

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

- CÁTEDRA: “SISTEMAS DE CONTROL”
- DOCENTE: Prof. Ing. Marcos A. Golato

# SISTEMAS DE CONTROL AVANZADOS

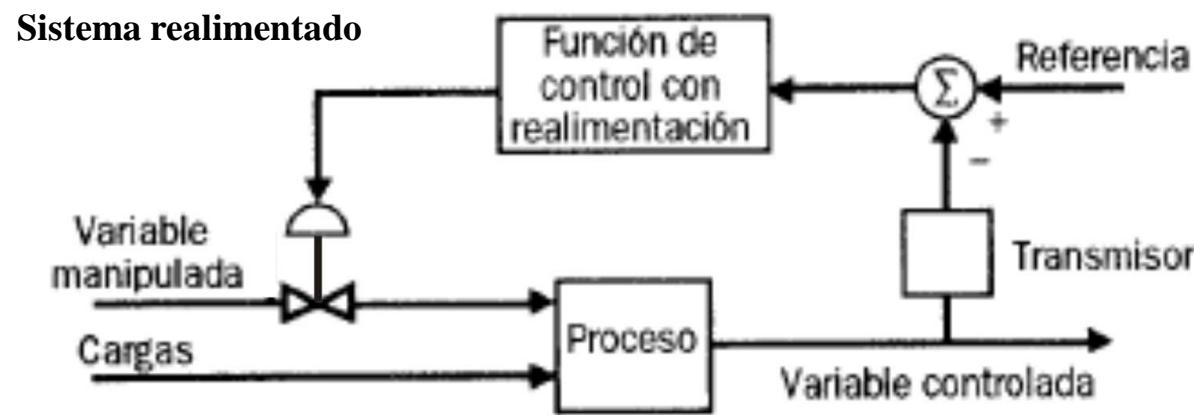
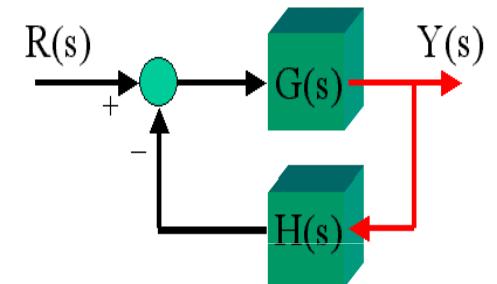
Universidad Nacional de Tucumán

Fundada el 25 de mayo de 1914



# Introducción

**Los sistemas convencionales (lazos simples de control), no son suficientes algunas veces para la ejecución correcta de un control.**

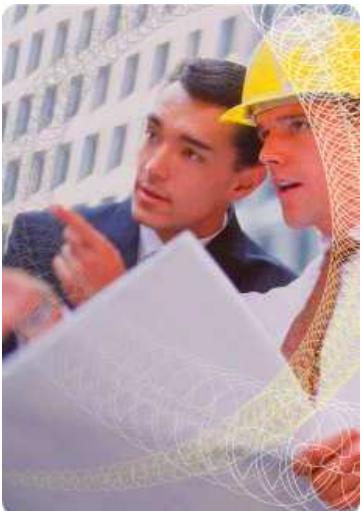


Este sistema resuelve el problema mediante un procedimiento de prueba y error.

Este sistema genera la señal de control en base a la diferencia entre los valores de medición y de referencia.

## Sistemas de control avanzados

Muchas veces las perturbaciones (cargas) en los procesos provocan desvíos grandes del Set-Point y de demasiada duración.



Entonces se busca técnicas más efectivas de control.

- **Control en cascada.**
- **Control en adelanto (Feed Forward).**
- **Control de relación.**
- **Control de restricción o selectivo.**

## Normas de representación de los sistemas de control

### Diagramas P&ID:

Se denomina diagrama “P&ID” (Piping and Intrumentation Diagram), a los esquemas donde se registran toda la instrumentación sobre un diagrama de flujo de proceso. Estos permiten asociar a cada elemento de medición y/o control un código, denominado “TAG” del instrumento.

### Simbología:

Los símbolos y nomenclaturas que se utilizan en los diagramas P&ID, se encuentran normalizados en diversos estándares. Las representaciones se realizan según:

- En Argentina: Norma IRAM-IAP 550, año 1972 y 1973 (IRAM 505).
- En el mundo:

Norma ISA (Instrument Society of America), S5.1 (1986), S5.2 (1981), S5.3 (1983), S5.4 (1986) y S5.5 (1989).

Norma SAMA (Scientific Apparatus Makers Association), esta organización se encarga de reunir y estandarizar los aparatos que se construyen para mediciones de variables físicas.

## Identificación de los instrumentos

Consiste en un arreglo de letras y números, y es de primordial importancia para la interpretación de los diagramas P&ID.

Por ejemplo: para un controlador de nivel con indicación local, tendría la forma “LIC-101A”, con el siguiente significado:

L	I	C	101	A
PRIMERA LETRA	MODIFICADOR DE LA SEGUNDA LETRA	SEGUNDA LETRA	NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DEL LAZO	SUFijo ADICIONAL

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## Significado de las letras

	PRIMERA LETRA	LETRAS SUCESIVAS
A	ANÁLISIS	ALARMA
C	ELEGIBLE POR EL USUARIO	CONTROL
D	ELEGIBLE POR EL USUARIO	DIFERENCIAL
E	TENSIÓN	ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN (SENSOR)
F	CAUDAL	RELACIÓN
L	NIVEL	BAJO
I	CORRIENTE	INDICACIÓN
P	PRESIÓN	-
Q	TOTALIZACIÓN / EVENTO	-
R	RADIACIÓN	REGISTRO
S	VELOCIDAD/FRECUENCIA	INTERRUPTOR
T	TEMPERATURA	TRANSMISOR
U	MULTIVARIABLE	MULTIFUNCIÓN
V	VIBRACIÓN	VÁLVULA
Y	INDEFINIDA	RELÉ DE CÓMPUTO O LÓGICO
Z	POSICIÓN	MOTOR / ELEMENTO FINAL DE CONTROL

- **PRIMERA LETRA:** indica siempre la variable que se controla.
- **MODIFICADOR DE LA PRIMERA LETRA:** indica diferencia, relación, etc, de la variable medida.
- **SEGUNDA LETRA:** describe la función cumplida por el elemento.

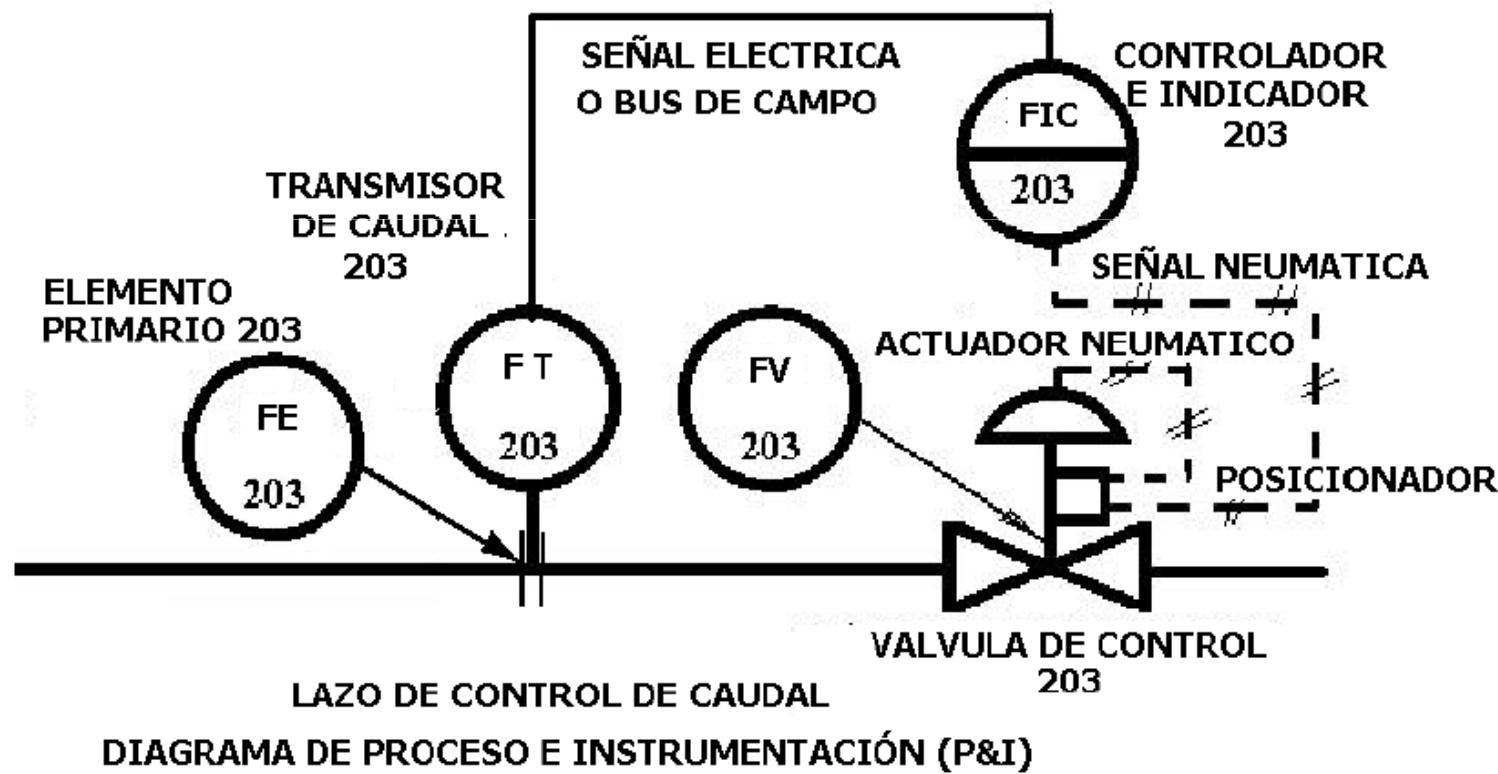
### Ejemplos:

**PT**= Transmisor de presión (primera y segunda letra).

**PDT**= Transmisor diferencia de presión (primera letra con su modificadora y segunda letra).

**PIT**= Transmisor de presión con indicación local (primera y segunda letra con modificadora para la función pasiva de indicación).

