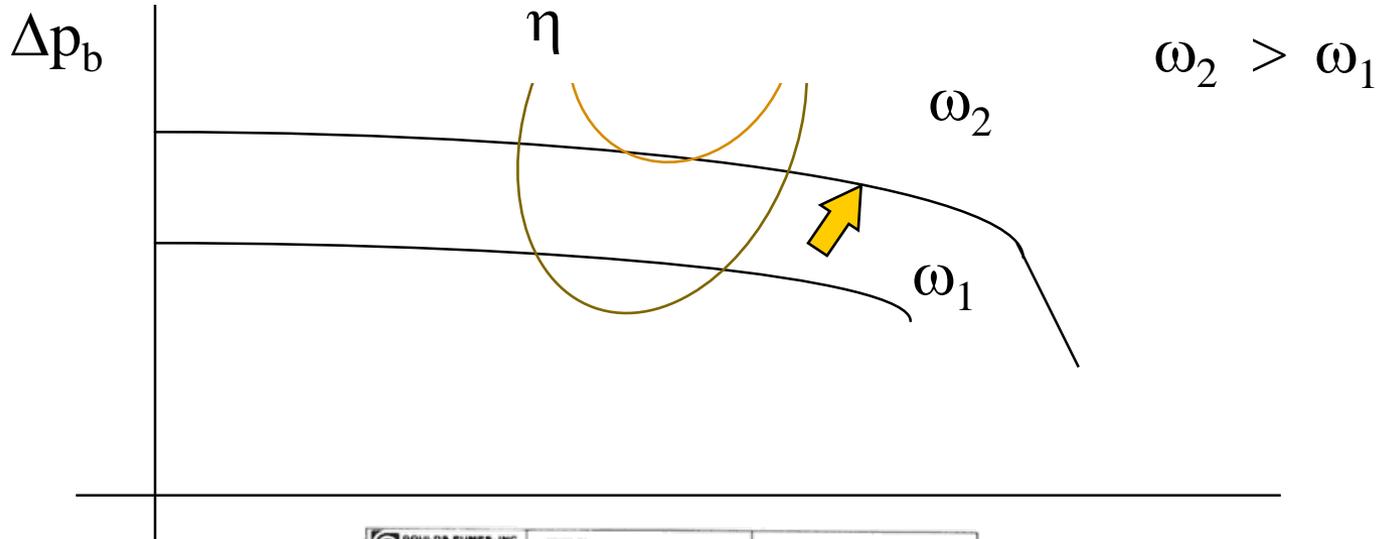
$$P = 36.022\Delta p_b q \quad P \text{ Potencia suministrada}$$

