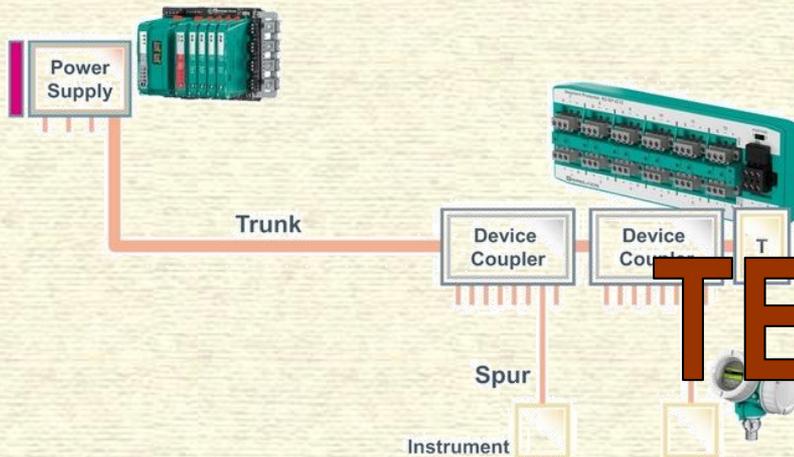


Instrumentación Industrial de Procesos



TEMA 8

SISTEMAS DE CONTROL



Departamento de Ingeniería de Procesos
y Gestión Industrial

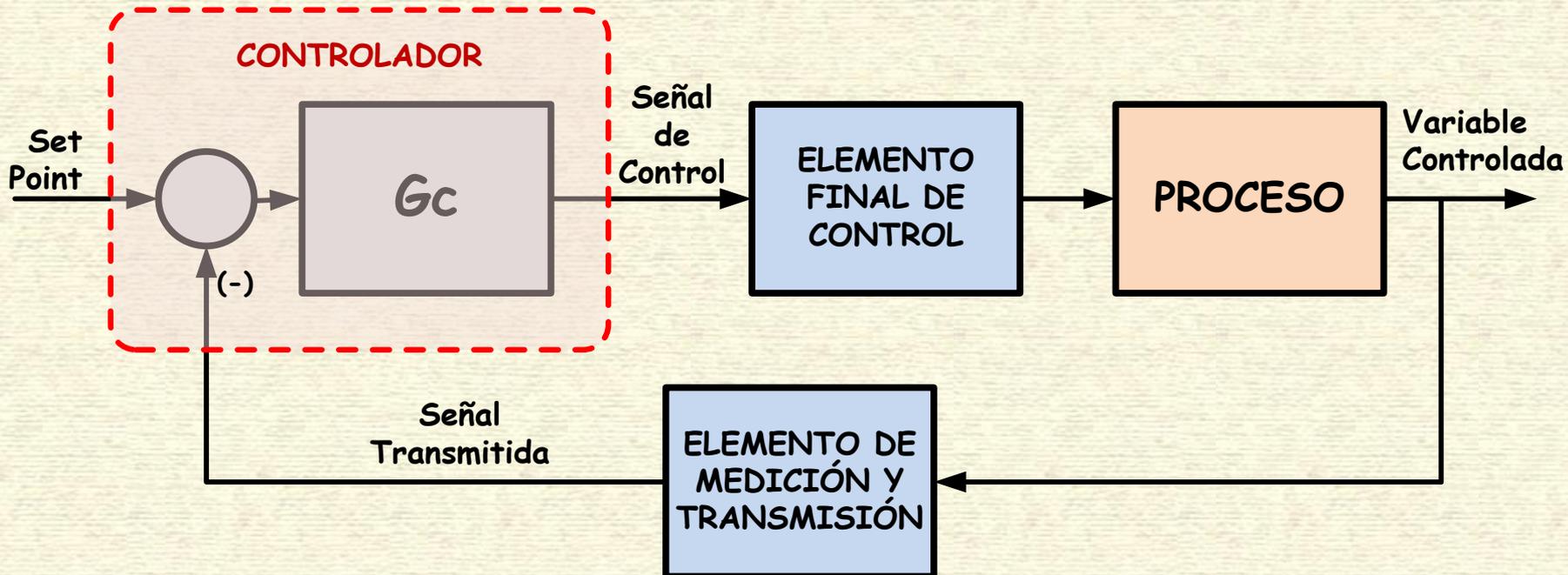


TEMA 8: SISTEMAS DE CONTROL

Controladores ON-OFF. El controlador PID analógico, formas paralelo y serie, filtro derivativo, unidad automático manual. Controladores PID digitales, algoritmos posicional y de velocidad, tiempo de muestreo. Saturación de la acción integral. Controladores PID no lineales. Configuración y sintonización de controladores PID, autoajuste. Adquisición de datos. Sistemas de control distribuido y basados en bus de campo.

CONTROLADOR

Es el dispositivo que compara el valor real de la salida de una planta con el valor deseado, determina la desviación (error) y produce una señal de control que actuará sobre el elemento final de control.

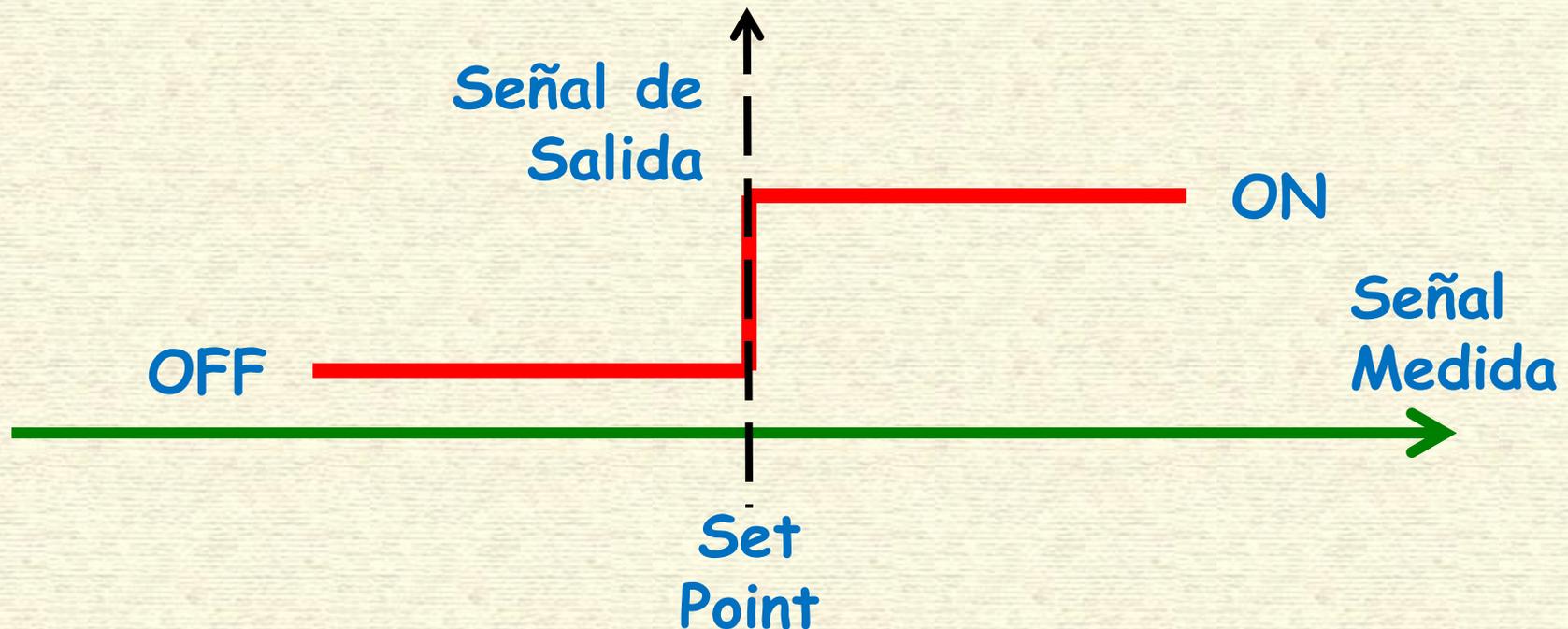


Los controladores industriales son eléctricos, electrónicos, hidráulicos, neumáticos o alguna combinación de éstos.

CONTROLADOR ON-OFF

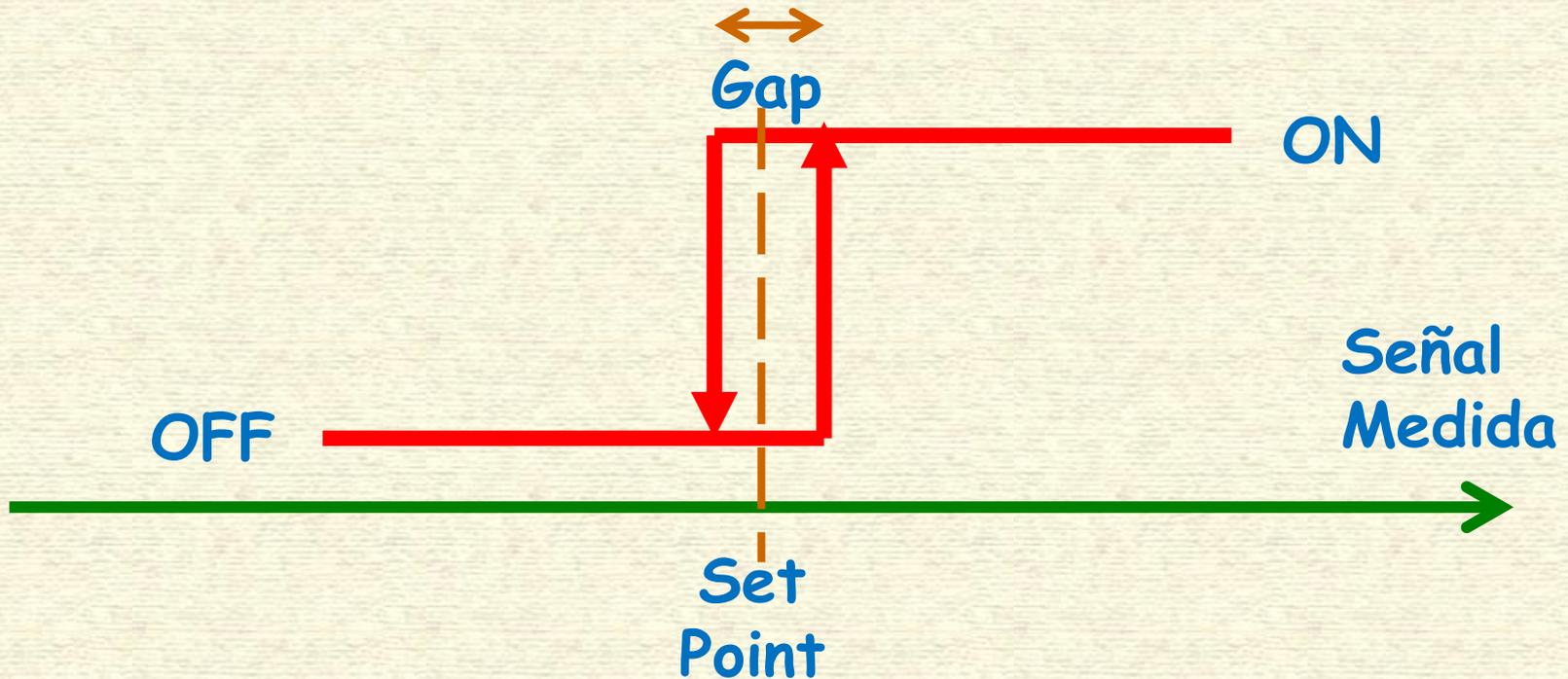
Este controlador tiene sólo dos estados ON/OFF, abierto/cerrado. Al comparar el Valor medido con el Valor Deseado toma una de las dos posibles acciones (ON-OFF) dependiendo del signo del error.

Es de uso extendido en sistemas industriales y domésticos por ser simple y barato.

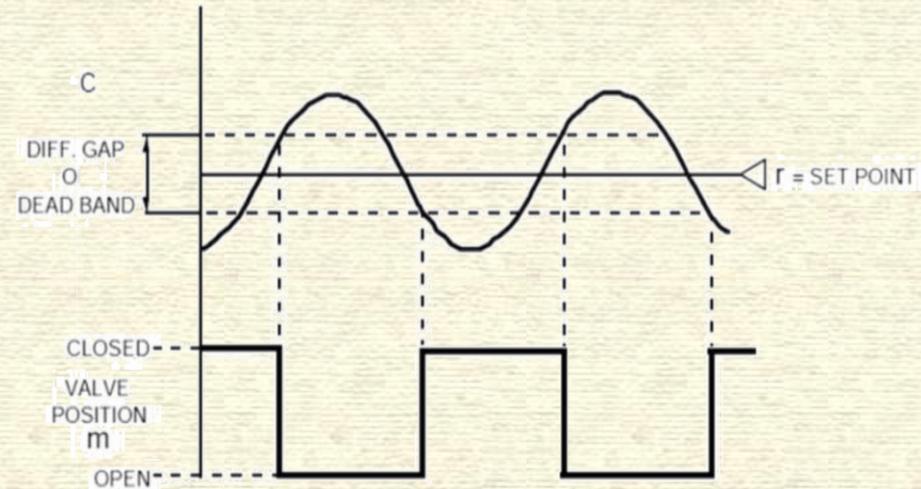
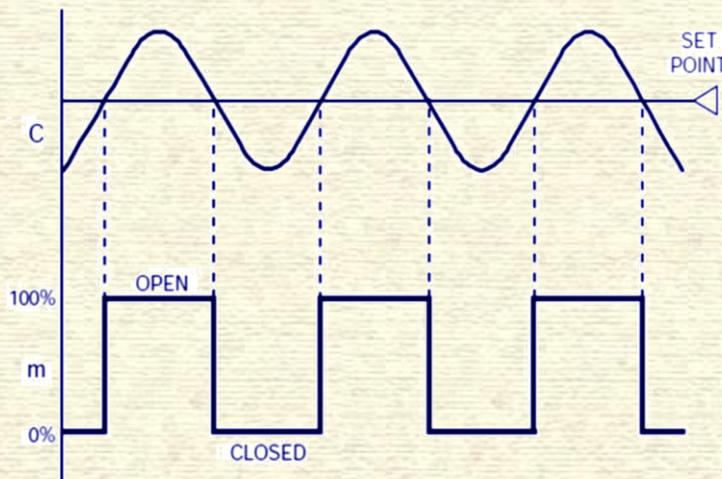
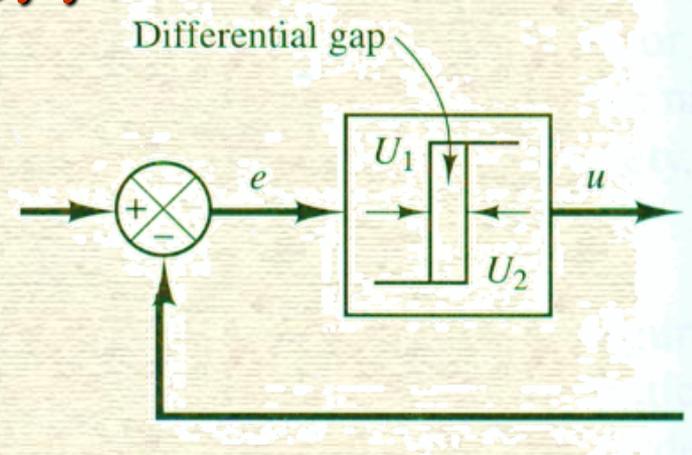
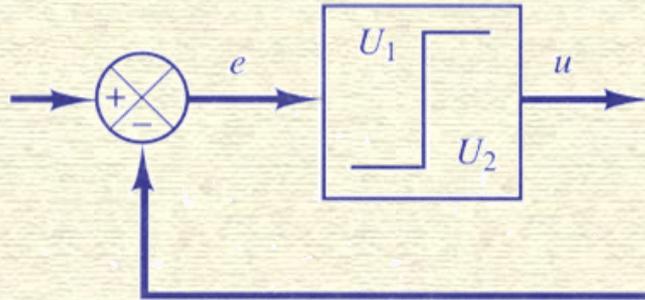


