

Ingeniería de Control

Tema 7. Estructuras de control industriales

Daniel Rodríguez Ramírez
Teodoro Alamo Cantarero

Contextualización del tema

- Conocimientos que se adquieren en este tema:
 - Como aprovechar variables auxiliares para mejorar el control.
 - Como mitigar el efecto de perturbaciones a la entrada y salida de la planta.
 - Conocimientos básicos sobre los diagramas P&I.
 - Como se puede diseñar un controlador que mantenga la relación entre dos variables.
 - Como conseguir que con una sola variable manipulada se puedan mantener un conjunto de variables controladas dentro de unos límites.
 - Como sacar provecho de la existencia de varios actuadores que puedan controlar una variable dada.
 - Que se entiende por control de planta completa.

Esquema del tema

9.1. Introducción.

9.2. Control en cascada.

9.2.1. Estructura de un sistema de control en cascada.

9.2.2. Sintonización de controladores en cascada.

9.3. Control anticipativo (feed-forward).

9.3.1. Consideraciones prácticas sobre los controladores anticipativos.

9.4. Control de proporción.

9.5. Control selectivo.

9.6. Control de gama partida.

9.7. Conceptos de control de planta completa.

Introducción

- En este tema se expondrán diversas estructuras que se usan en la industria y que son más complejas que los lazos de control básicos.
- Son estructuras de control que utilizan variables auxiliares distintas a la entrada o salida de la planta.
- Técnicas que tratan de compensar el efecto que sobre el sistema ejercen perturbaciones medibles a la entrada y a la salida:
 - **Control en cascada:** detecta perturbaciones a la entrada y corrige su efecto antes de que se propague a la salida.
 - **Control anticipativo:** trata de cancelar lo más rápidamente posible el efecto de las perturbaciones medibles que afectan a la salida.
- Estructura de control que tiene como objetivo mantener la relación entre dos variables una de las cuales no es manipulable → **Control de proporción.**
- **Control selectivo** → mantener dentro de unos límites varias variables de proceso usando una sólo variable manipulada.
- **Control de gama partida** → usar varios actuadores priorizados para controlar una sola variable de proceso.
- **Control de planta completa.**

Esquema del tema

Introducción.

Control en cascada.

Estructura de un sistema de control en cascada.
Sintonización de controladores en cascada.

Control anticipativo (feed-forward).

Consideraciones prácticas sobre los controladores anticipativos.

Control de proporción.

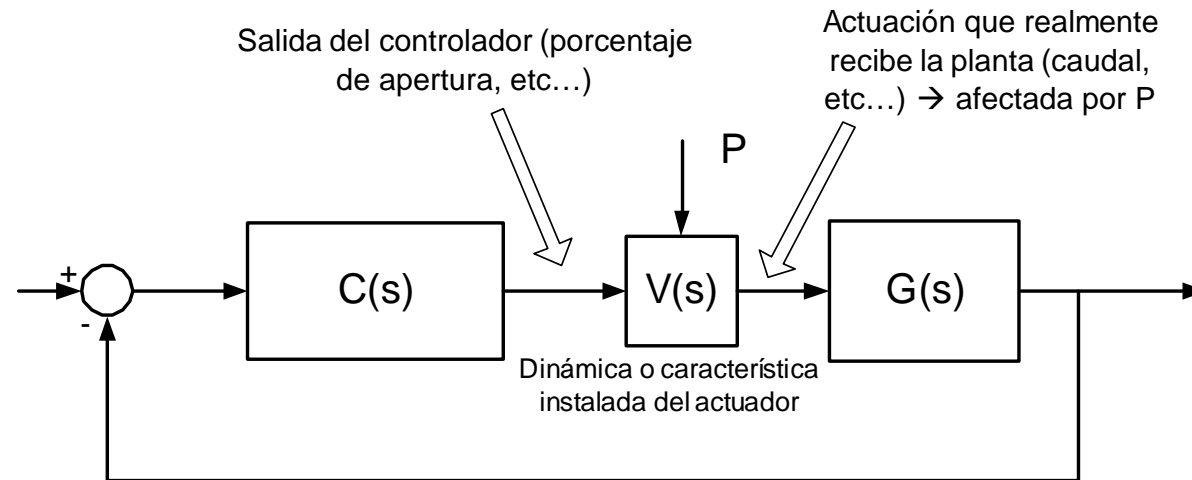
Control selectivo.