## Ejemplo: Lazo de control de caudal



**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## Símbolos SAMA p/ sistemas de control de combustión

### Introducción

La complejidad de las estrategias usadas para el control de la combustión requiere una notación que exceda los Diagramas de Proceso e Instrumentación (P&IDs) estándar de la ISA (Sociedad de Instrumentación, Sistemas y Automatización). La Asociación Científica de Fabricantes de Aparatos (SAMA) ha desarrollado tal notación y esto se utiliza comúnmente para definir estrategias de control de combustión.

### Fundamentos

La notación SAMA consiste en cuatro formas, una serie de letras para la información de la etiqueta y varios algoritmos matemáticos de control. Estos componentes, demostrados en las tablas abajo, se combinan para describir completamente la lógica de control compleja.

Tipo de Dispositivo	
	Medición o Indicación
	Procesamiento Manual
	Procesamiento Automático
	Control Final

Letras de Medición/Indicación			
<b>A</b>	Análisis	<b>R</b>	Registro
<b>C</b>	Conductividad	<b>I</b>	Indicación
<b>D</b>	Densidad	<b>Q</b>	Integración
<b>F</b>	Flujo	<b>U</b>	Adquisición Digital
<b>L</b>	Nivel	<b>T</b>	Transmisor
<b>M</b>	Humedad	<b>RT</b>	Transmisor Registrador
<b>P</b>	Presión	<b>IT</b>	Transmisor Indicador
<b>S</b>	Velocidad		
<b>T</b>	Temperatura		
<b>V</b>	Viscosidad		
<b>Z</b>	Posición		

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

<b>Procesamiento del Señal</b>			
Adición	$\Sigma$	Selector Alto	>
Promedio	$\Sigma/n$	Selector Bajo	<
Diferencia	$\Delta$ ó -	Limitador Alto	↗
Proporcional	$K$ ó $P$	Limitador Bajo	↖
Integral	$\int$ ó I	Proporción Inversa	-K ó -P
Derivativa	$d/dt$ ó D	Límite de Velocidad	↙ ↖
Multiplicación	X	Bias	±
División	÷	Función de tiempo	f(t)
Raíz Cuadrada	$\sqrt[n]{X}$	Transferencia de señal	T
No-lineal	$f_1(x)$	Generador de señal	A
Tres estados	↔	Comparador de señal	H/, /L

# FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA

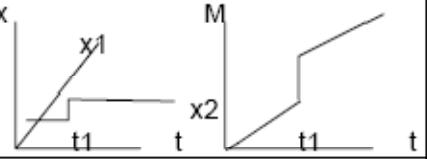
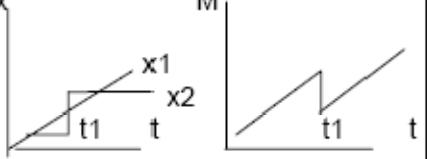
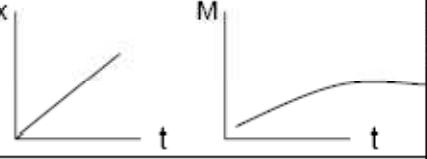
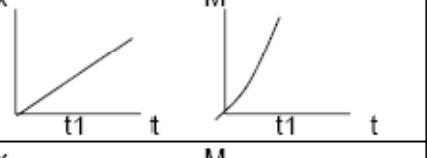
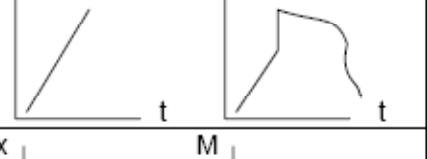
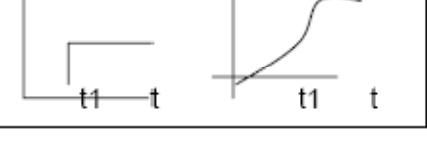
## DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

FUNCION BLOCK – FUNCION DESIGNACION					
La función designación esta asociada con controladores dispositivos computacionales convertidores y reles se usa individualmente o en combinaciones(ver tabla 1 nota 14) Las "cajas" ayudan en la ubicación de símbolos u otras marcas en diagramas y permite que la función se use solo en block de diseño conceptual					
Nº	FUNCION	SIMBOLO	ECUACION	REPRESENTACION GRAFICA	DEFINICION
1	SUMA	$\sum$	$M = X_1 + X_2 + \dots + X_n$		La salida es la suma algebraica de las entradas. Las entradas pueden ser positivas o negativas
2	PROMEDIO	$\frac{\sum}{n}$	$M = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$		La salida es la suma algebraica de las entradas dividida por el numero de entradas
3	DIFERENCIA	$\Delta$	$M = X_1 - X_2$		La salida es la diferencia algebraica de dos entradas
4	PROPORTINALIDAD	K 1:1 2:1	$M = KX$		La salida es directamente proporcional a la entrada. En un bloque K puede ser 1:1 , 2:1 etc que reemplazan a K
5	INTEGRACION	$\int$	$M = \frac{1}{T_i} \int x dt$		La salida varia con ambas magnitudes y su duración. La salida es proporcional al tiempo de integración de la entrada
6	DERIVADA	$d/dt$	$M = T_D \frac{dx}{dt}$		La salida es proporcional a la razón de cambio de la entrada

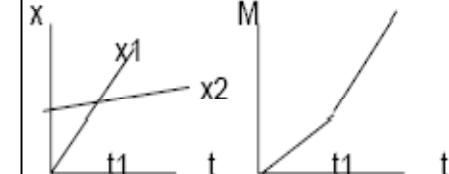
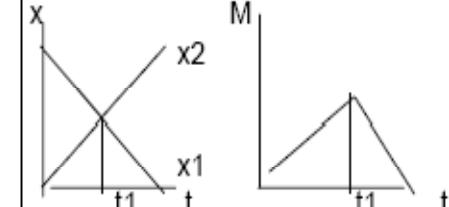
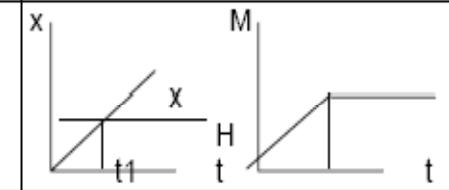
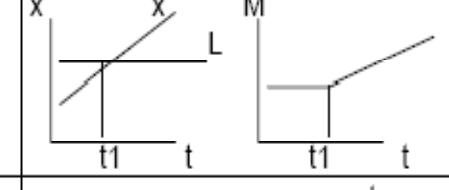
# FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA

## DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**5.4 TABLA 3 CONTINUACION**

Nº	FUNCION	SIMBOLO	ECUACION	REPRESENTACION GRAFICA	DEFINICION
7	MULTIPLICACION	$\times$	$M = X_1 X_2$		La salida es el producto de las dos entradas
8	DIVISION	$\div$	$M = \frac{X_1}{X_2}$		La salida es el cuociente de las dos entradas
9	EXTRAER RAIZ	$\sqrt[n]{\phantom{x}}$	$M = \sqrt[n]{X}$		La salida es la raíz n de las entradas si n es omitida se asume raíz cuadrada
10	EXPONENCIAL	$X^n$	$M = X^n$		La salida es igual a la entrada elevada a exponente n
11	NO LIENAL O FUNCION NO ESPECIFICADA	$M = f(x)$	$M = f(x)$		La salida es no lineal o función no especificada de la entrada
12	FUNCION TIEMPO	$f(t)$	$M = Xf(t)$ $M = f(t)$		La salida es igual a la entrada en función tiempo o al tiempo solamente

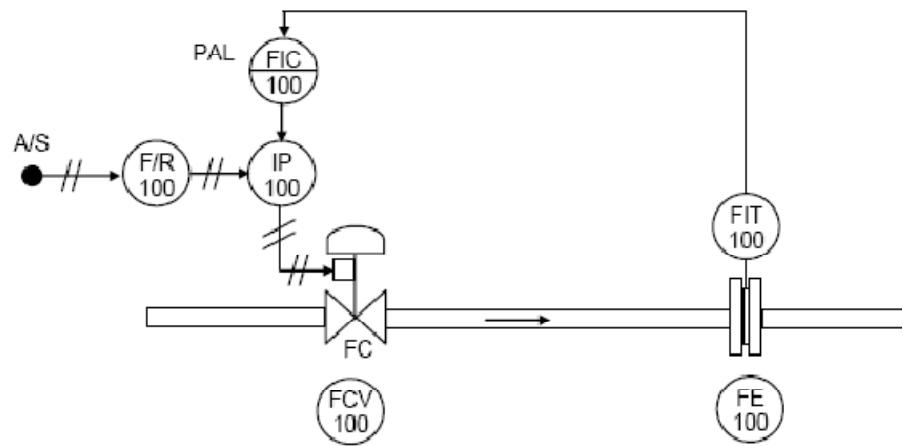
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

5.4 TABLA 3 CONTINUACION					
Nº	FUNCION	SIMBOLO	ECUACION	REPRESENTACION GRAFICA	DEFINICION
13	SELECCIÓN MAYOR	>	$M = \begin{cases} X & \text{para } X_1 \geq X_2 \\ X_2 & \text{para } X_1 \leq X_2 \end{cases}$		La salida es mayor que las entradas
14	SELECCIONA MENOR	<	$M = \begin{cases} X & \text{para } X_1 \leq X_2 \\ X_2 & \text{para } X_1 \geq X_2 \end{cases}$		La salida es menor que las entradas
15	LIMITACION MAYOR	∨	$M = \begin{cases} X & \text{para } X \leq H \\ H & \text{para } X \geq H \end{cases}$		La salida es igual a la entrada o al límite mayor, mientras el valor sea menor
16	LIMITACION MENOR	∧	$M = \begin{cases} X & \text{para } X \geq L \\ L & \text{para } X \leq L \end{cases}$		La salida es igual a la entrada o al límite menor mientras el valor sea mayor
17	PROPORCIONAL INVERSA	-K	$M = -KX$		La salida es inversamente proporcional a la entrada la entrada

