Ciclo de Formación de Grado Superior

Química Industrial

Módulo 0190: Regulación y Control de Proceso Químico

Lazo de control – Simbología – Control PID – Control Avanzado

Profesor prácticas de control avanzado: Ignacio Peñarrocha Alós (UJI)

Organización del módulo

- Módulo 0190: Regulación y control de proceso químico
- Duración 220 h anuales. 11 h/semana
- Prácticas propuestas fuera del centro
  - Control de tanques interactivos
  - Control de un bloque calefactor
  - Control de un tanque calefactado
  - Software de simulación de control de procesos
- Sesiones control avanzado: 3 sesiones de 6 horas.

¿Qué veremos en estas 3 sesiones?

- Conceptos teóricos
  - Control básico regulatorio (relé y PID)
  - Control avanzado (estructuras de control)

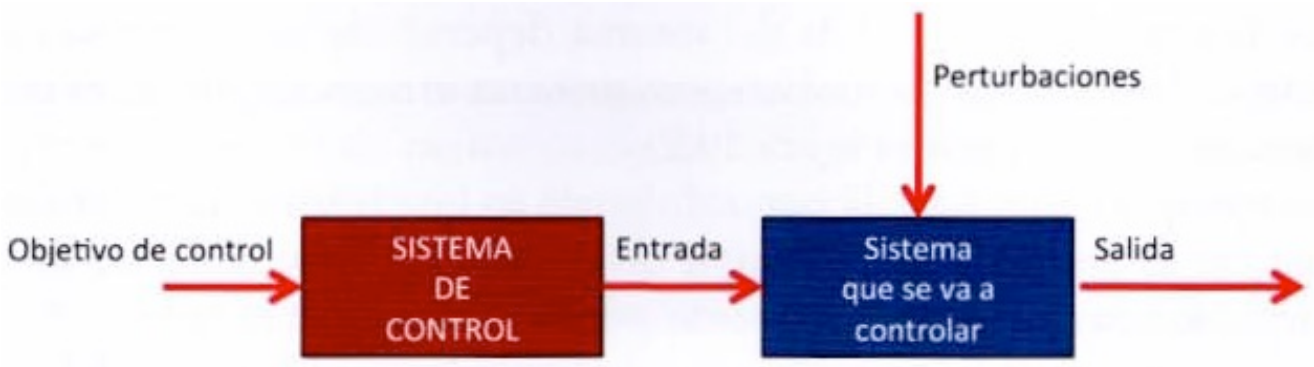
- Conceptos prácticos
  - Software para el control de procesos (Codesys)
  - Lectura de sensores y Escritura sobre actuadores
  - Registrar y monitorizar señales
  - Implementación de algoritmos de control (relé, PID, control avanzado)
  - Maquetas de procesos diversos

1. Lazo de control

- ¿Qué es un lazo de control?
- Sistema de control de lazo abierto vs. lazo cerrado
- Ventajas del control en lazo cerrado
- Desventajas del control en lazo abierto
- Operaciones que realiza un lazo de control
- Variables: entrada, salida y perturbaciones
- Partes de un lazo de control
- Diagramas de bloques

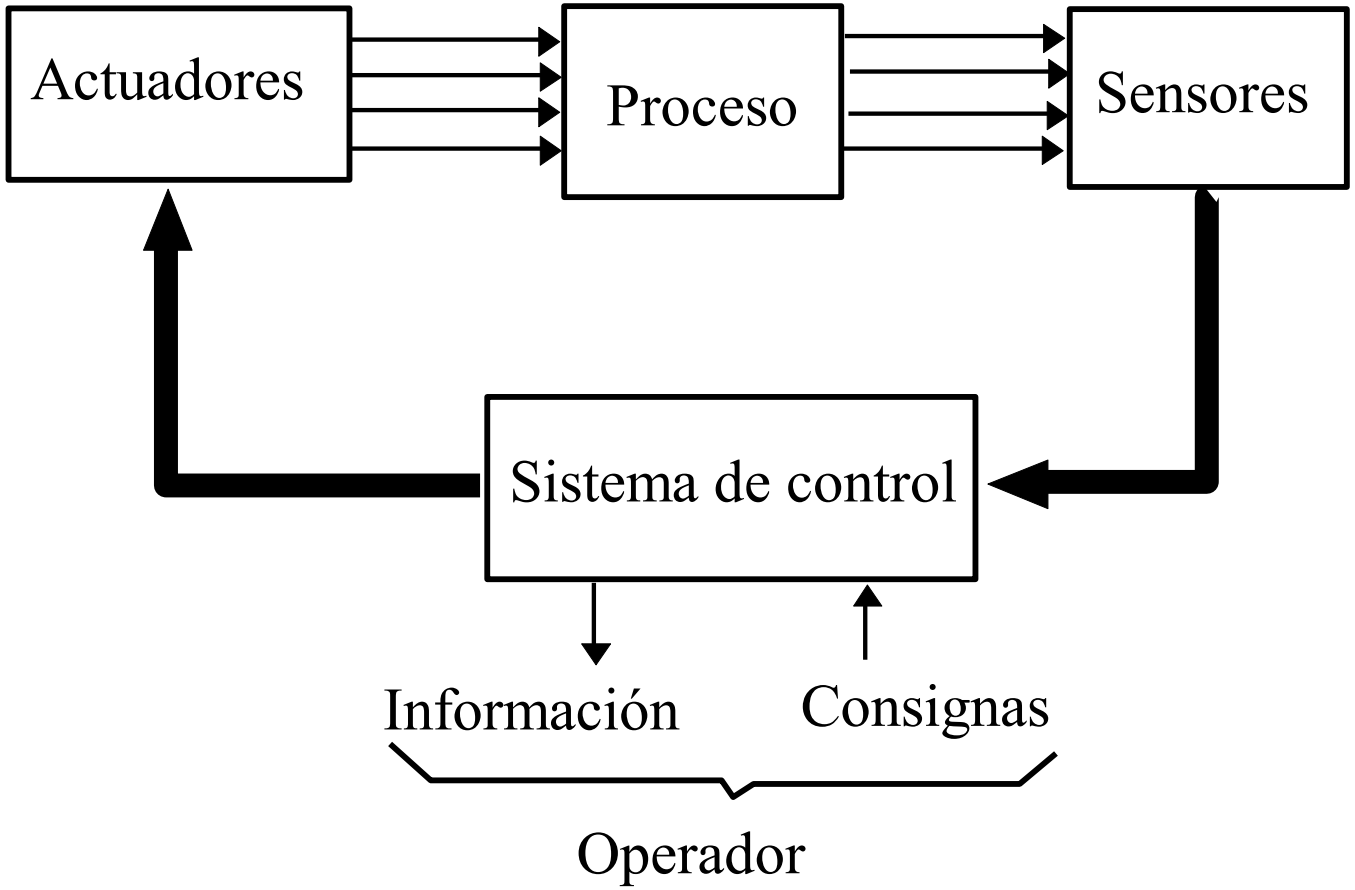
1. Lazo de control

- Sistema de control: conjunto de dispositivos que trabajan juntos para lograr un objetivo de control.
- Tareas del sistema de control
  - Medir (sensores, variable de salida a controlar)
  - Decidir: a partir de comparar el objetivo de control y la medición
  - Actuar sobre el sistema



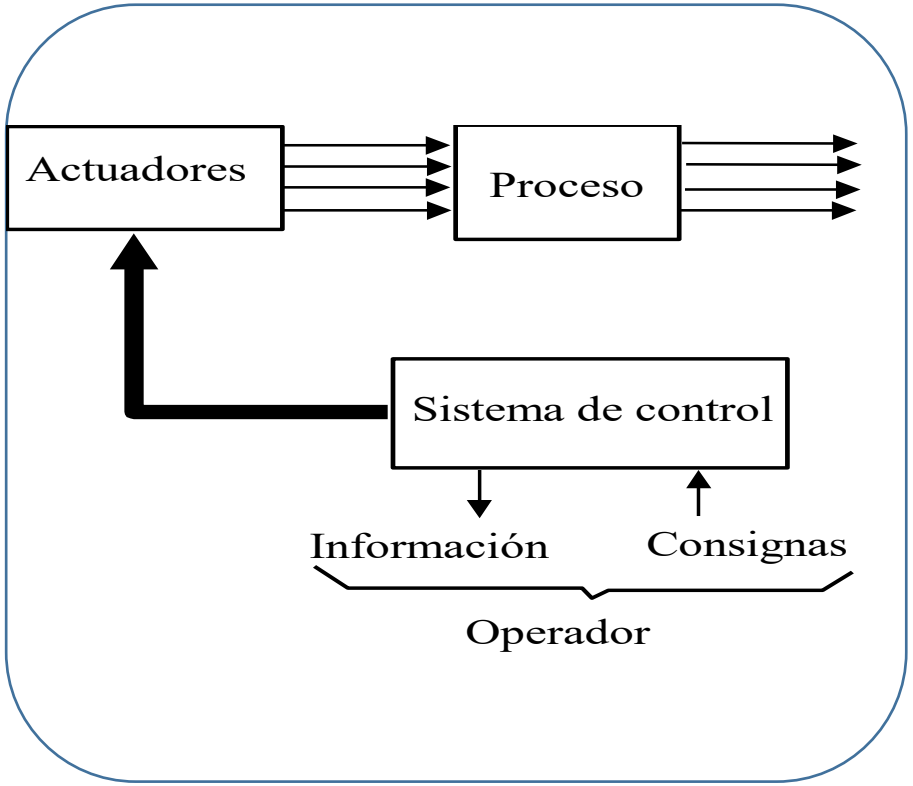
1.1. Sistema de control

- Medir
- Decidir
- Actuar
- Interacción humana
  - Consignas
  - Información

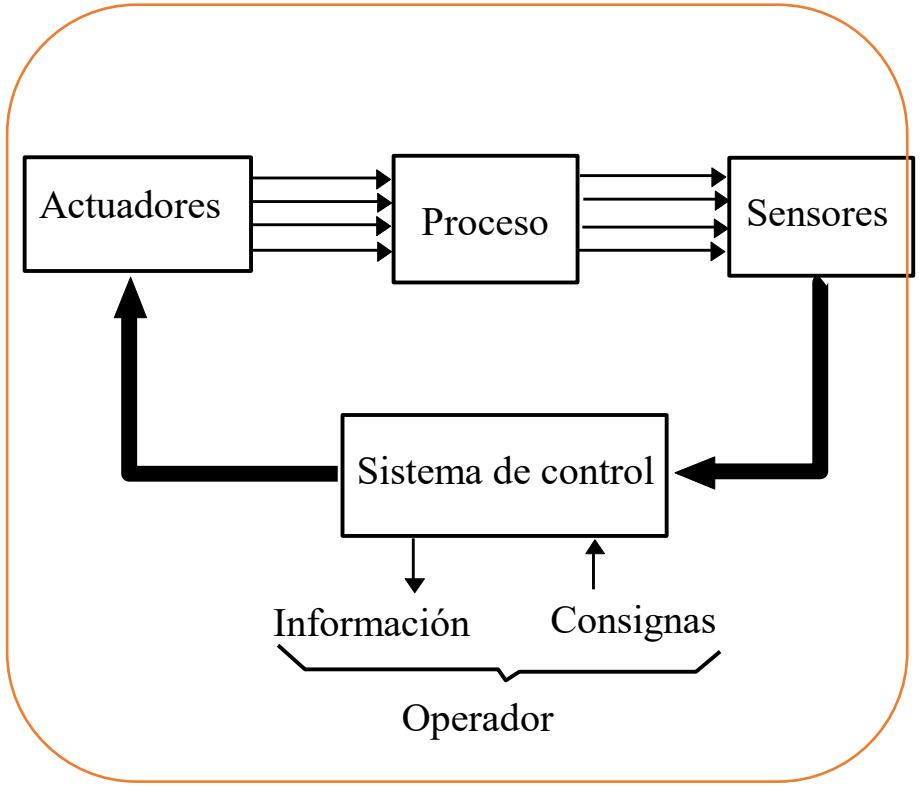


1.2 Tipos de lazos

Control en bucle abierto

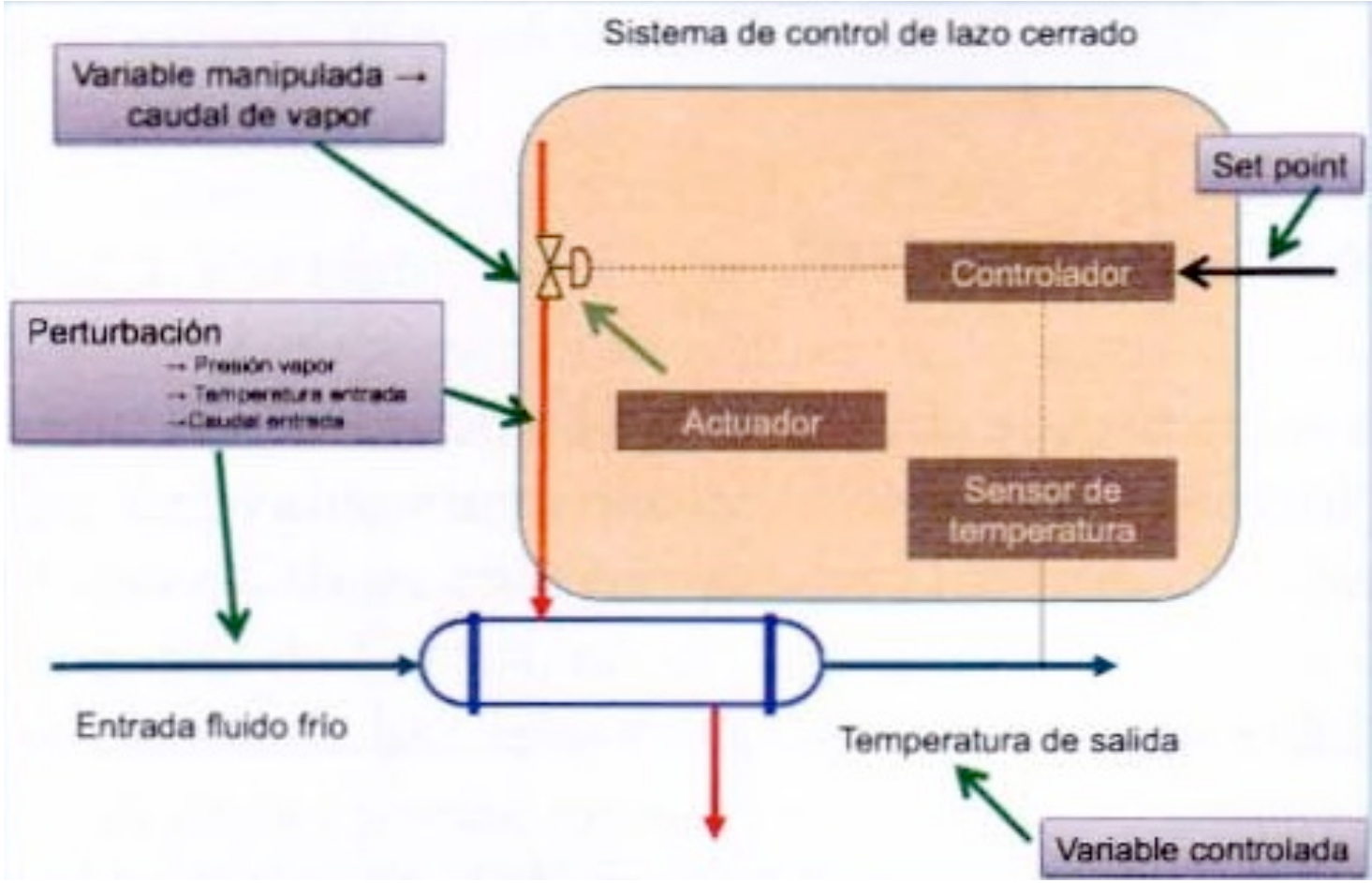


Control en bucle cerrado



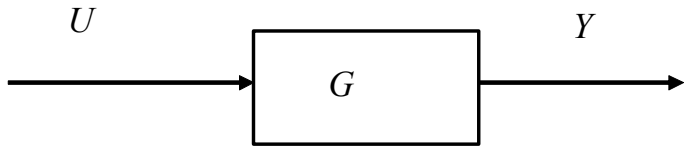
1.3. Elementos y variables del lazo de control

- Elementos:
  - Sensor
  - Controlador
  - Elemento final (actuador)
- Variables:
  - CV (Variable Controlada),
    PV (Variable de Proceso)
  - Y, MV (Variable manipulada)
    CO (Controlled Output)
  - W, SP (SetPoint, consigna)
  - Error: ESP-PV
  - Z, DV (perturbación)

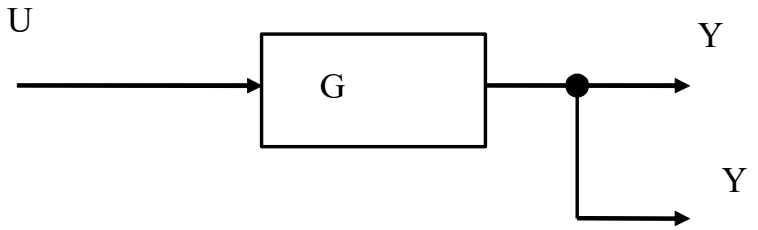


1.4. Diagramas de bloques

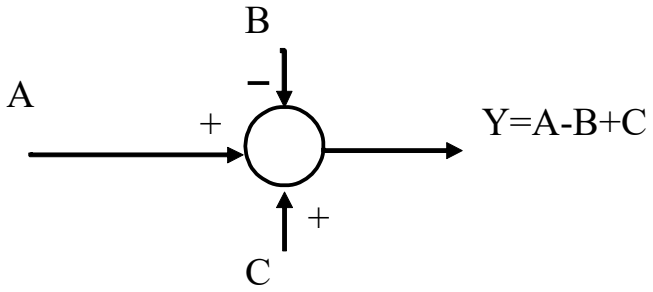
- Explican la relación entre las variables de un sistema
- Bloque: Y=f(U)



- Nodo de bifurcación

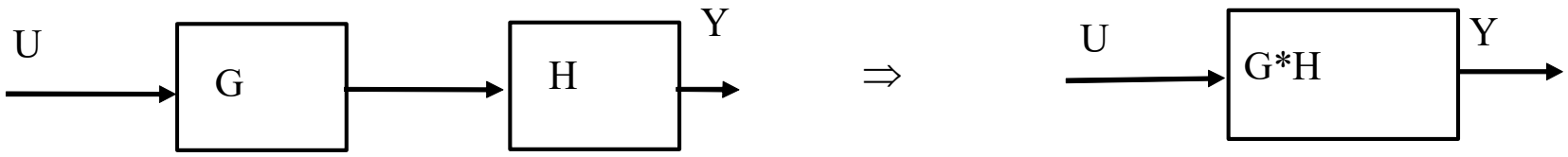


- Nodo sumador

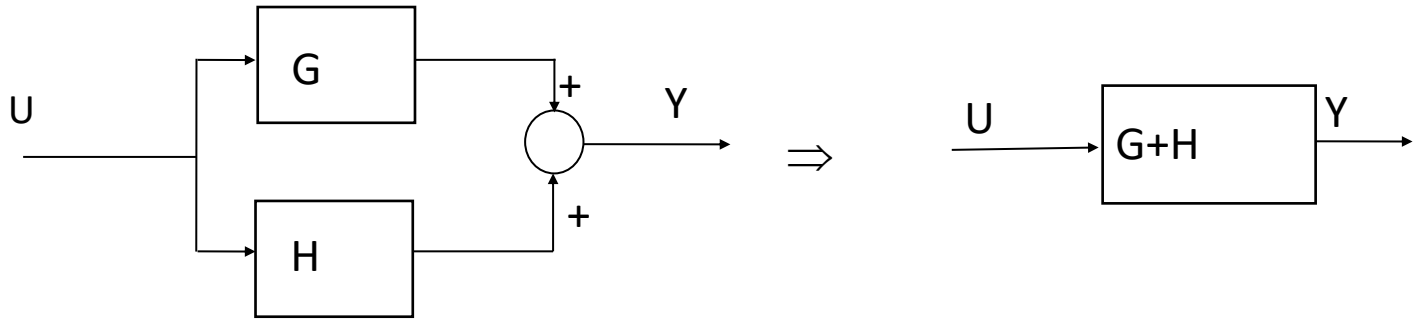


1.4. Diagramas de bloques

- Bloques en cascada (serie)



- Bloques en paralelo

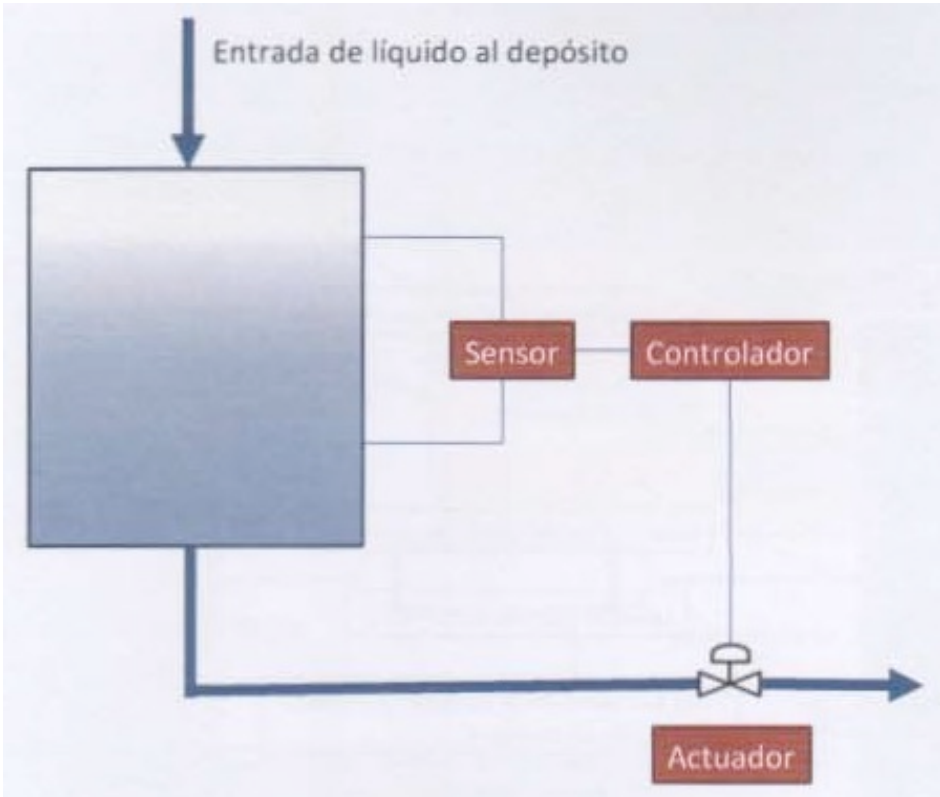


1.5. Controlador

- Control centralizado monolazo
- Control centralizado multilazo
- Control distribuido multilazo

Se puede implementar en

- PID industrial (campo)
- PLC
- Sistema de control distribuido



1.6. Registrador

- En sistemas de control distribuido
- Monitorización
- Traza de datos

- Permite visualizar el comportamiento del sistema de control (PV)
- Permite modificar consignas (SP)
- Permite experimentar con el proceso para ajustar controladores

2. Simbología de instrumentación

- Identificar elementos de un lazo de control
- Símbolos de instrumentación
- Actuadores existentes
- Identificar el sistema de control mediante plano P&ID

2.1. Letras de identificación

	Letras de identificación				
	1.ª Letra	2.ª Letra	3.ª Letra y letras sucesivas		
	Variable	Suplementaria	Función pasiva	Función salida	Suplementaria
A	Análisis		Alarma		
C	Conductividad			Control	
D	Densidad	Diferencial			
E	Tensión		Elemento primario		
F	Caudal	Relación			
G			Mirilla de cristal		
H	Manual				Alto
I	Intensidad		Indicador		
L	Nivel				Bajo
M	Definido por el usuario				Medio
O	Definido por el usuario		Orificio, restricción		

2.1. Letras de identificación

Letras de identificación					
	1.ª Letra	2.ª Letra	3.ª Letra y letras sucesivas		
	Variable	Suplementaria	Función pasiva	Función salida	Suplementaria
P	Presión				
R	Radioactividad		Registro		
S	Velocidad, frecuencia	Seguridad		Interruptor (*Switch*)	
T	Temperatura			Transmisor	
V	Viscosidad			Válvula	
W	Peso		Funda protectora		
Y	Posición	Eje Y		Cálculo	
Z	Posición	Eje Z			

2.2. Ejemplos

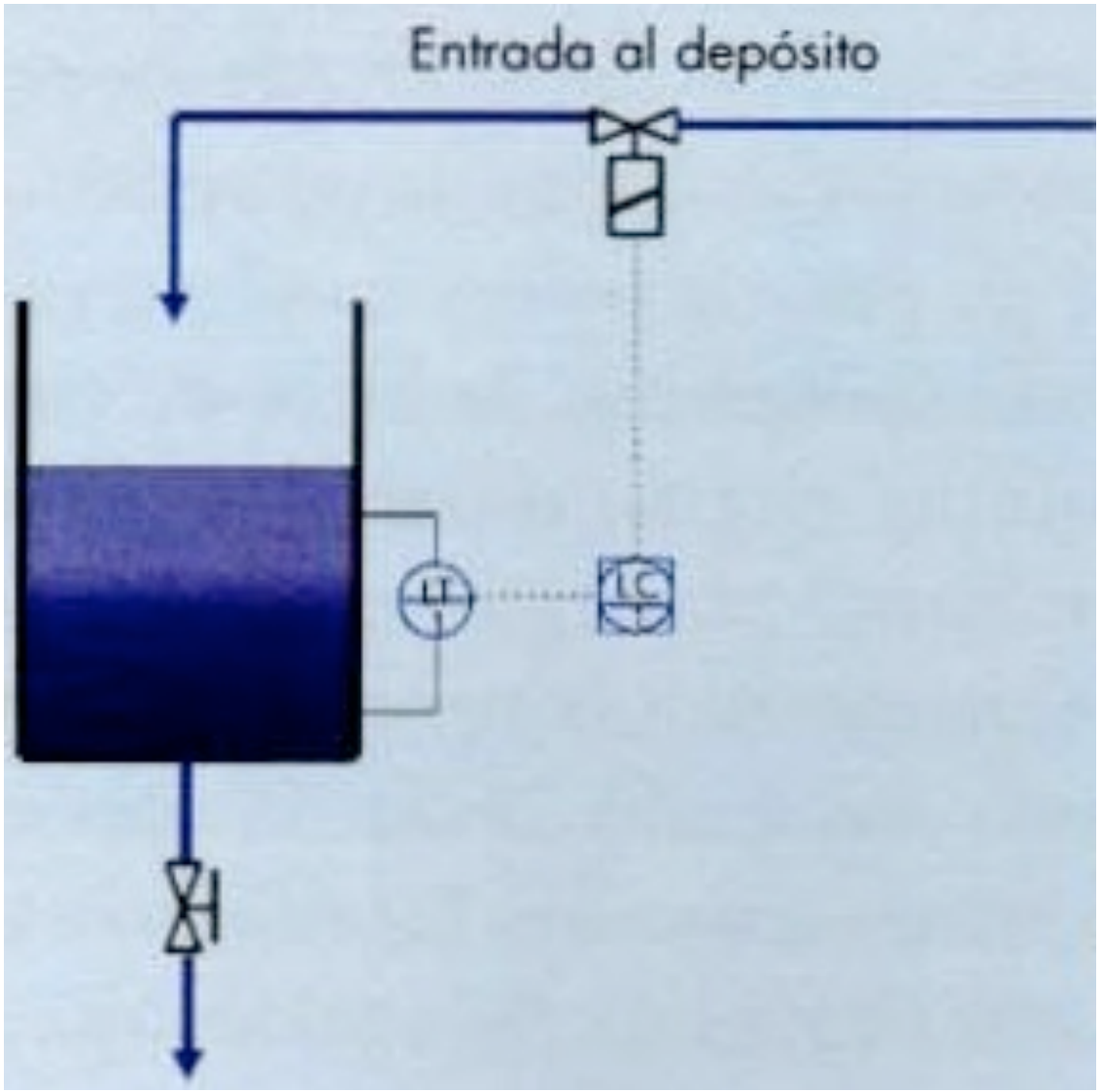
Código	Significado
FT	• F: Caudal • T: Transmisor Transmisor de caudal
LIC	• L: Nivel • I: Indicador. • C: Controlador Controlador con indicador de nivel
LAH	• L: Nivel • A: Alarma • H: Alto Alarma de alto nivel
TSHH	• T: Temperatura • S: Seguridad • H: alto • H: alto Disparo de seguridad por alta temperatura
FE	• F: caudal • Elemento primario Elemento primario de caudal
LG	• L: Nivel • G: Mirilla de cristal Indicador de nivel de vidrio visual
SR	• S: Velocidad • R: Registro Registro de velocidad
PCV	• P: Presión • C: Controlador • V: válvula Válvula controladora de presión
FX	• F: caudal • X: cálculo Función de cálculo de caudal (por ejemplo, la raíz cuadrada de la señal proporcionada por una placa orificio)
FF	• F: Caudal • F: relación Relación de caudal
HS	• H: Manual • S: interruptor Interruptor manual
EV	• E: Tensión • V: Válvula Electroválvula
PDCV	• P:Presión • D: Diferencial • C: Controlador • V: Válvula Válvula de control de la presión diferencial
AC	• A: Análisis • C: Controlador Controlador de una variable medida mediante un análisis. Por ejemplo, la conductividad, medida por un conductímetro en línea, del agua utilizada para alimentar las calderas.