CONTROLADOR ON-OFF

La conmutación no es instantánea, hay un rango en el que debe moverse la señal error antes que ocurra la conmutación que se denomina **brecha diferencial (gap)**



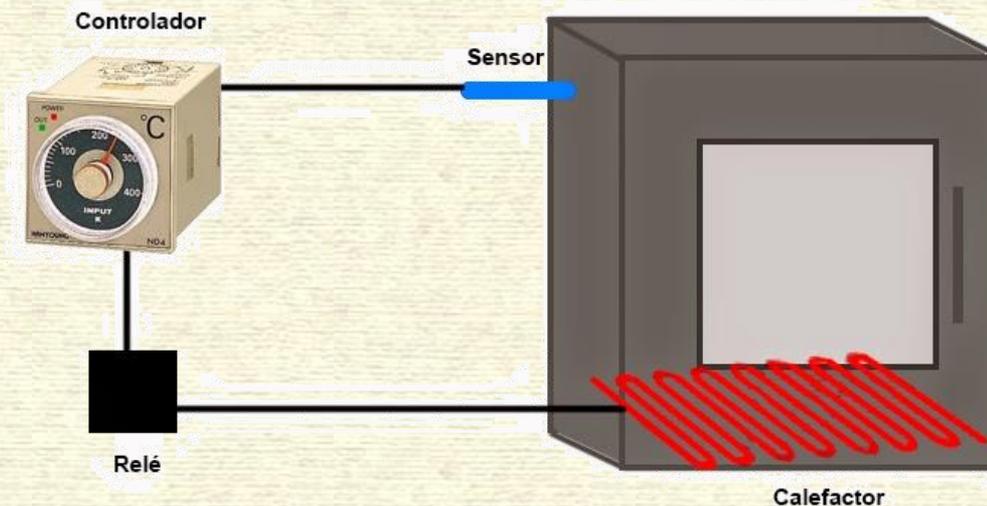
CONTROLADOR ON-OFF



La conmutación no es instantánea, hay un rango en el que debe moverse la señal error antes que ocurra la conmutación que se denomina **brecha diferencial (gap)**

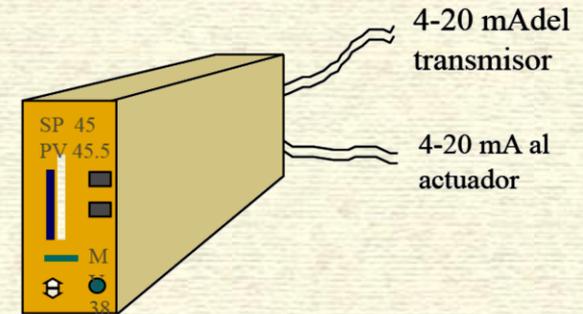
CONTROLADOR ON-OFF

1. Es una solución básica al problema de control con limitaciones inherentes.
2. Existen compromisos entre comportamiento de la salida y el natural esfuerzo de control.
3. Son una buena opción cuando hay una capacidad preponderante y los tiempos muertos son muy pequeños.
4. Están difundidos en ciertos controles de temperatura



CONTROLADOR PID

- Propuesto en el año 1922 por Minorsky, ofrecido en forma comercial a partir de los años 40.
- Se mantiene hasta ahora como el controlador **unilazo** más utilizado.



- Relativamente fácil de sintonizar. Permite alcanzar una buena performance.
- Es fácilmente implementable en un sistema de control digital
- Se emplea en alrededor del 95 % de las aplicaciones de la industria de procesos.
- Al ser concebido como unilazo, se basa en una estructura de una entrada y una salida

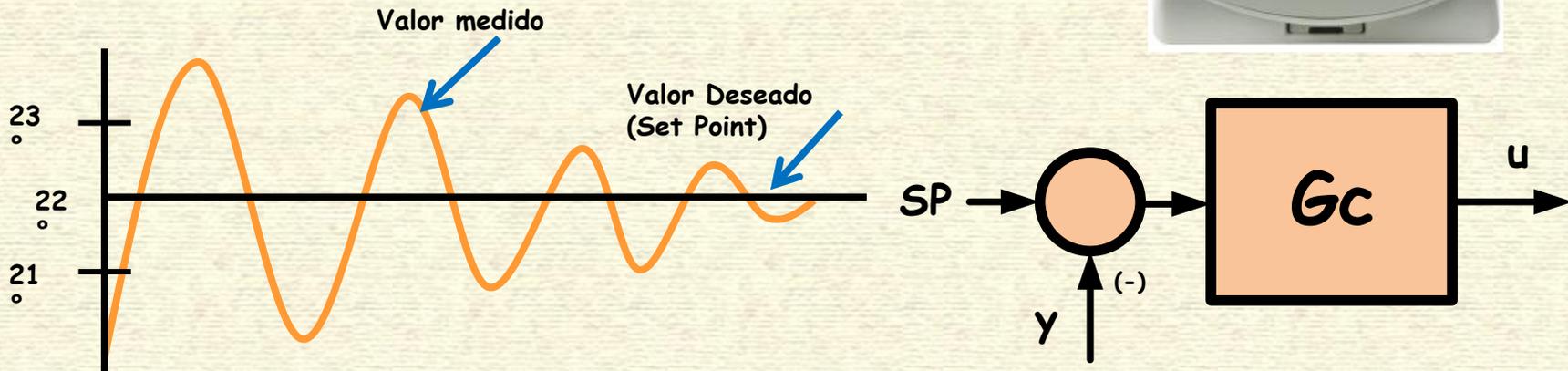
CONTROLADOR PID

Variable transmitida (y)

Set point

Señal de control (u)

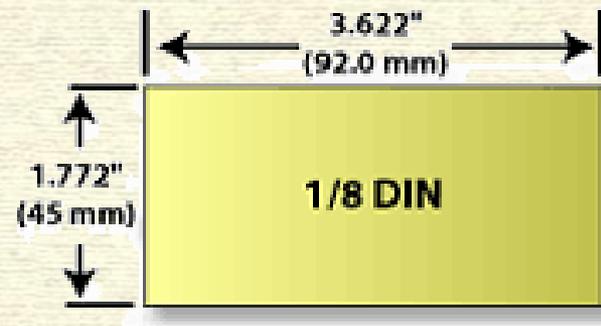
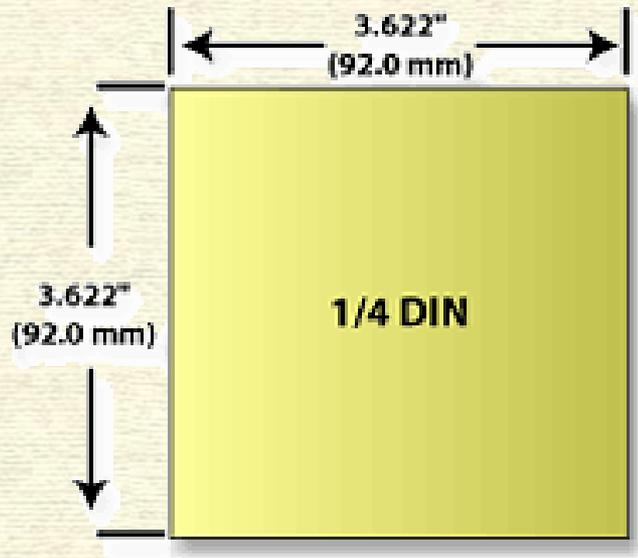
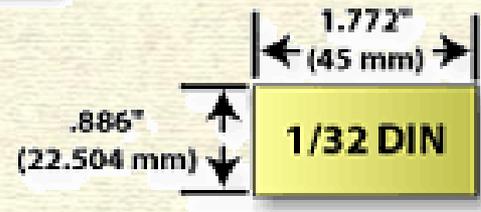
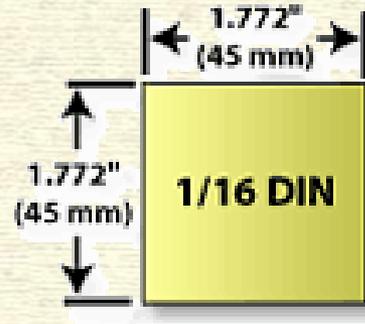
Teclas de configuración y de ajuste de parámetros



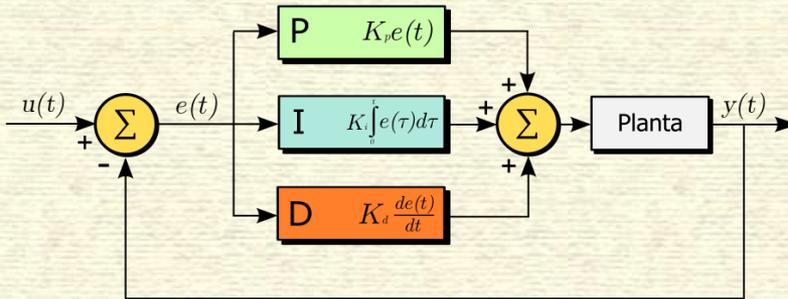
El controlador resta el set point (**SP**) de la señal medida (**y**), obteniendo así la señal de error, y genera una salida (**u**) que se calcula con la función temporal del error.

CONTROLADOR PID

Los controladores comerciales que se montan en paneles se fabrican en tamaños estandarizados.



CONTROLADOR PID IDEAL



P: proporcional
I: integral
D: derivativo

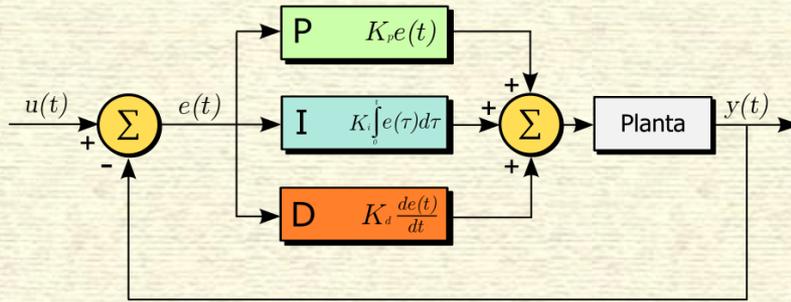
- Está basado en 3 acciones paralelas
- Frecuentemente se utilizan sólo los términos P e I
- Existen varias formulaciones matemáticas.
- El PID ideal se corresponde con:

$$u(t) = u_0 + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_I} \int_0^t e(\theta) d\theta + K_C T_D \frac{de(t)}{dt}$$

K_C: ganancia proporcional
T_I: tiempo integral
T_D: tiempo derivativo

$$\Delta u(s) = K_C \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] e(s)$$

CONTROLADOR PID



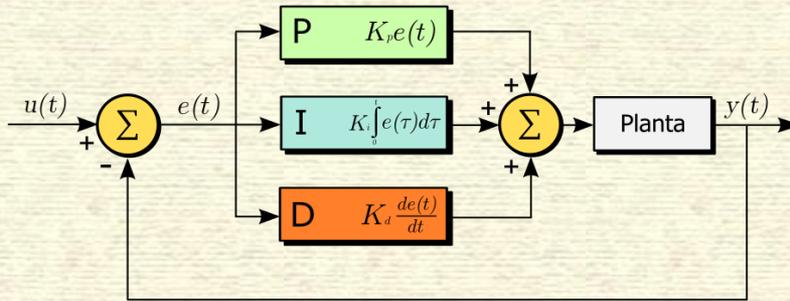
ACCIÓN PROPORCIONAL

$$u(t) = u_0 + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_I} \int_0^t e(\theta) d\theta + K_C T_D \frac{de(t)}{dt}$$

Una ventaja de esta estrategia de control, es que sólo requiere del cálculo de un parámetro (**ganancia K_C**) que fija la intensidad de la acción de control. Genera una respuesta instantánea.

Sin embargo, el controlador proporcional posee una característica indeseable, que se conoce como error en estado estacionario (offset).

CONTROLADOR PID



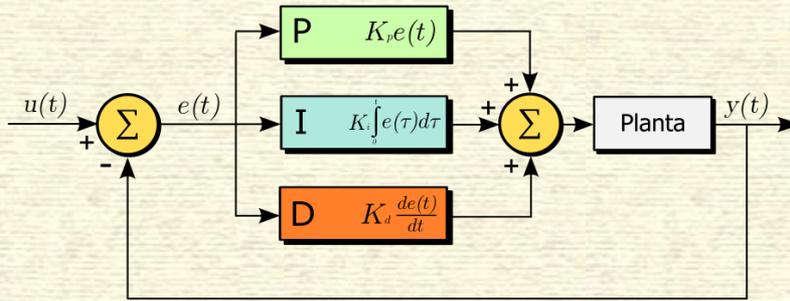
**ACCIÓN
INTEGRAL**

$$u(t) = u_0 + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_I} \int_0^t e(\theta) d\theta + K_C T_D \frac{de(t)}{dt}$$

La acción integral da una respuesta proporcional a la integral del error. Esta acción elimina el offset, pero se obtiene una mayor desviación del set point, la respuesta es más lenta y el periodo de oscilación es mayor que en el caso de la acción proporcional sola.

La intensidad de la acción integral se regula con el parámetro **Tiempo Integral** T_I .

CONTROLADOR PID



**ACCIÓN
DERIVATIVA**

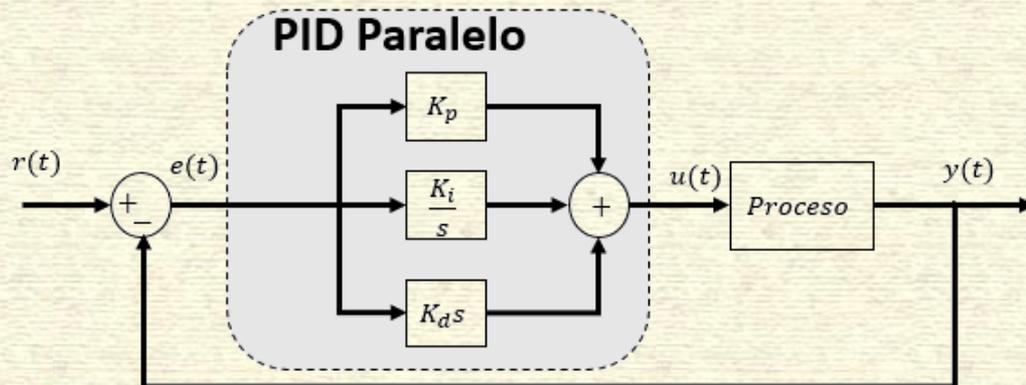
$$u(t) = u_0 + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_I} \int_0^t e(\theta) d\theta + K_C T_D \frac{de(t)}{dt}$$

La acción derivativa da una respuesta proporcional a la derivada del error (velocidad de cambio del error). Añadiendo esta acción de control a las anteriores, se logra acelerar la respuesta. No elimina el offset.