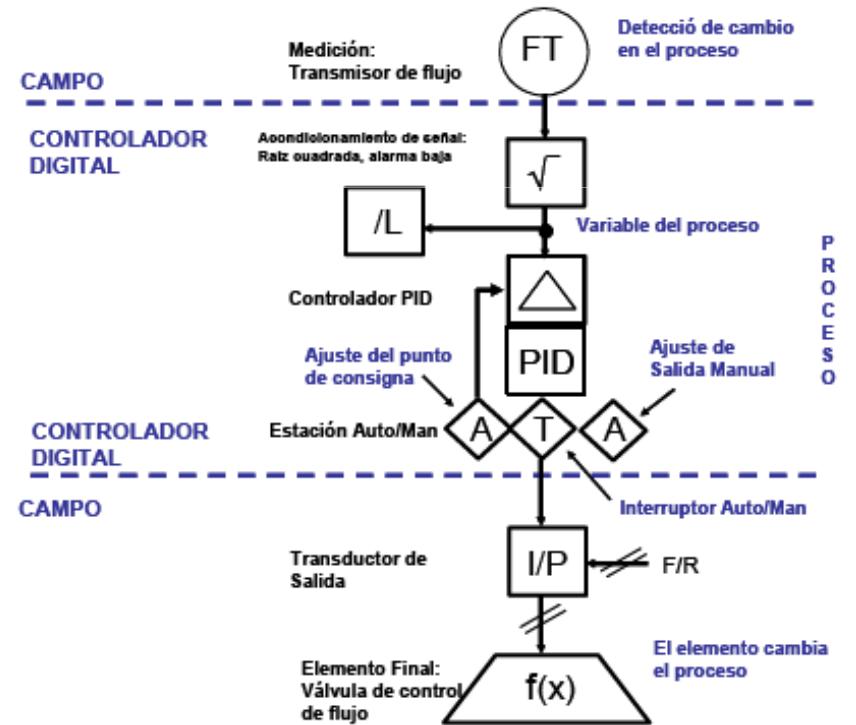
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

5.4 TABLA 3 CONTINUACION					
Nº	FUNCION	SIMBOLO	ECUACION	REPRESENTACION GRAFICA	DEFINICION
18	LIMITACION DE VELOCIDAD	-V-	$\frac{dM}{dt} = \frac{dx}{dt} \begin{cases} \leq H & \text{AND} \\ \geq H & \text{OR} \end{cases}$ $\frac{dM}{dt} = H \begin{cases} \frac{dx}{dt} & \text{M=x} \end{cases}$		<p>La salida es igual a la entrada, mientras la relación de cambio de la entrada no excede un valor límite. La salida cambiará con la relación establecida de límite hasta que la salida sea igual a la entrada</p>
19	BIAS	+ - ±	$M = X \pm b$		<p>La salida es igual a la entrada más o menos un valor arbitrario (Bias)</p>
20	CONVERTIDOR	*/*	Salida = f (entrada)	NADA	<p>La forma de la señal de salida es diferente que las señales de entrada.</p> <p>*          E tensión          H hidráulico          I corriente          Q electromagnético          P Neumático          A análogo          B binario          R resistencia eléctrica          D digital</p>

## Comparación de los métodos de notación ISA y SAMA para un lazo típico de control de caudal



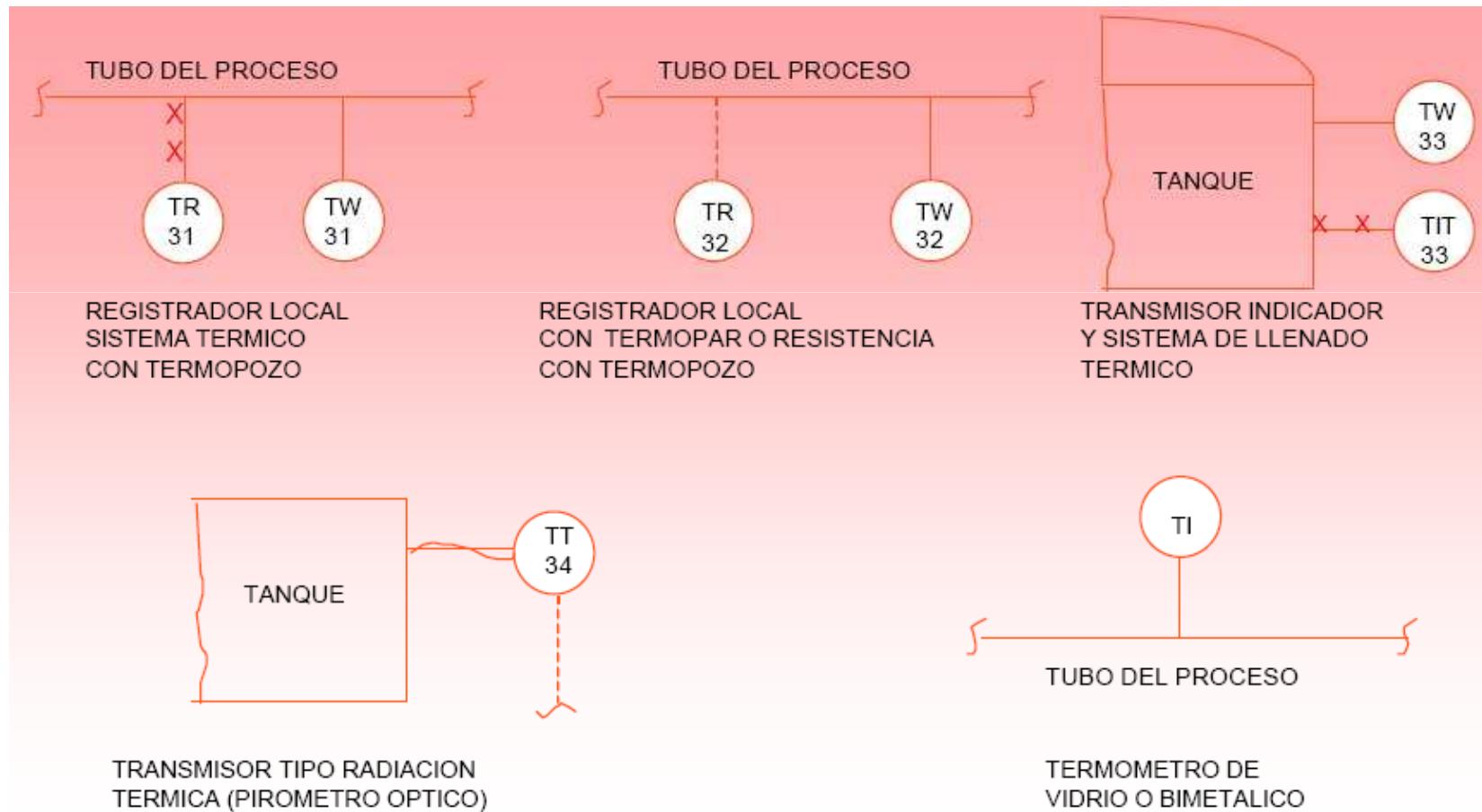
Notación ISA



Notación SAMA

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

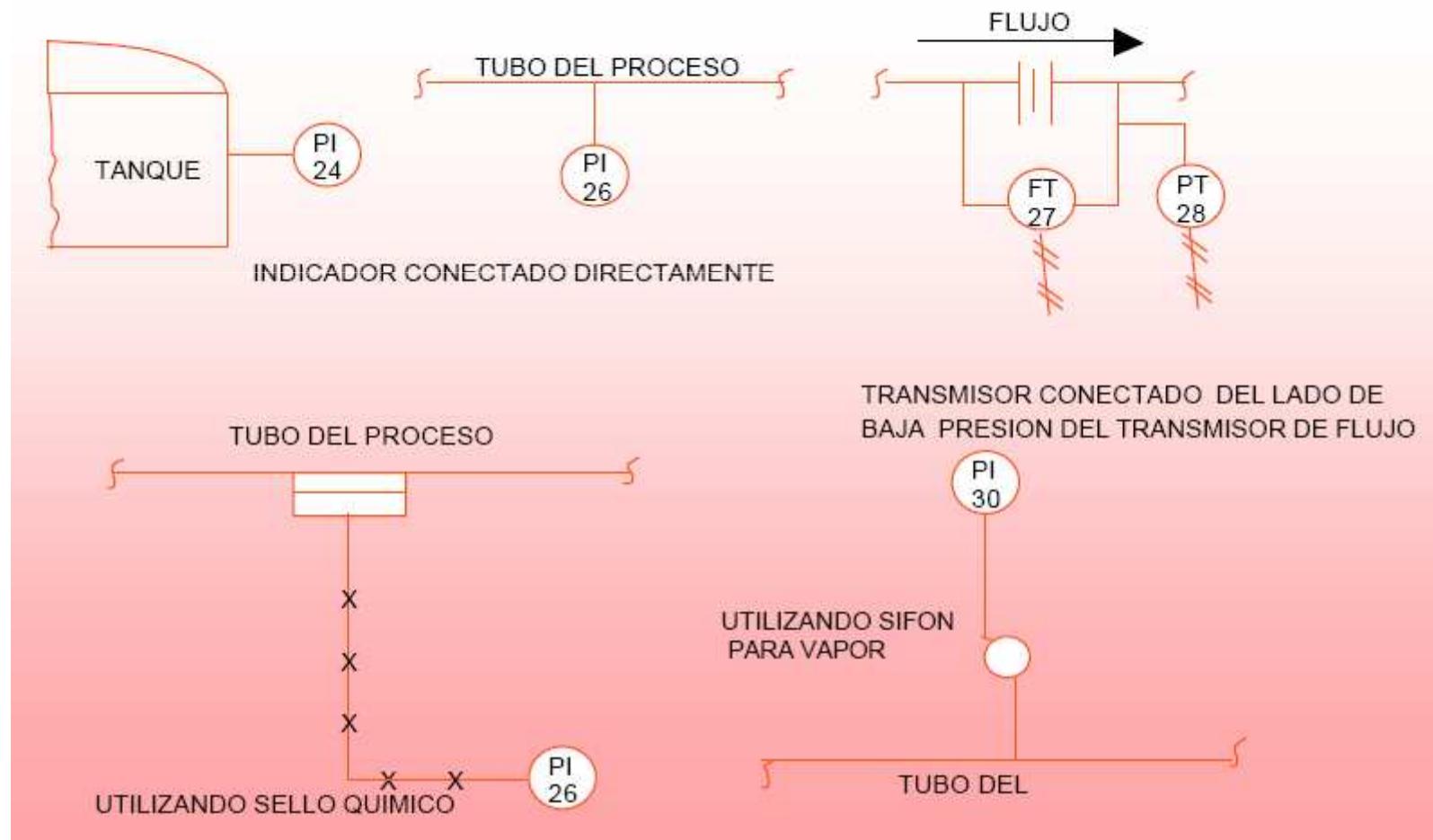
Elementos Primarios para Control de Temperatura



# FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA

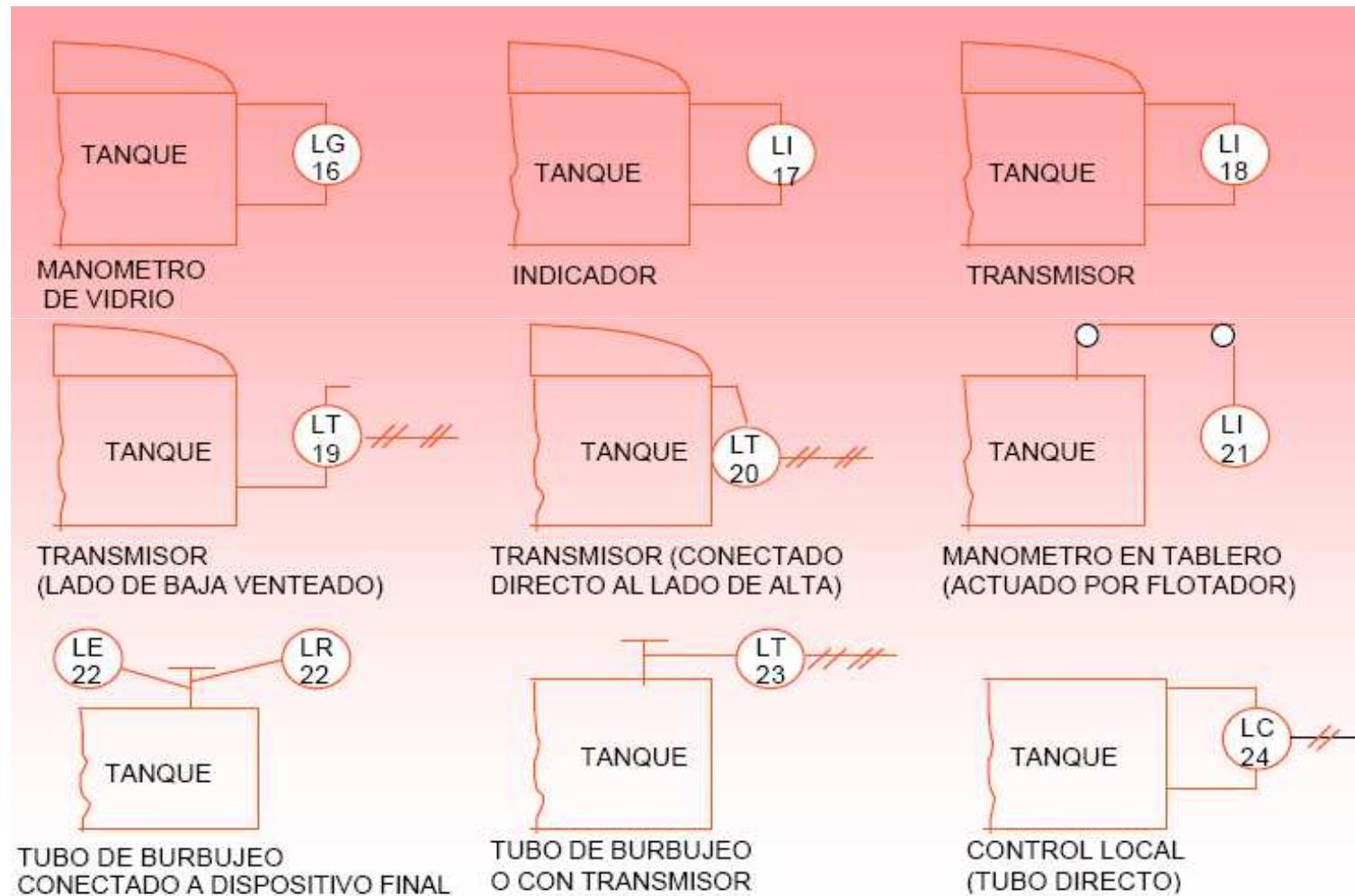
## DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