$$P = \eta W \quad W \text{ Potencia absorbida}$$

P      kw  
q      m<sup>3</sup>/h  
p      bares



# Curvas características

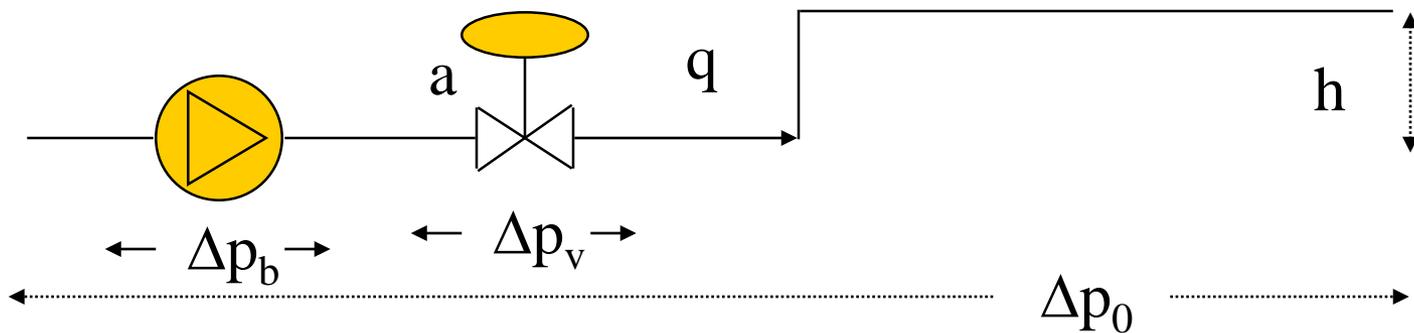
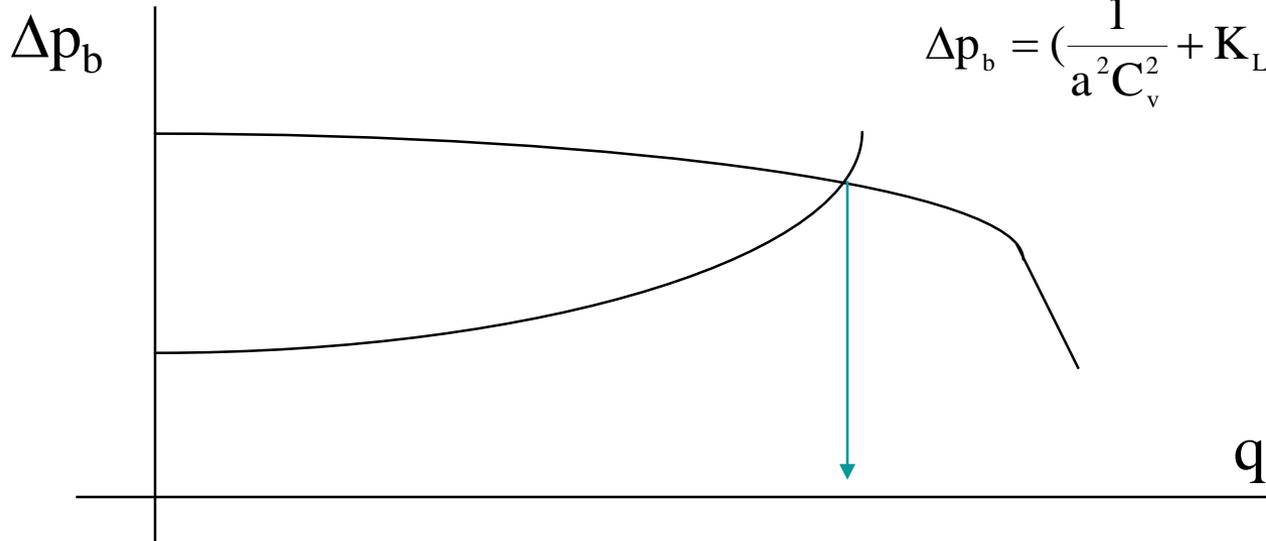




# Punto de operación

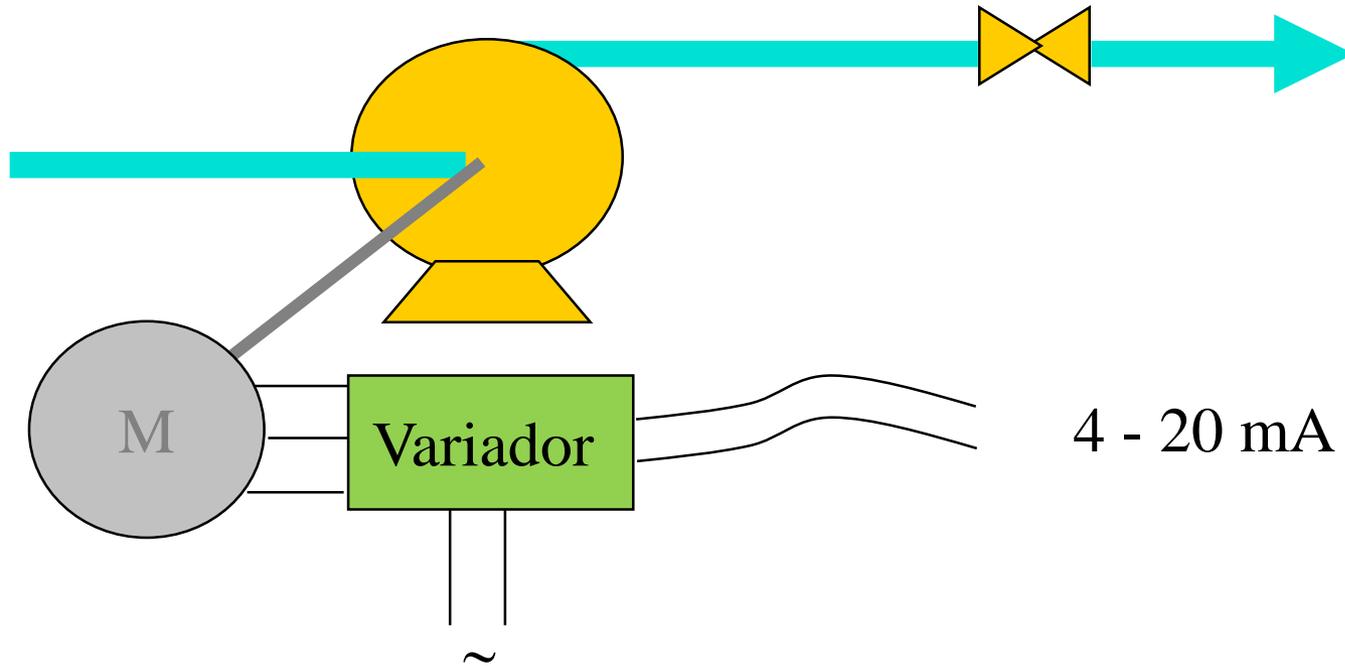
$$\Delta p_0 + \Delta p_b = \Delta p_v + K_L \rho q^2 + \rho gh =$$