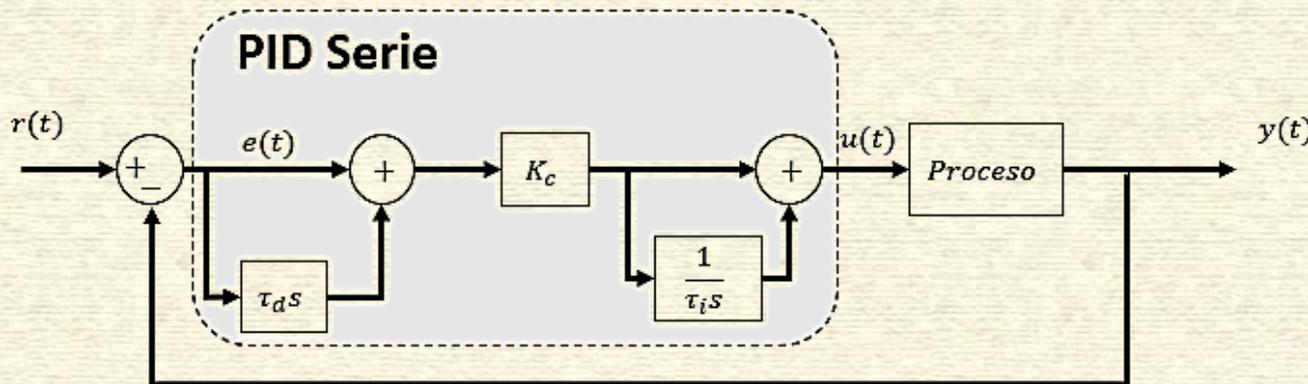
La intensidad de la acción derivativa se ajusta con el parámetro **Tiempo Derivativo** T_D .

ESTRUCTURA DE CONTROLADORES PID

(Ideales)



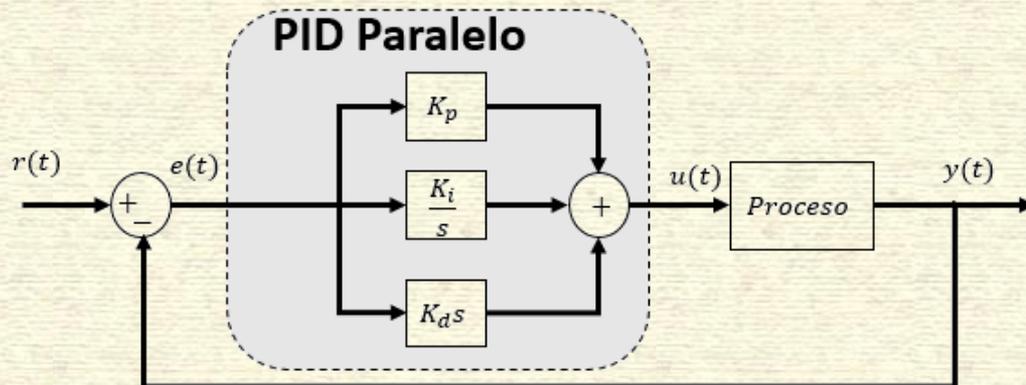
$$\Delta u(s) = K_c \left[1 + \frac{K_c}{T_I s} + T_D s \right] e(s)$$



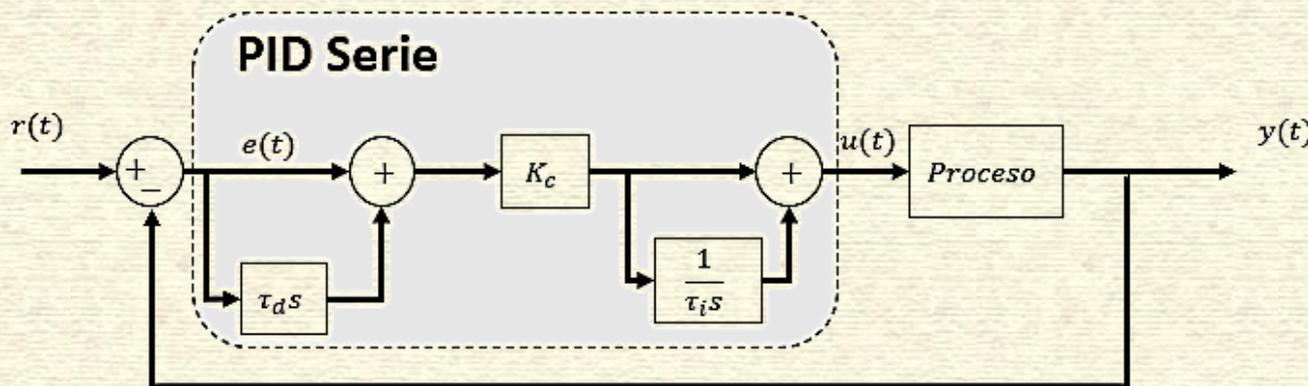
$$\Delta u(s) = K_c \left[1 + \frac{K_c}{T_I s} \right] (1 + T_D s) e(s)$$

ESTRUCTURA DE CONTROLADORES PID

(Reales)



$$\Delta u(s) = Kc \left[1 + \frac{Kc}{T_I s} + \frac{T_D s}{T_N s + 1} \right] e(s)$$



$$\frac{T_N}{T_D} \approx 0.05 \text{ a } 0.1$$

$$\Delta u(s) = Kc \left[1 + \frac{Kc}{T_I s} \right] \left(\frac{T_D s + 1}{T_N s + 1} \right) e(s)$$

SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID

Sintonización es el ajuste de los parámetros K_C , T_I , T_D para que se satisfagan los requisitos de comportamiento del sistema de control.

Métodos clásicos. Se utilizan desde los años 50, y son básicamente un ajuste empírico de los parámetros. Entre ellos:

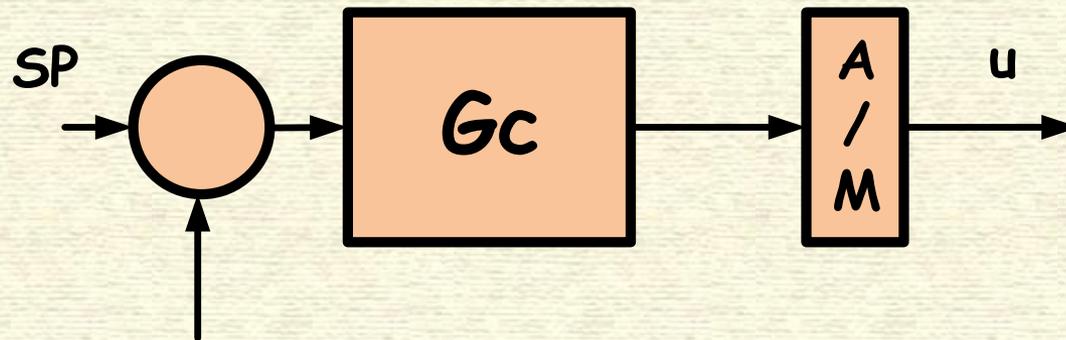
- **Método de oscilaciones sostenidas de Ziegler-Nichols:** se encuentra la ganancia de control proporcional en e, límite de estabilidad (K_{CU}) y se mide el período de oscilación T_U y con estos parámetros se ajustan K_C , T_I , T_D
- **Método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols:** se parte de la curva de respuesta al escalón en la señal de control.
- **Método de la curva de reacción de Cohen-Coon:** simil ant.

Métodos basados en modelo. (IMC, MPC, etc.)

CONTROLADORES PID - UNIDAD A/M

La mayoría de los controladores PID comerciales cuentan con **unidades automático-manual** que permiten conmutar entre las dos formas de operación. Cuando se opera en manual, la salida u de controlador permanece constante y puede ser variada por el operador.

También los controladores vienen provistos con mecanismos que hacen que la conmutación A/M no provoque cambios abruptos en la señal de salida (**bumpless**).



CONTROLADORES DEDICADOS

Los **controladores universales**, no están asociados a un determinado tipo de variable. El rol que cumplen depende de la variable medida que llega al dispositivo a través de una señal estandarizada.

Existen, sin embargo, algunos controladores que sólo se emplean con una variable específica, son los denominados **controladores dedicados**.

Casos típicos son los controladores de caudal, temperatura, de humedad y temperatura ambiente, de pH, etc.

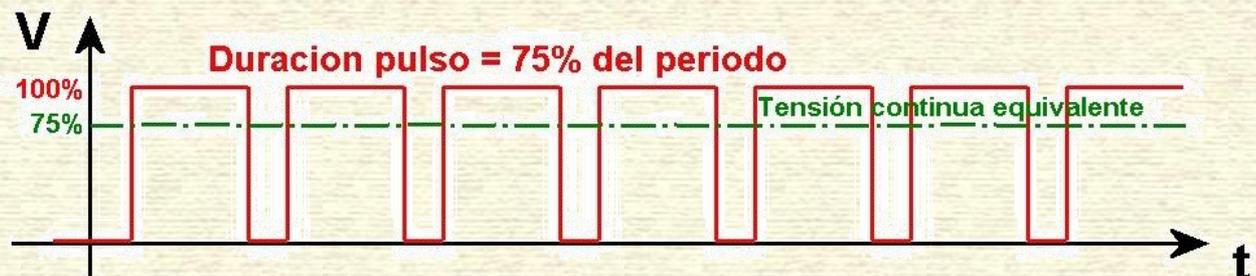
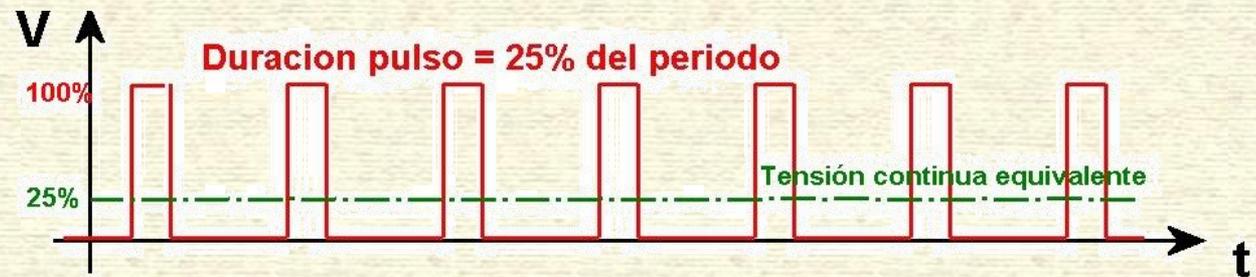


CONTROLADORES PID DEDICADOS

Algunos **controladores PID** de temperatura está provistos de señales de salida analógicas convencionales y otros tienen señales de salida aptas para el manejo de corriente eléctrica en resistencias como fuente de flujo calórico.

Un caso **típico** son la salida con modulación de pulsos (PWM).

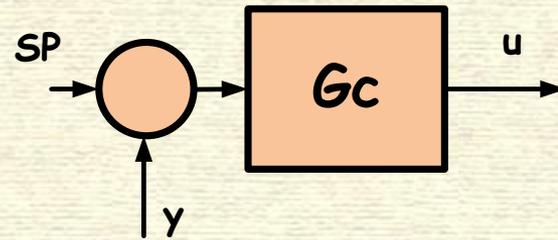
La salida es básicamente analógica, pero los cambios 0-100 % tienen lugar a intervalos discretos de tiempo.



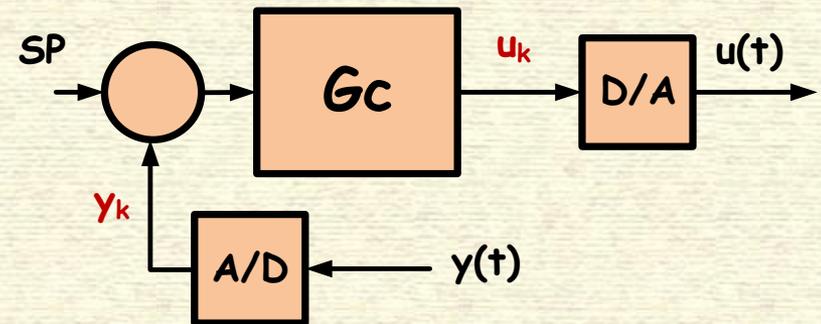
CONTROLADORES PID

TECNOLOGÍA ANALÓGICA Y DIGITAL

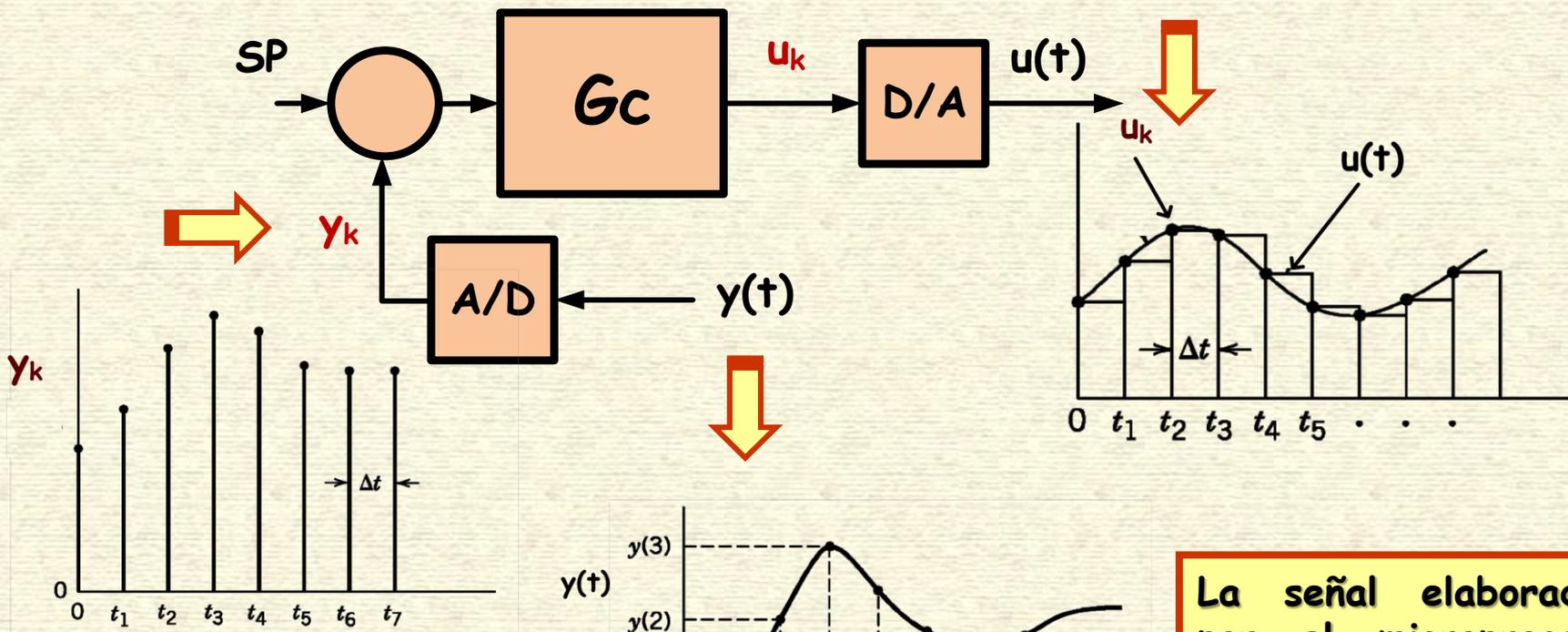
Controladores analógicos: se implementan con circuitos, eléctricos o neumáticos. Caídos en desuso en la actualidad.



Controladores digitales: tecnología electrónica, basados en microprocesadores. Necesitan conversores A/D y D/A.