### Elementos Primarios para Control de Presión



**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

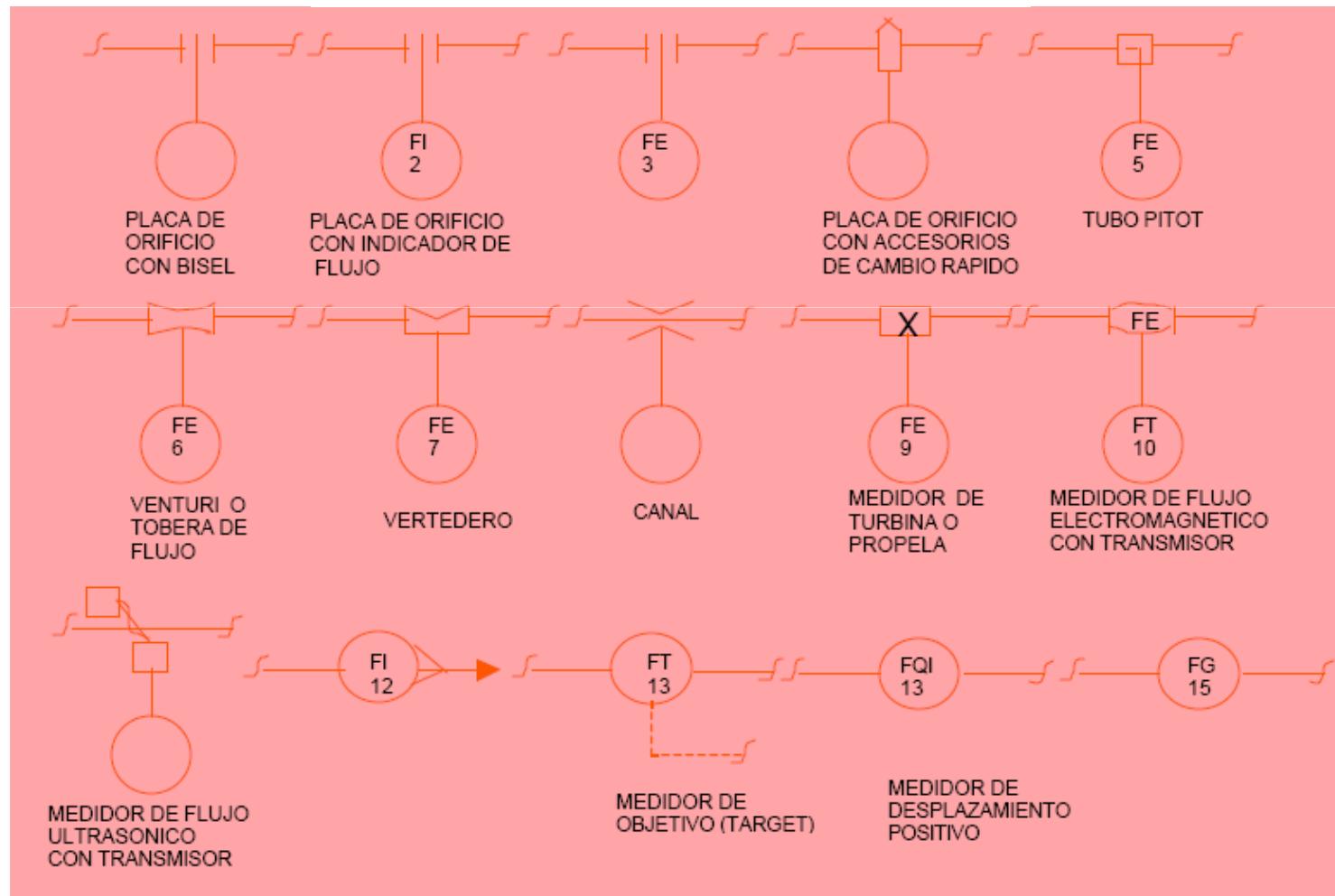
Elementos Primarios de Control de Nivel



# FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA

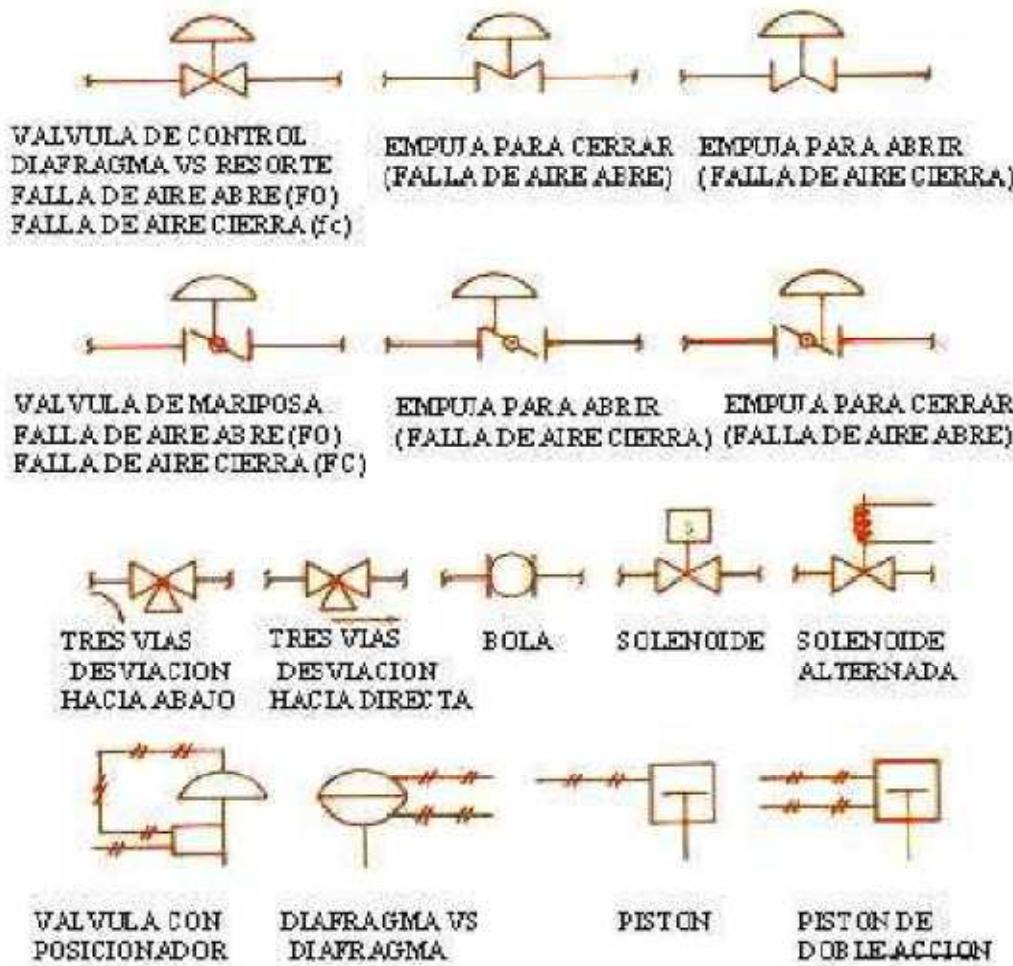
## DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

### Elementos Primarios para Control de Flujo



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Elementos Finales de Control



## SISTEMAS DE CONTROL AVANZADOS

### Control en cascada

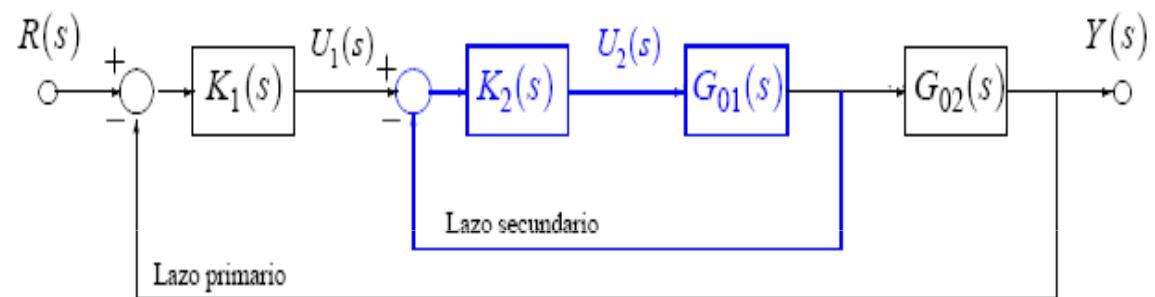
Control en el cual, la señal de salida de un controlador ingresa como valor deseado a otro controlador y su señal de salida, va directamente al elemento final de control.

- Es una estructura alternativa de control para rechazar perturbaciones parcialmente medibles.
- La idea básica es realimentar variables intermedias entre la perturbación y la salida.



## Estrategia del control en cascada

Estructura básica de un control en cascada:



Presenta básicamente dos lazos:

Lazo primario con un controlador primario  $K_1(s)$ .

Lazo secundario con un controlador secundario  $K_2(s)$ .

El control secundario se diseña para atenuar el efecto de la perturbación antes de que alcance a afectar significativamente la salida  $y(t)$ .

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Ejemplo: Control de temperatura en un reactor continuo.  
Aplicación de un lazo de control simple.**

Perturbaciones del sistema:

- Caudal producto
- Temperatura producto
- Composición producto
- Presión fluido refriг.
- Temperatura fluido refriг.

**Para cambios en  $T_c$  y  $P_c$ , el sistema responde lento debido al retardo en la transf. de energía.**

Diagrama P&ID

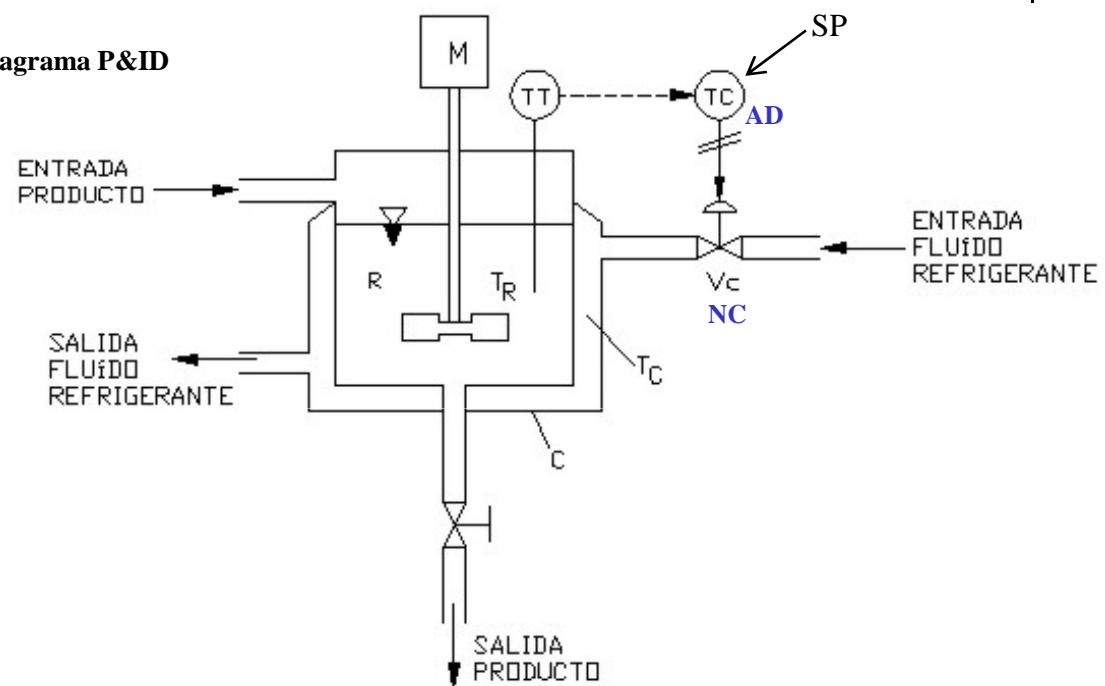
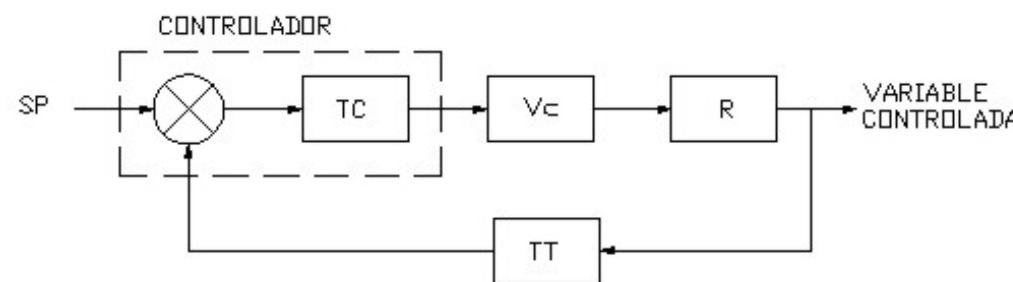


Diagrama de bloques



**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Ejemplo: Control de temperatura en un reactor continuo.**  
**Aplicación de un lazo de control en cascada Temp.-Temp.**

Este sistema mantiene cte  $T_c$ , evitando variaciones grandes en  $T_R$ . Pero p/variaciones de  $P_c$  el sistema pierde efectividad.

Diagrama P&ID

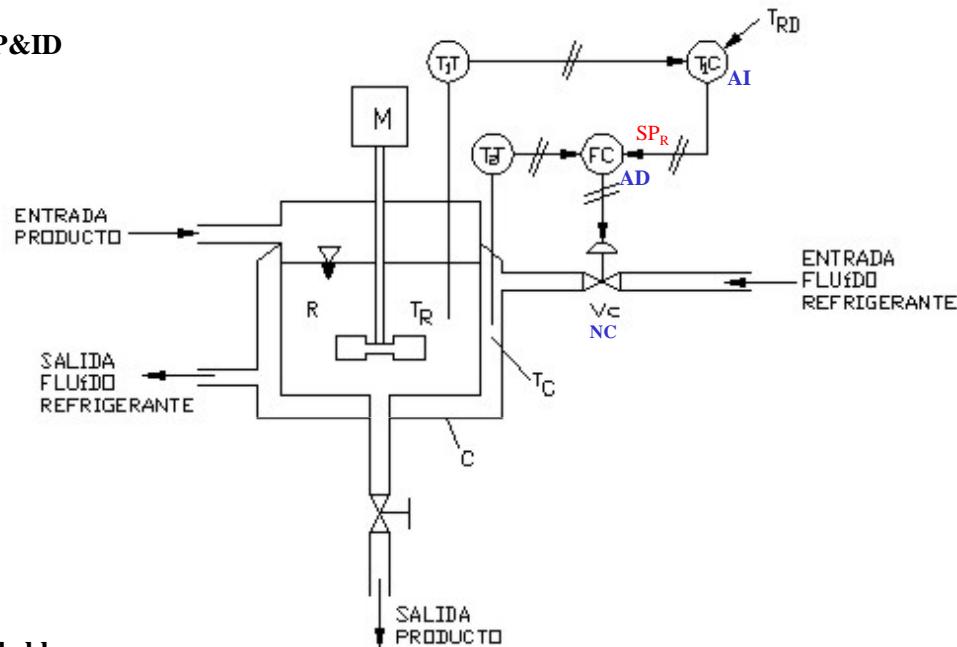
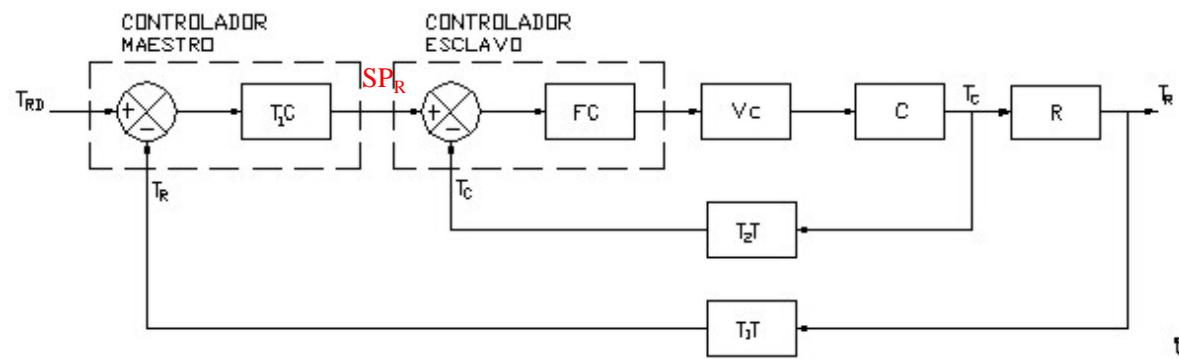