$$\Delta p_b = \left( \frac{1}{a^2 C_v^2} + K_L \right) \rho q^2 + \rho gh - \Delta p_0$$





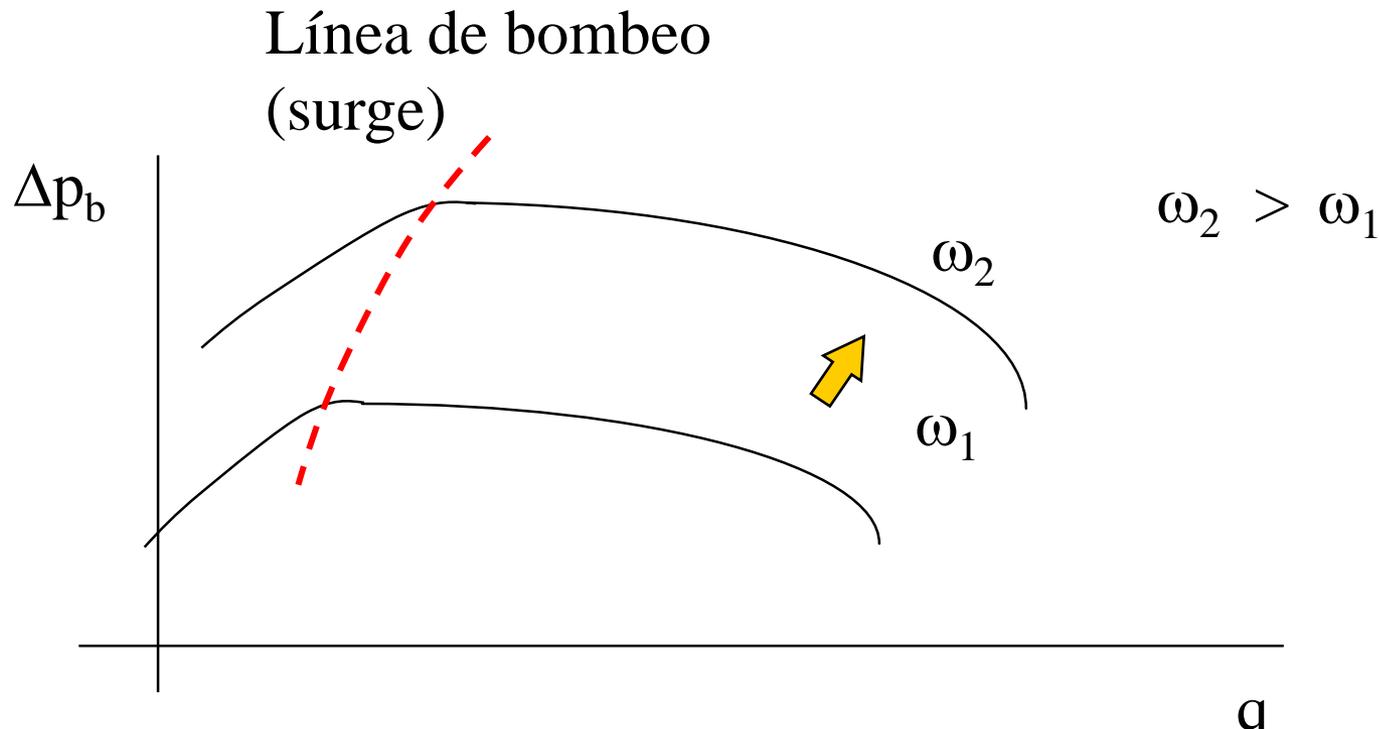
# Bombas de velocidad variable





# Compresores

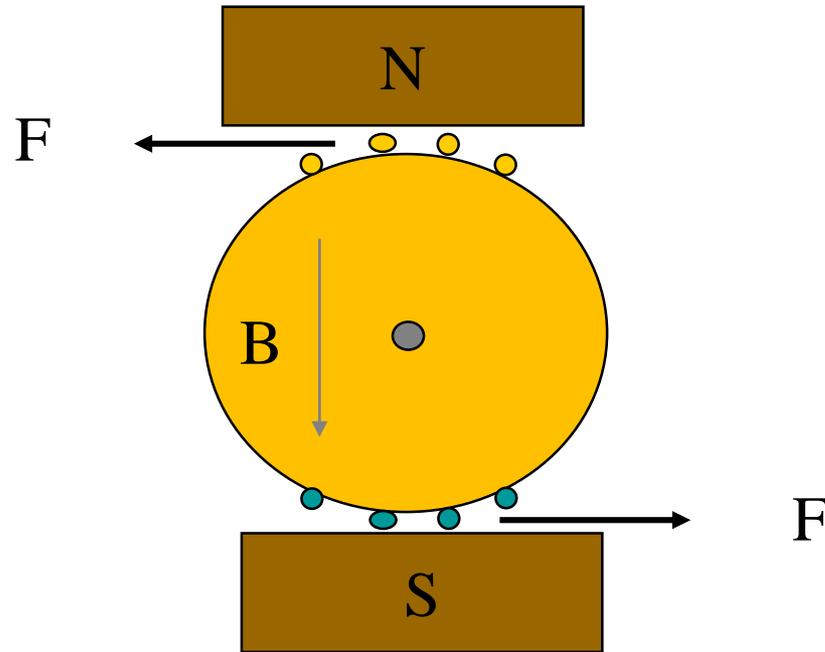