CONTROLADORES PID DIGITALES



Se transforma la señal de entrada $u(t)$ analógica en una señal digital y_k mediante un mecanismo de muestreo. Intervalo de muestreo en el orden de 0.1 segundo para PID comerciales

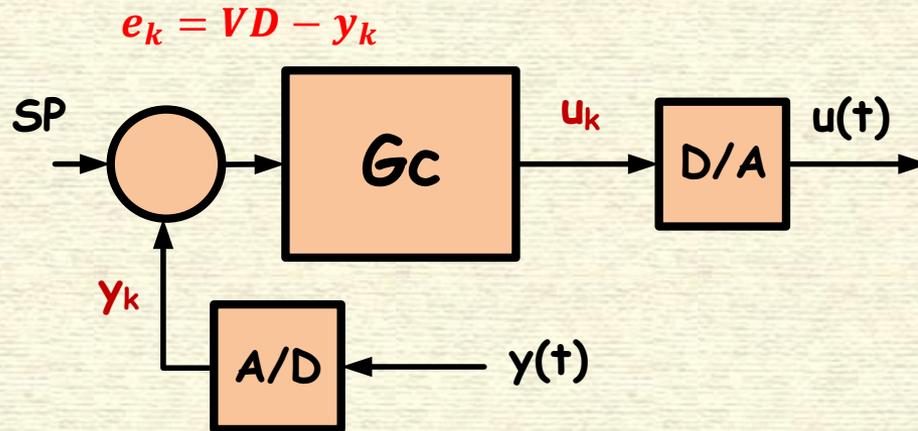
La señal elaborada por el microprocesador del controlador u_k se transforma en una señal continua $y(t)$ por medio de un dispositivo de retención.

CONTROLADORES PID DIGITALES

ALGORITMOS

Algoritmo de posición

$$u_k = K_C e_k + \frac{K_C}{T_I} \Delta t \sum_{i=1}^k e_i + K_C T_D \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t}$$



El tiempo de muestreo Δt es fijo. Los controladores comerciales tienen valores entre 0.1 y 0.2 segundos.

Algoritmo de velocidad

$$u_k = u_{k-1} + K_C (e_k - e_{k-1}) + \frac{K_C}{T_I} \Delta t e_k + K_C T_D \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{\Delta t}$$

CONTROLADORES PID DIGITALES

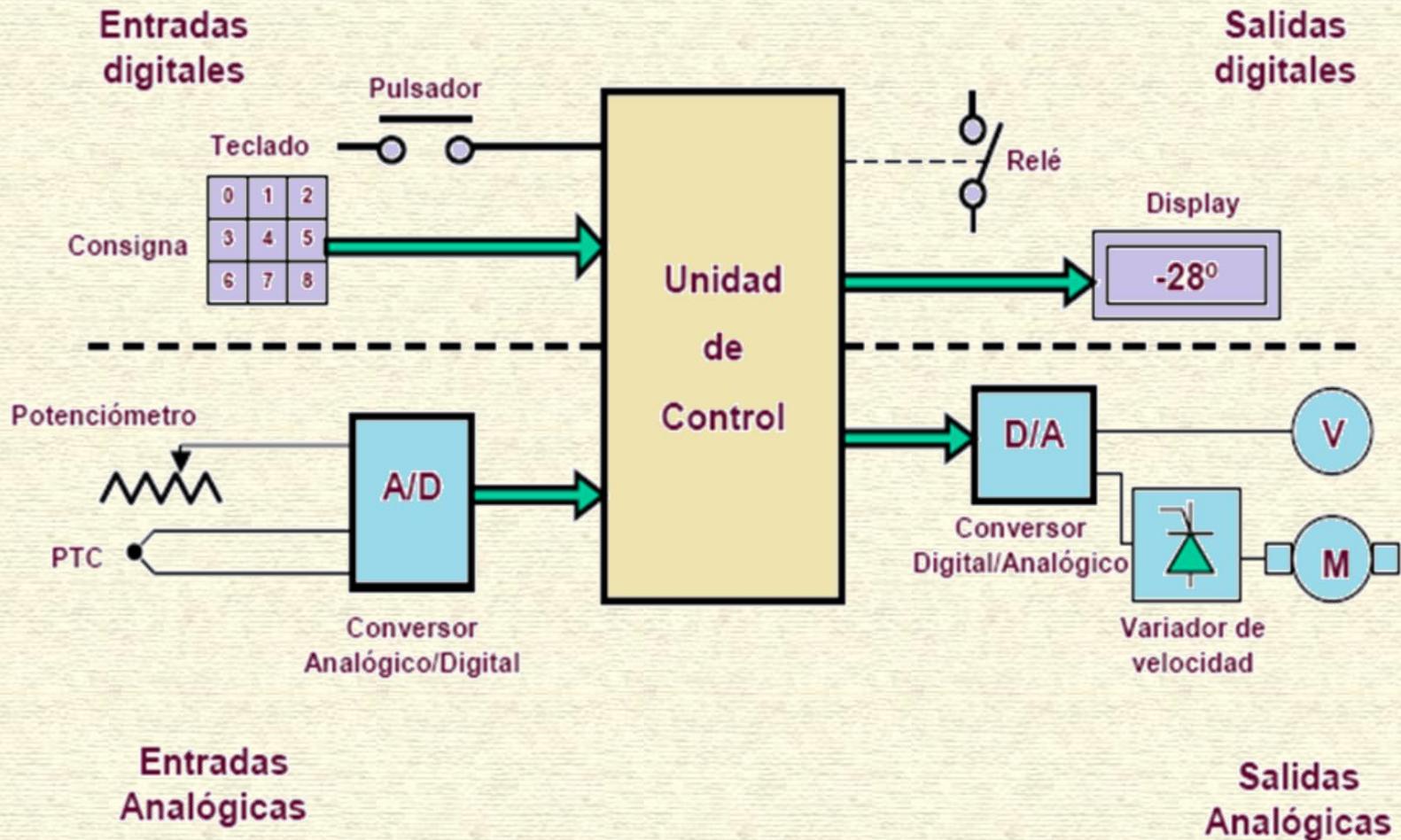
VENTAJAS

- Permiten introducir variantes al algoritmo básico (caracterización de señales, operaciones algebraicas y lógica entre señales, autosintonía)
- Por lo anterior, pueden ser más versátiles y permiten configurarlos con facilidad
- Admiten una gama amplia de señales de entrada y alternativas para las salidas
- Permiten en una misma unidad tener más de un controlador PID
- Permiten la comunicación con sistemas de control distribuido, fieldbus y diversas plataformas de adquisición y visualización de datos



CONTROLADORES PID DIGITALES

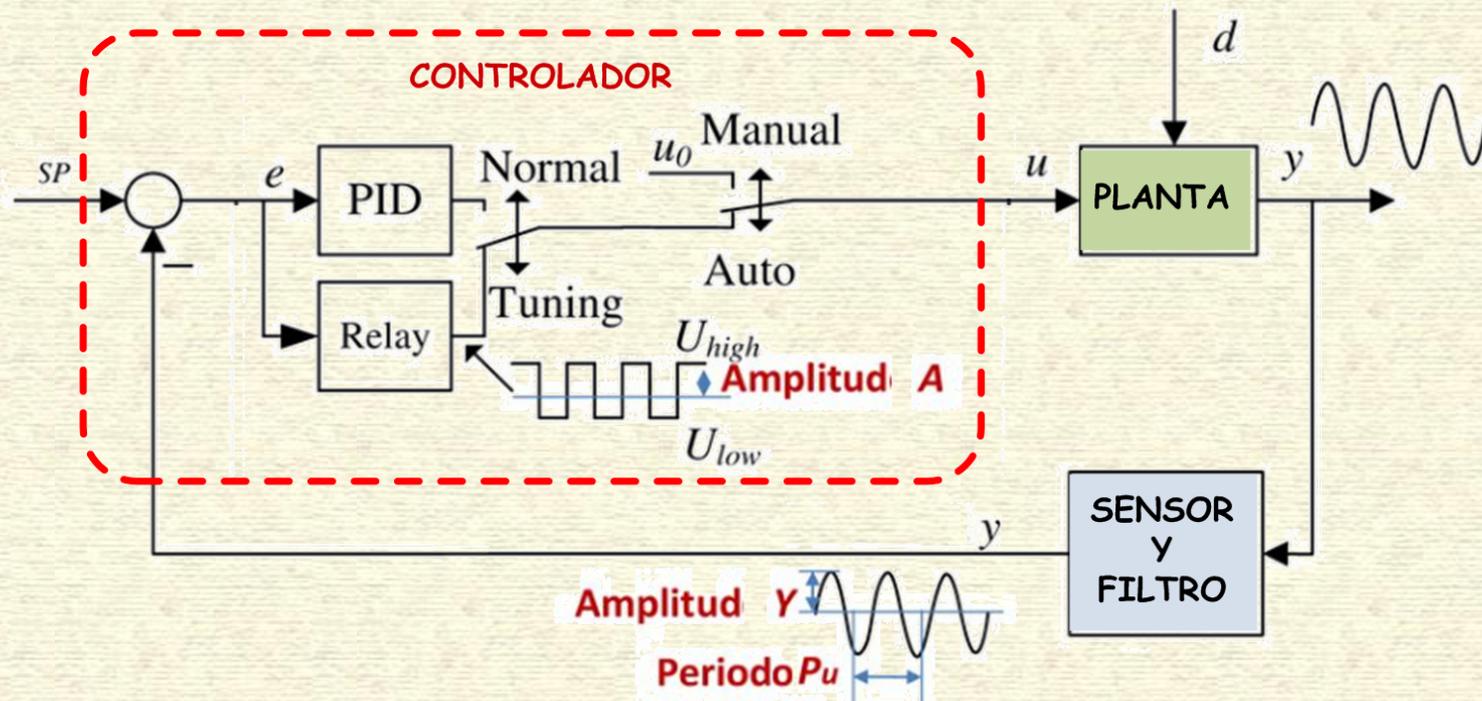
La versatilidad puede ser mayor, ampliando las prestaciones y permitiendo introducir incluso operaciones lógicas



AUTOSINTONIZACIÓN

Método del relé ON/OFF

La tecnología digital permite introducir mecanismos de auto-sintonía, ya que dispone de los valores de la medición y de la salida.

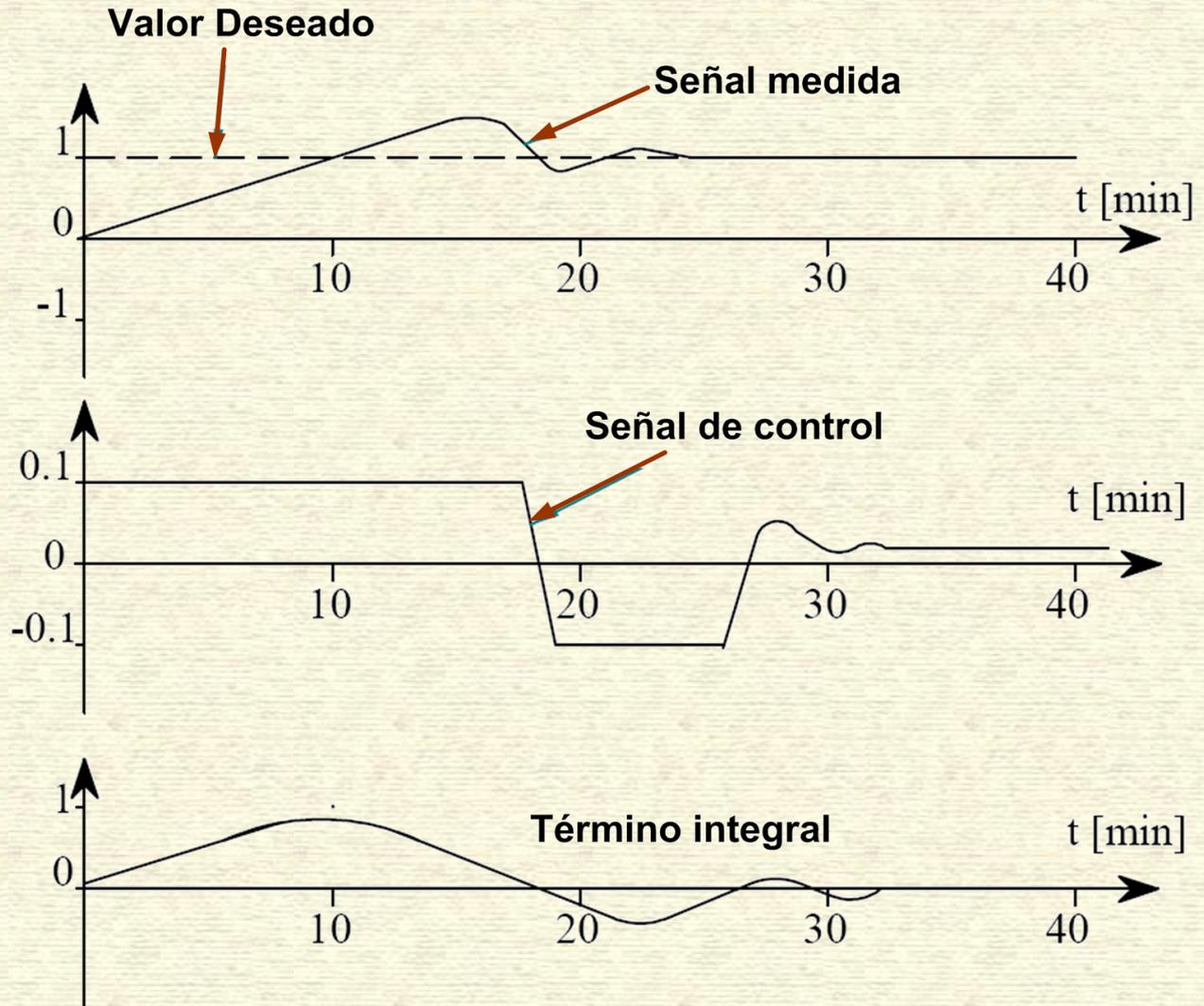


El controlador cambia los parámetros usando variantes del método de Ziegler y Nichols en lazo cerrado.

$$K_{cu} = \frac{4 A}{\pi Y}$$

SATURACIÓN INTEGRAL (WINDUP)

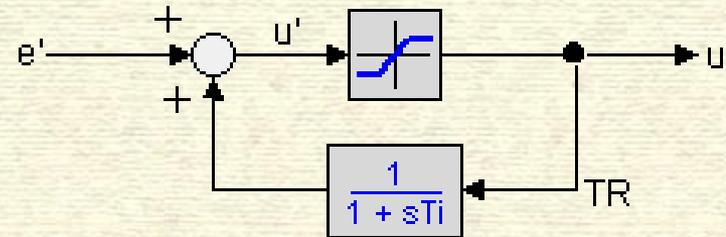
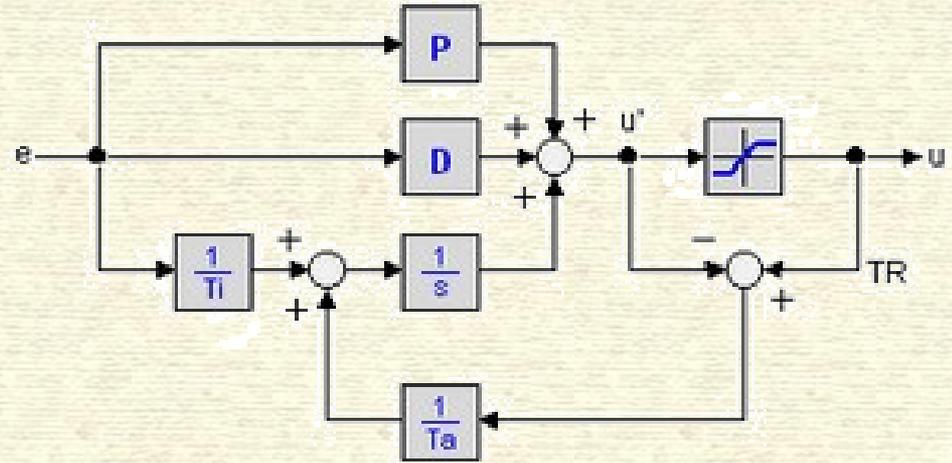
Uno de los principales efectos indeseables de la saturación de actuadores y transmisores es que el integrador del controlador continuará integrando aún mientras la entrada se encuentra saturada.