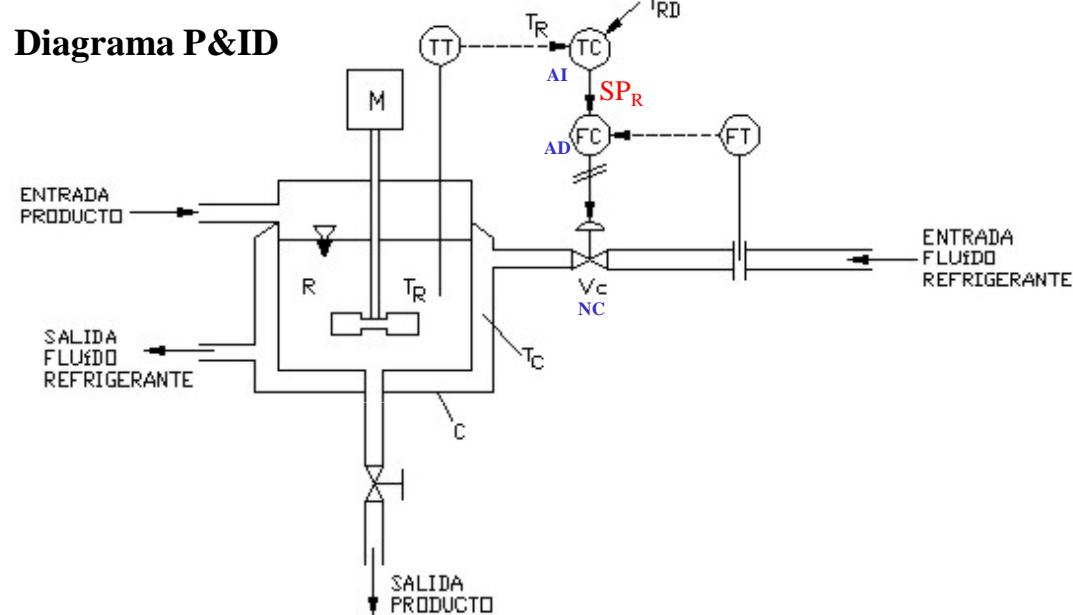
Diagrama de bloques



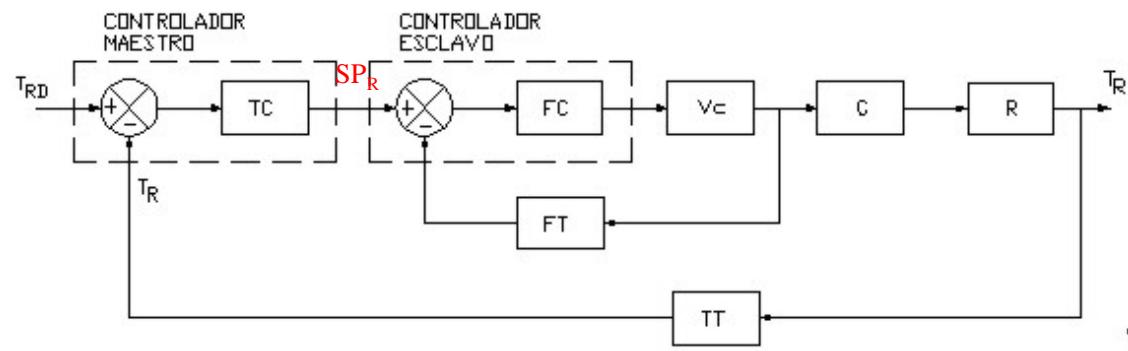
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Ejemplo: Control de temperatura en un reactor continuo.  
Aplicación de un lazo de control en cascada  
Temp.-Caudal.**

Este sistema tiene en cuenta las variaciones de  $P_c$ , pero no ayuda p/ variaciones de  $T_c$ .



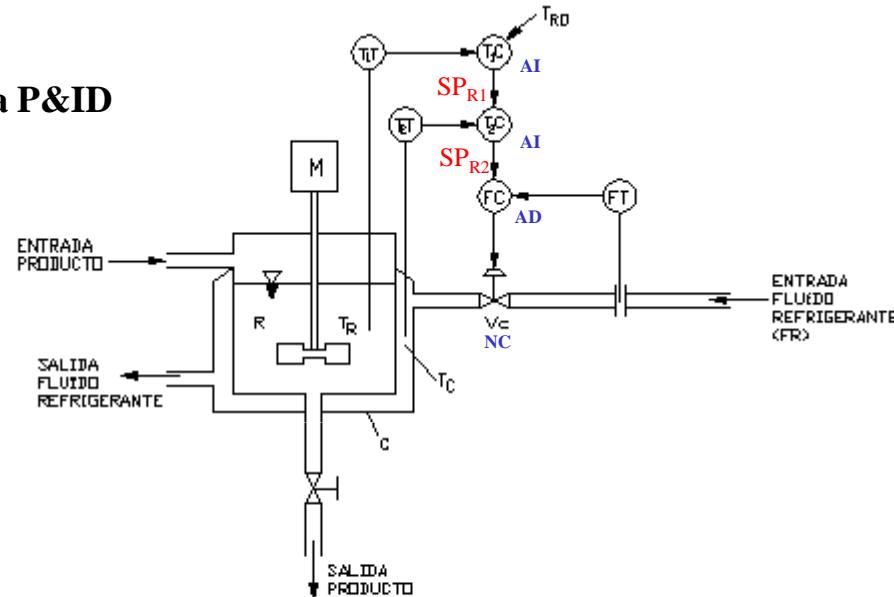
**Diagrama de bloques**



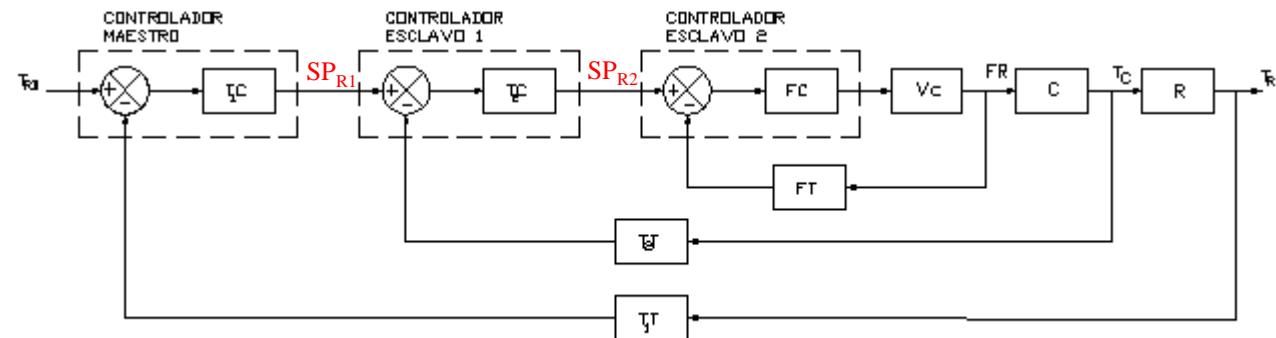
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Ejemplo: Control de temperatura en un reactor continuo.**  
**Aplicación de un lazo de control con doble cascada Temp.-Temp.-Caudal.**