2.3. Símbolos de instrumentos

Símbolo	Descripción
	Instrumento montado en campo al lado de los sensores.
	Instrumento montado en la sala de control y accesible al operador.
	Instrumento montado en la sala de control e inaccesible al operador.
	Instrumento instalado en un panel auxiliar local (panel situado al lado del equipo que controla o acciona).
	Instrumento visualizado en un sistema de control distribuido accesible al operador.
	Función de ordenador accesible al operador.
	Función de ordenador montado en campo.
	Función de autómata programable (PLC) accesible al operador.
	Función de autómata programable montada en campo.
I	*Interlock*. Función que activa una secuencia en caso de cumplirse unas determinadas condiciones en el sistema.

2.4. Ejemplo

- LT: Sensor de nivel
- LC: Controlador de nivel
- Válvula

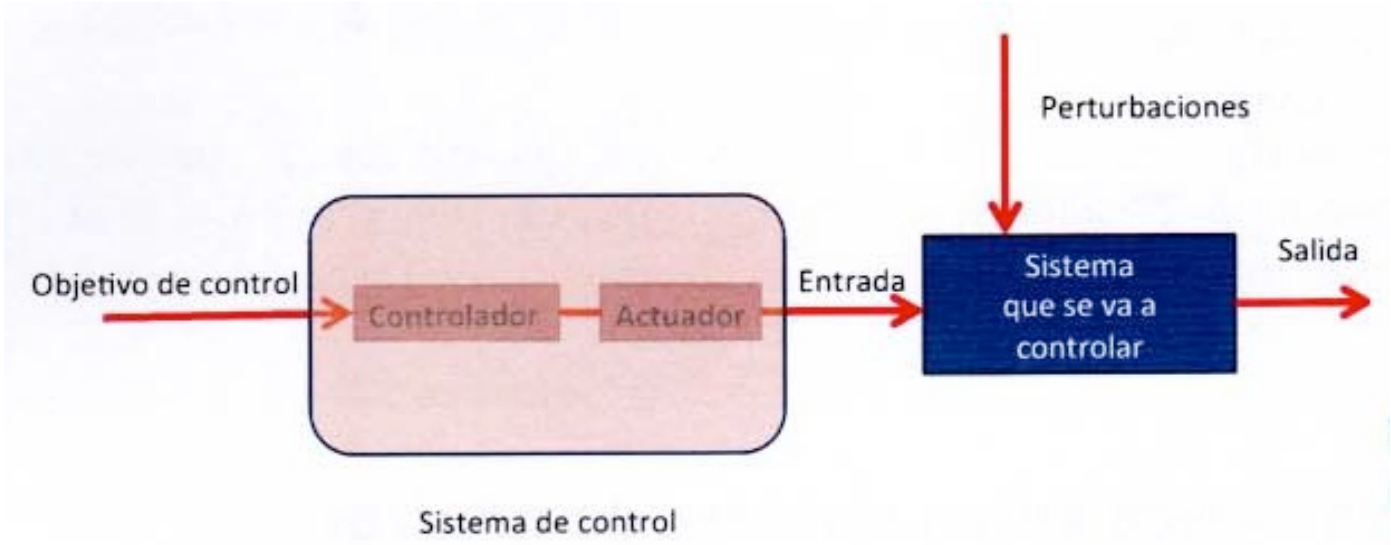


3. Control PID

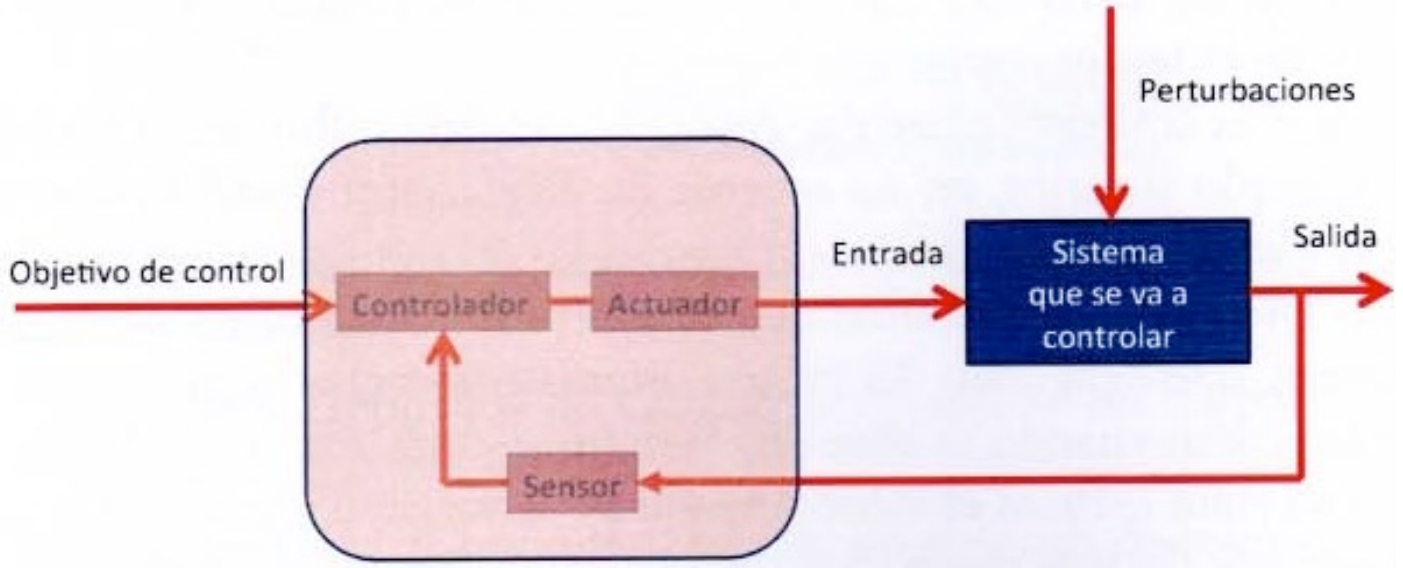
- Conocer los diferentes tipos de control
- Ventajas y desventajas del control todo nada
- Ventajas y desventajas del control PID
- Error estacionario

3.1. Controladores

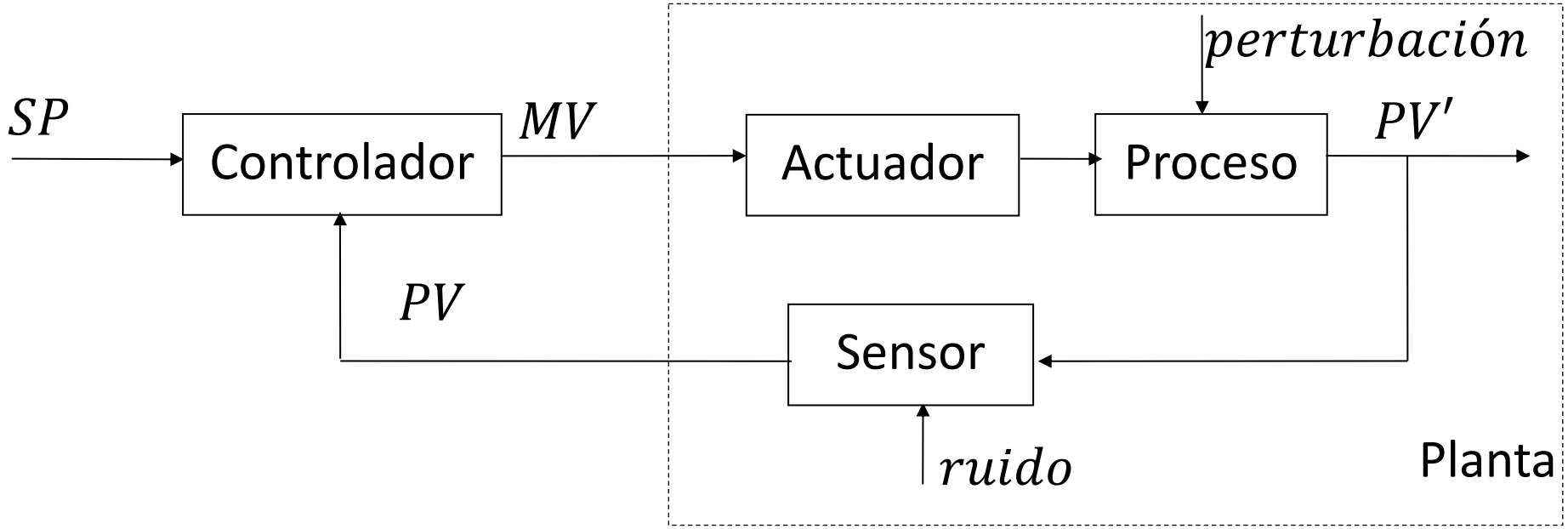
- Control en bucle abierto
  - Control manual



- Control en bucle cerrado (automático)
  - Control tipo relé
  - Control PID
  - Control avanzado



3.2. Sistema realimentado

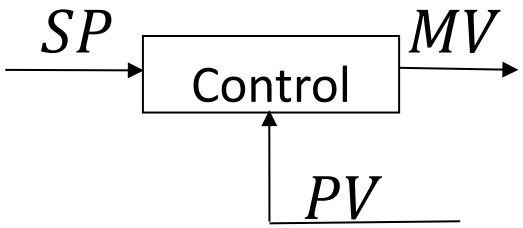


SP: Referencia

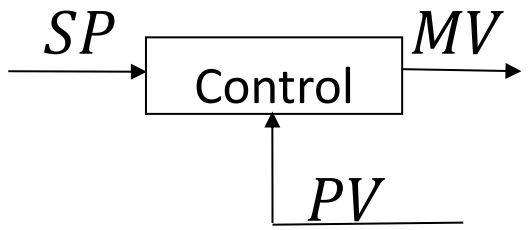
PV: Salida medida

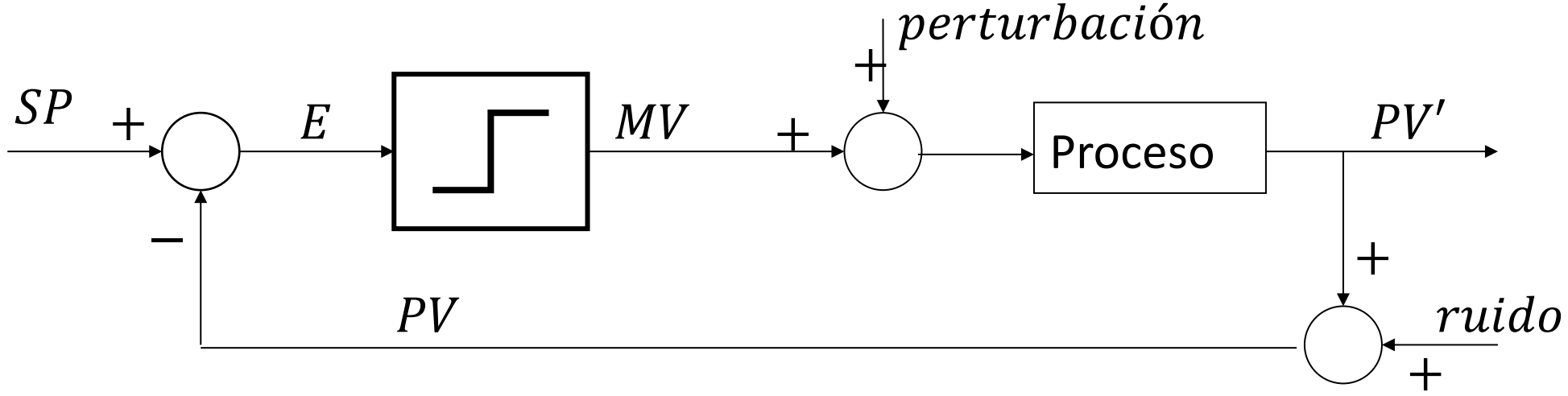
MV: Acción de control

PV': Salida del proceso


SP
Control
MV
PV

3.3. Control todo-nada (relé)





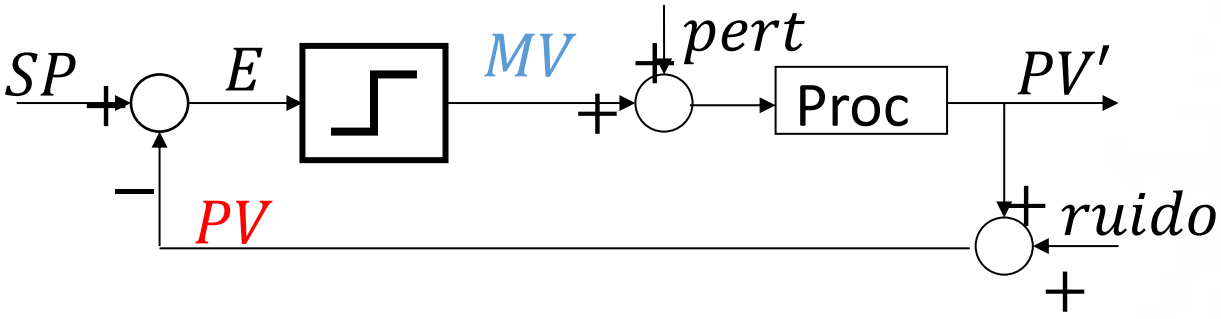
- Actuador encendido o apagado
- Función relé

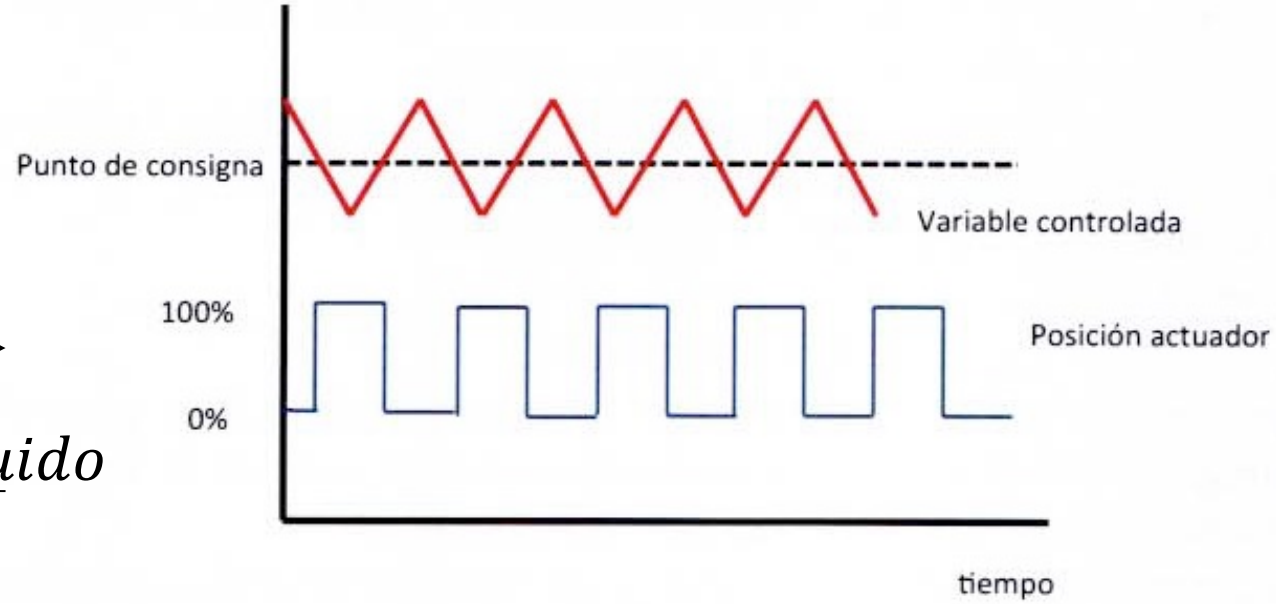
```
IF (PV<SP) THEN
    MV := ValorMax;
    ELSE
    MV := Valormin;
END_IF
```

Relé con histéresis

```
IF (PV<SP-histeresis) THEN
    MV := ValorMax;
END_IF
IF (PV>SP+histeresis) THEN
    MV := Valormin;
END_IF
```

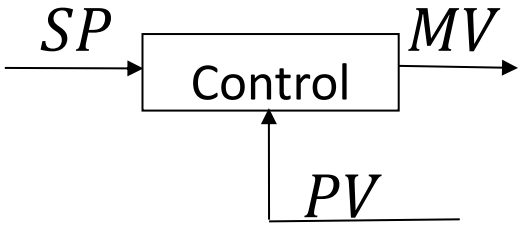
3.3. Control tipo relé



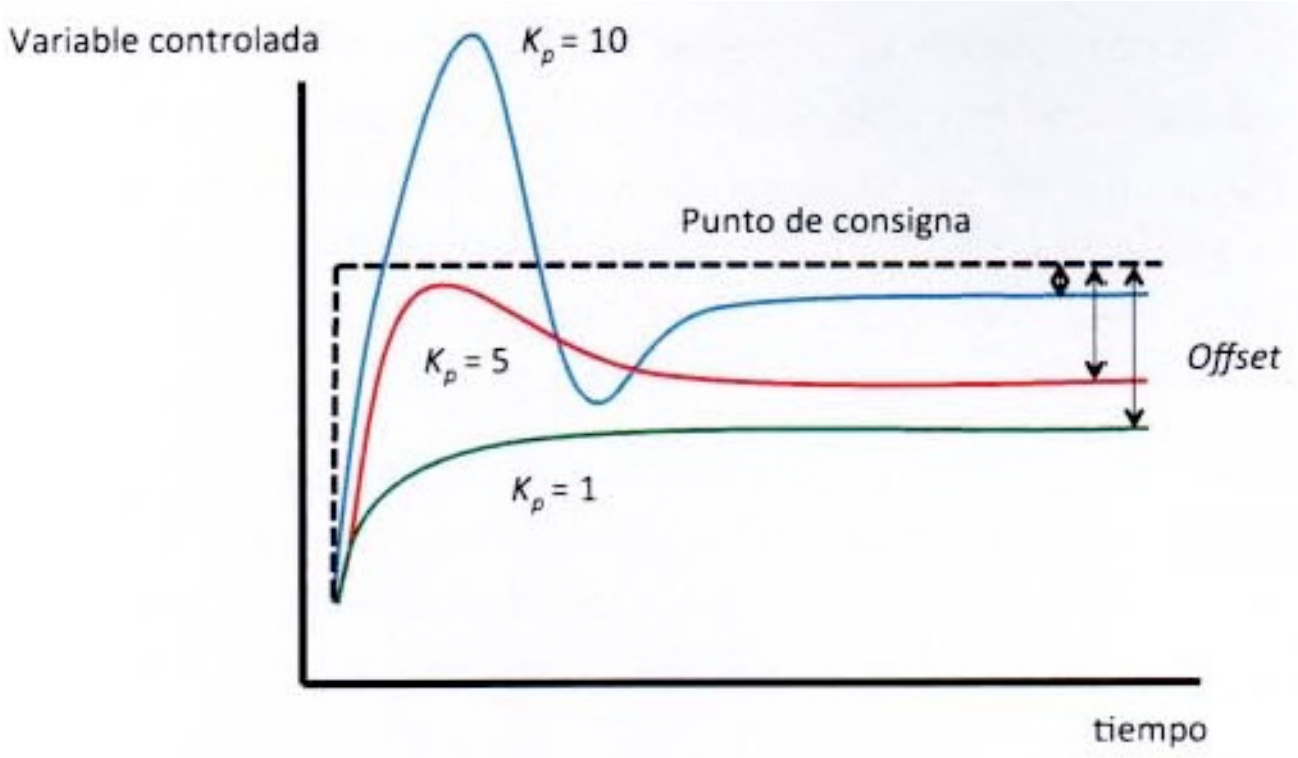


Ventajas	Desventajas
El controlador es económico debido a la sencillez del algoritmo matemático.	Oscilaciones continuas
Las válvulas solenoides son más económicas que las válvulas de control	Desgaste de los actuadores
Fiable	
Fácil de instalar y ajustar	