SATURACIÓN INTEGRAL (WINDUP)

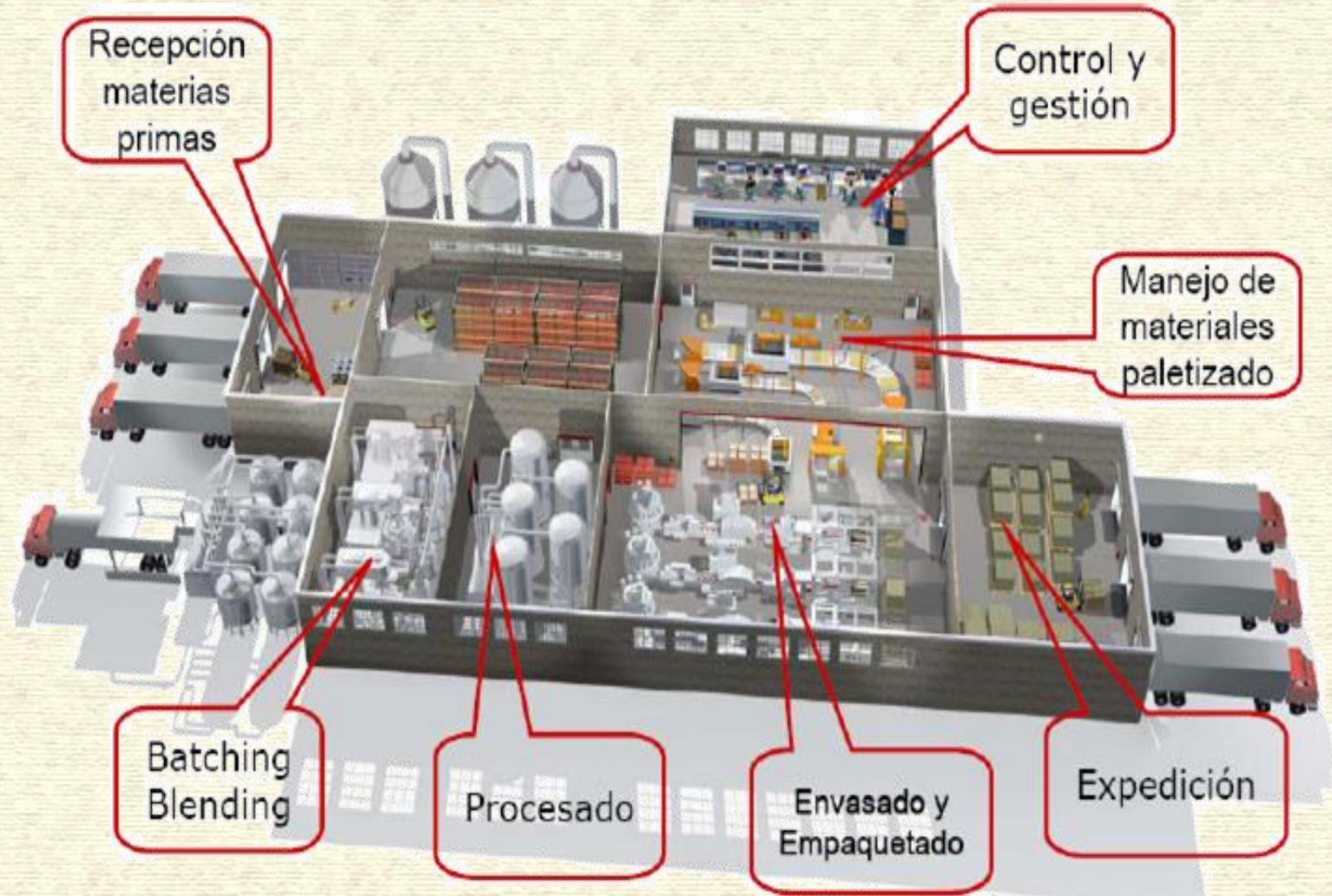
El estado del integrador puede alcanzar valores excesivos, que deterioran la respuesta transitoria en el momento que cesa la limitación, produciendo respuestas con grandes sobrevalores. Este efecto se denomina **reset windup**.

La solución consiste en detectar la saturación de la señal de salida y detener la integración. Los controladores comerciales ofrecen distintas soluciones como **relés anti-windup** y **reimplementación externa** de la acción integral.



SISTEMAS DE CONTROL EN UNA PLANTA

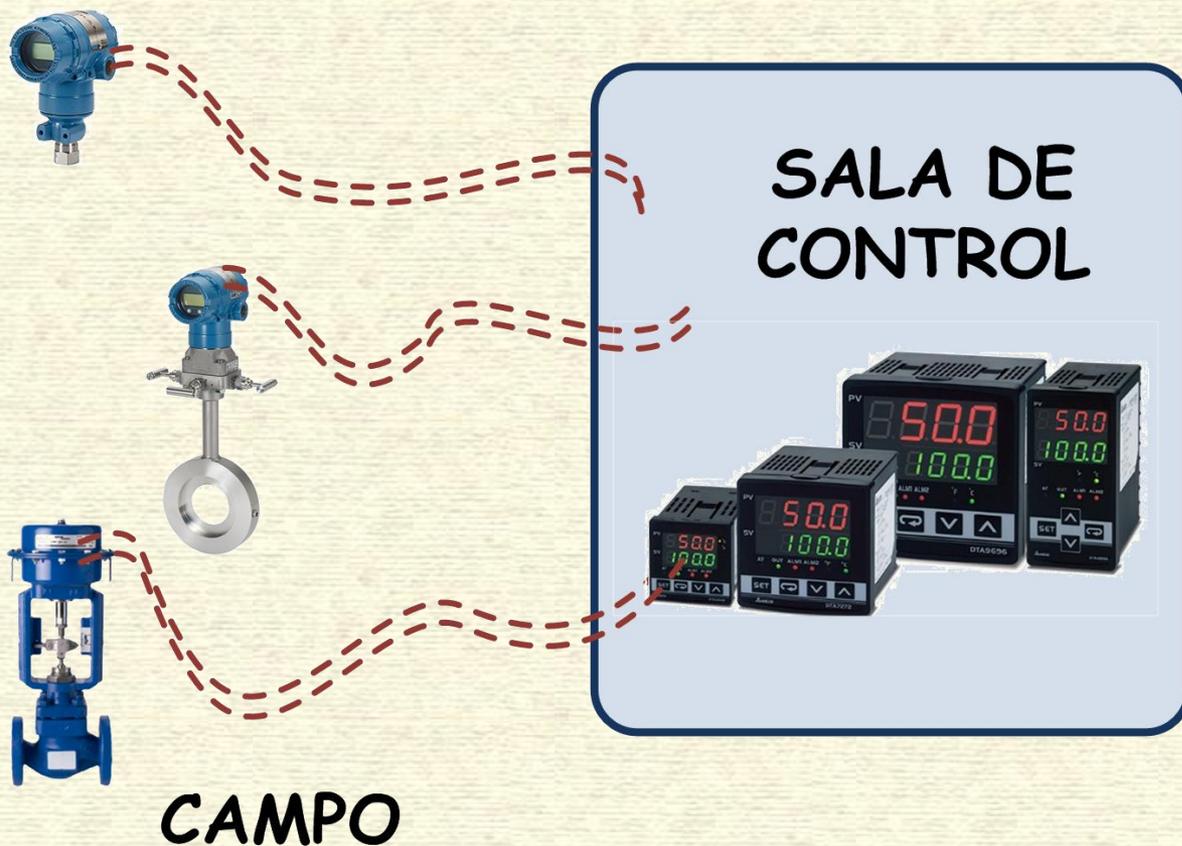
Una fábrica tiene diversos sectores en los que se realizan tareas muy distintas y requieren instrumentación y sistemas de control ad hoc.



SISTEMAS DE CONTROL EN UNA PLANTA

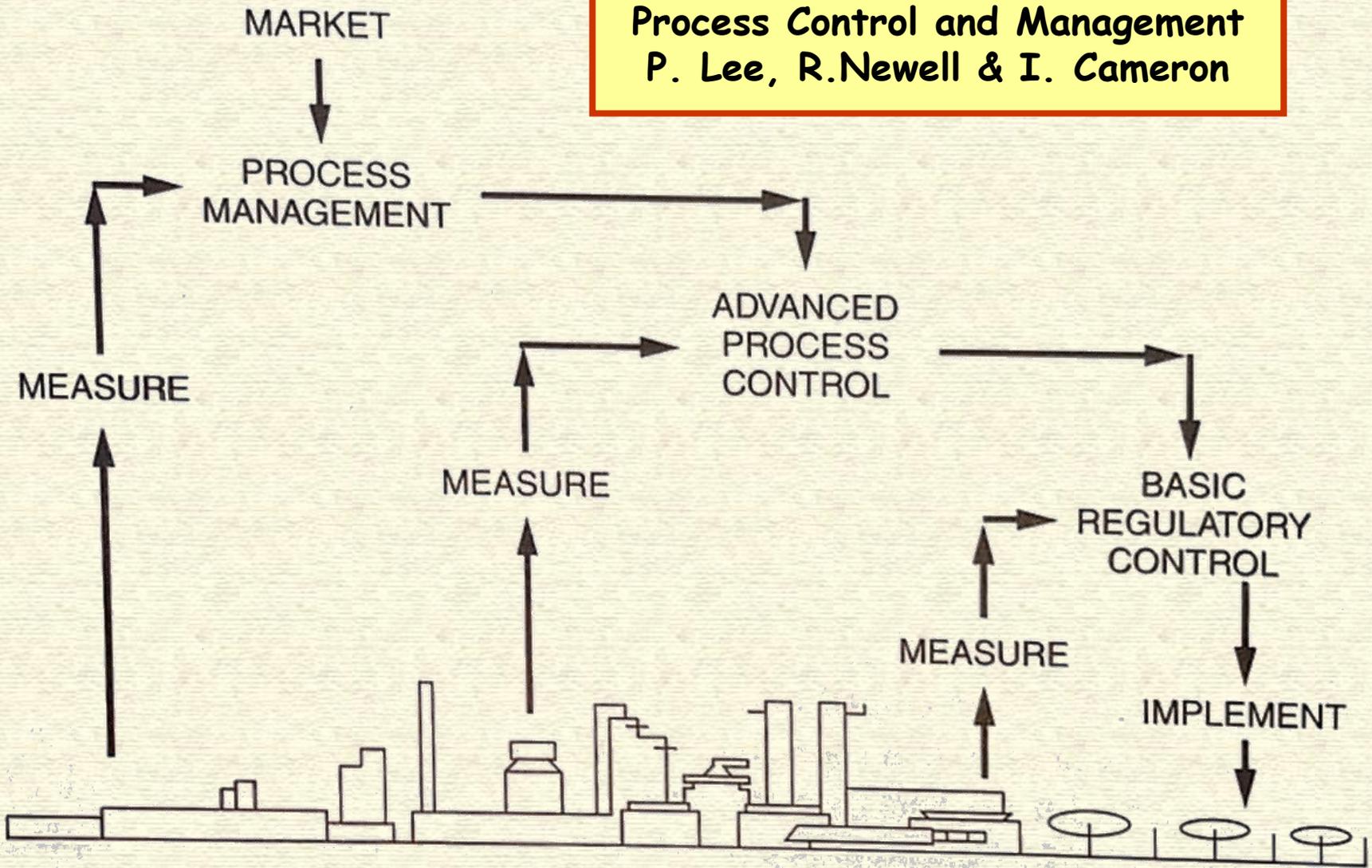
La instrumentación de campo está constituida por los sensores, actuadores, PLCs. Pero los controladores, registradores normalmente se alojan en un lugar común: la Sala de Control.

Se requieren señales que lleguen a controladores, registradores, etc. y señales que vayan de los controladores hacia los actuadores en el campo (cableado).

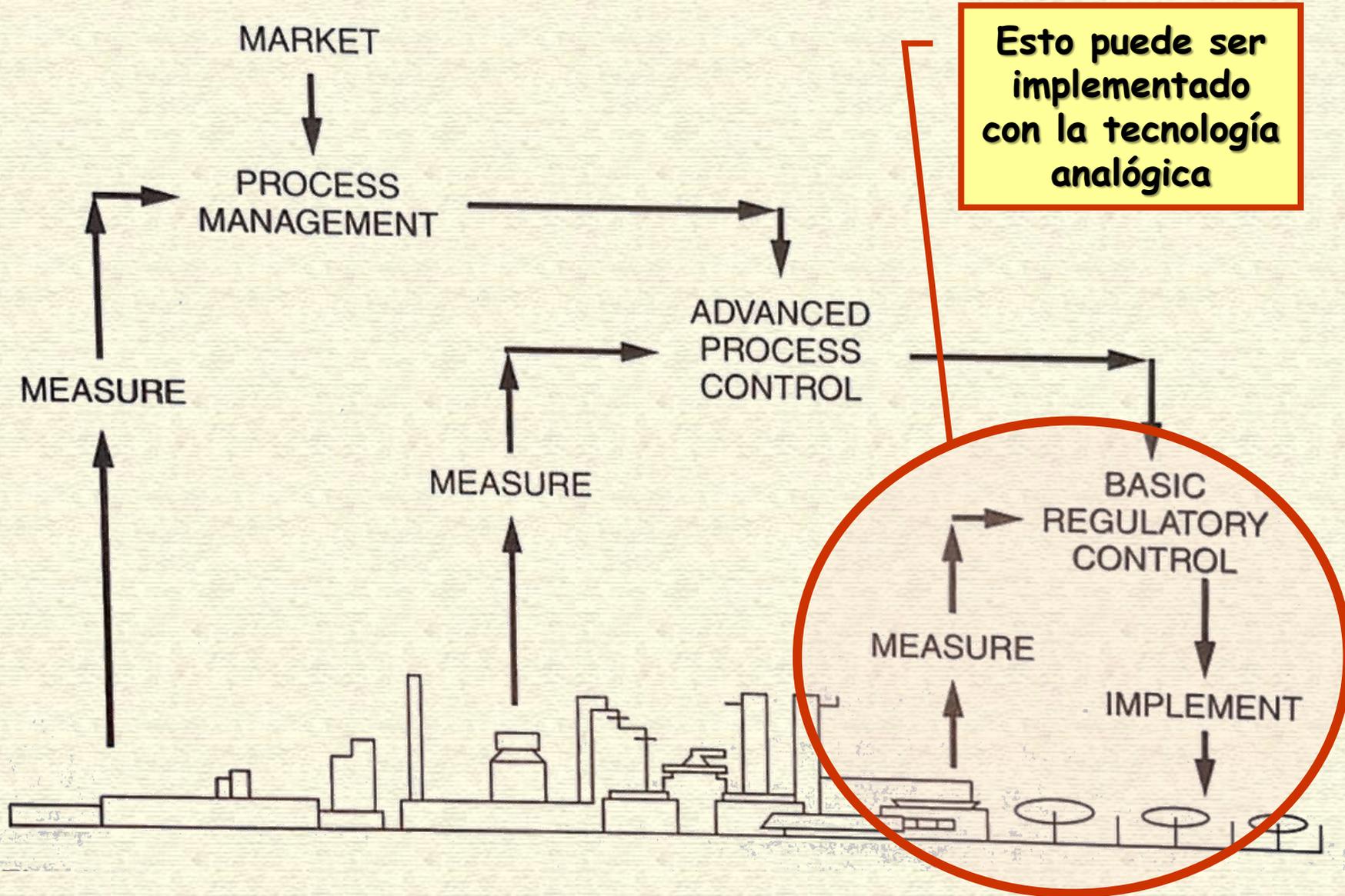


JERARQUÍA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

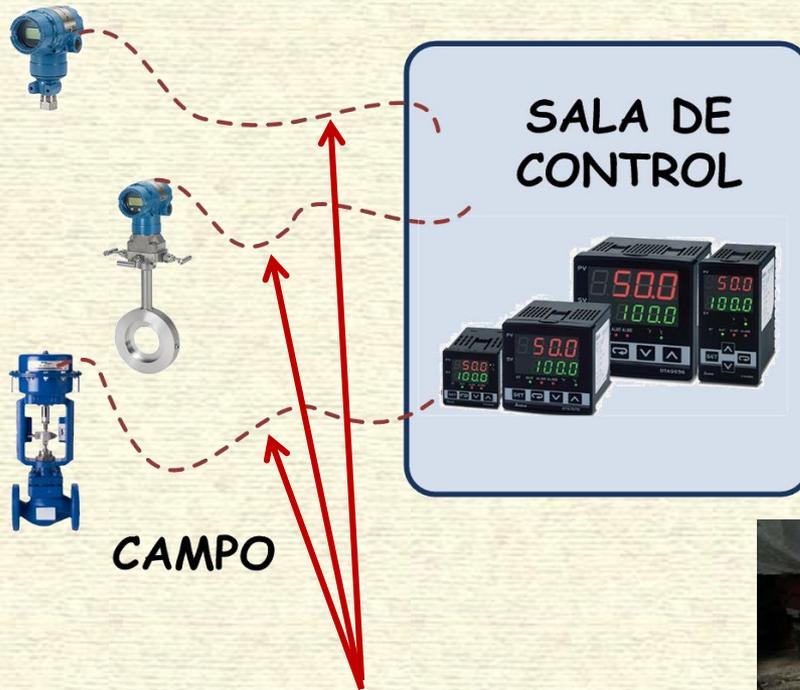
Process Control and Management
P. Lee, R. Newell & I. Cameron



JERARQUÍA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL



CABLEADO EN SISTEMAS CONVENCIONALES



Algunos problemas:

- Costos de cable
- Ruidos
- Fiabilidad de los equipos
- Calibrado
- Mantenimiento
- etc.