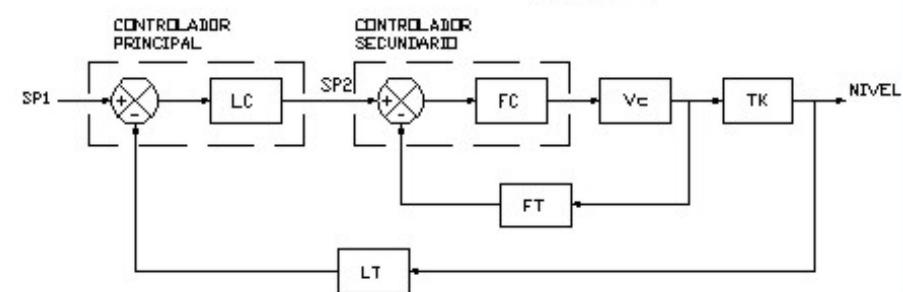
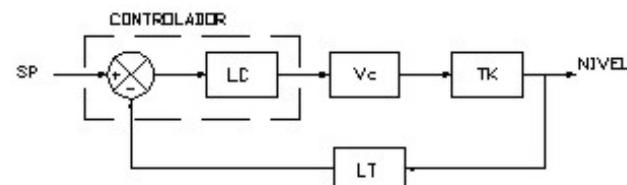
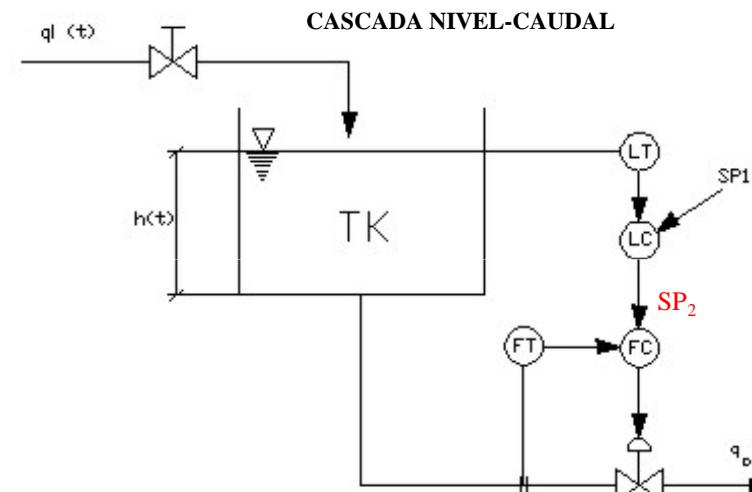
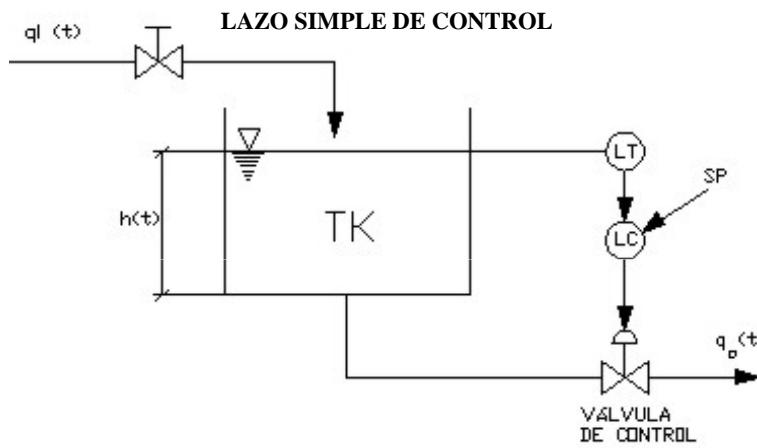
**Diagrama P&ID**



**Diagrama de bloques**



## Aplicación de un control de nivel en cascada.



## **Ventajas del control en cascada**

---

- Las perturbaciones del lazo secundario son corregidas antes que afecten la variable primaria.
- Los retrasos de fases en los procesos intermedios son disminuidos por el lazo secundario.
- Brindan ajustes precisos en la manipulación de fluidos másicos o energéticos.

## **Condiciones para su aplicación**

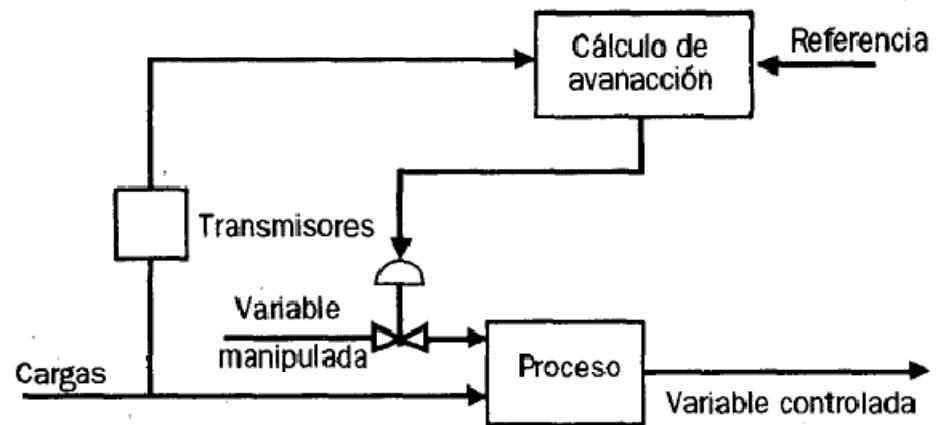
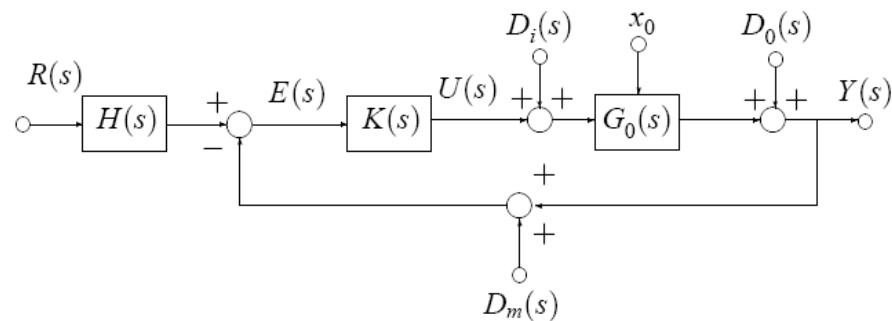
---

- Debe ser posible medir una variable intermedia de influencia sobre la variable controlada.
- La suma de los retardos de los elementos que integran el lazo secundario, debe ser menor a la suma de los elementos del lazo primario.

## Control en adelanto (Avanacción).

Control en el cual la información de una o más condiciones que puedan “perturbar” la variable controlada, son convertidas fuera de cualquier lazo de control, en una acción correctiva que se suma a la señal de salida del controlador para minimizar la desviación de dicha variable.

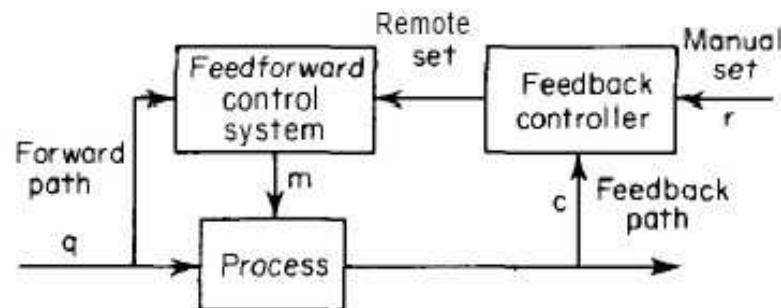
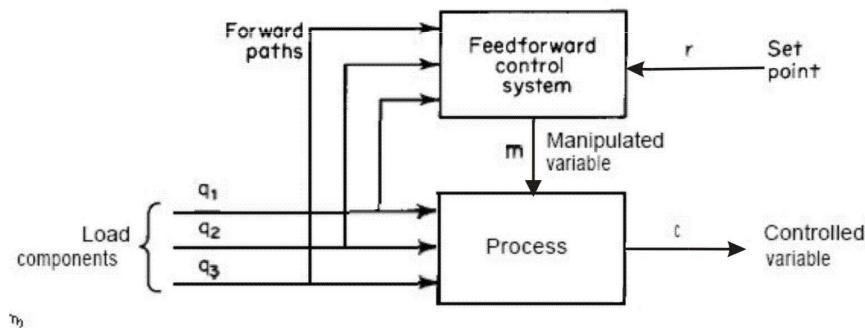
### Estructura básica de un control en avanacción:



## Característica de la Avanacción

La Avanación no altera la estabilidad de un sistema, ya que es un lazo de “control abierto adelantado”. No forma parte de ningún lazo retroalimentado quién determina las características de estabilidad del conjunto.

Inyección de señales perturbadoras medibles en el lazo del proceso.



Estructura del control feedforward en relación al control feedback:

## Ejemplo: Control de temperatura en un intercambiador de calor

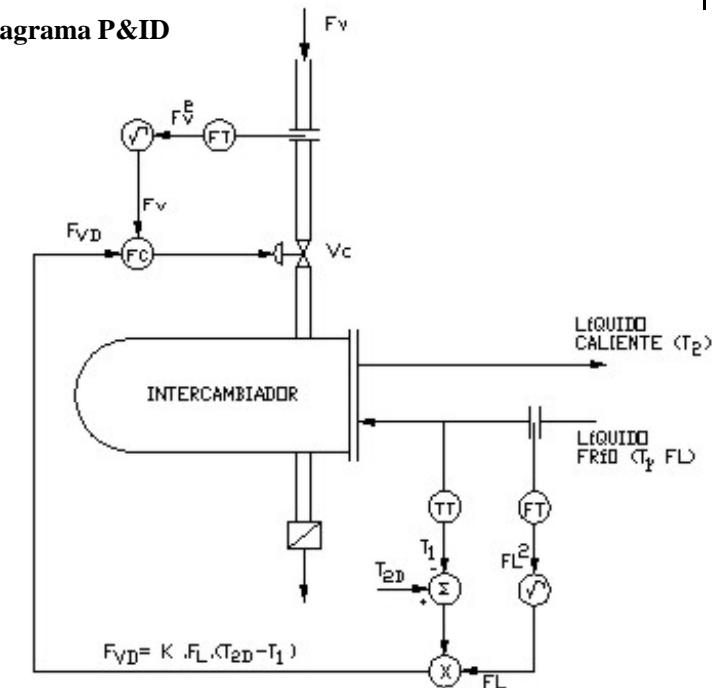
## **Variables características del sistema:**

- Variable controlada: Temperatura  $T_2$
  - Variable manipulada: Caudal vapor  $F_V$
  - Perturbaciones: Temperatura  $T_1$   
Caudal líquido  $F_L$

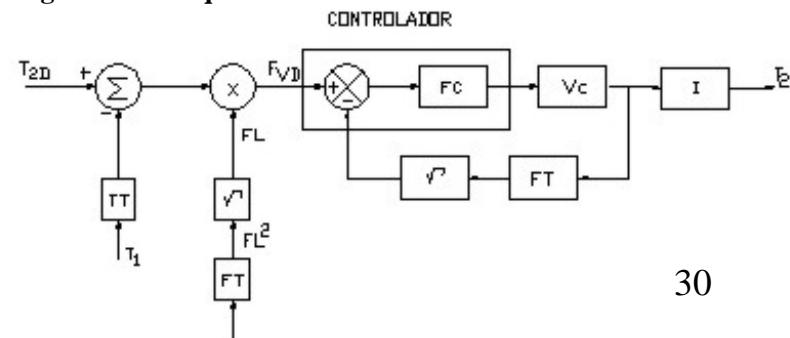
## **Defectos del sistema implementado:**

- Errores de exactitud en los cálculos.
  - Velocidad de compensación dinámicamente no ajustada.