Un compresor es una máquina que está construida para aumentar la presión y desplazar fluidos compresibles, tal como lo son los gases y los vapores.





# Motores eléctricos

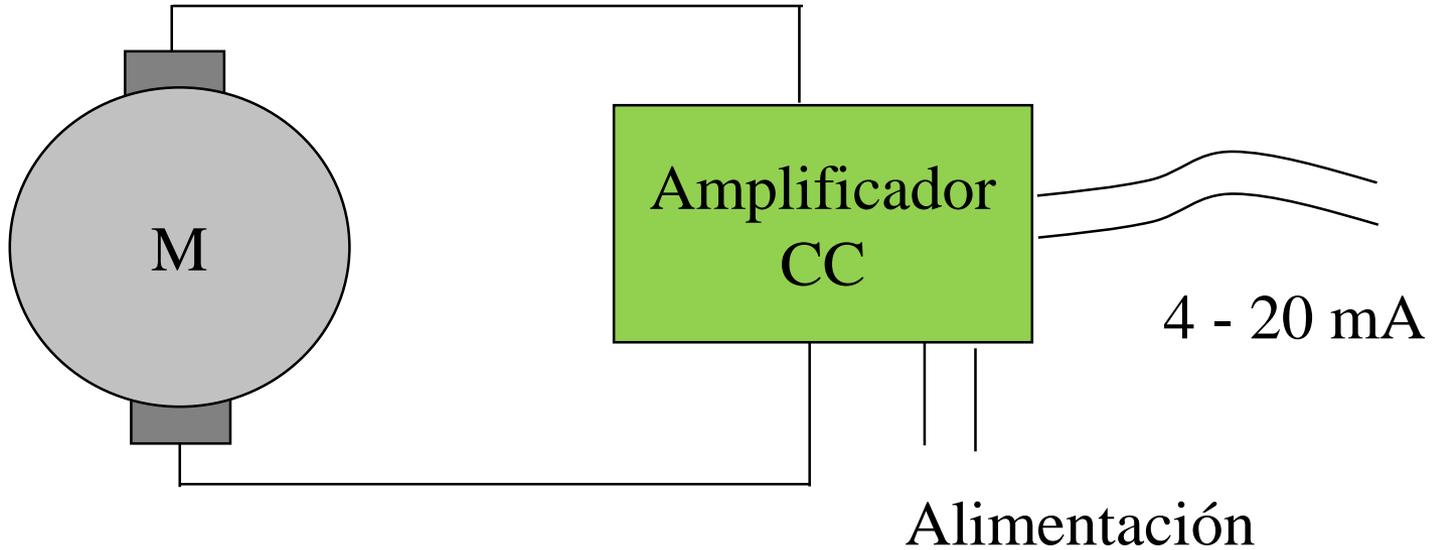
---





# Motores eléctricos cc / ca

Motor  
CC



Motor de  
inducción  
ca