El cableado, conexión física para señales eléctricas analógicas, llega a ser importante ya que pueden implicar extensiones 50 o más metros.



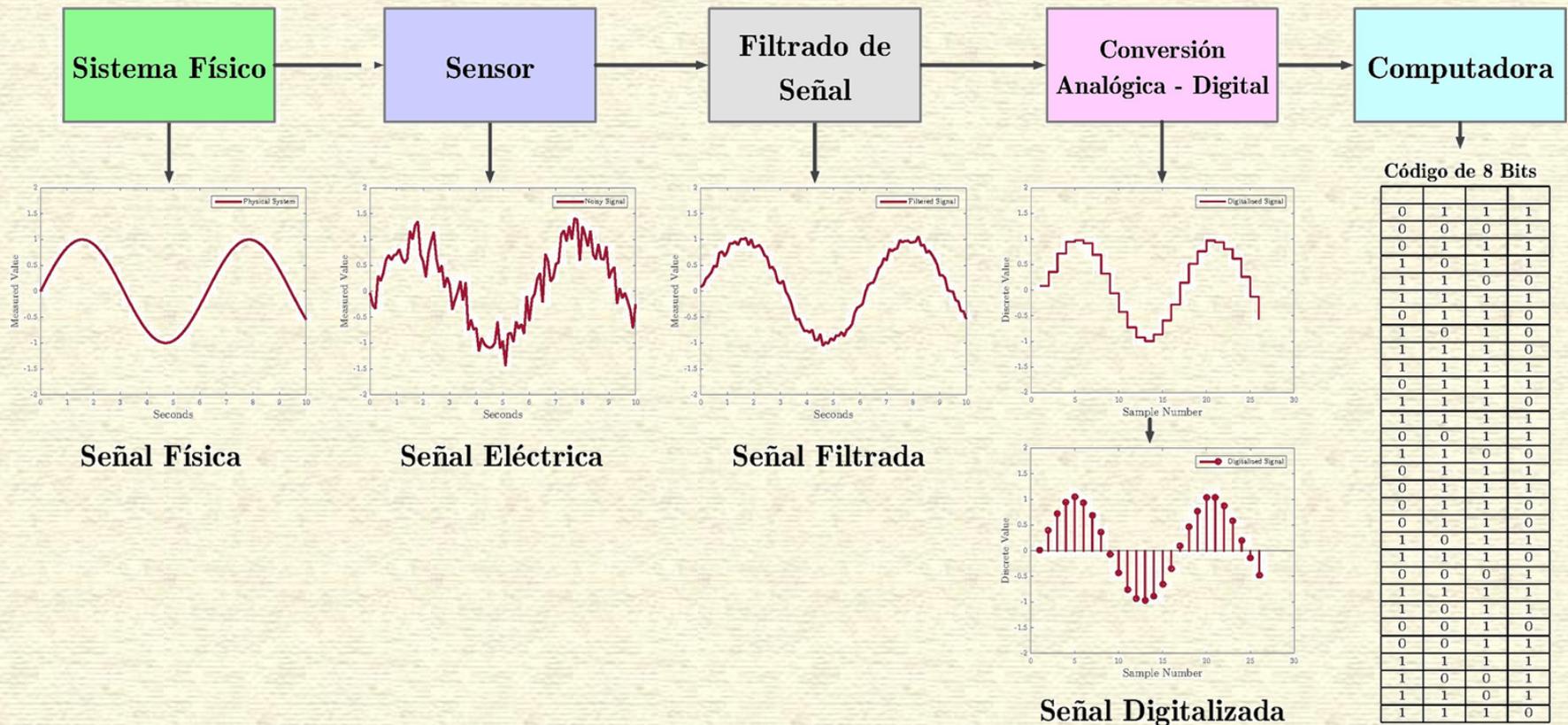
ADQUISICIÓN DE DATOS

La **adquisición de datos** o **adquisición de señales** consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros dispositivos electrónicos (sistema digital).



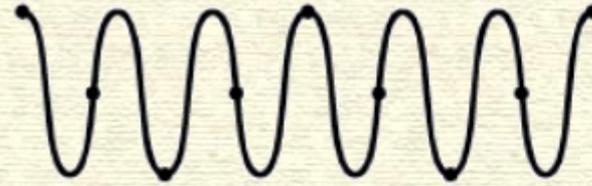
ADQUISICIÓN DE DATOS

Las señales analógicas provenientes de los instrumentos de campo deben pasar por el proceso de digitalización.

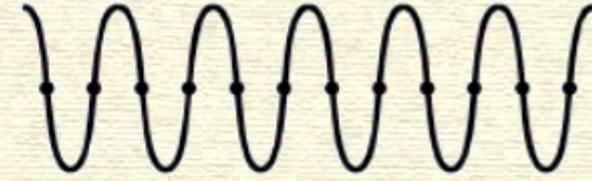


ADQUISICIÓN DE DATOS

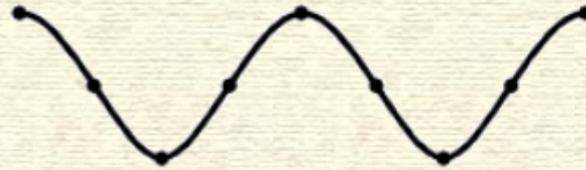
Al muestrear, se pierde información. Para que esta pérdida no sea gravosa, hay que elegir con cuidado el tiempo de muestreo. Si este tiempo es alto, puede producirse el fenómeno de **aliasing**.



Señal original con 4/3 de muestras por ciclo



Señal original con 2 de muestras por ciclo



Señal reconstruida en base al muestreo (baja frecuencia)



Señal reconstruida en base al muestreo (sin oscilacion)

Se han propuesto algunas referencias en función de la constante de tiempo dominante (τ_D) y del tiempo de estabilización (t_s).

$$0.01 \leq \frac{\Delta t}{\tau_D} \leq 0.05$$

$$\frac{t_s}{15} \leq \Delta t \leq \frac{t_s}{6}$$

ADQUISICIÓN DE DATOS - SCADA

SCADA es el acrónimo de **Supervisory Control And Data Acquisition** que se emplea para hacer referencia a un software para ordenadores que permite **controlar** y **supervisar** procesos industriales a distancia.

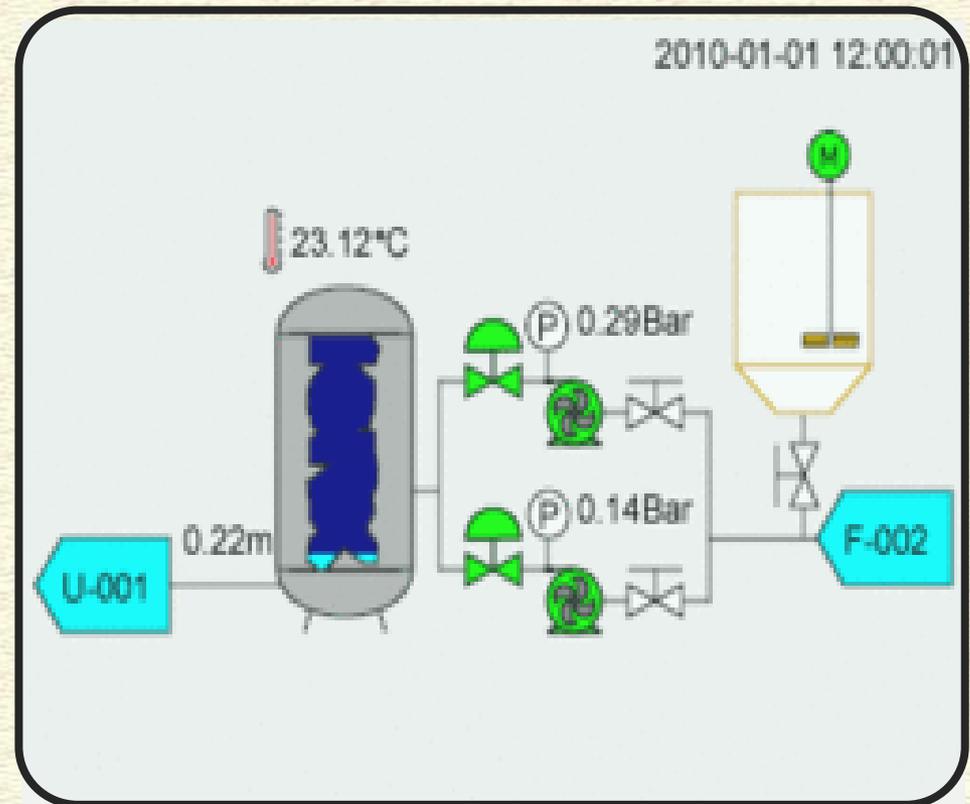


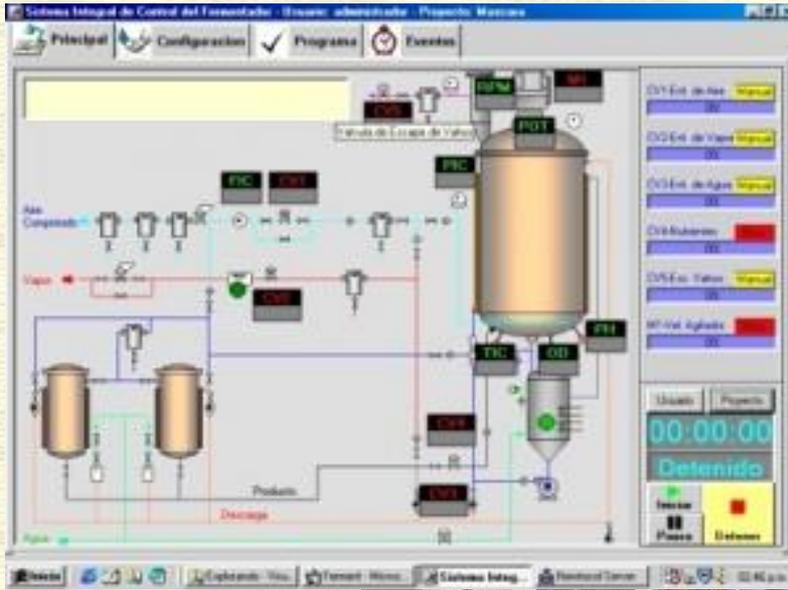
ADQUISICIÓN DE DATOS - SCADA

Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores, actuadores, controladores, PLCs, etc), al monitorear permanentemente el proceso y permitir cambiar set point, ajuste de controladores, entradas de PLC, etc.

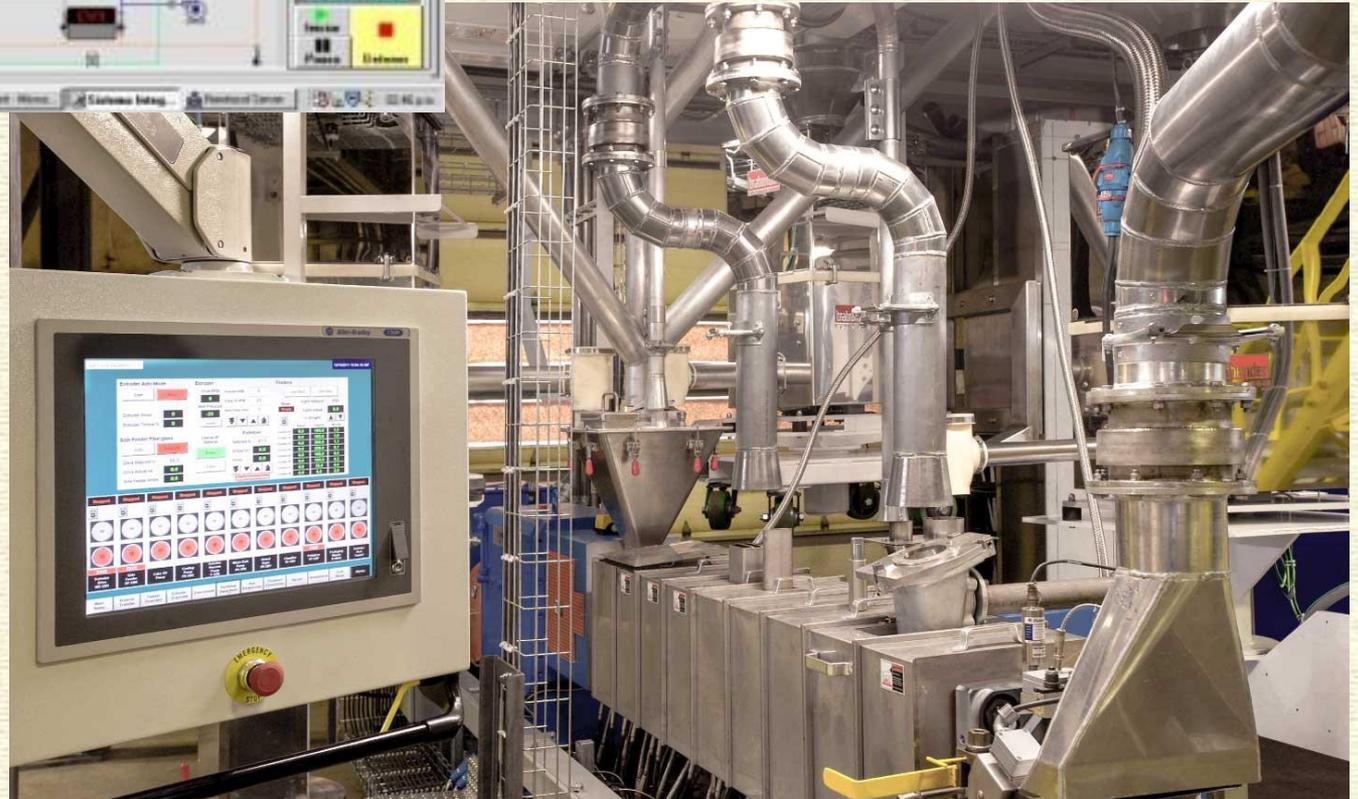
Administra toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, alarmas, etc.).