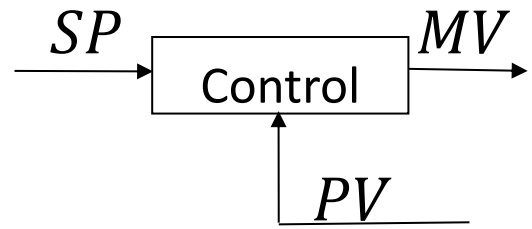
3.4. Control P



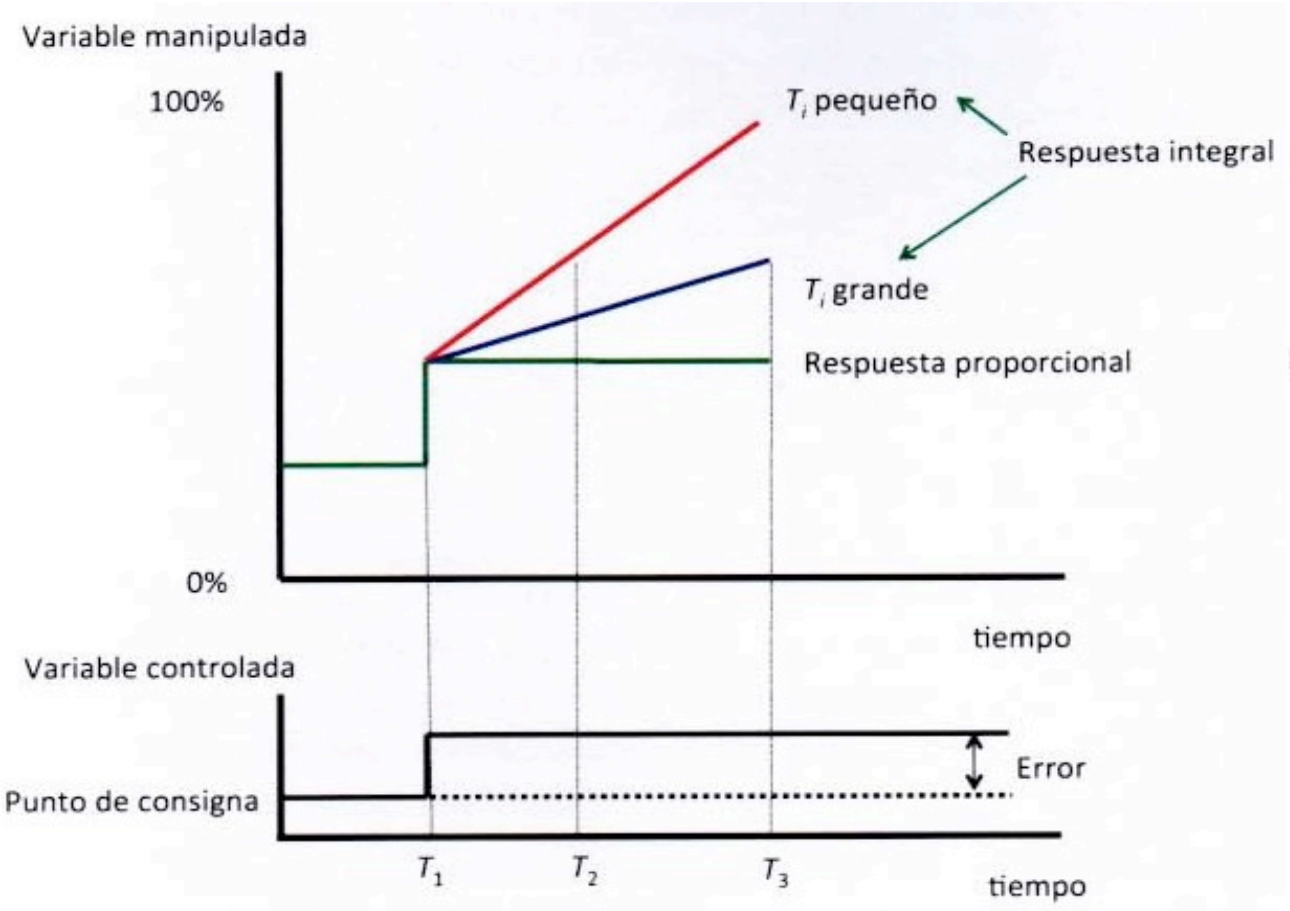
- $MV = K_p(SP - PV)$

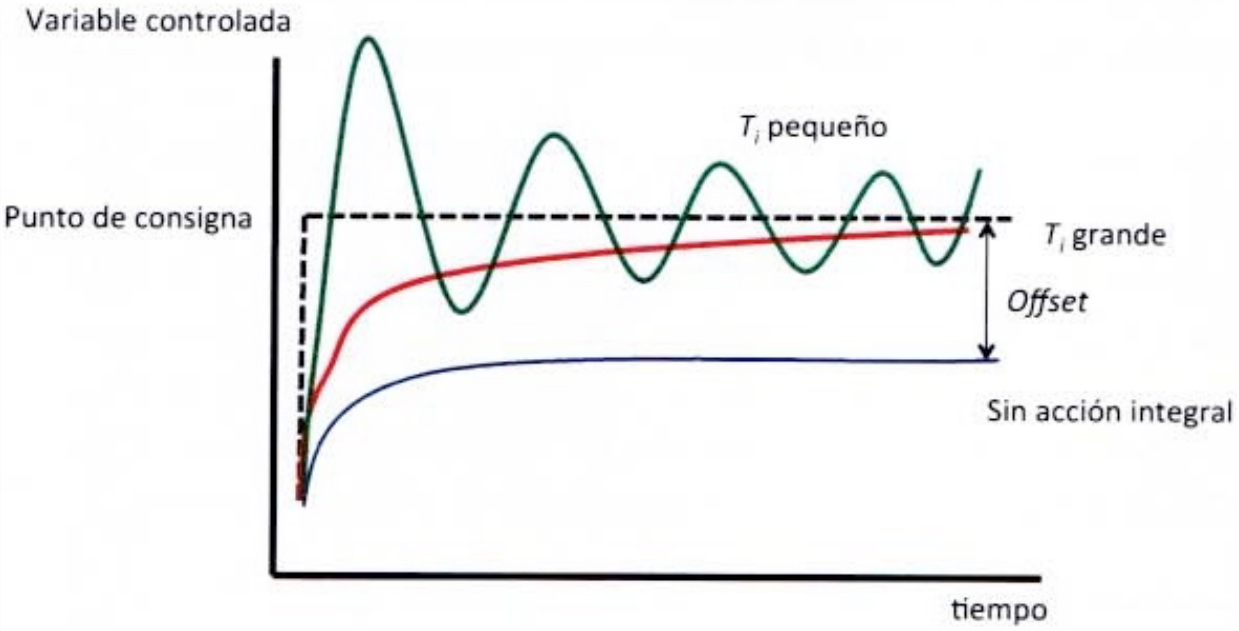


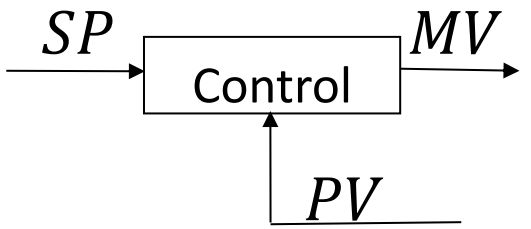
3.5. Control PI



- $MV = K_p\left((SP - PV) + \frac{1}{T_i}\int(SP - PV)dt\right)$

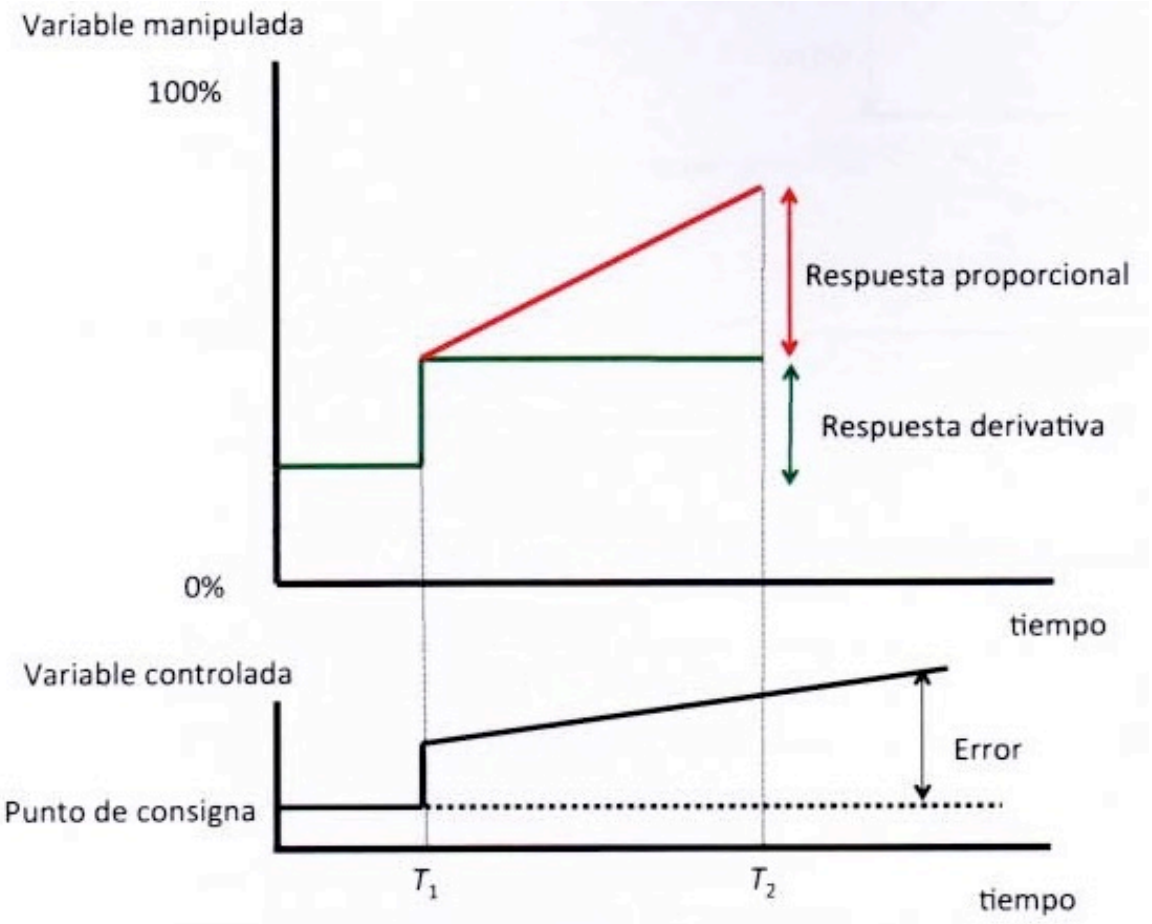


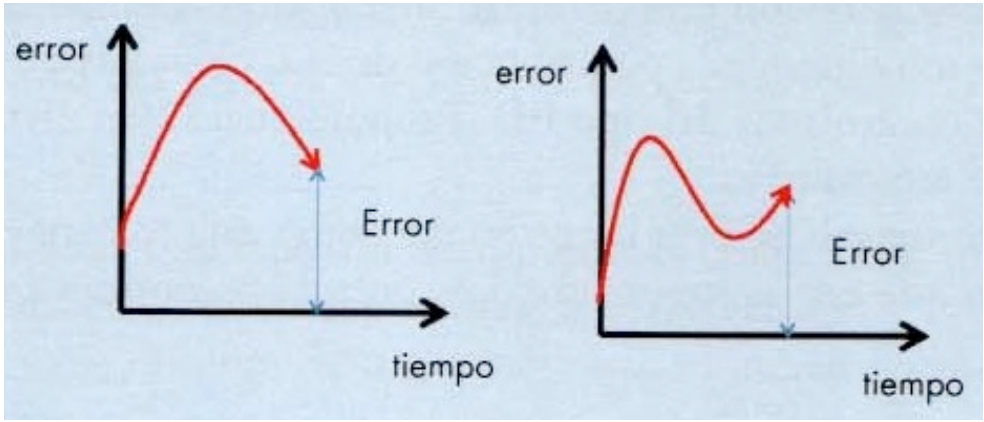




3.6. Control PD

- $MV = K_p \left((SP - PV) + \frac{1}{T_i} \int (SP - PV) dt + T_d \frac{d(SP-PV)}{dt} \right)$





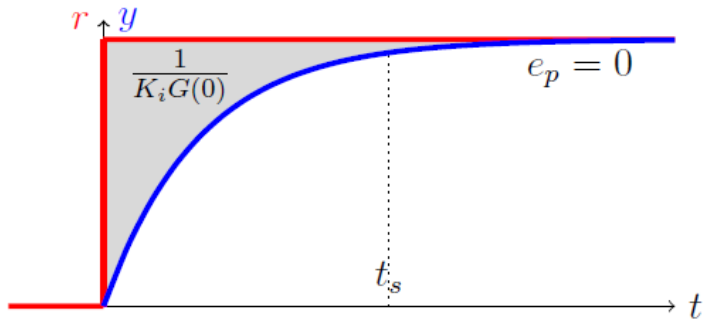
3.7. Prestaciones del control PID

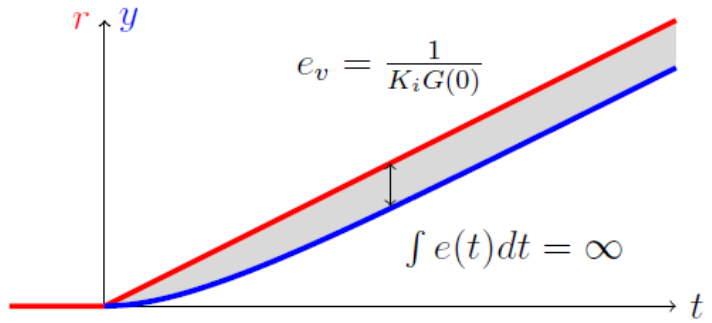
- El término integral permite seguir referencias constantes

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

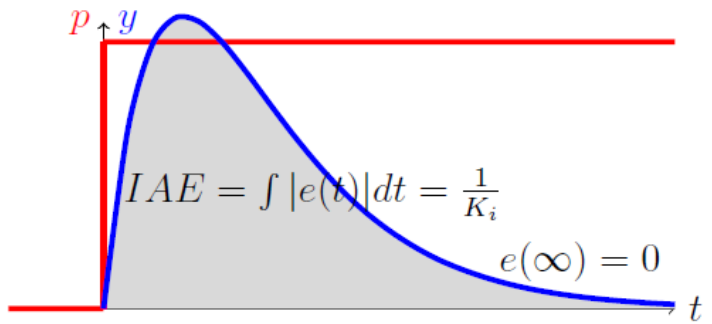
- El término integral permite rechazar perturbaciones constantes

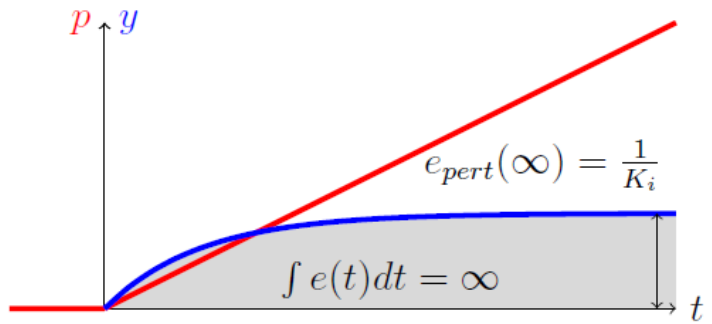
Ante referencia r





Ante perturbación p





Medida de velocidad de respuesta: $\frac{1}{K_i}$

3.8. Efecto de los parámetros del PID

Ventajas de aumentar K_p

- Sistema más rápido
- Se reduce el error

Inconvenientes de aumentar K_p

- Sistema más oscilatorio
- Se amplifica el ruido

Ventajas $\downarrow T_i$ o $\uparrow K_i$

- Sistema más rápido
- El error se anula antes

Inconvenientes $\downarrow T_i$ o $\uparrow K_i$

- Sistema más oscilatorio
- Sistema menos robusto

Ventajas $\uparrow T_d$ o $\uparrow K_d$

- Sistema más rápido
- Sistema menos oscilatorio

Inconvenientes $\uparrow T_d$ o $\uparrow K_d$

- Se amplifica más el ruido

Normalmente T_d se fija en relación a T_i: $T_d = \frac{T_i}{4}$

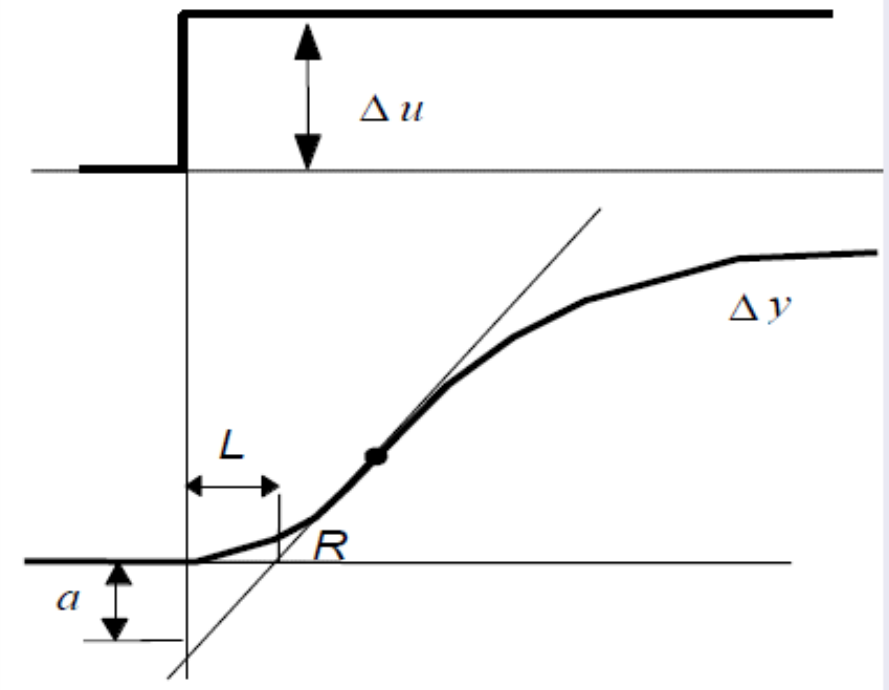
3.9. Ajuste experimental del PID

Prueba y error:

- Partir de $K_p = 0, T_i = 999999, T_d = 0$
- Aumentar K_p hasta que la respuesta sea aceptable (Control P)
- Aumentar ligeramente T_d para mejorar la respuesta (opcional)
- Disminuir T_i hasta eliminar el error estacionario (Control PI)

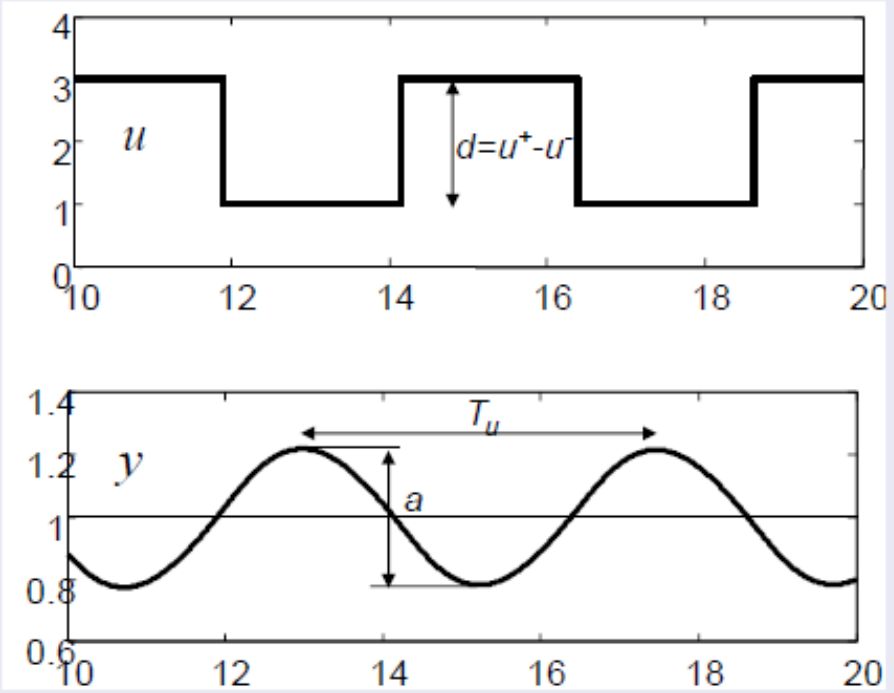
3.9. Ajuste experimental del PID

Método de bucle abierto (ZN)



	K_p	T_i	T_d
PI	$0{,}9\frac{\Delta u}{a}$	$3{,}4L$	0
PID	$1{,}2\frac{\Delta u}{a}$	$2L$	0.5L

Método de bucle cerrado (relé)

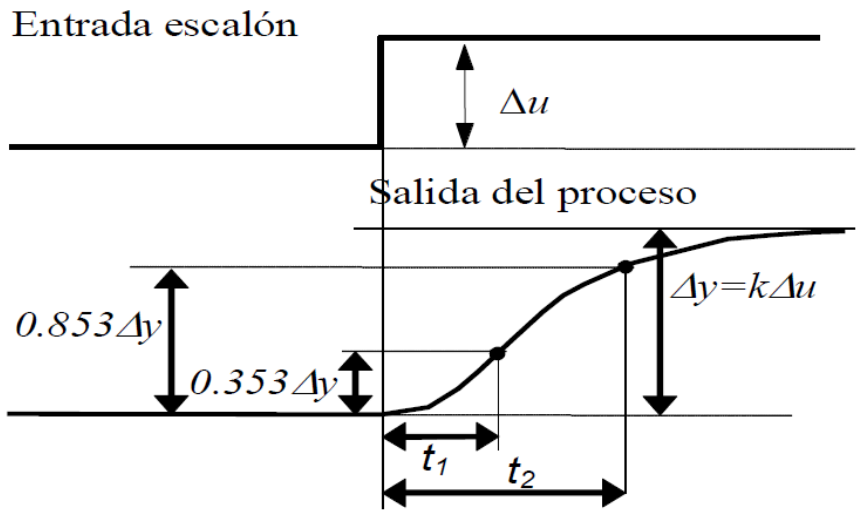


	K_p	T_i	T_d
PI	$0{,}57\frac{d}{a}$	$0{,}83T_u$	0
PID	$0{,}76\frac{d}{a}$	$0{,}5T_u$	$0{,}13T_u$

3.9. Ajuste experimental del PID

- U -> MV (actuador)
- Y -> PV (sensor)

Método de bucle abierto II (aproximación a FOTD)



$$G(s) = \frac{k\,e^{-Ts}}{1+\tau s}$$

← Es necesario esperar al valor final

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$T = 1.3t_1 - 0.29t_2$$

$$\tau = 0.67(t_2 - t_1)$$

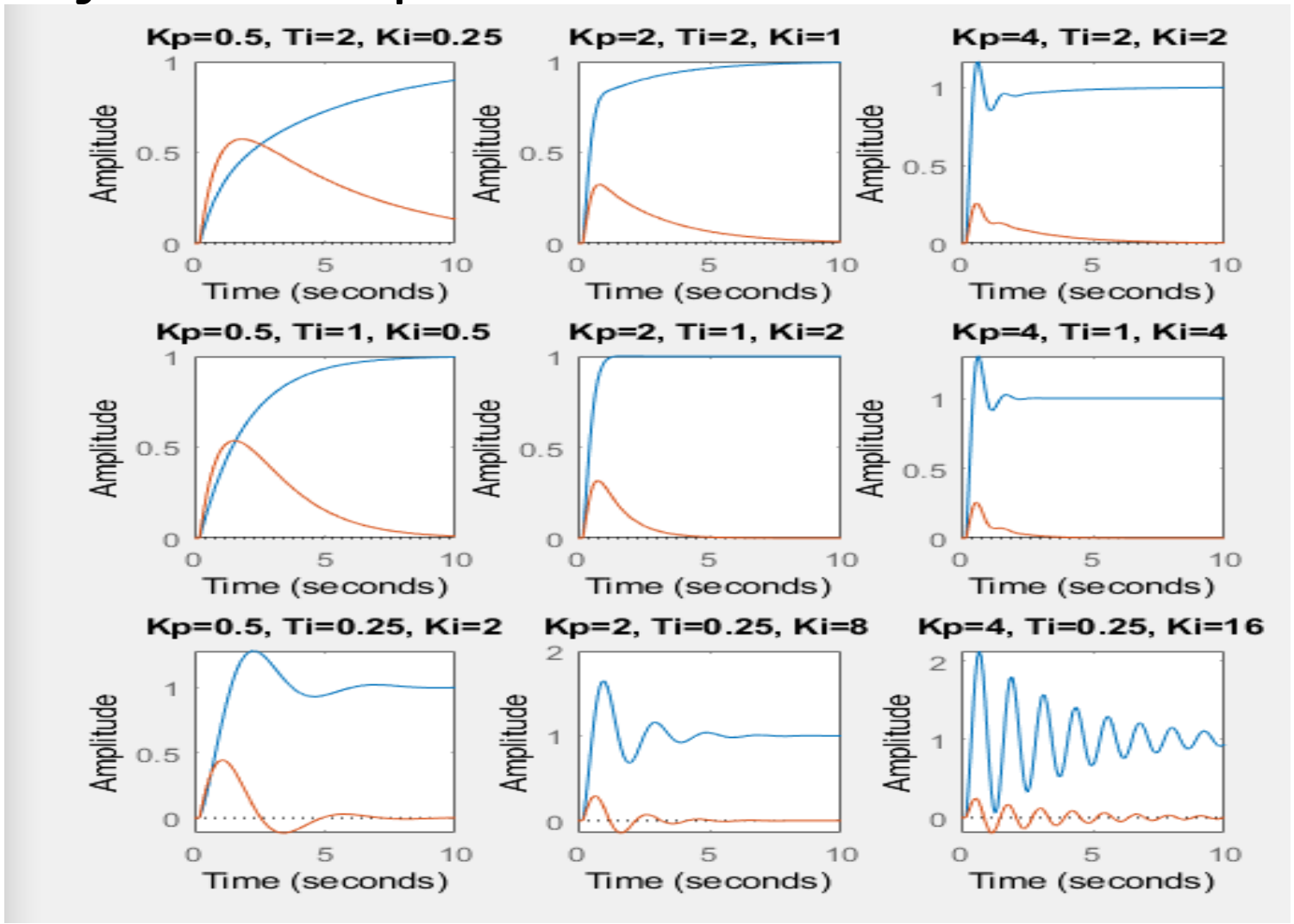
Método de bucle abierto II

- Con k, T y τ se entra en una tabla

Tipo	Poco robusto K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{0.859}{k}\left(\frac{T}{\tau}\right)^{-0.997}$	$1.484\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.468}$	0
PID	$\frac{1.357}{k}\left(\frac{T}{\tau}\right)^{-0.947}$	$1.188\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.738}$	$0.381\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.995}$

Tipo	Muy robusto K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{0.15}{k} + \left(0.35 - \frac{\tau T}{(\tau+T)^2}\right)\frac{\tau}{kT}$	$0.35T + \frac{13\tau^2 T}{\tau^2 + 12\tau T + 7T^2}$	0
PID	$\frac{1}{k}\left(0.2 + 0.45\frac{\tau}{T}\right)$	$\frac{0.4T + 0.8\tau}{T + 0.1\tau}T$	$\frac{0.5T\tau}{0.3T + \tau}$

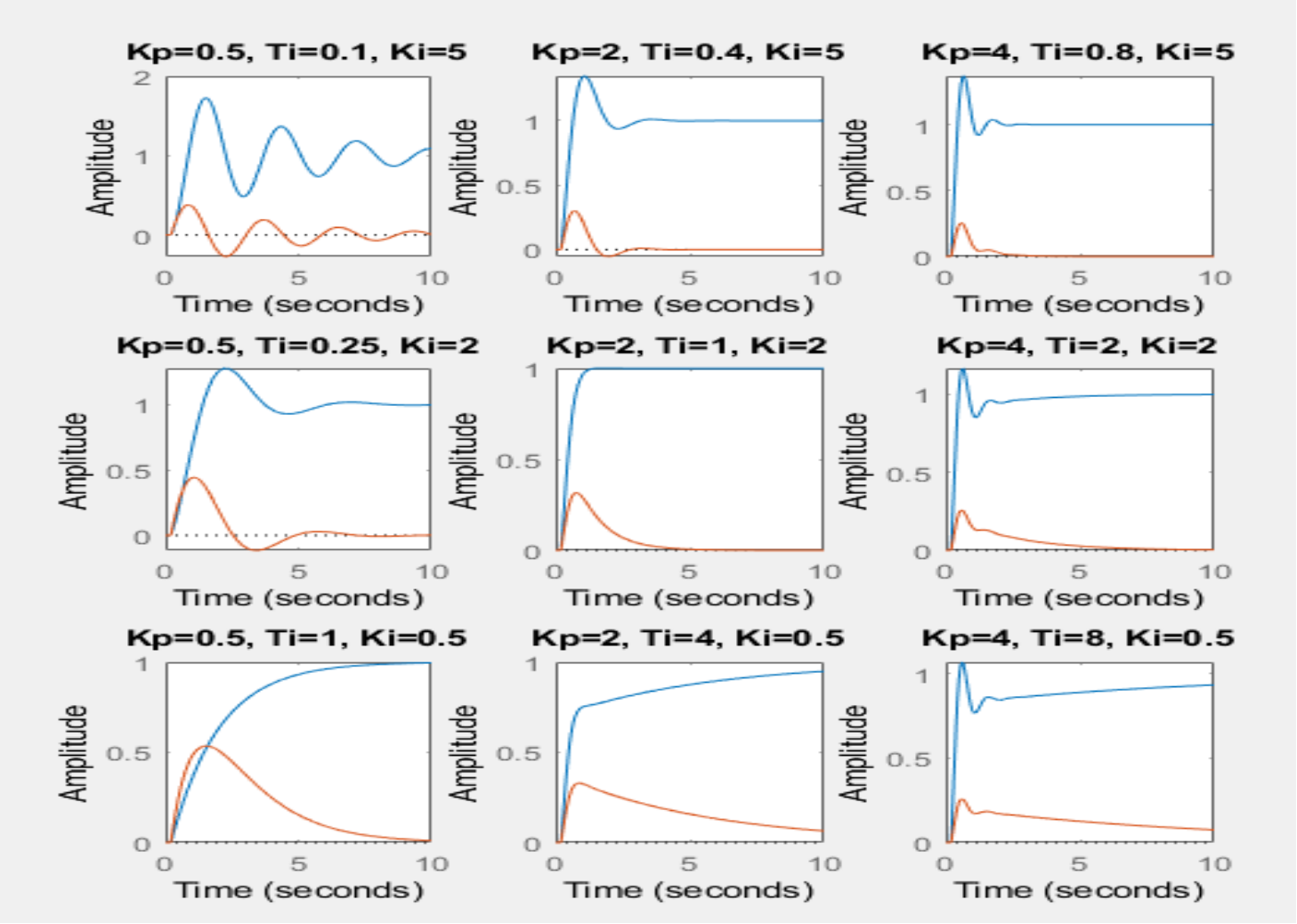
3.9. Ajuste experimental del PID. Reajuste Kp-Ti



Ti

Kp

3.9. Ajuste experimental del PID. Reajuste Kp-Ki



Ki

Kp

4. Control avanzado

- Clasificar los tipos de control avanzado
- Conocer los diferentes mecanismos del control avanzado
- Relacionar el control avanzado con la eficiencia y la seguridad
- Conocer las características de un control distribuido