Diagrama P&ID



## Diagrama de bloques



## Ejemplo: Control de temperatura en un intercambiador (mejorado).

- La velocidad de compensación se ajusta con la inclusión de relés dinámicos.
- Los errores de exactitud se eliminan con la introducción de realimentación negativa.

Diagrama P&ID

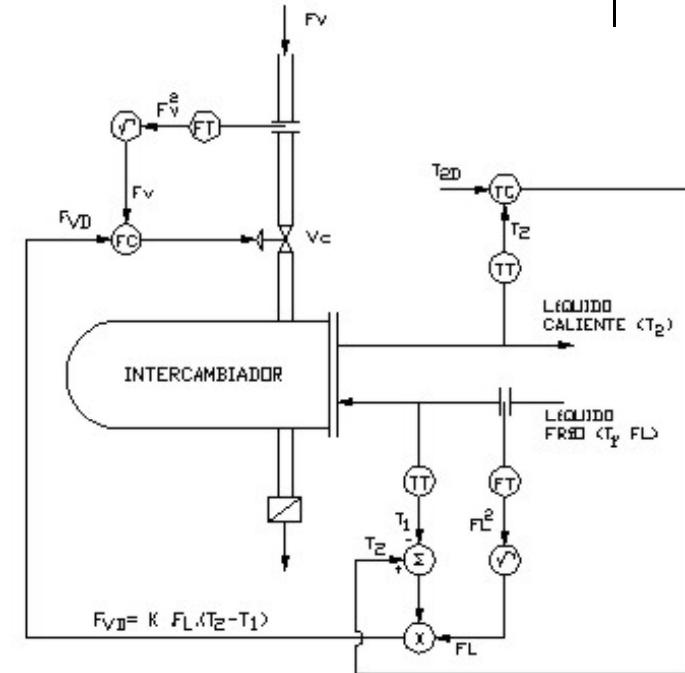
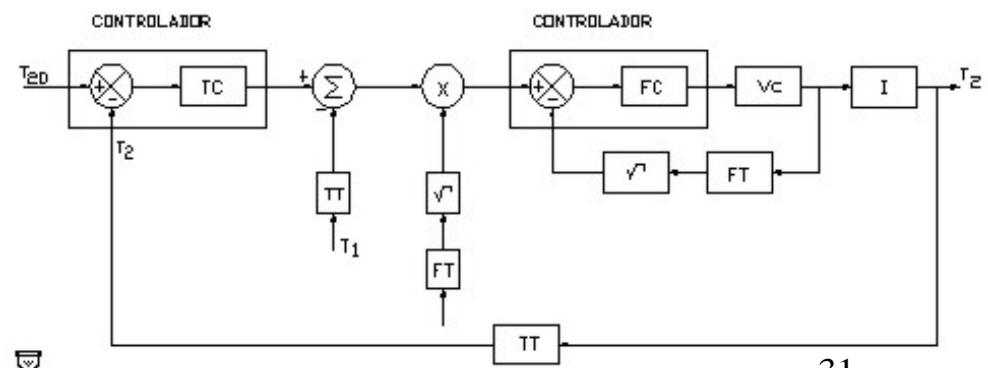


Diagrama de bloques



## Ventajas del control en Avanacción

- Reducción del efecto de las perturbaciones sobre la variable controlada.
- Mejora en la respuesta de sistemas que poseen retardos importantes.
- Posibilidad de agregarse a un lazo de control por realimentación.

## Condiciones para su aplicación

- Debe ser posible medir las variables perturbadoras del sistema.
- Debe poder introducirse realimentación negativa para asegurar una variable controlada constante.



## Conclusión

---

- Con el **control en realimentación** se asegura la **estabilidad interna** del lazo y el **desempeño robusto en régimen permanente**.
- Con el **control FeedForward**, se pueden hacer «**retoques finos**» al diseño para mejorar la **respuesta transitoria** del sistema.

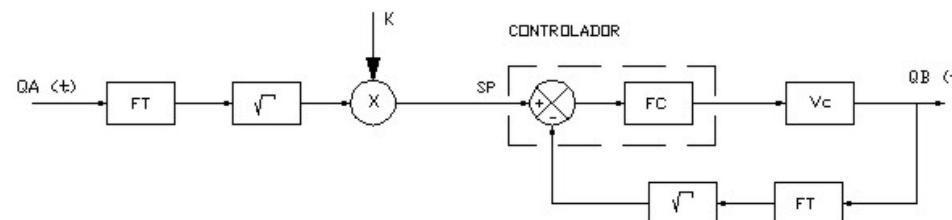
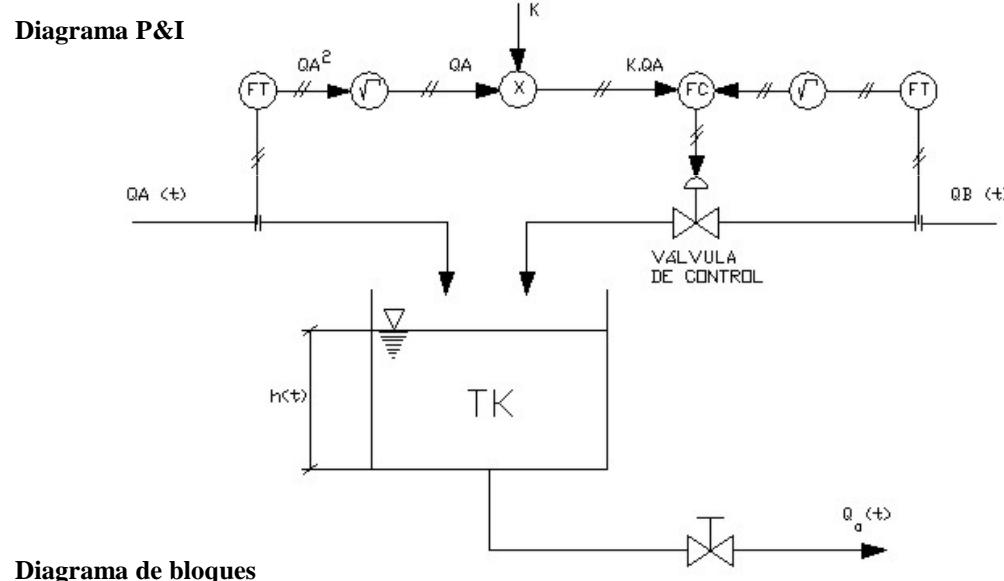


33

# Control de Relación

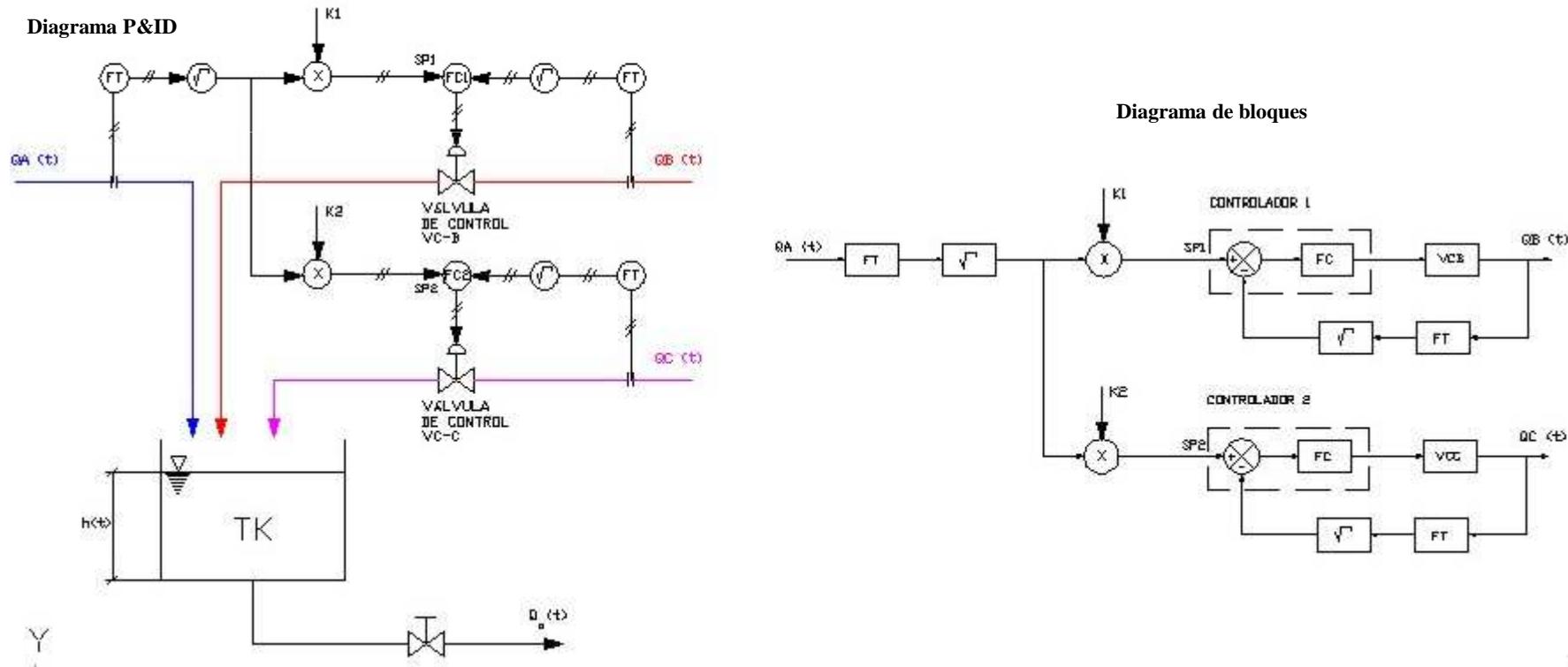
**Control en el cual, permite mantener una relación fija entre dos o más variables.**

- Se utiliza en procesos continuos de mezcla de flujos en los que se requiere mantener una cierta relación entre ellos.
- Requiere de cálculos aritméticos.
- Su implementación depende del proceso y del dispositivo de control.



# Control de Relación Multiblending

Este control permite mezclar más de dos corrientes con distintas relaciones.



# Control de Restricción

Este control permite restringir o relevar acciones de control en operaciones particulares.