Permite su gestión e intervención a través de pantallas con diseñadas por el software (**HMI**).





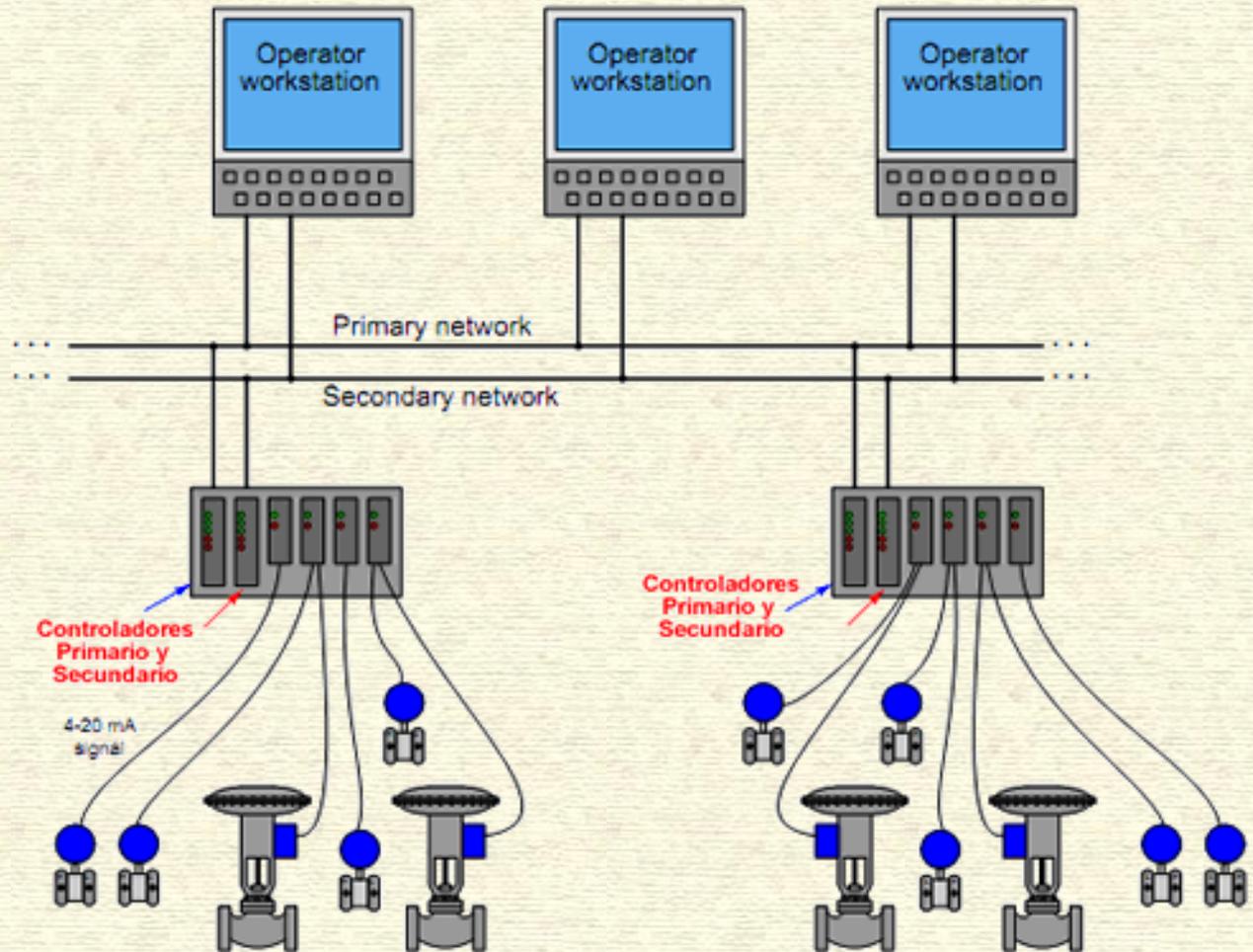
ADQUISICIÓN DE DATOS - SCADA



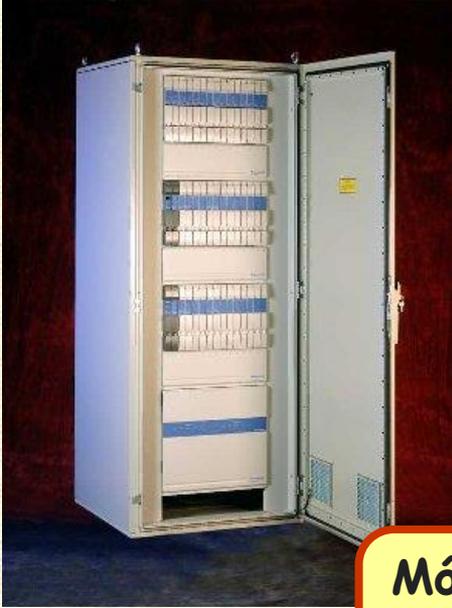
SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO

Arquitectura

Sistema de control que cumple con sus funciones de control a través de una serie de **módulos de control** automático, independientes y distribuidos en distintas secciones de una planta de proceso.

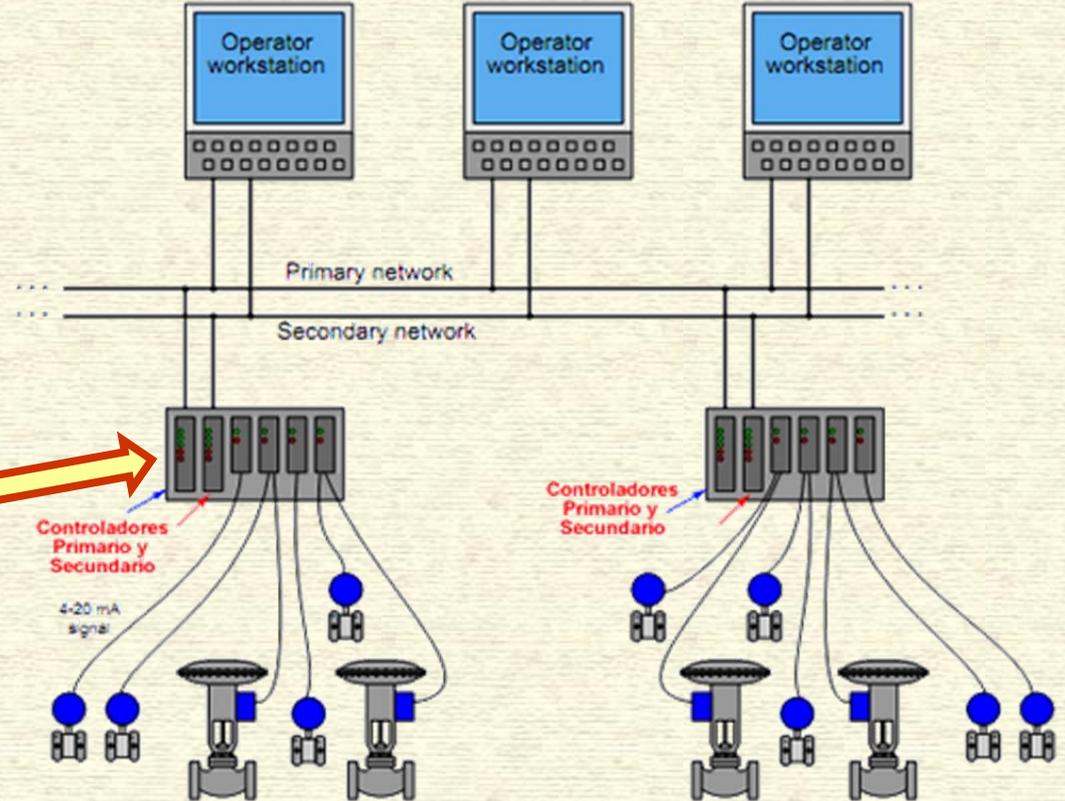


SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO



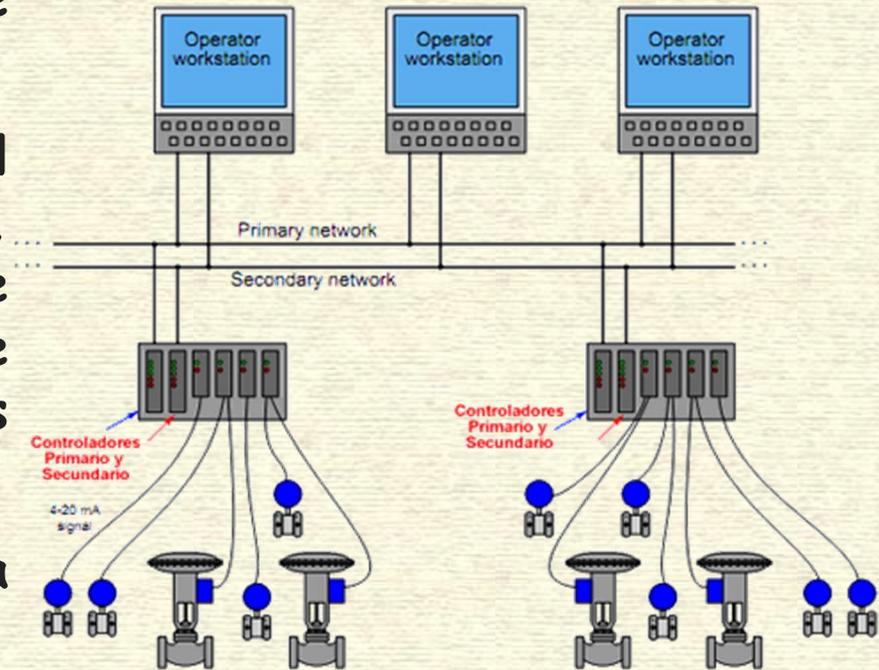
Módulo de control

Estación del operador

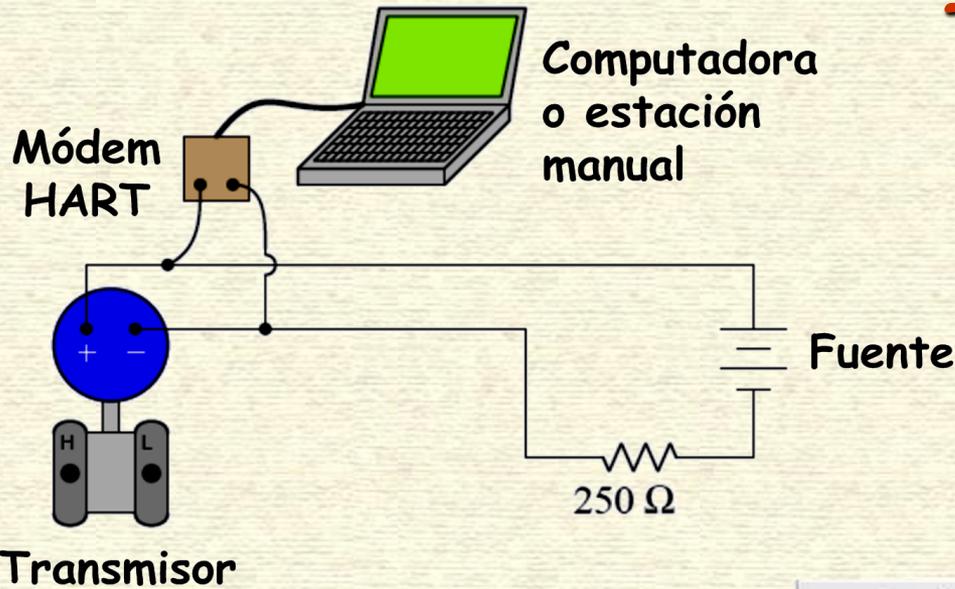


SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO

- Fueron creados para sustituir a los controladores monolazo
- La arquitectura de un SCD está formada por múltiples procesadores, cada uno de los cuales controla una unidad de proceso de una planta, de forma que en caso de fallo solo es esa parte la que queda sin control
- La configuración redundante brinda seguridad operativa.
- Diseñados inicialmente para el control analógico de procesos, evolucionaron rápidamente hacia sistemas híbridos que manejaban asimismo señales de entrada-salida digitales.
- La arquitectura permite la expansión en forma flexible



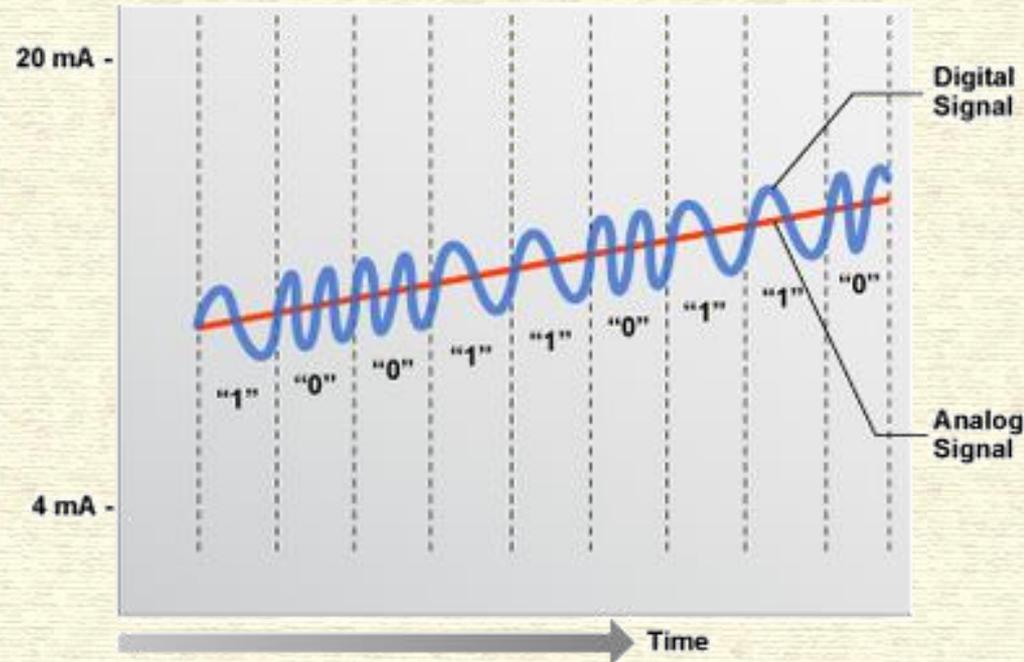
INSTRUMENTOS INTELIGENTES (HART)



Comunicación digital
superpuesta a la señal
de 4-20 mA.

Permite realizar:

- Test de funcionamiento
- Calibración remota,
- Caracterización de señales
- Funciones de control PID
- etc.