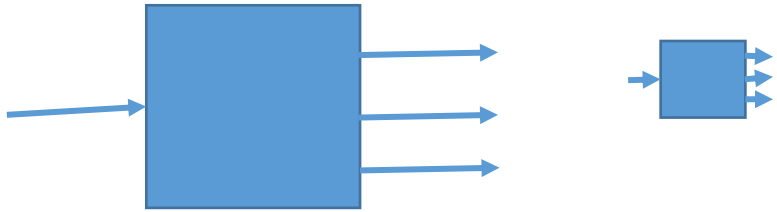
4.1. Niveles en el control de procesos

- Control básico (relé o PID).
  - Operaciones estables y seguras
- Control avanzado (estructuras de control).
  - Optimización económica y seguridad
- Control multivariable
  - Coordinación entre unidades. Decide SP para operar de forma óptima
- Optimización en línea
  - Planificación global de la planta.
  - Tiene en cuenta coste de la energía y materias primas

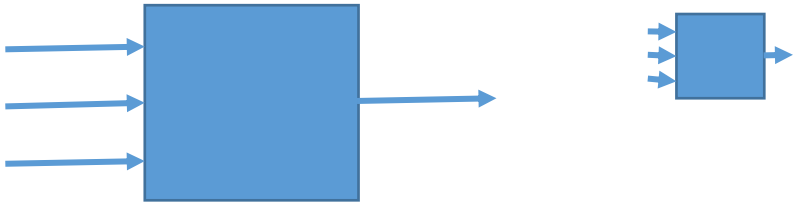
4.2. Control avanzado (estructuras de control)

Clasificación

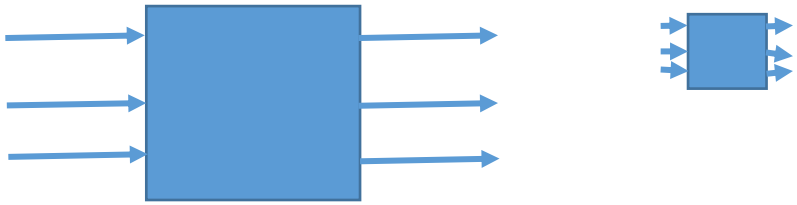
- Múltiples mediciones
  una actuación



- Una medición
  múltiples actuaciones

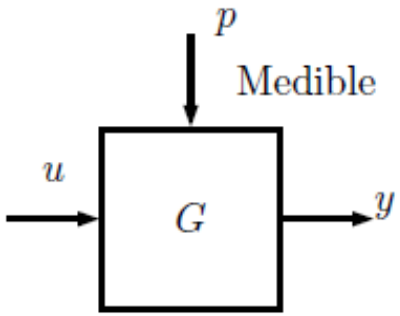


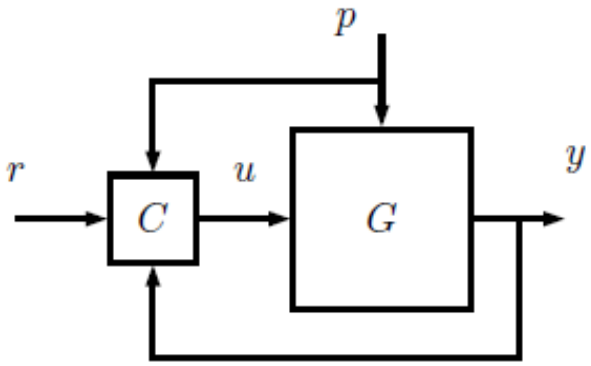
- Múltiples mediciones
  múltiples actuaciones



Control anticipativo (feedforward)

- Se tiene una medición directa de la perturbación

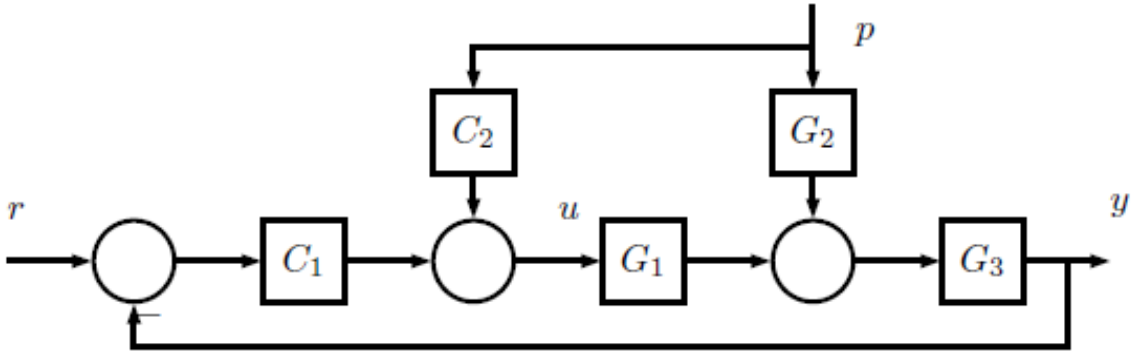




- Se utiliza un controlador modificado con la medición de perturbación
- Uso: atenuar más rápido el efecto de las perturbaciones

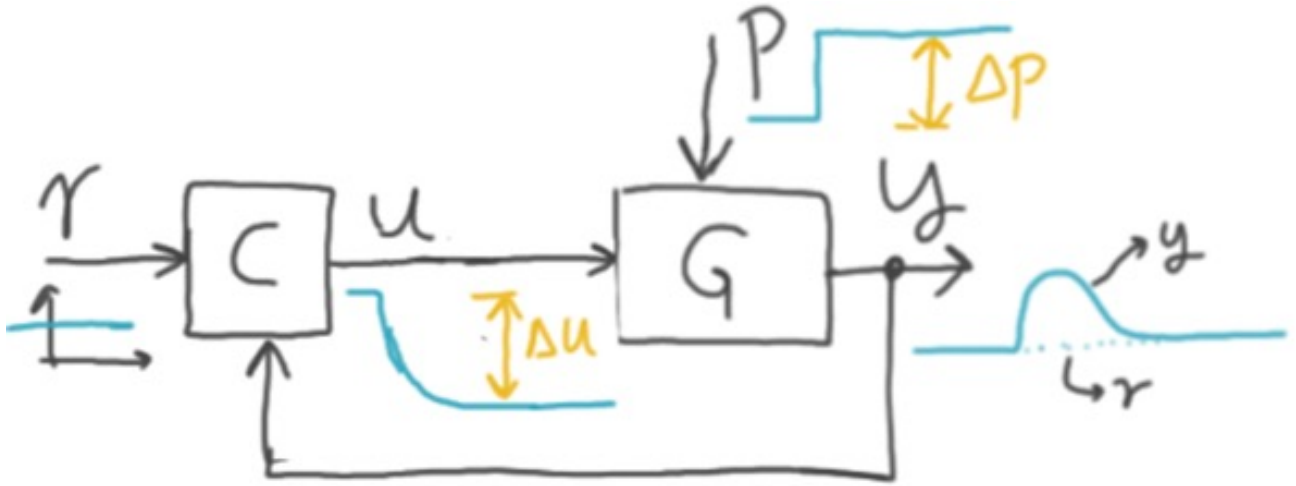
Control anticipativo (feedforward)

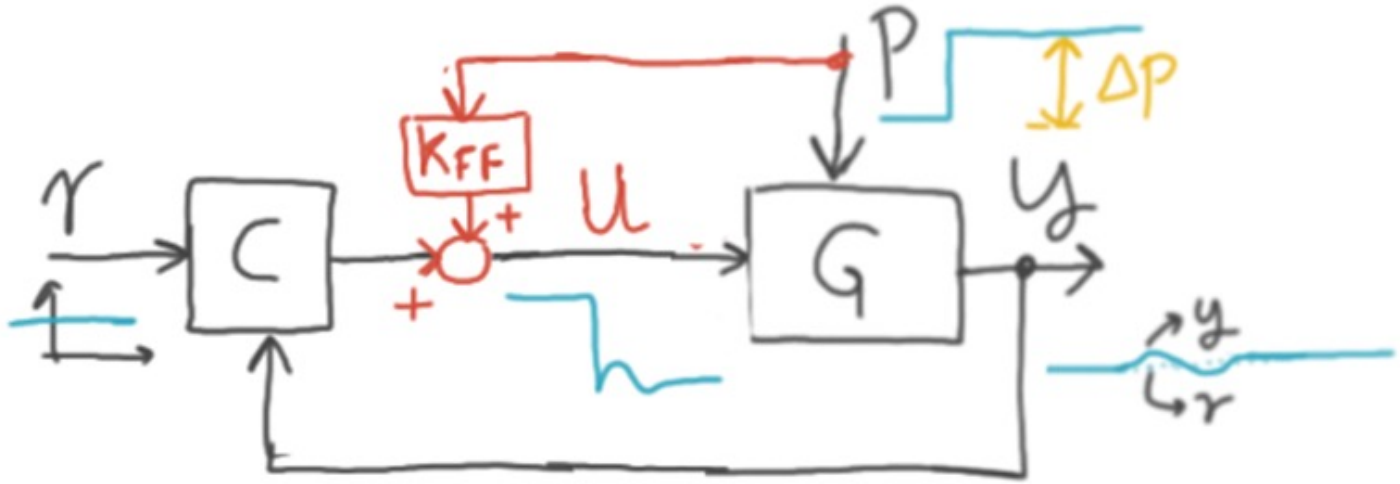
- Se tiene una medición directa de la perturbación



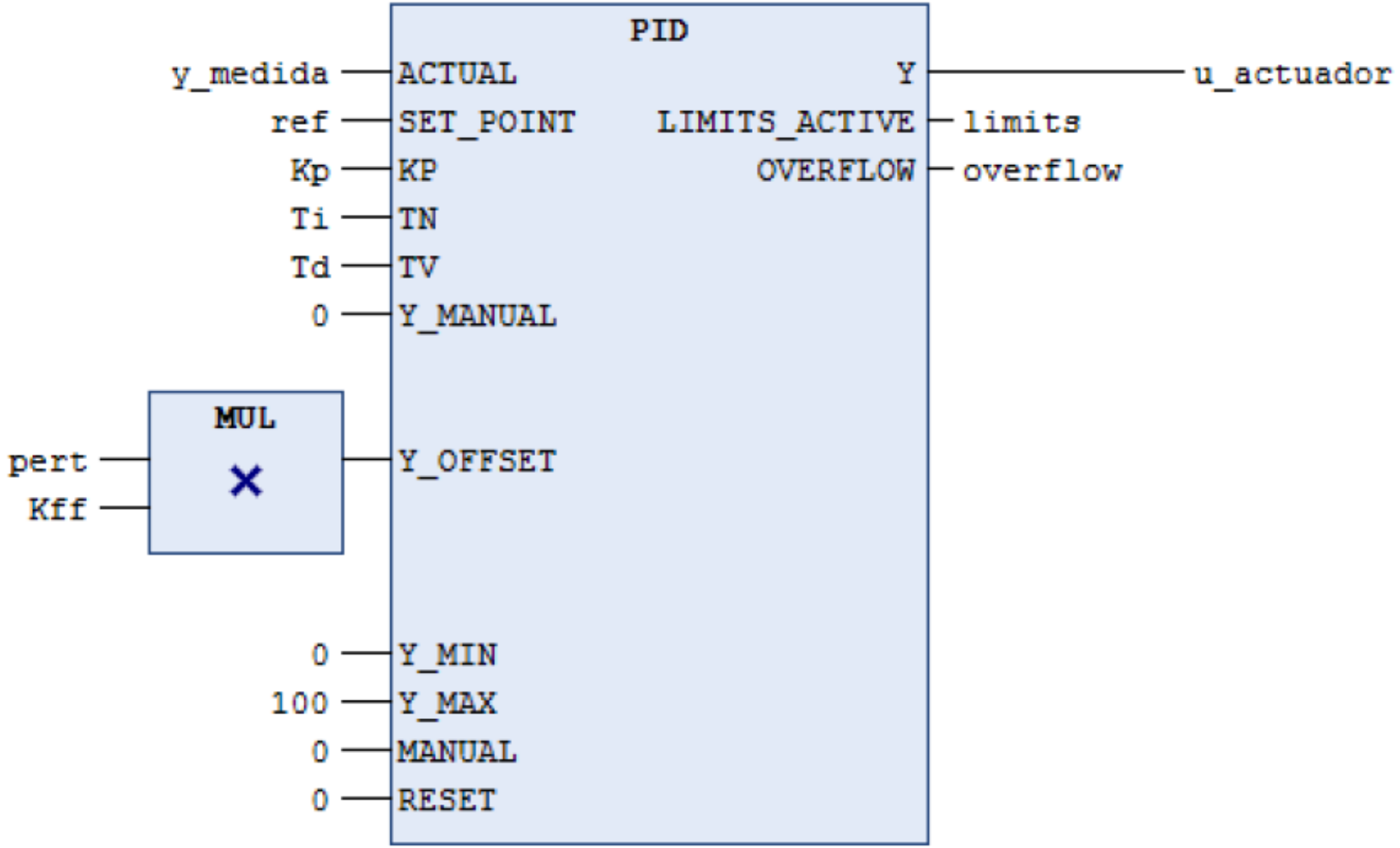
- C1 (y->u): Se ajusta primero y se pone en marcha
- C2: se ajusta después como la ganancia $C_2 = \frac{\Delta u}{\Delta p}$ con C1 en marcha
  - Se da un escalón a la perturbación y se mira qué cambio provoca en la acción

Control anticipativo (feedforward)



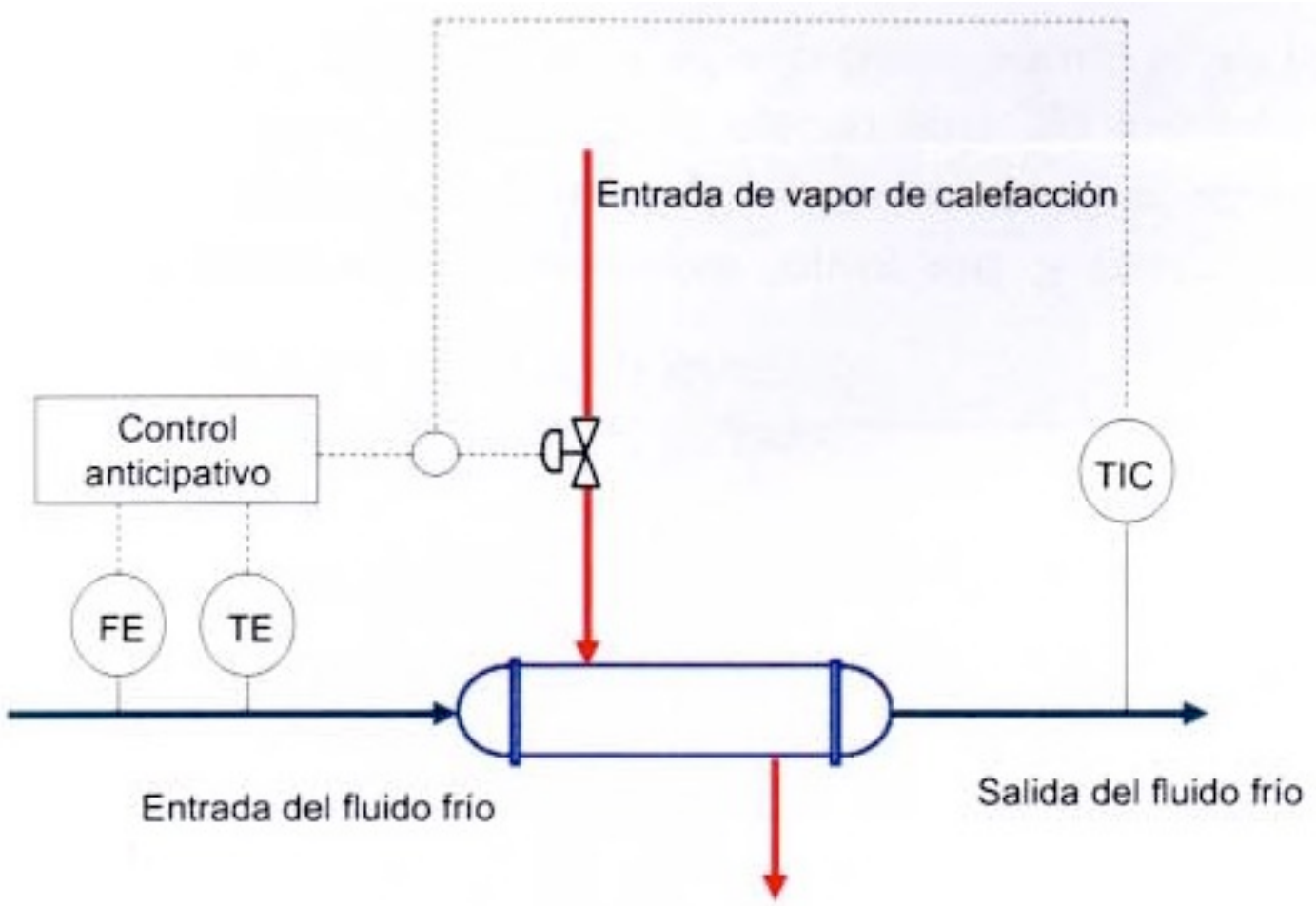


Control anticipativo (feedforward)

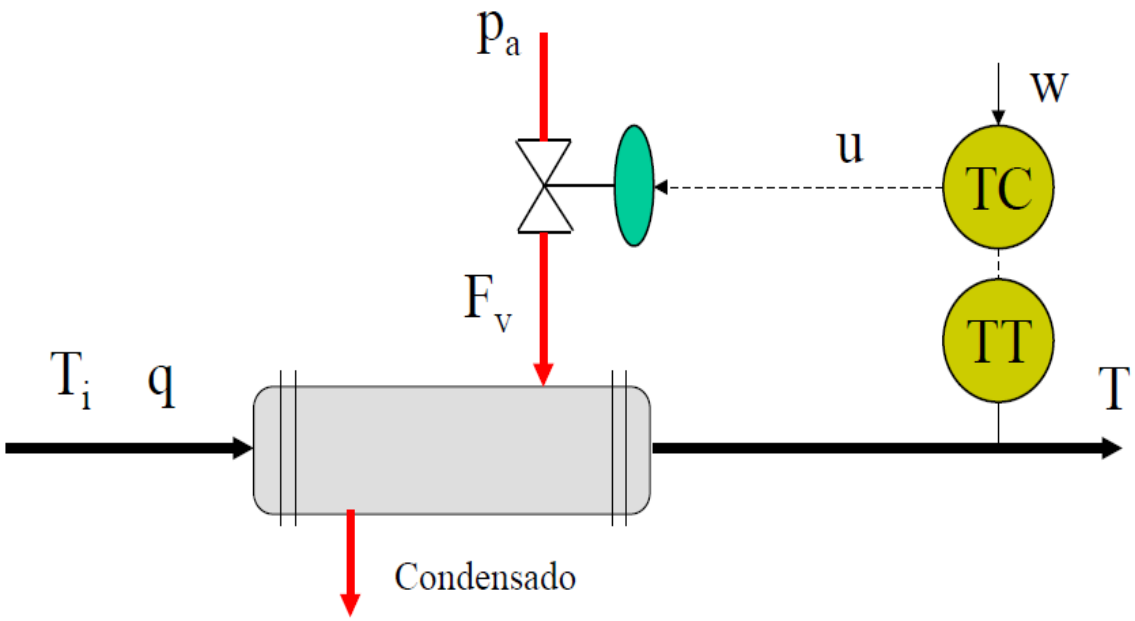


Control anticipativo (feedforward)

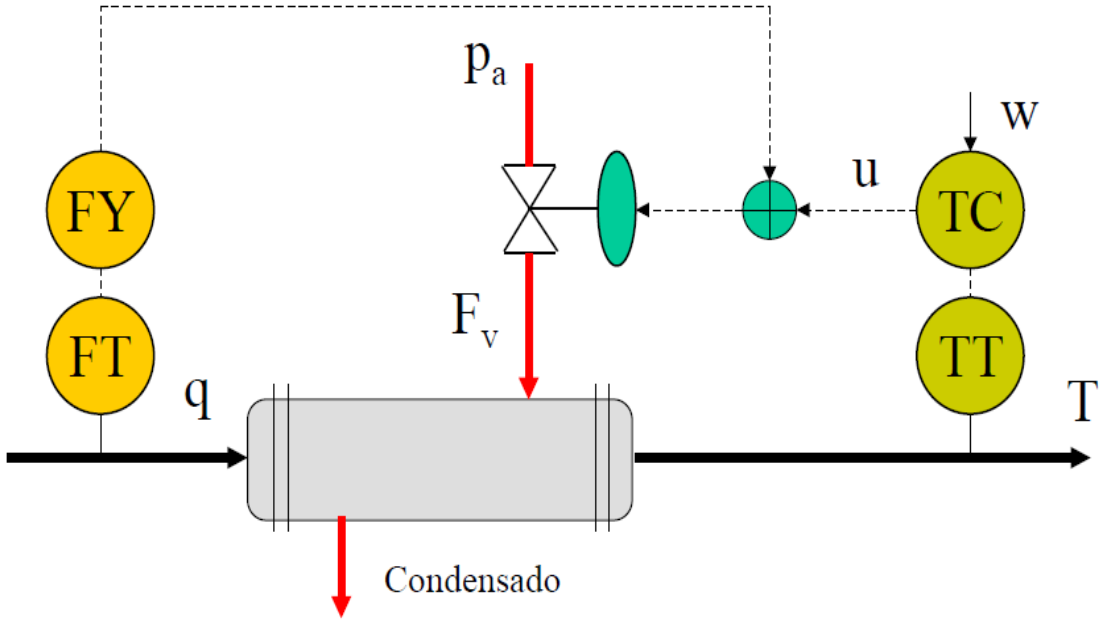
- Ejemplo



Control anticipativo (feedforward)



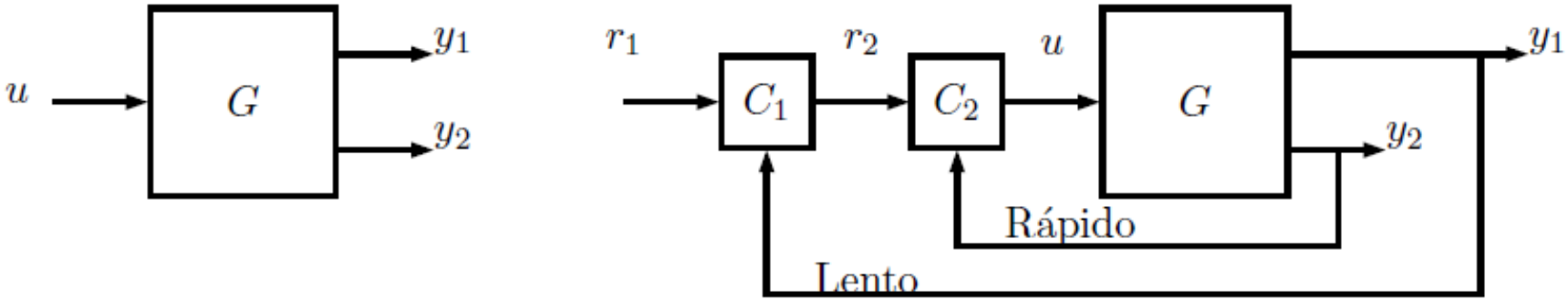
Respuesta ante cambios en el caudal q ó en T_i:
El regulador solo empieza a corregir cuando T se ha modificado.