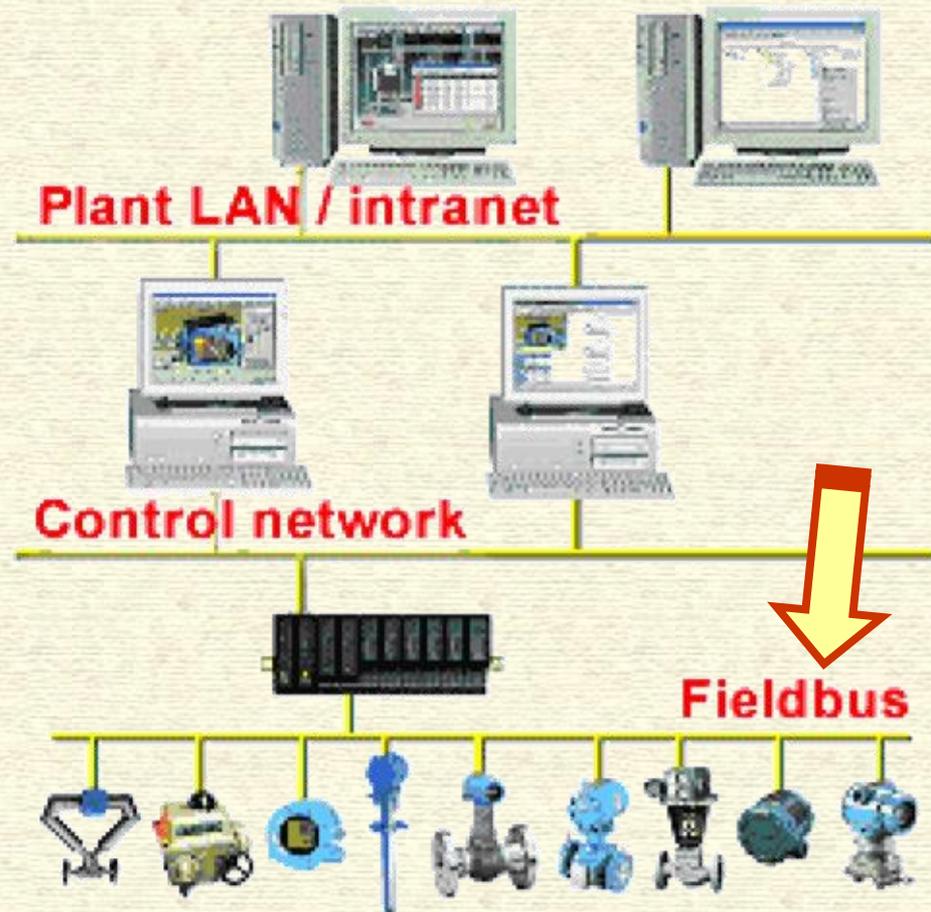


BUS DE CAMPO (FIELDBUS)

Bus de campo (fieldbus) es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción.

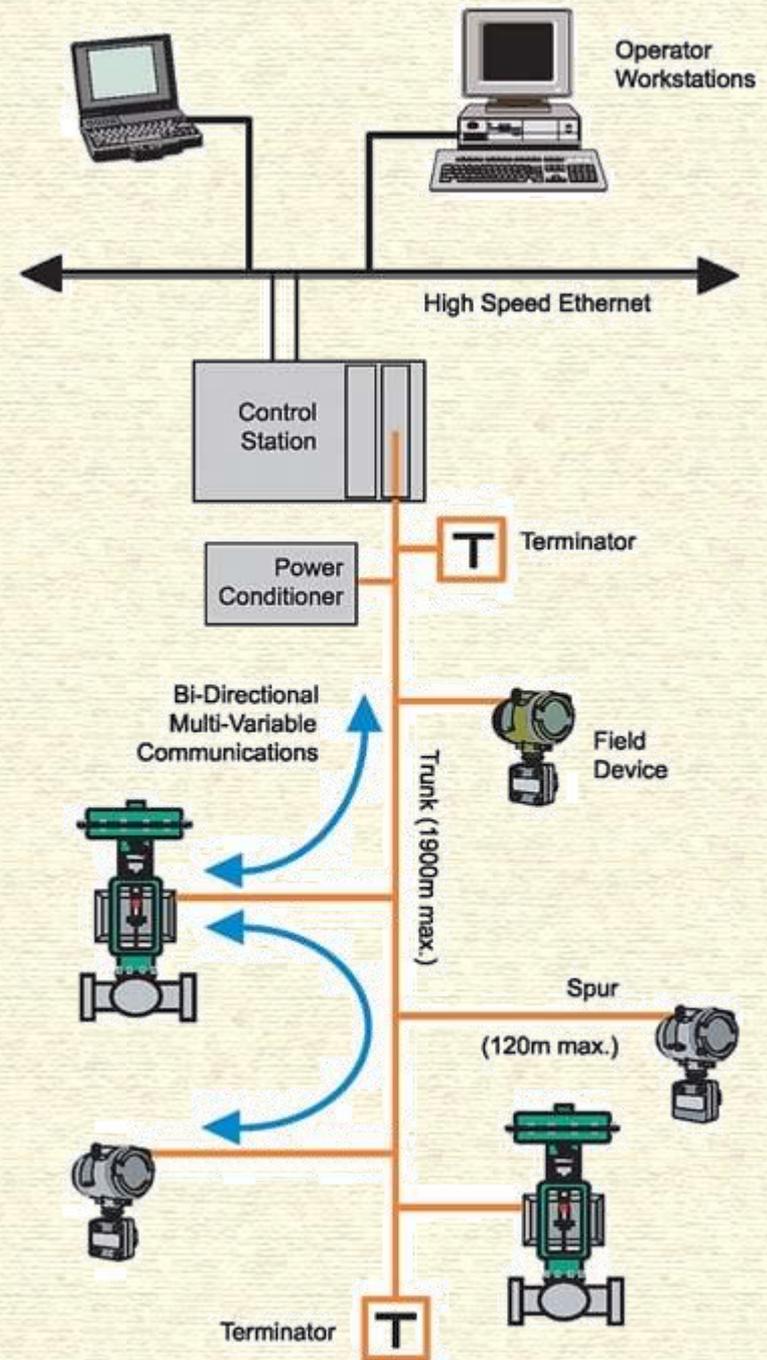
Existen protocolos estandarizados para comunicar digitalmente los instrumentos:

- Fieldbus Found.
- WorldFIP
- Profibus
- etc.

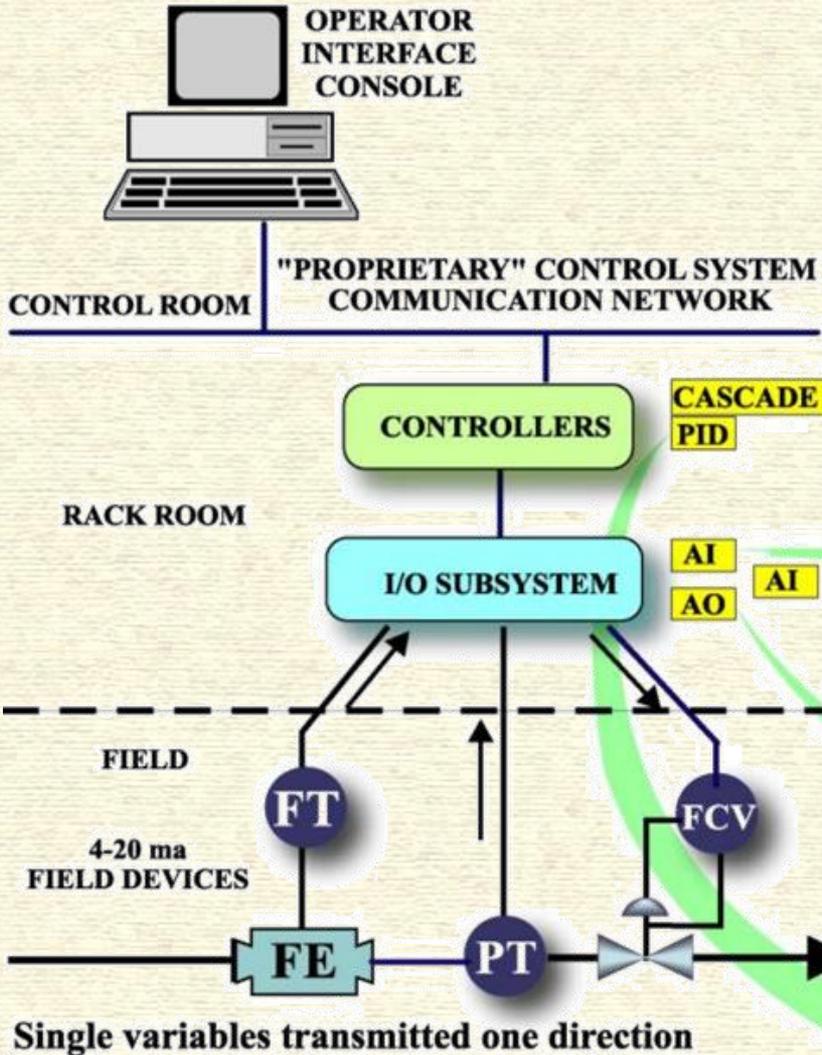


BUS DE CAMPO (FIELDBUS)

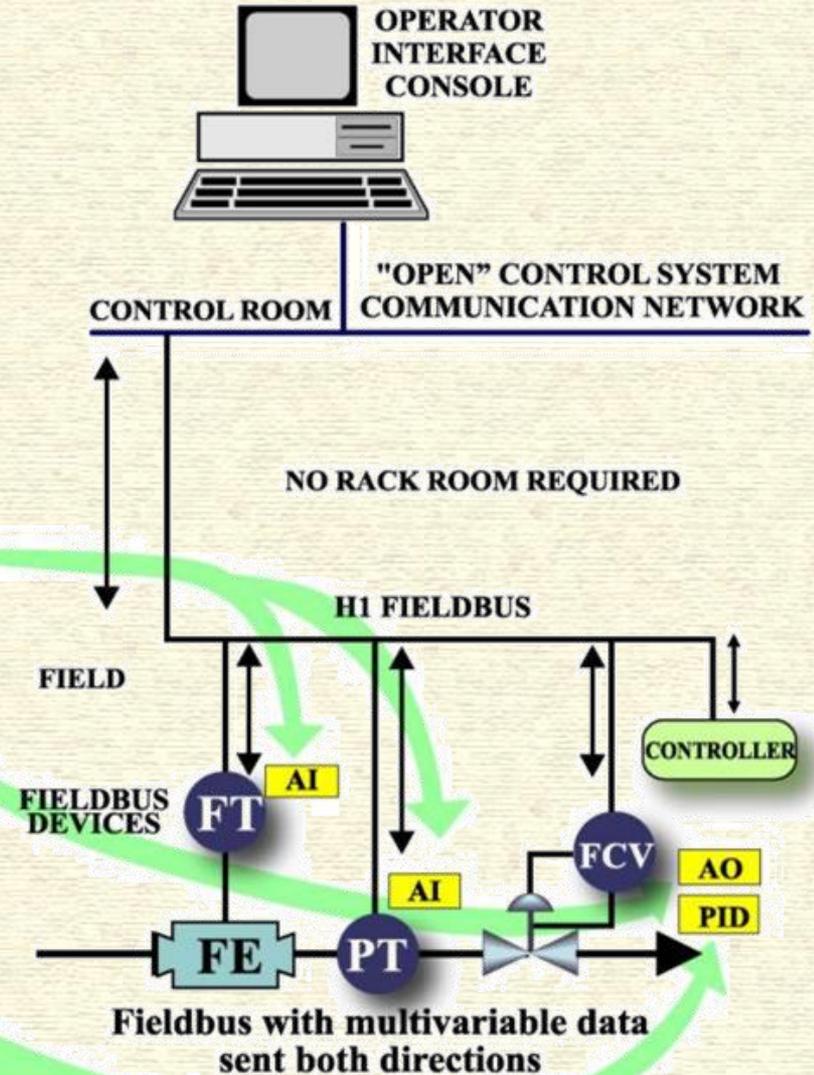
- El intercambio se lleva a cabo por medio de un mecanismo estándar.
- Flexibilidad de extensión.
- Conexión de módulos diferentes en una misma línea.
- Posibilidad de conexión de dispositivos de diferentes procedencias.
- Distancias operativas superiores al cableado tradicional.
- Reducción masiva de cables y costo asociado.
- Simplificación de la puesta en servicio



SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO

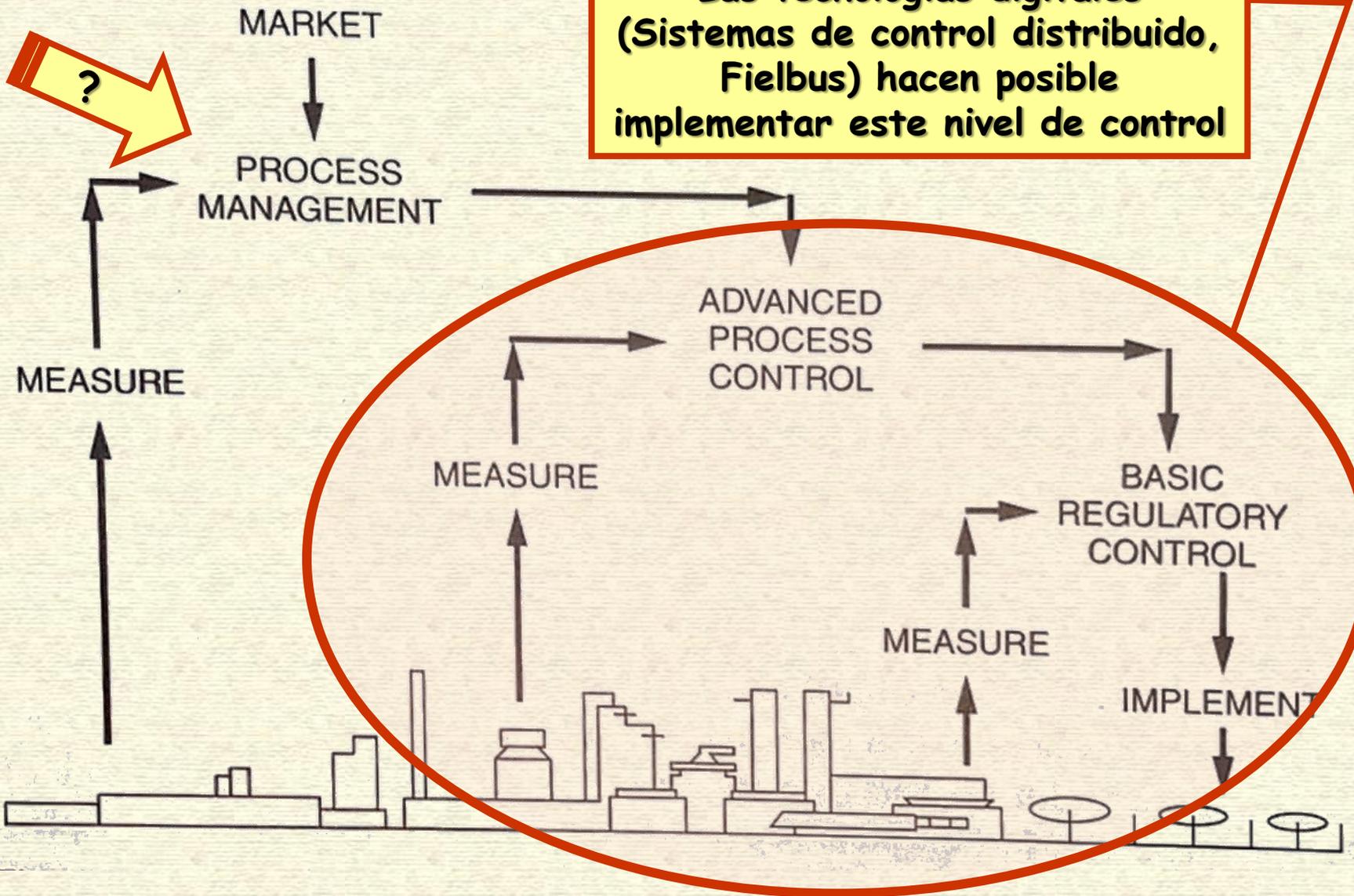


FIELDBUS



JERARQUÍA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Las tecnologías digitales (Sistemas de control distribuido, Fielbus) hacen posible implementar este nivel de control



JERARQUÍA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