Respuesta ante cambios en el caudal q :
La salida del regulador se modifica de acuerdo a los cambios de q para compensar su efecto en T

Control en cascada

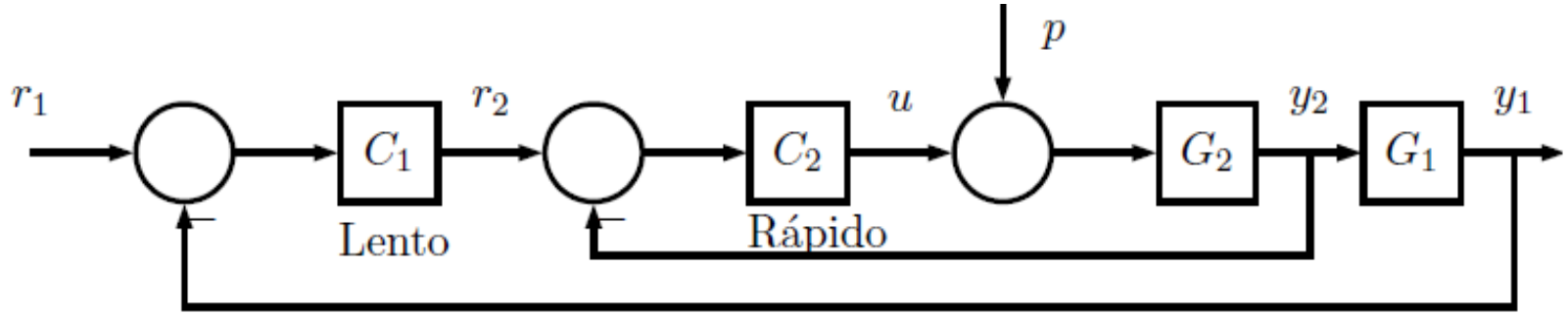
- Se tiene una medición adicional que evoluciona más rápido



- Se utilizan dos controladores, uno con cada medición
- Usos:
  - atenuar más rápido el efecto de las perturbaciones
  - Limitar alguna variable intermedia

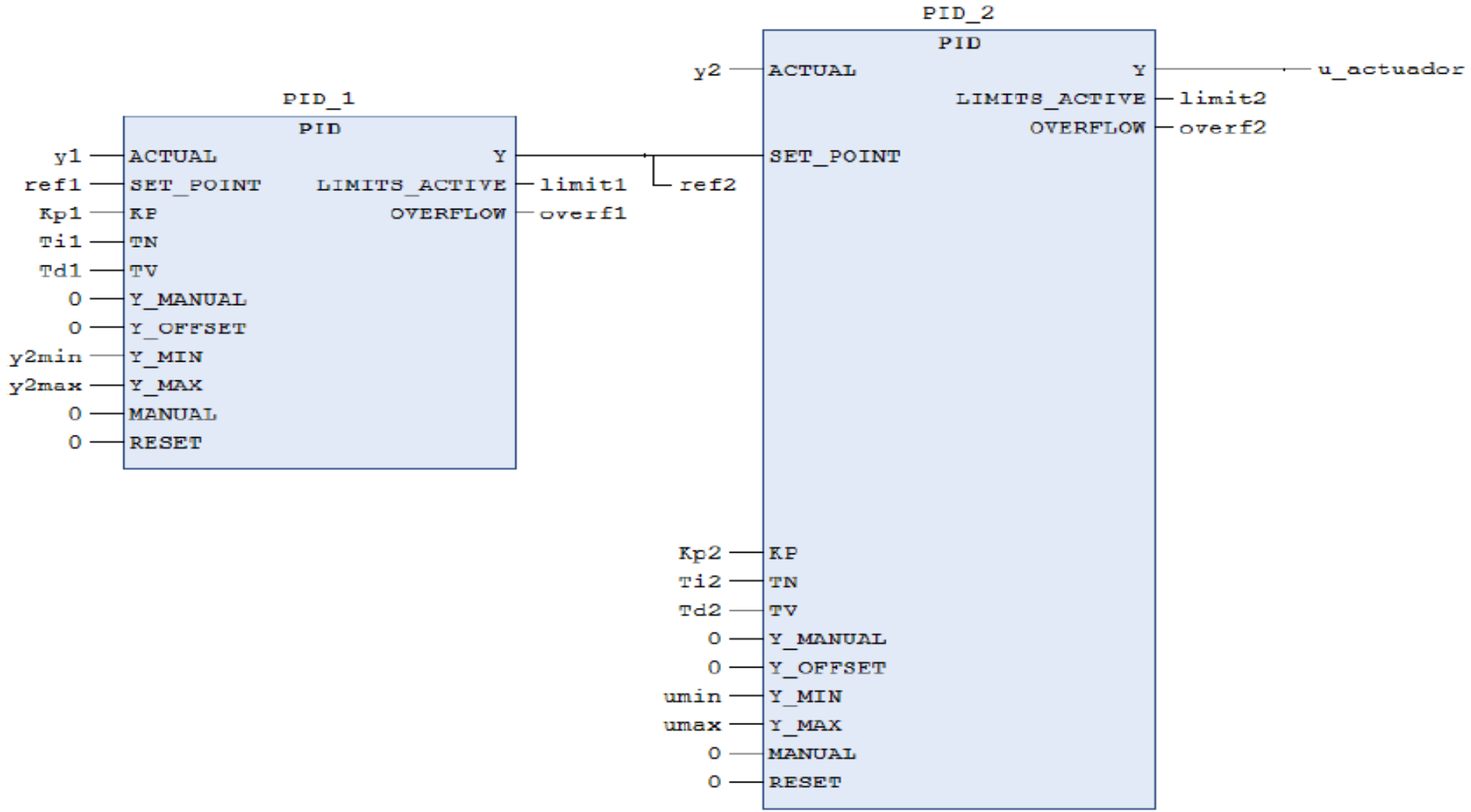
Control en cascada

- Se utilizan dos controladores



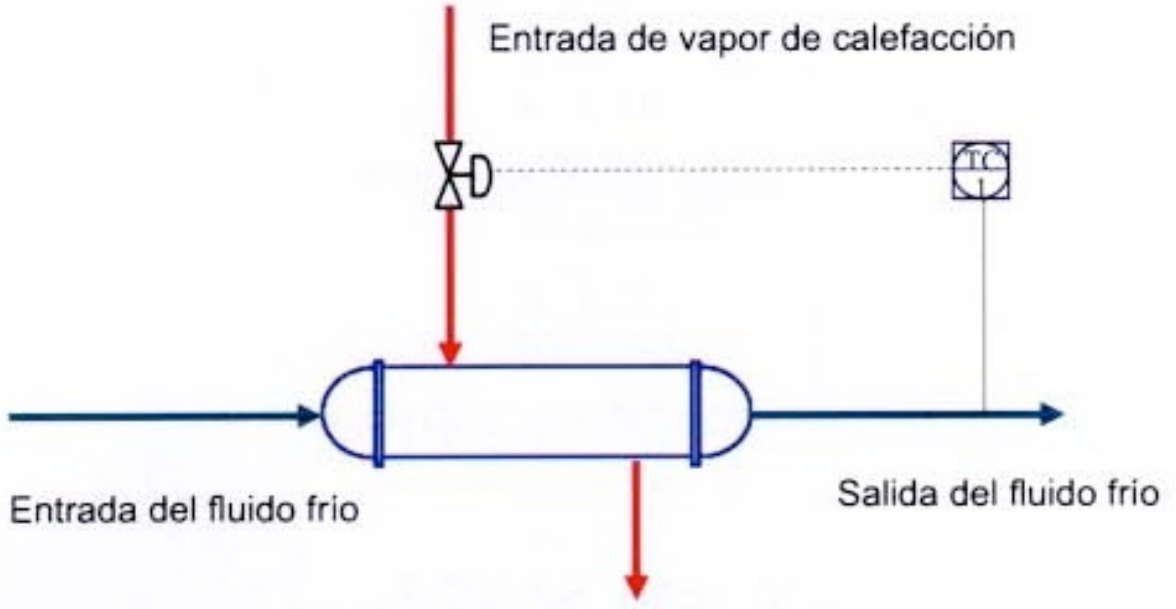
- C2 (y2->u): rápido/secundario/esclavo. Se ajusta 1º
- C1 (y1->r2): lento/principal/maestro. Se ajusta con C2 ya en marcha

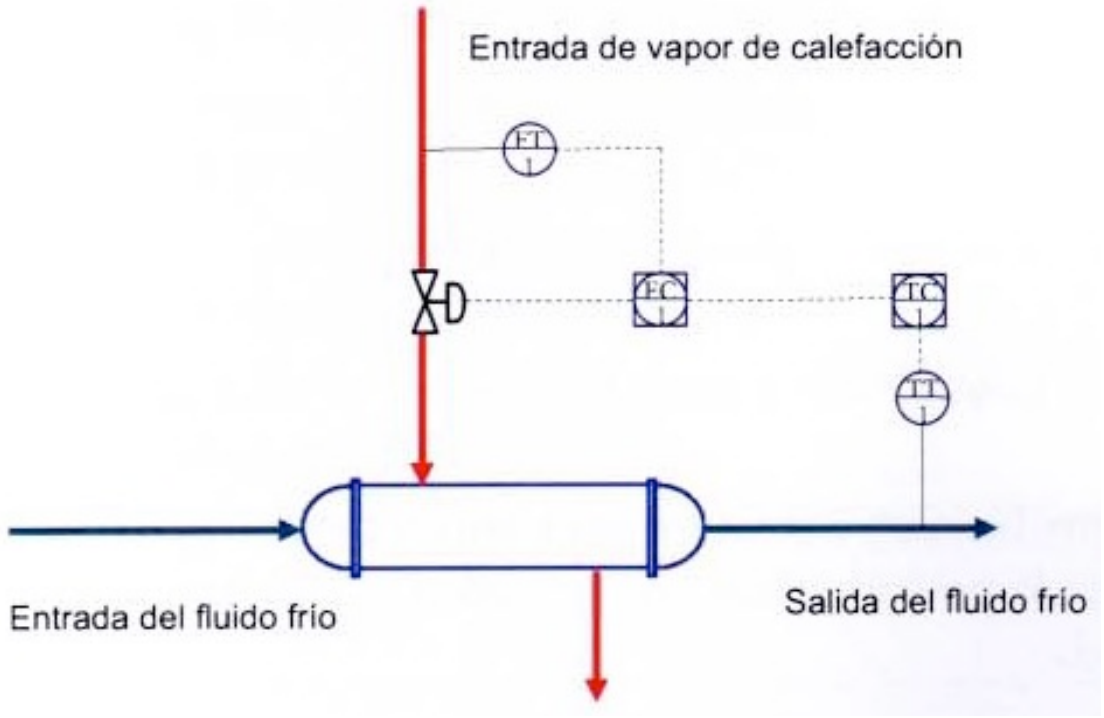
Control en cascada



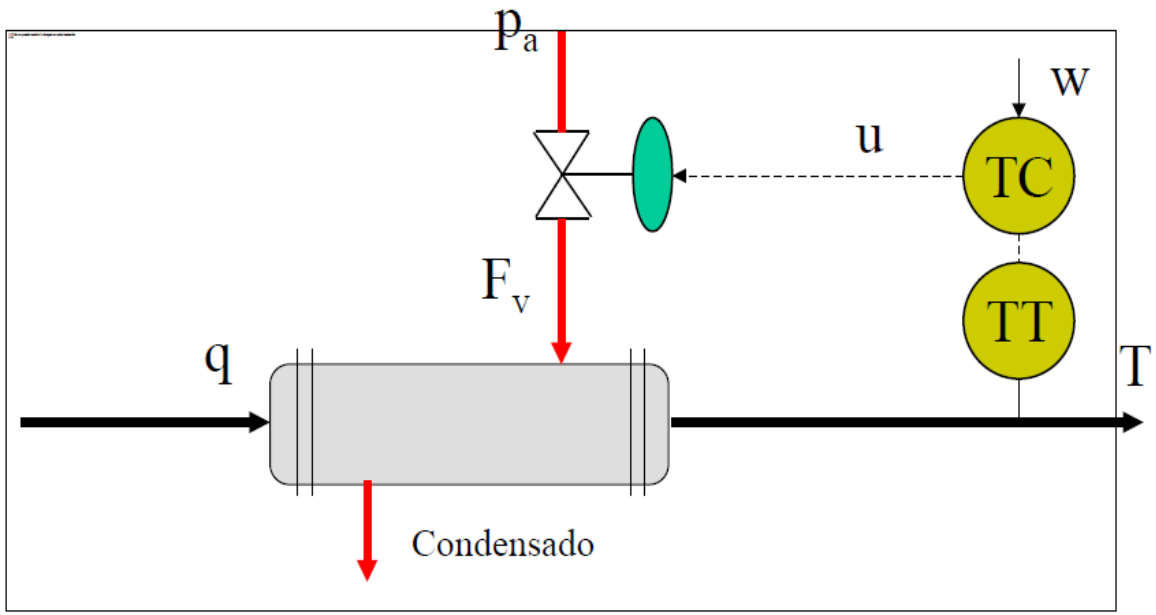
Control en cascada

- Ejemplo

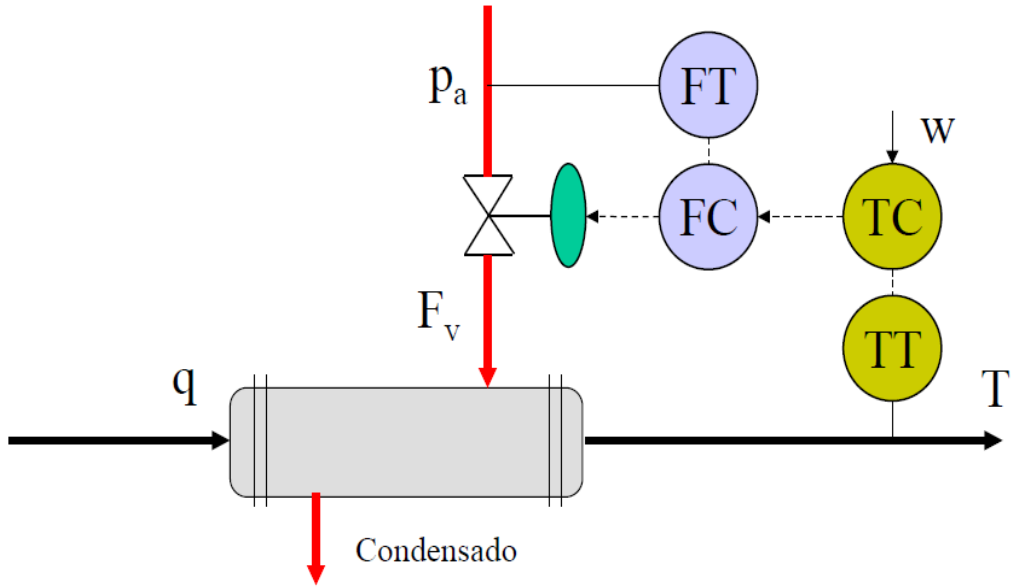




Control en cascada

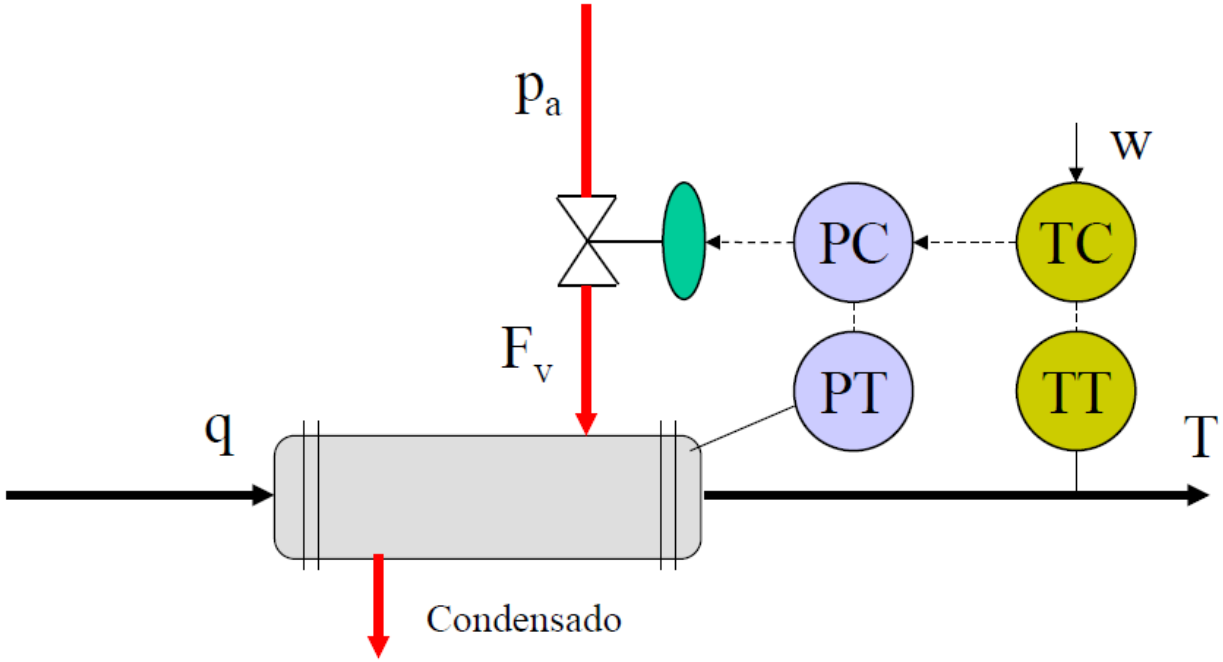


Respuesta ante cambios en la presión de alimentación:
Su efecto se traduce a un cambio de T que es corregido por el regulador modificando u



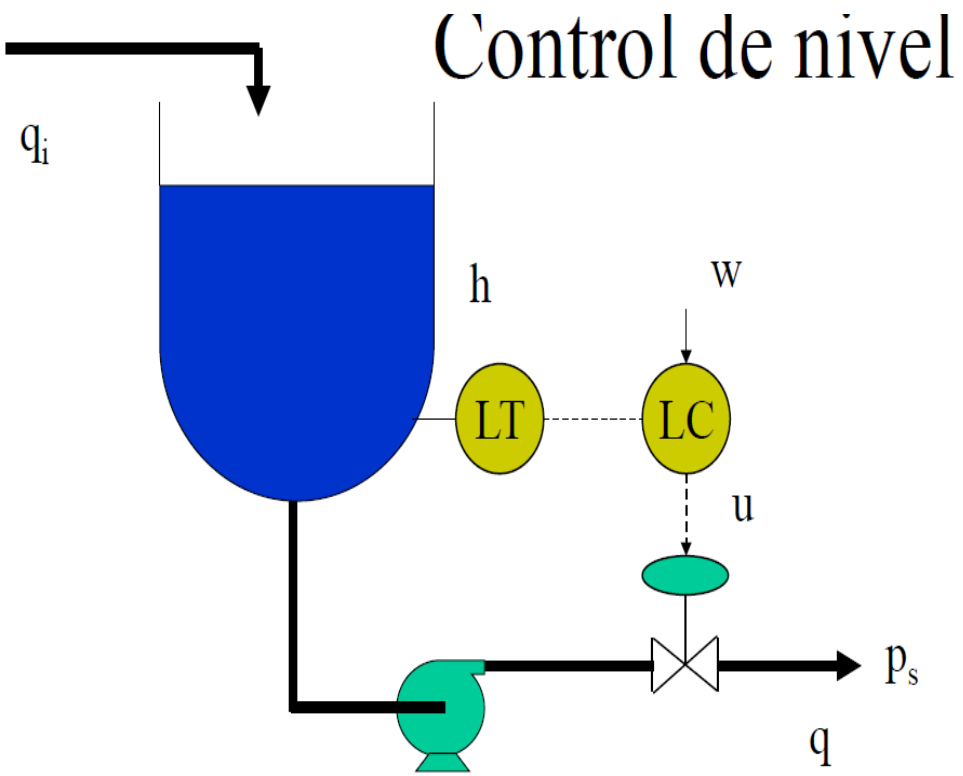
El regulador externo (TC) fija la consigna del regulador interno (FC) el cual corrige el efecto del cambio en p_a sobre F_v antes de que alcancen al cambiador significativamente

Control en cascada

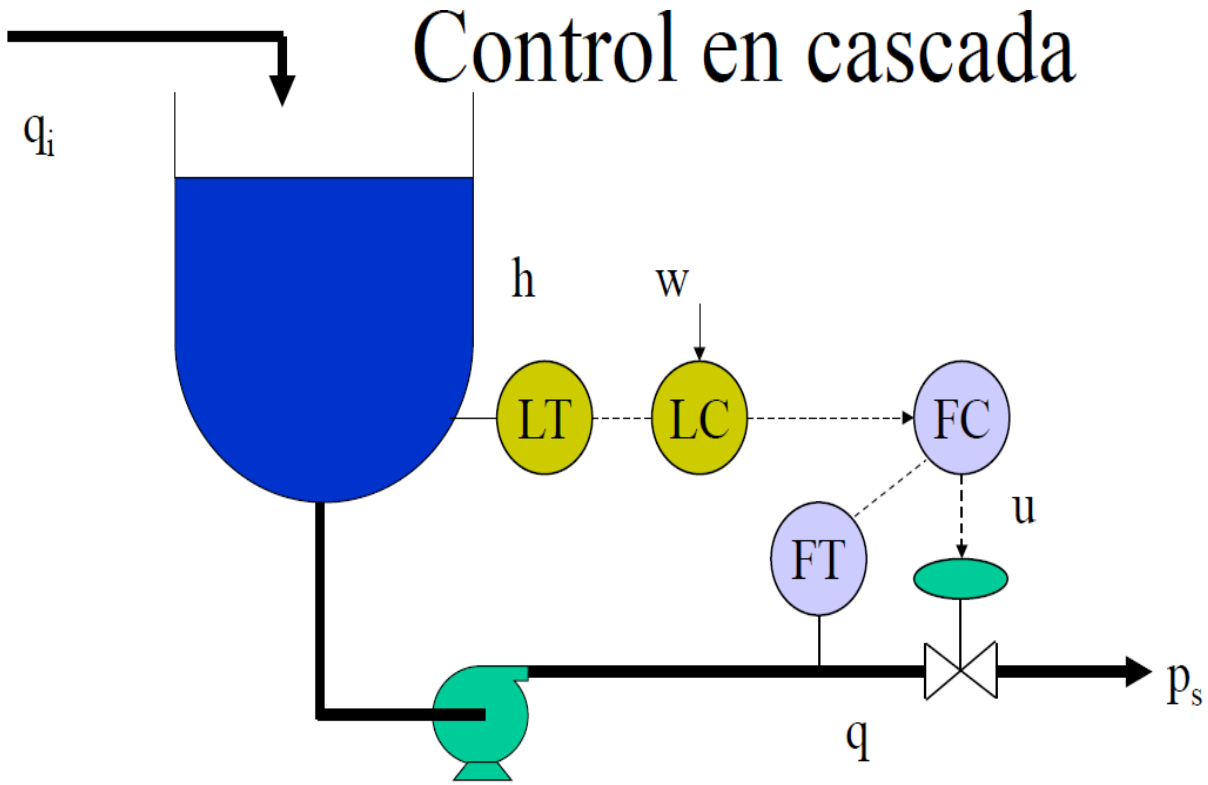


El regulador interno (PC) de presión corrige mas perturbaciones y de forma mas eficaz

Control en cascada

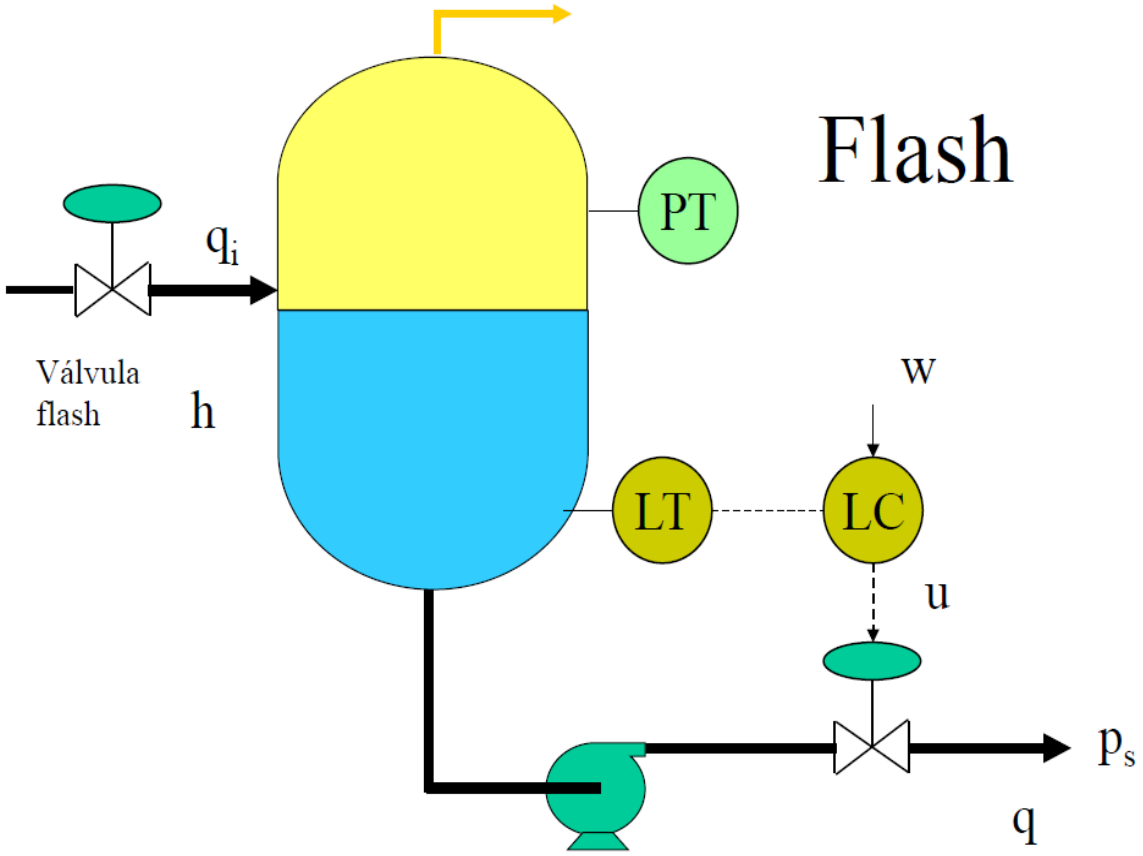


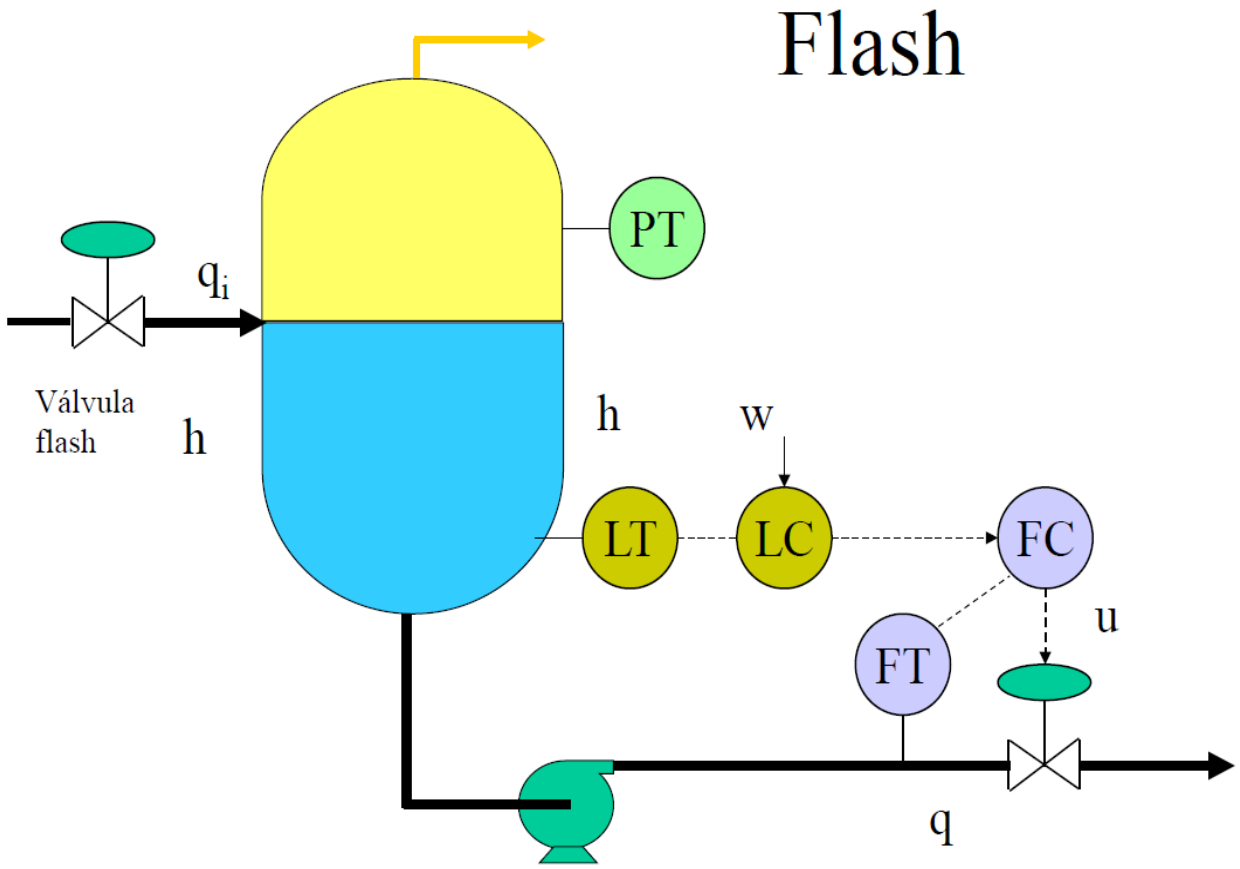
Respuesta ante cambios en la presión en la linea de descarga: Su efecto se traduce a un cambio de h que es corregido por el regulador modificando u



El regulador externo (LC) fija la consigna del regulador interno (FC) el cual corrige el efecto de las perturbaciones p_s sobre q antes de que alcancen significativamente al nivel del depósito

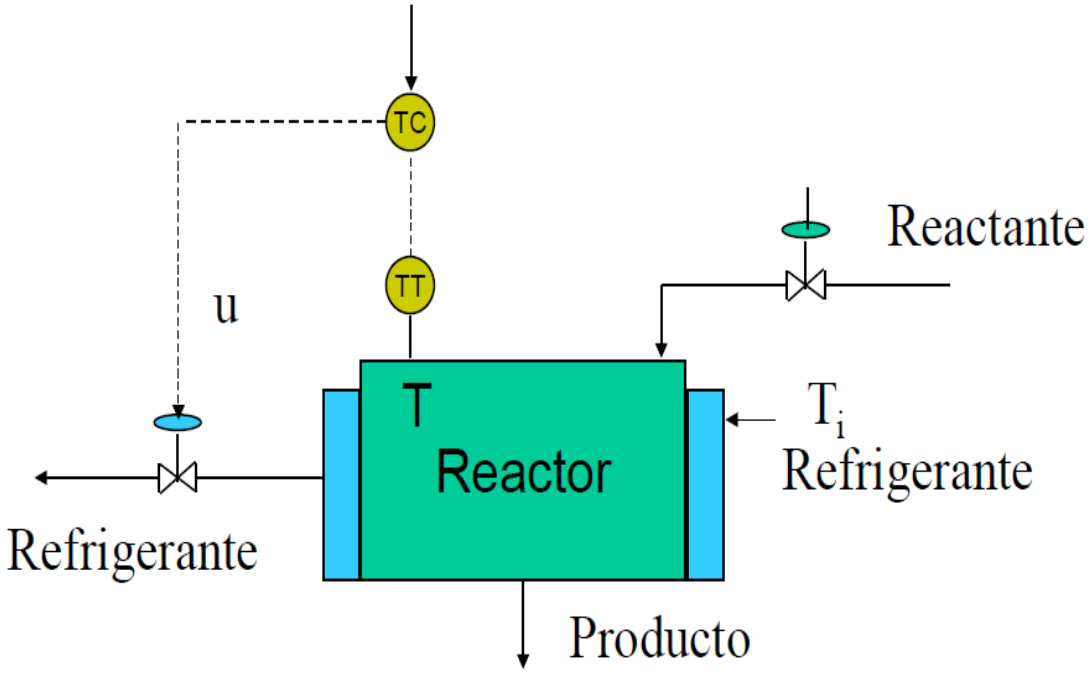
Control en cascada



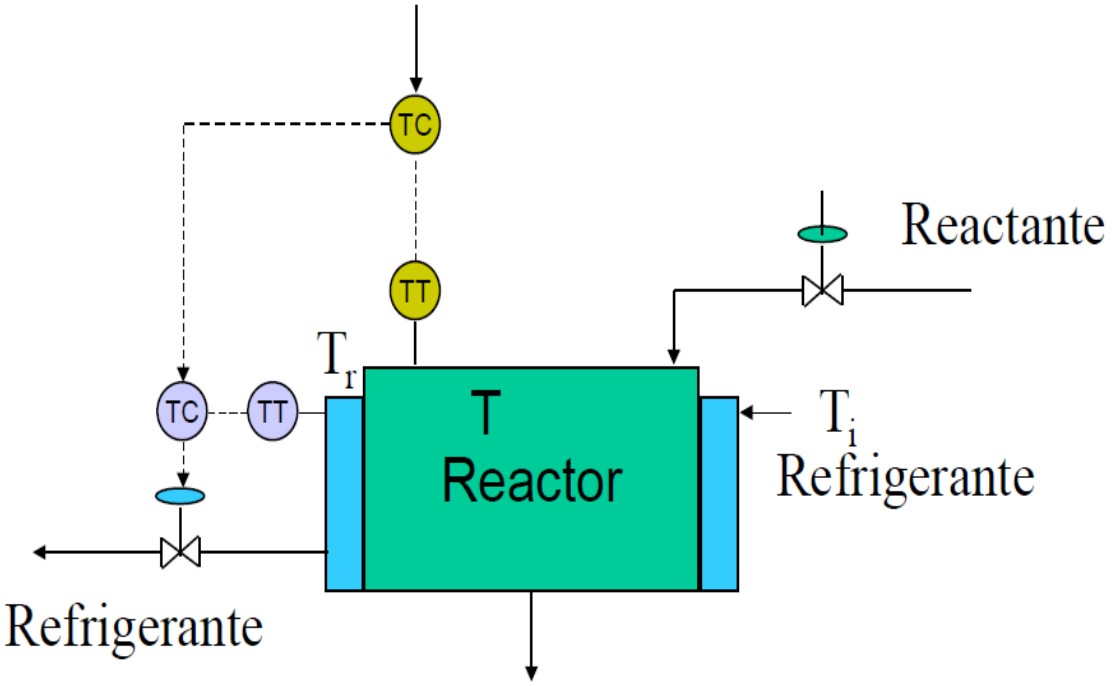


Cambios en la demanda de la fase vapor modifican la presión en el flash

Control en cascada

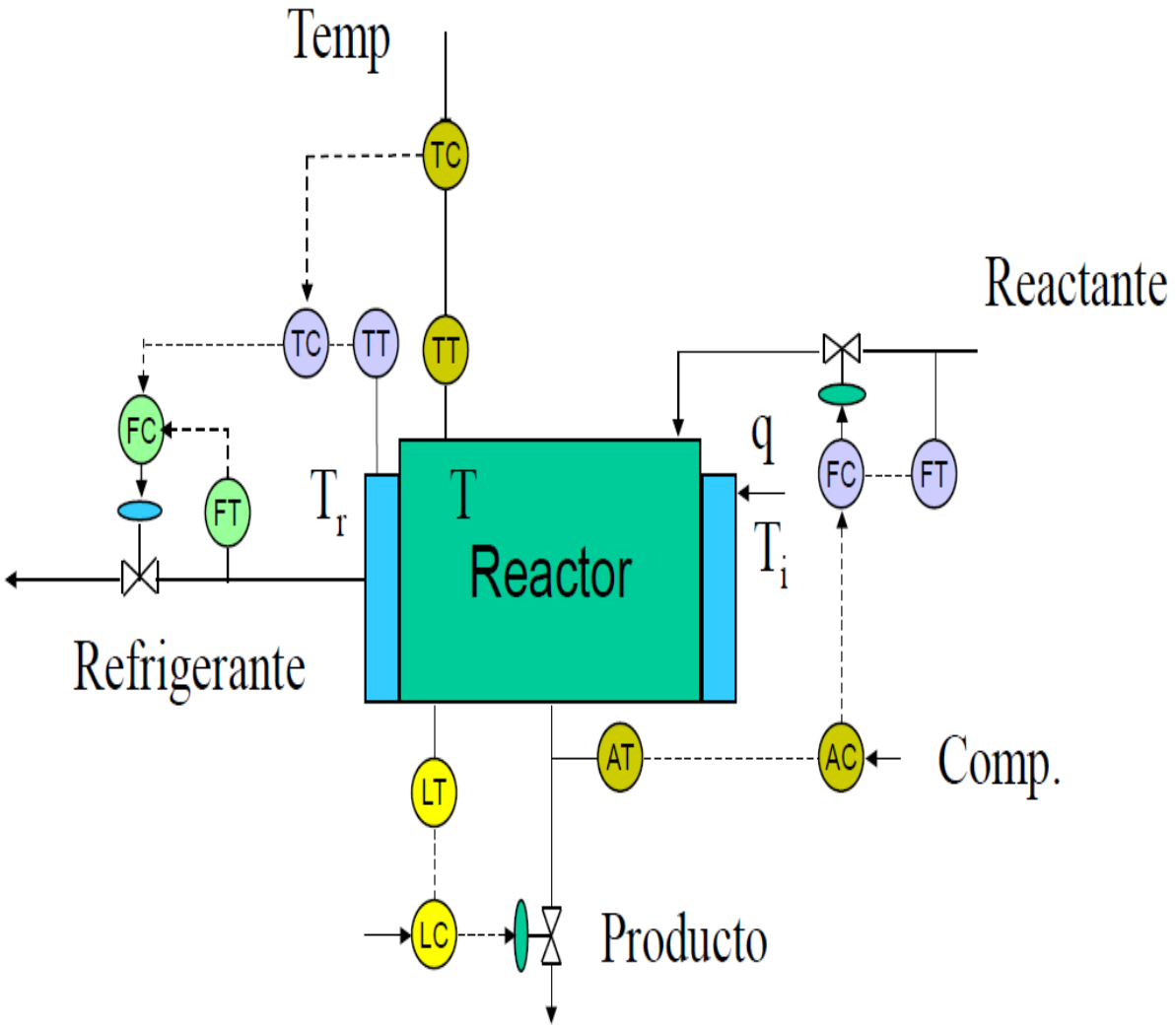


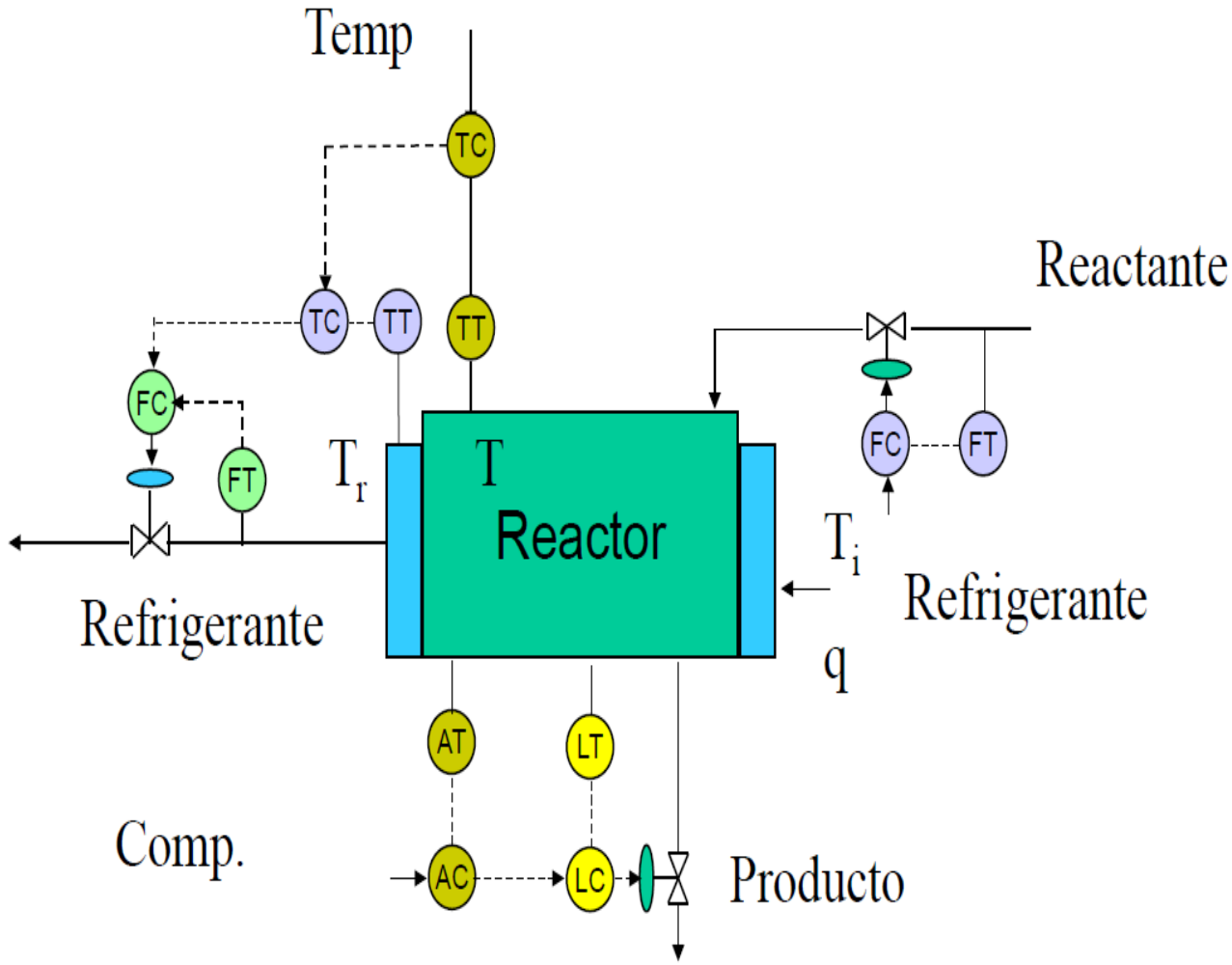
Respuesta ante cambios en la temperatura de refrigerante T_i : Su efecto se traduce a un cambio de T que es corregido por el regulador modificando u



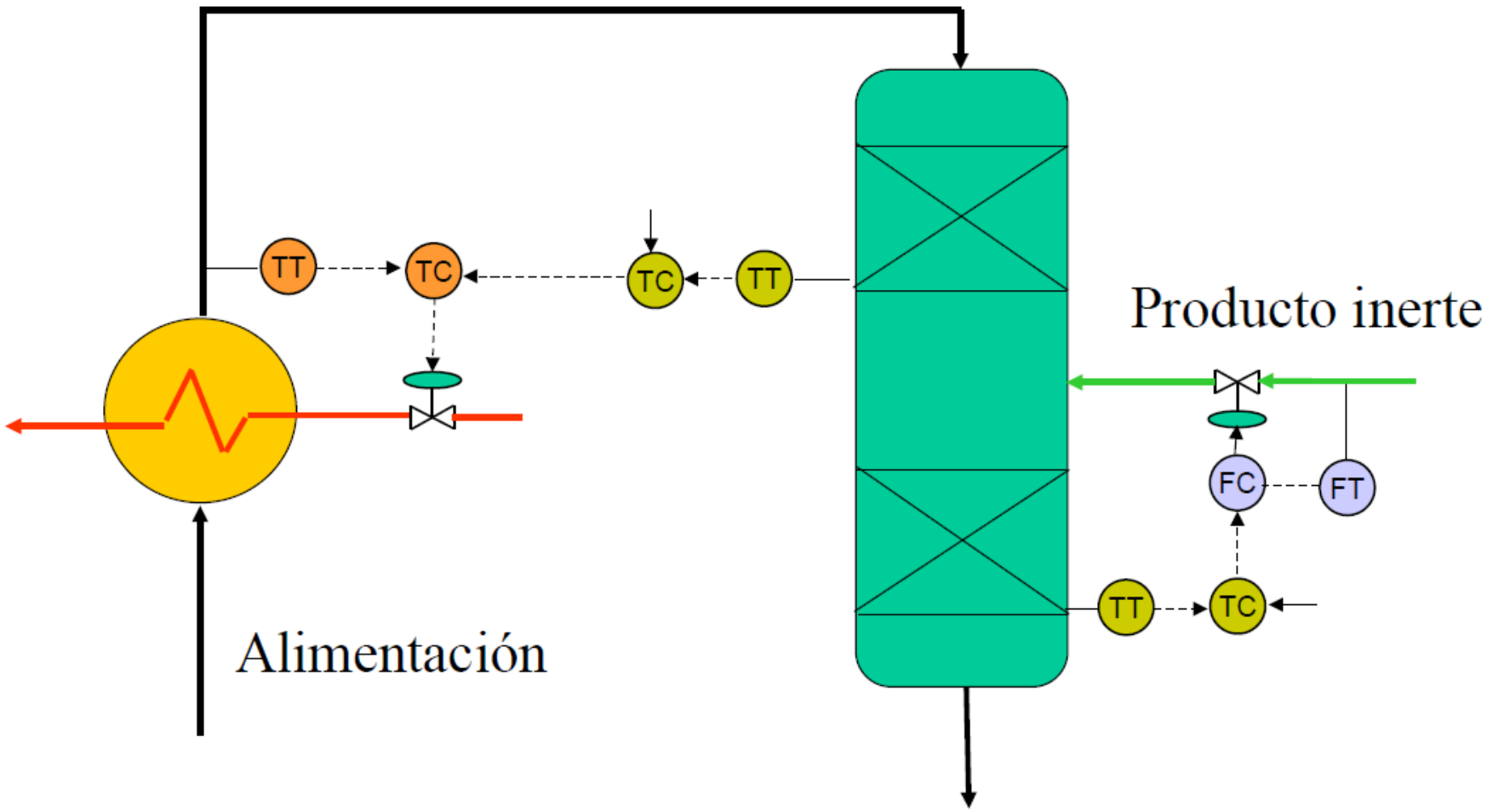
El regulador externo (TC_1) fija la consigna del regulador interno (TC_2) el cual corrige las perturbaciones en T_r antes de que alcancen significativamente a la temperatura T

Control en cascada. Control de un reactor

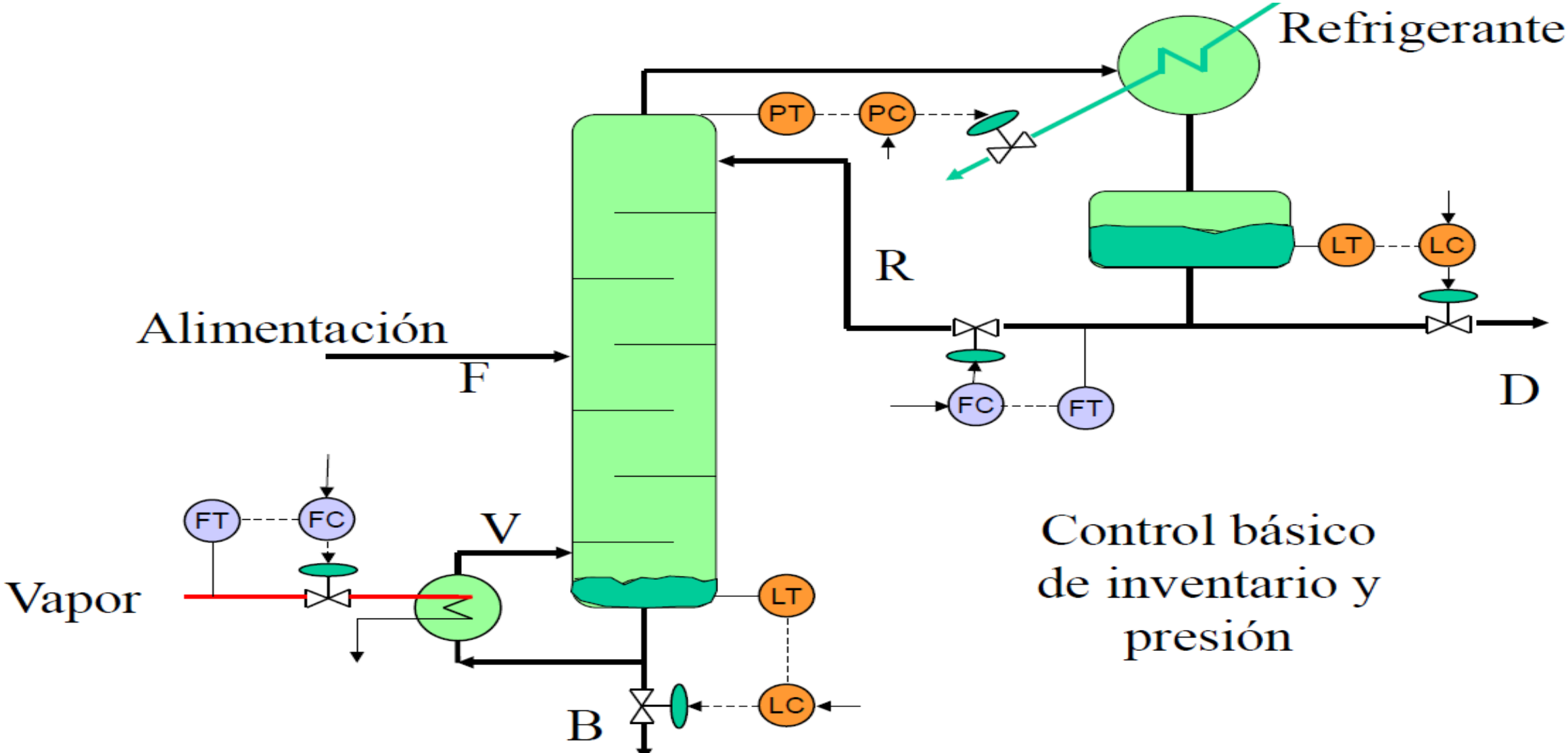




Control en cascada. Reactor de lecho

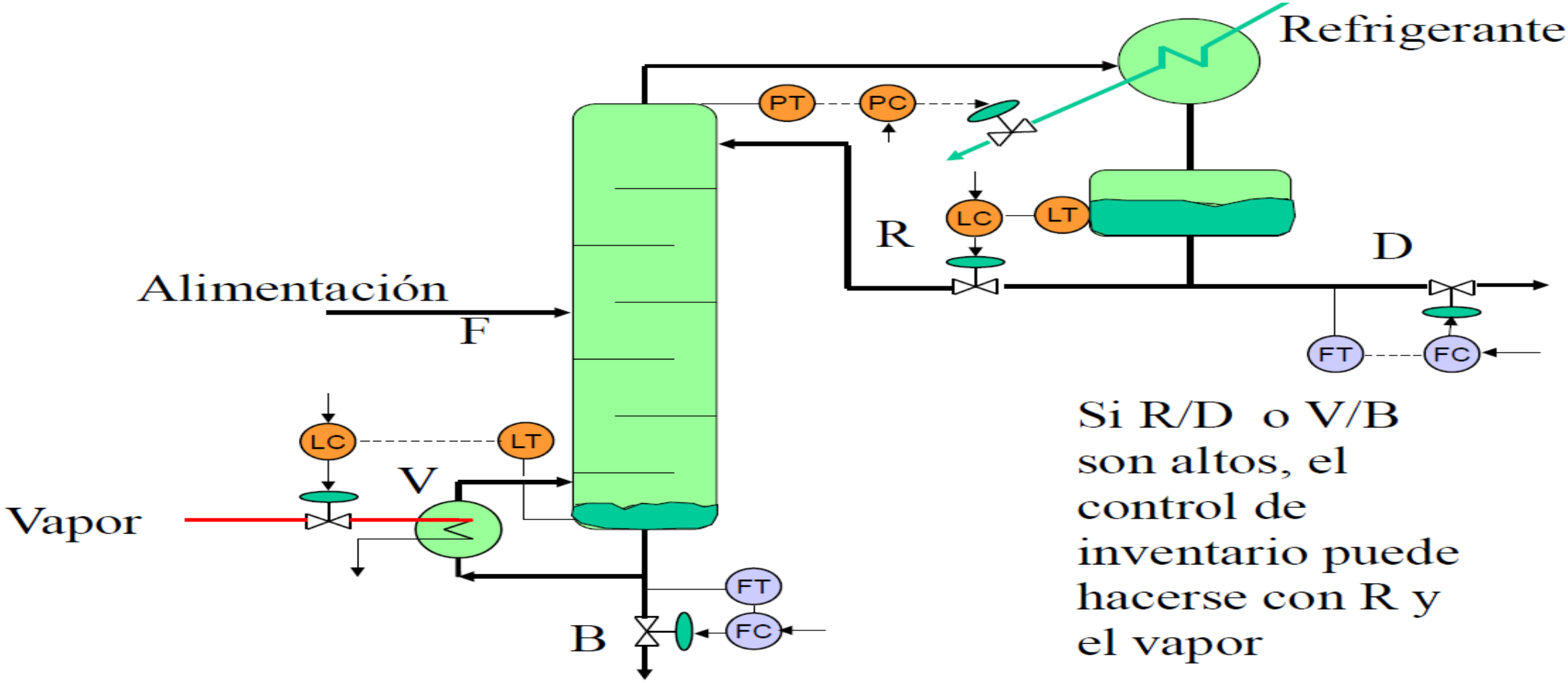


Control en cascada. Columna de destilación



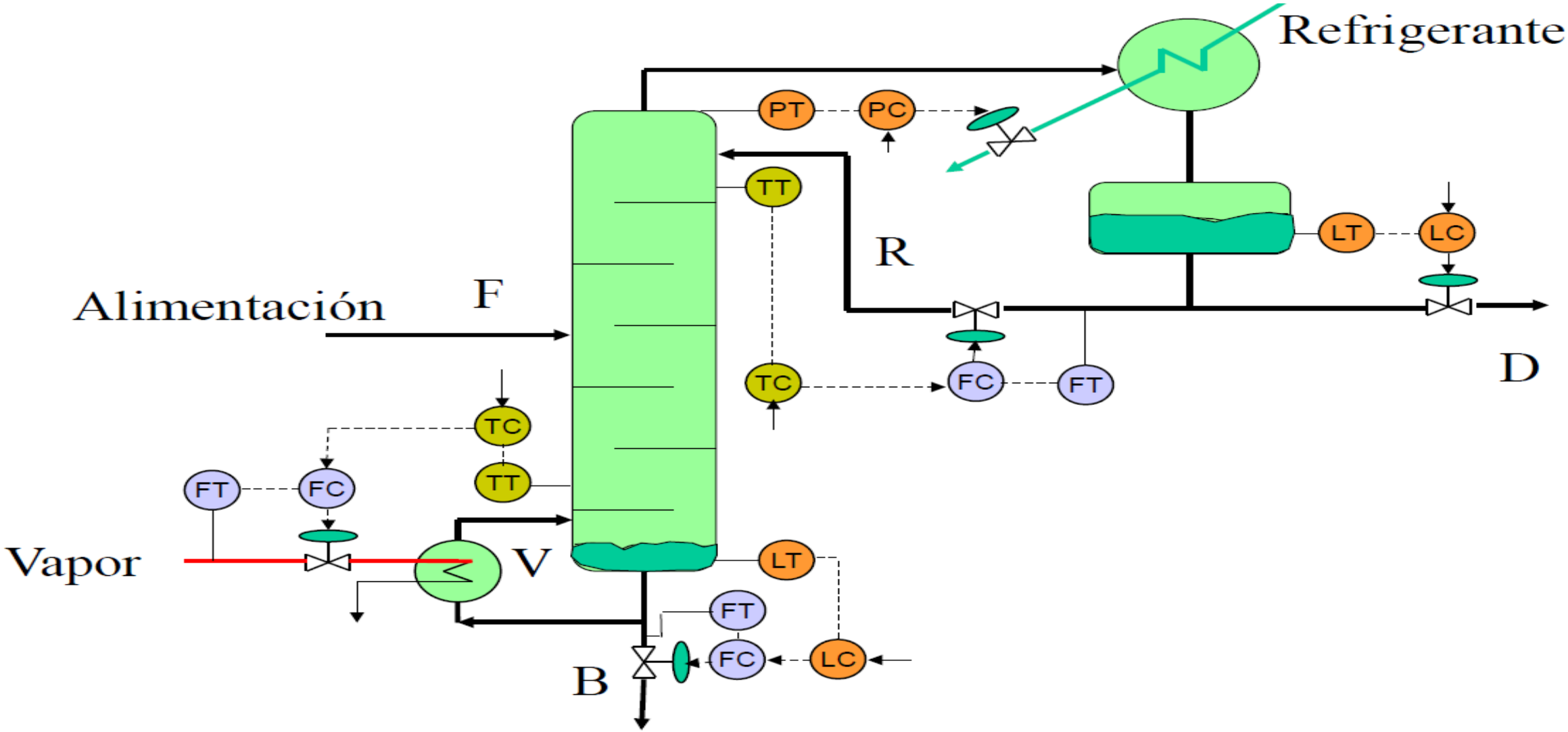
Control básico de inventario y presión

Control en cascada. Columna de destilación

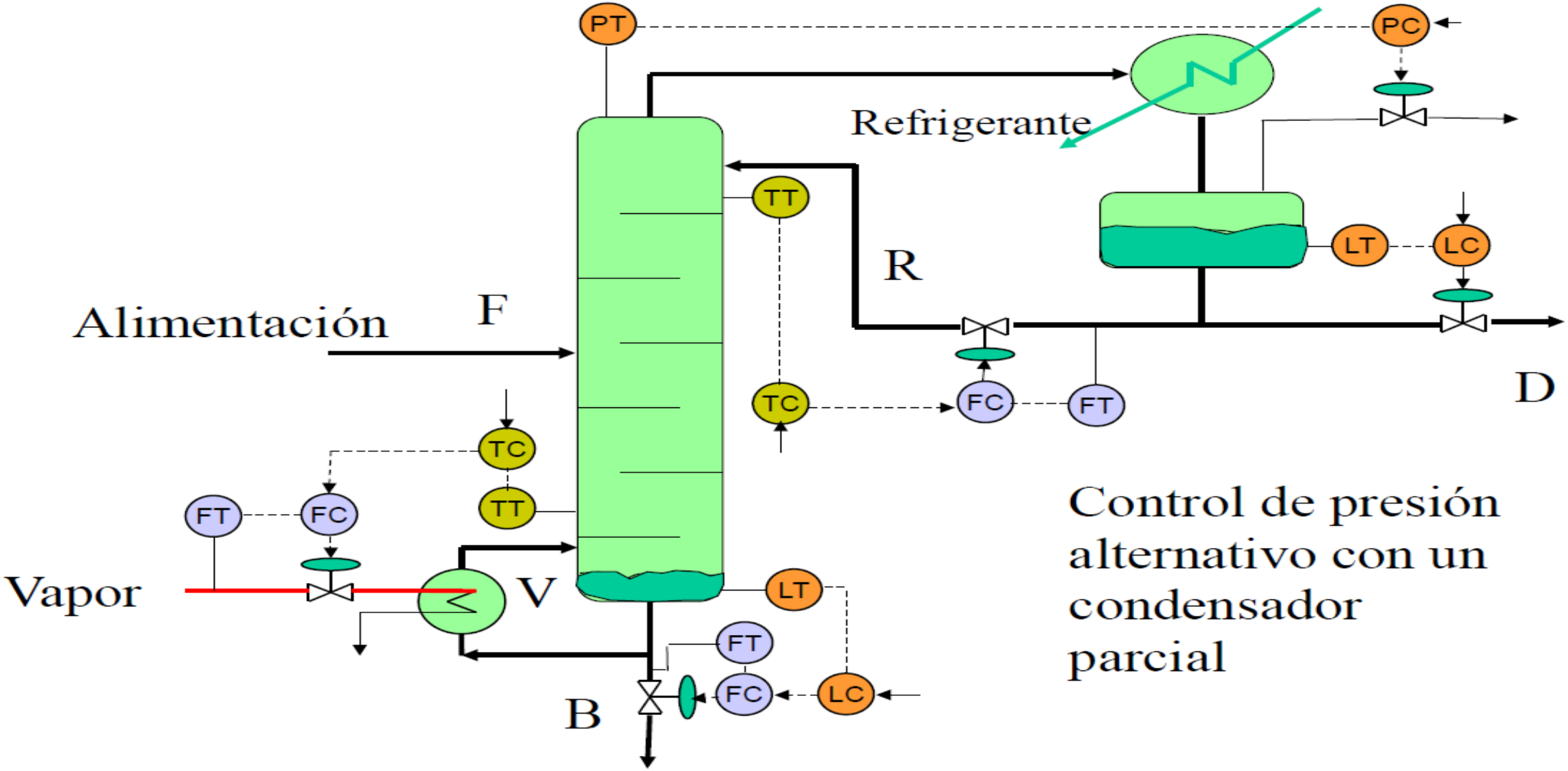


Si R/D o V/B son altos, el control de inventario puede hacerse con R y el vapor

Control en cascada. Columna de destilación

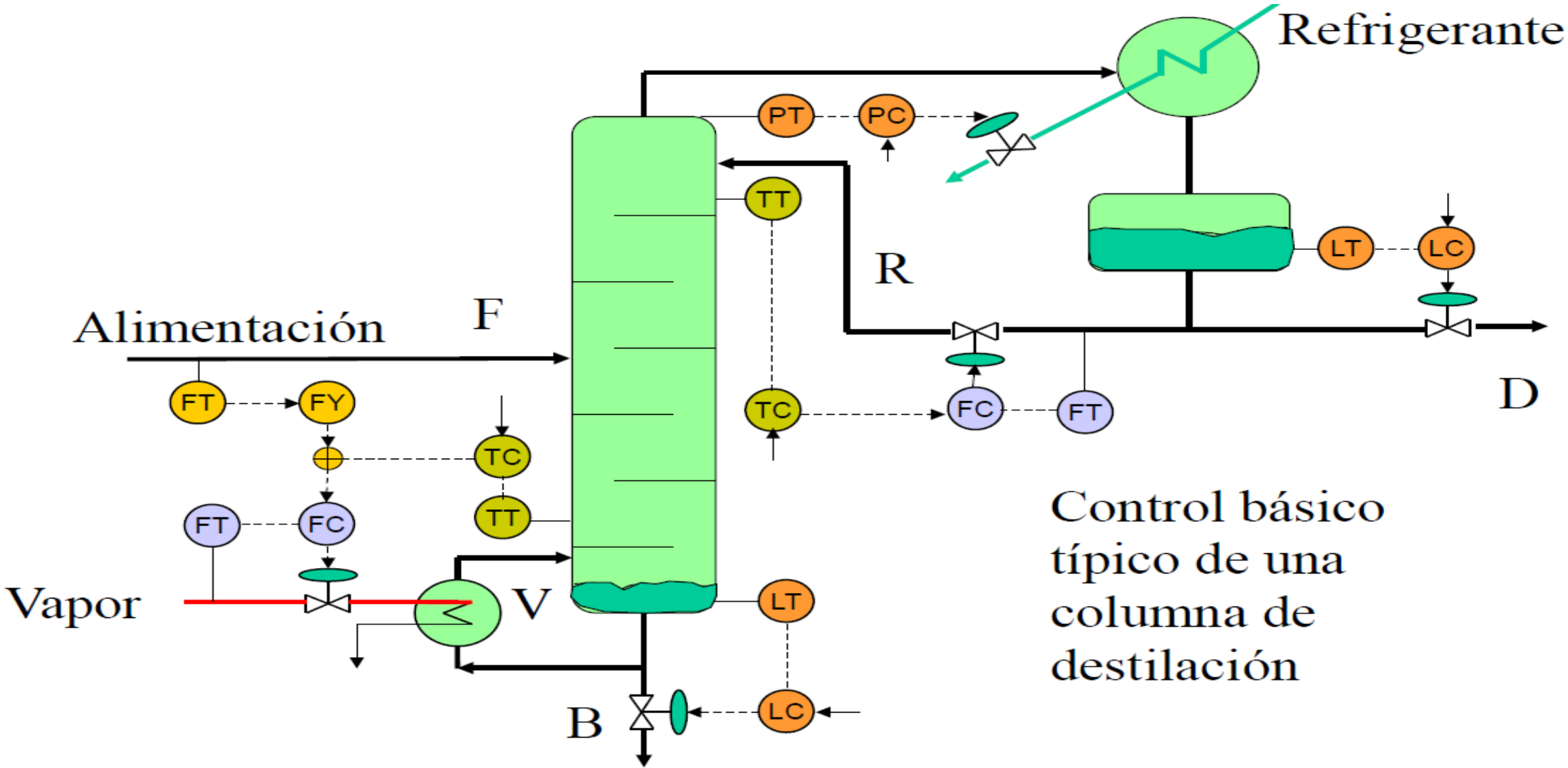


Control en cascada. Columna de destilación

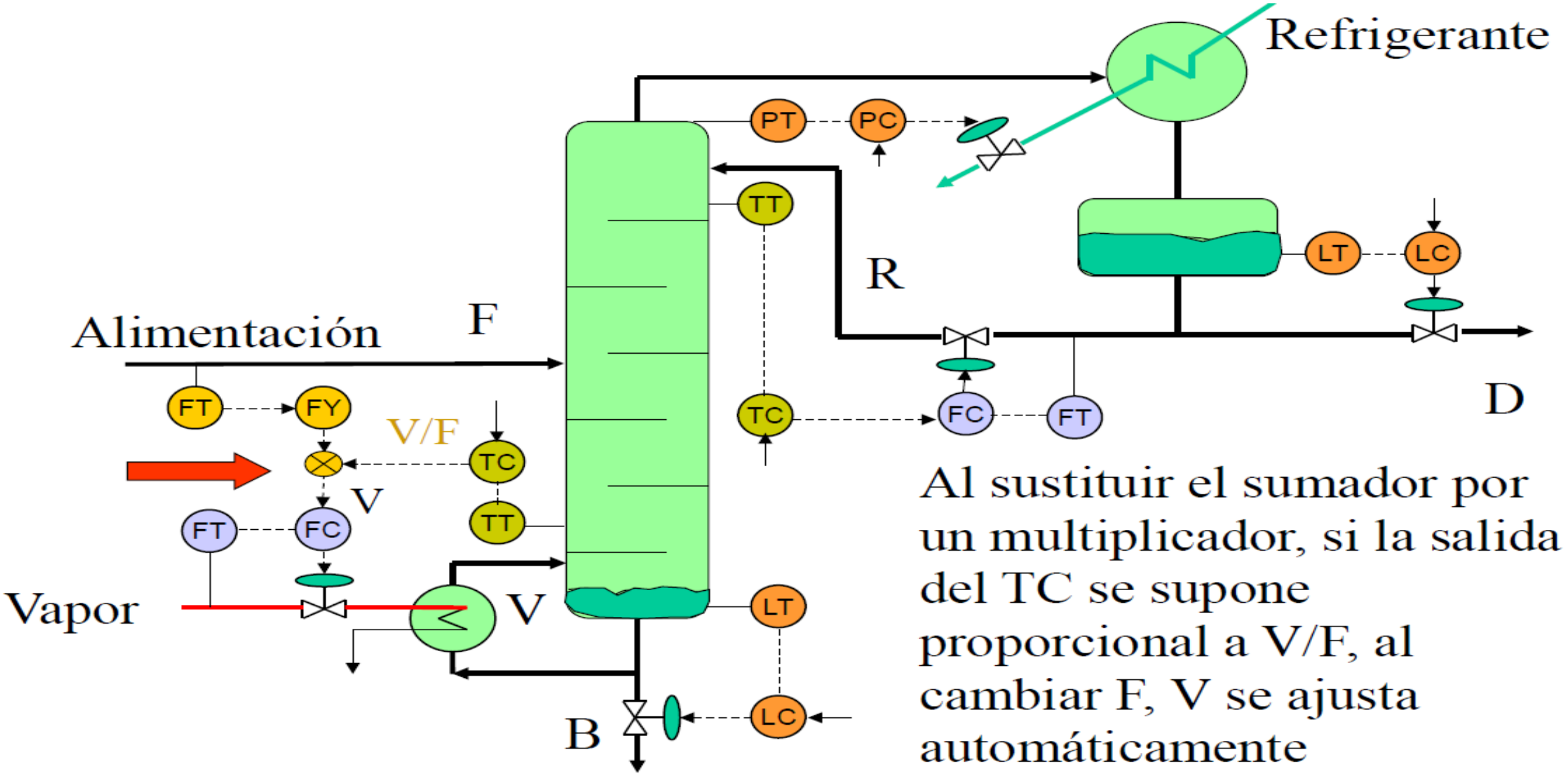


Control de presión alternativo con un condensador parcial

Control en cascada. Columna de destilación

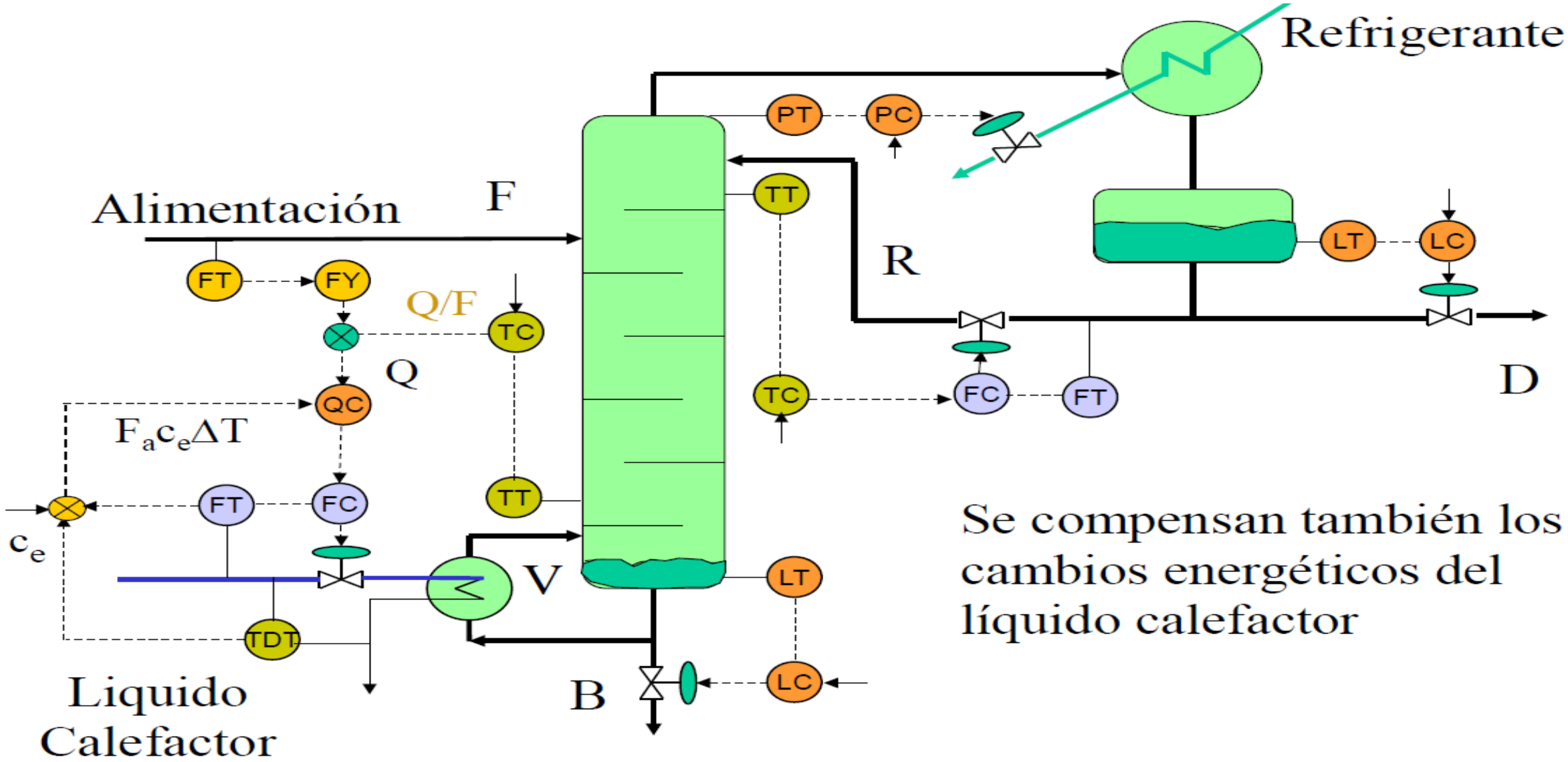


Control en cascada. Columna de destilación



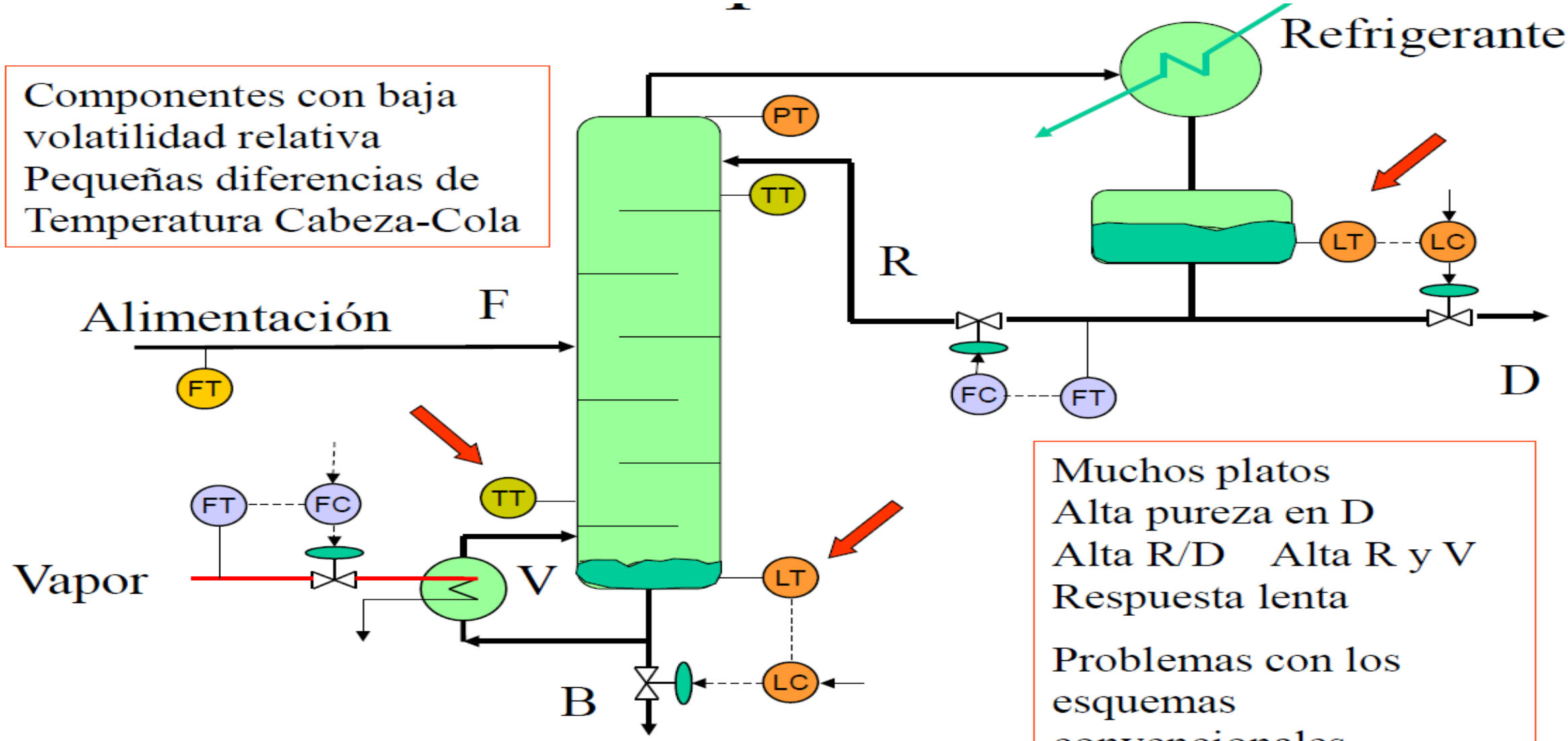
Al sustituir el sumador por un multiplicador, si la salida del TC se supone proporcional a V/F, al cambiar F, V se ajusta automáticamente

Control en cascada. Columna de destilación



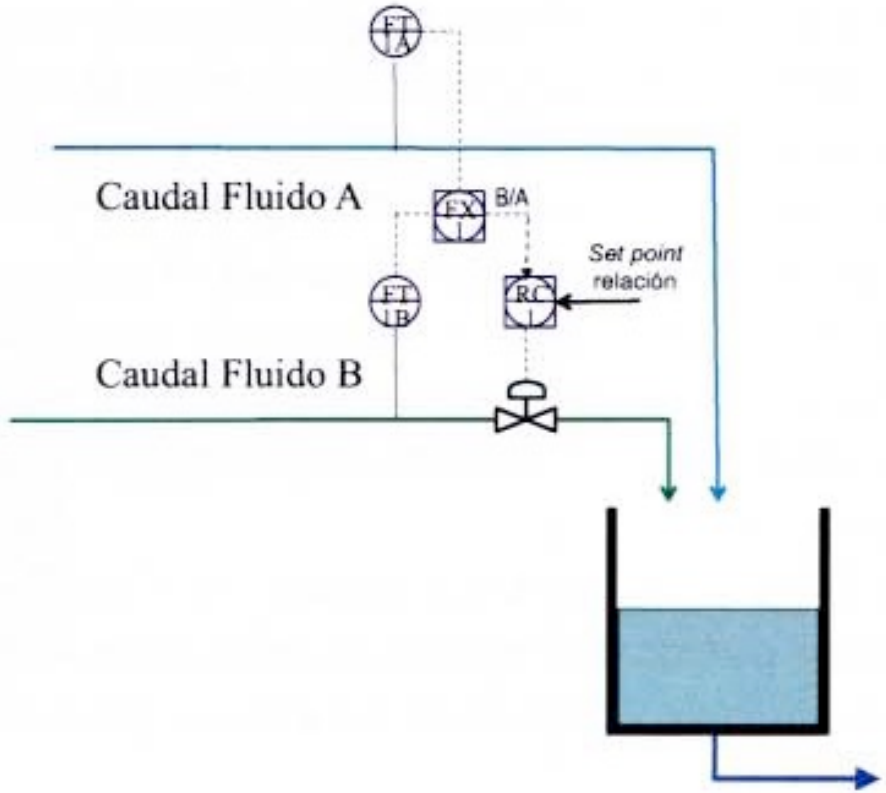
Se compensan también los cambios energéticos del líquido calefactor

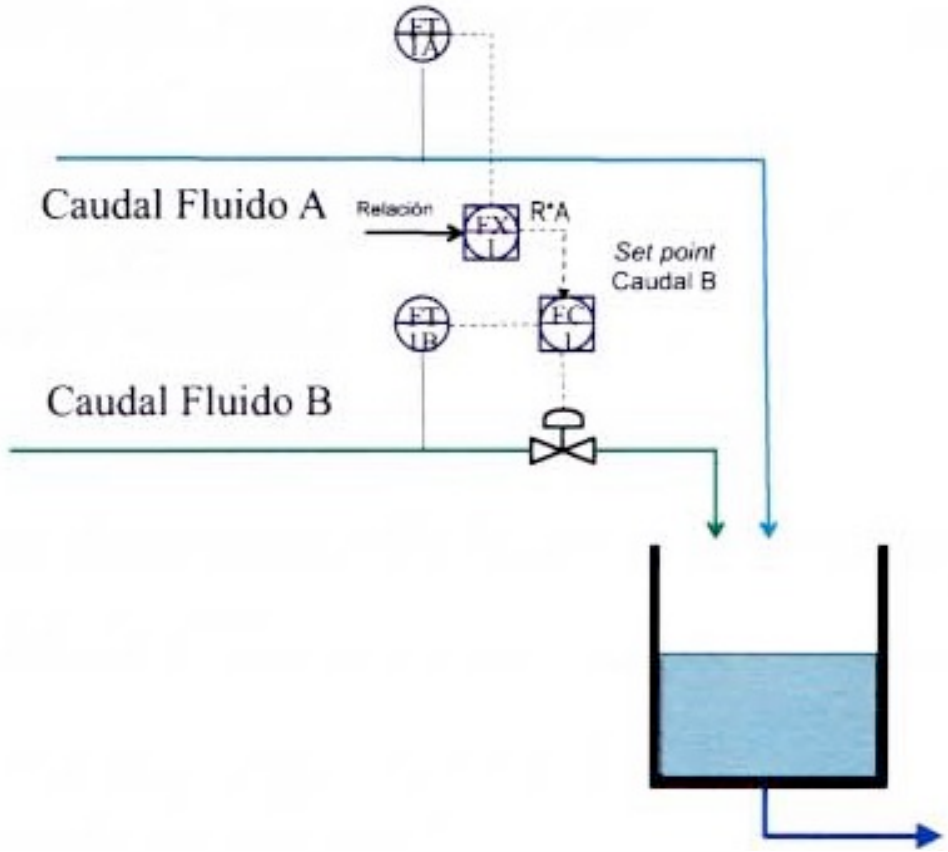
Control en cascada. Columna superfraccionadora



Control de relación (ratio)

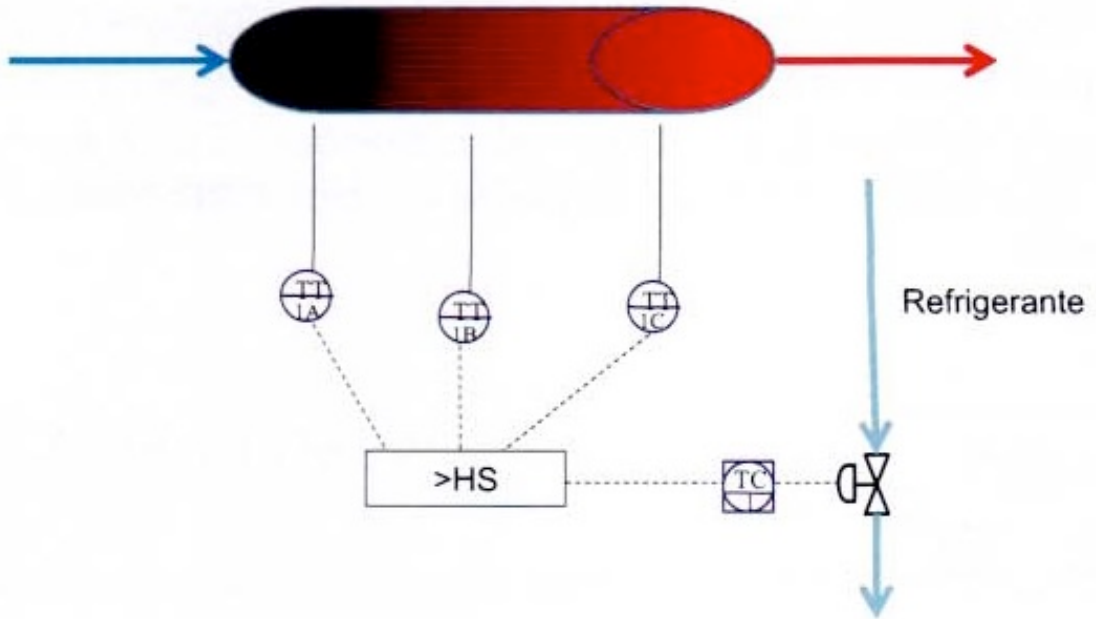
- Control entre una variable controlada y una no controlada
- Dos alternativas:



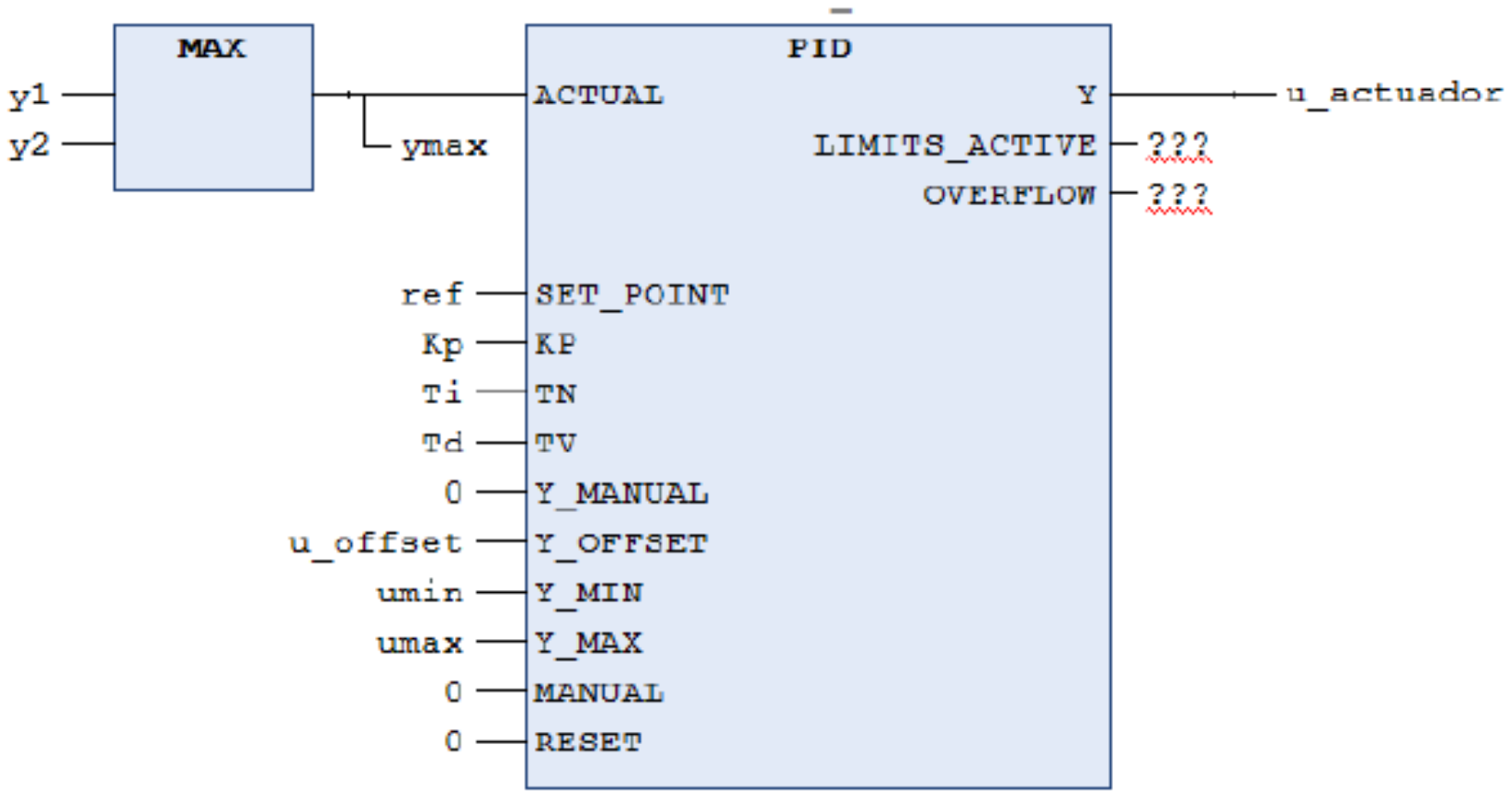


Control selectivo

- Varios sensores y un controlador
- Selección de medición que se envía al controlador

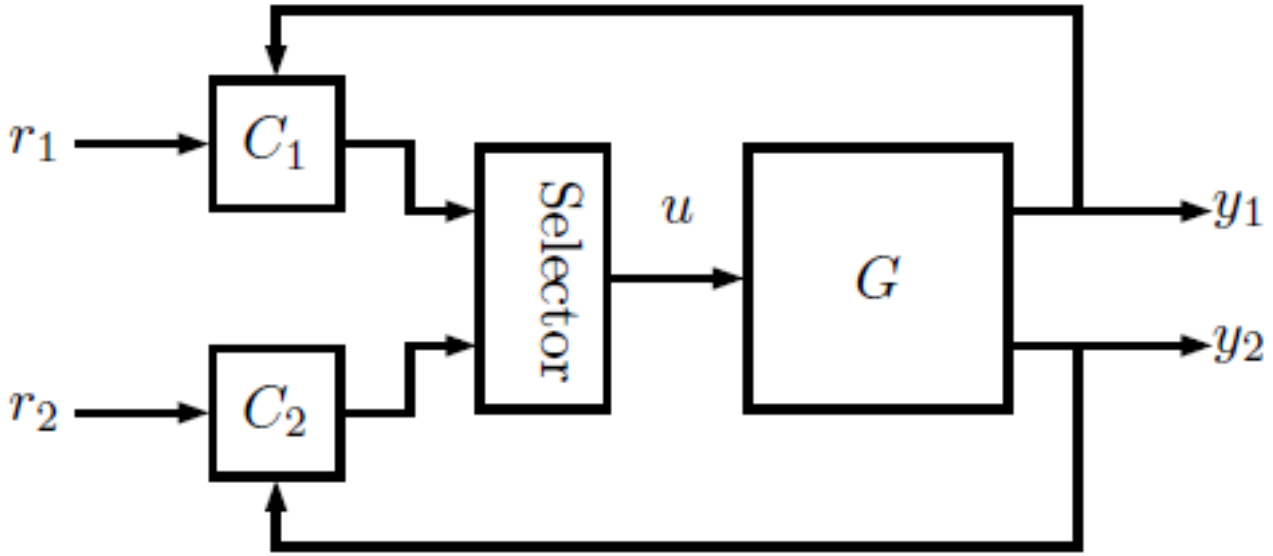


Control selectivo

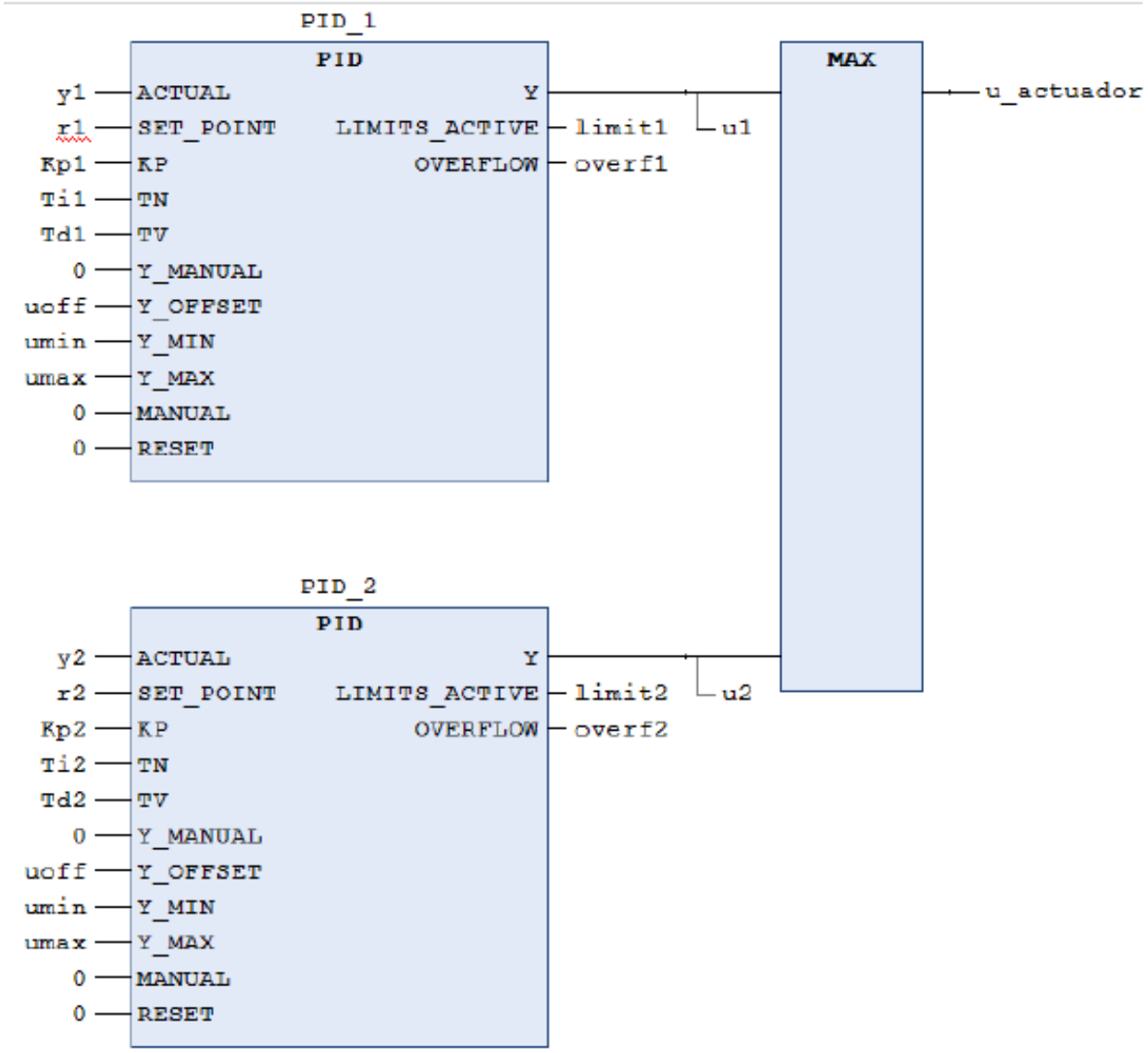


Control selectivo override

- Varios sensores y varios controladores
- Selección de la acción de control que se envía al actuador

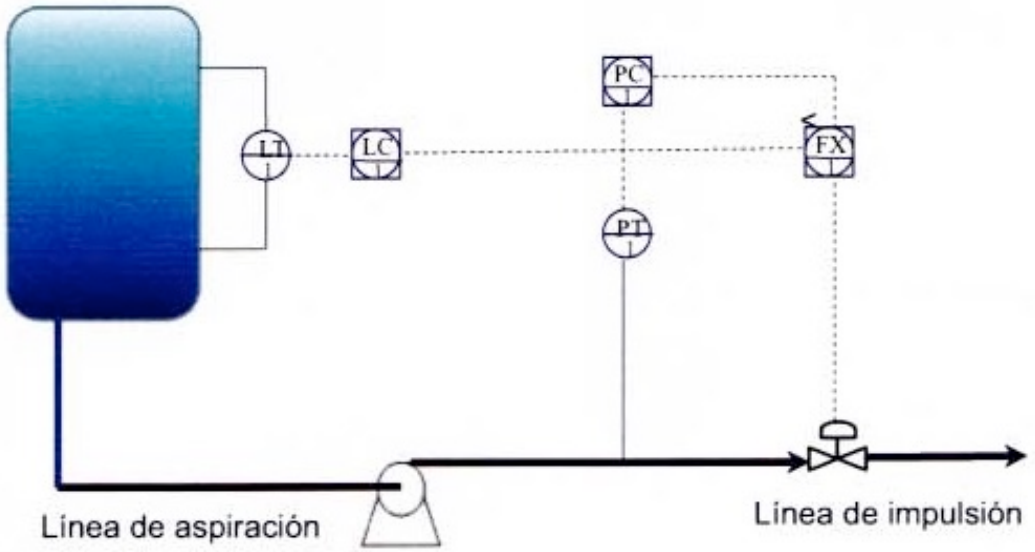


Control selectivo override



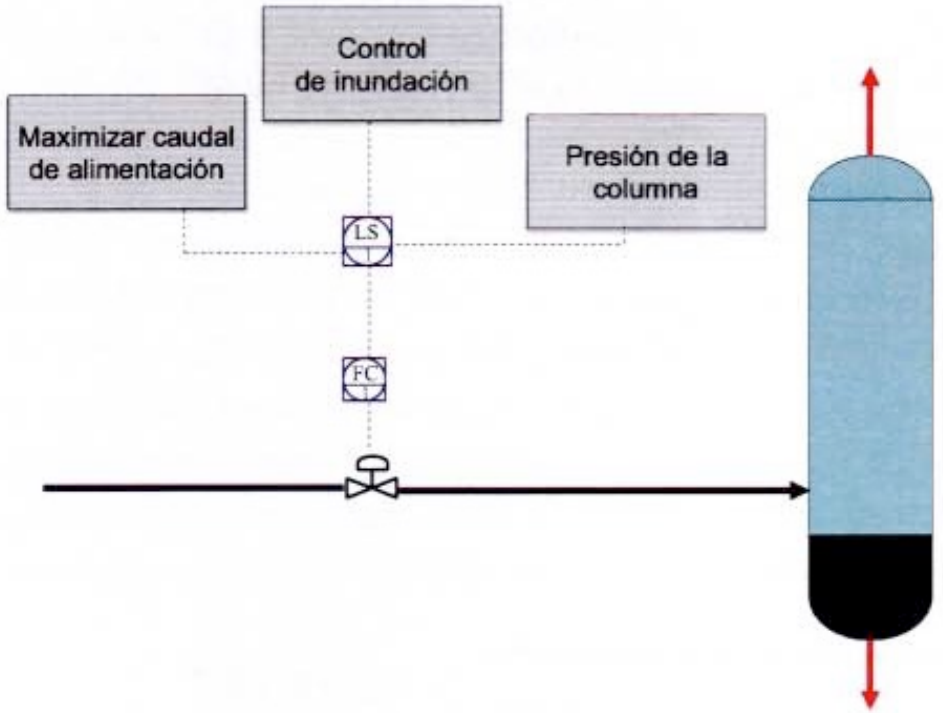
Control selectivo override

- Varios sensores y varios controladores
- Selección de la acción de control que se envía al actuador



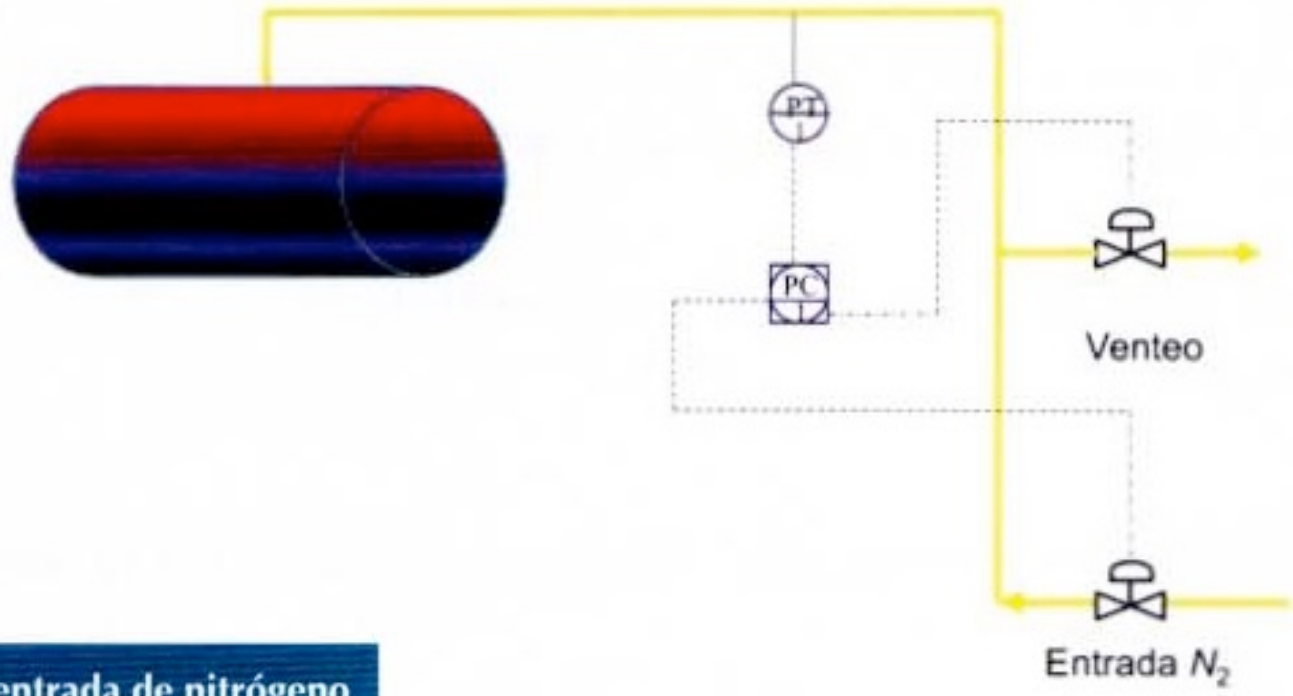
Control selectivo por restricciones

- Un sensor, un controlador y varias referencias
- Selección de la referencia que se envía al controlador para cumplir ciertas restricciones



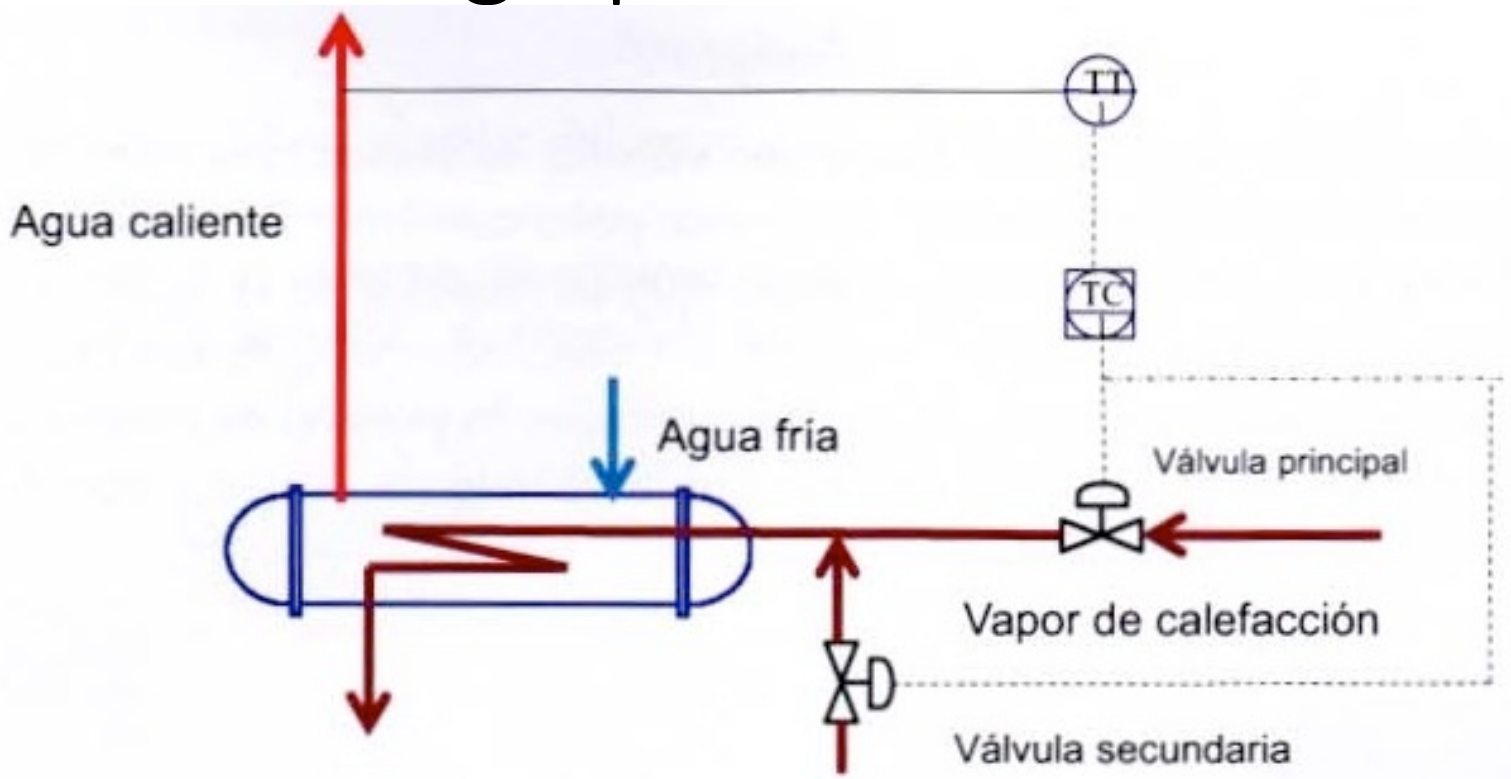
Control de rango partido

- Un sensor, 2 actuadores
- Los actuadores tienen efectos contrapuestos



Señal del controlador (mA)	Válvula venteo	Válvula entrada de nitrógeno
4	Cerrada	Abierta
12	Cerrada	Cerrada
20	Abierta	Cerrada

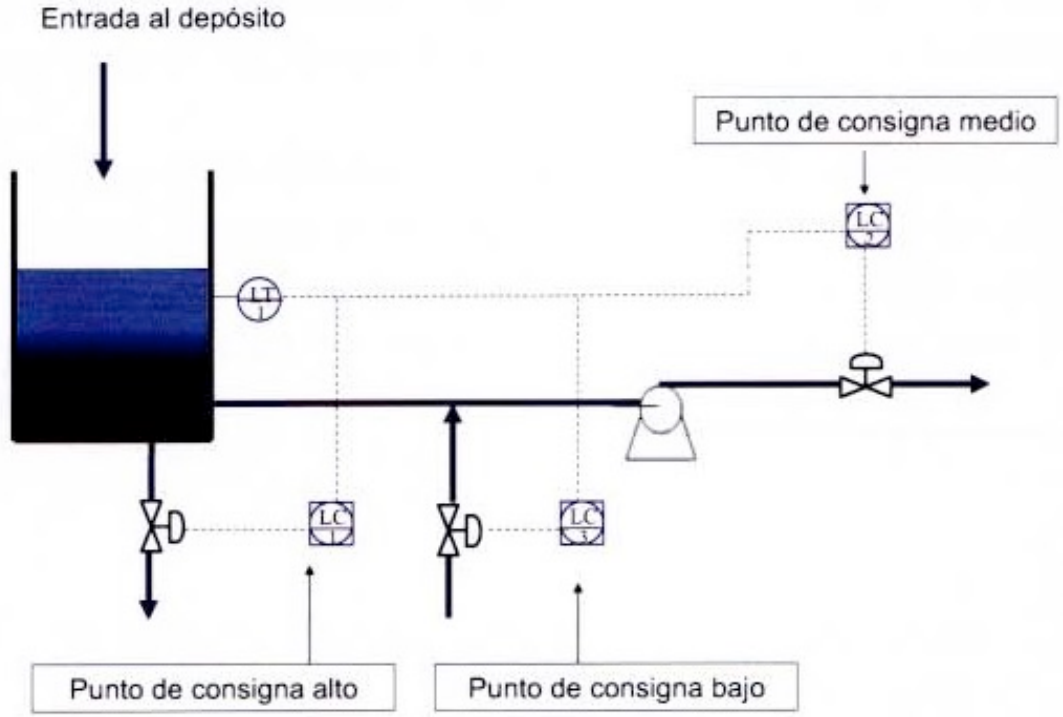
Control de rango partido



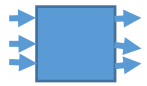
Señal del controlador (mA)	Válvula vapor principal	Válvula vapor secundaria
4	Cerrada	Cerrada
12	Abierta	Cerrada
20	Abierta	Abierta

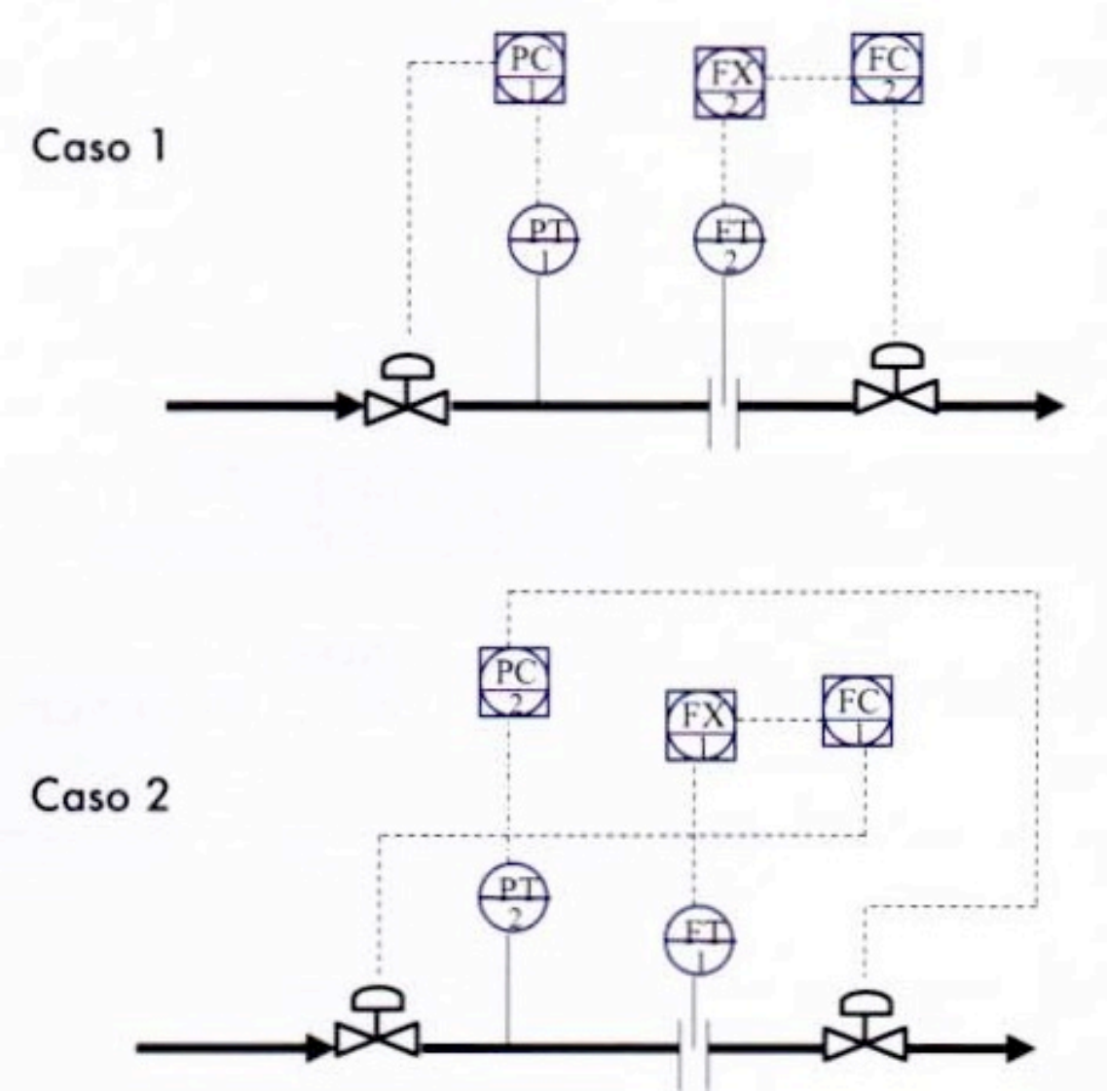
Control en paralelo

- Varios controladores, varios actuadores, diferentes consignas
- Algunos controladores sólo entran en funcionamiento por seguridad.



Control con múltiples entradas y salidas





Lazo de control. Cuestiones

- ¿Qué es un lazo de control?
- Sistema de control de lazo abierto vs. lazo cerrado
- Ventajas del control en lazo cerrado
- Desventajas del control en lazo abierto
- Operaciones que realiza un lazo de control
- Variables: entrada, salida y perturbaciones
- Partes de un lazo de control
- Diagramas de bloques