Control de gama partida.

Conceptos de control de planta completa.

Control en cascada

- Usualmente es sencillo medir las perturbaciones que puedan afectar a la salida de los actuadores.
- La idea es evitar que el efecto se acumule y afecte a la salida.
- Una perturbación a la entrada de la planta modifica el nivel de acción de control esperado por el controlador.

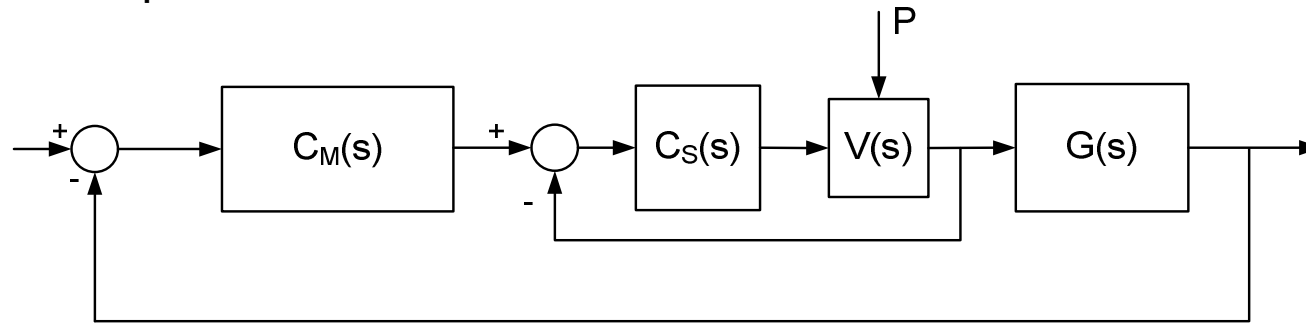


- El efecto de una perturbación a la entrada se manifiesta en la salida al cabo de un cierto tiempo → compensada por el controlador.

P incide sobre el sistema durante un tiempo sin que se haga nada.

Control en cascada

- La idea tras el control en cascada es la de actuar sobre la perturbación antes de que se manifieste sobre la salida.
- El valor de la actuación que se aplica en realidad se mide o se estima.
- Se utiliza un lazo interno de realimentación para controlar que el nivel de actuación aplicada coincida con el deseado:



- El lazo de control interno se llama secundario o esclavo y el externo primario o master.

Estructura de control maestro-esclavo

- El control secundario procura que el nivel de actuación aplicado coincida lo más posible sobre el deseado → se evita que el efecto de la perturbación se acumule.

Control en cascada

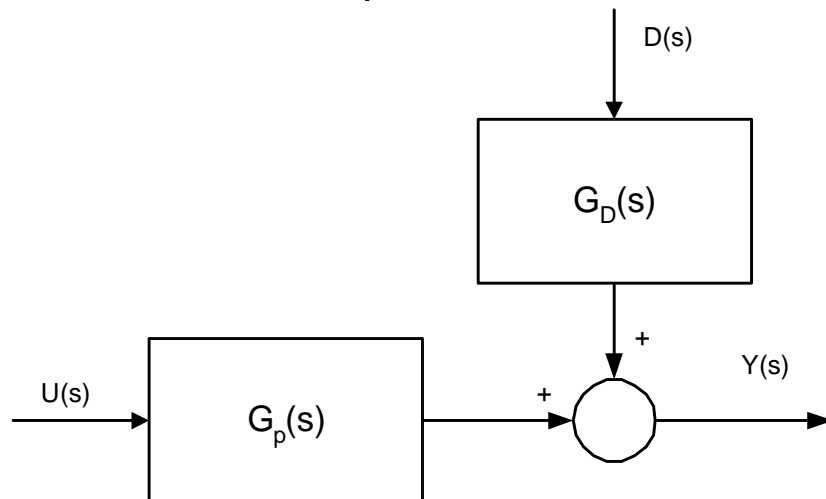
- La estructura de control en cascada es muy habitual en la industria.
- Los PID industriales suelen tener como opción tomar el punto de consigna de un controlador primario.
- Por otra parte el lazo secundario debe ser más rápido que el primario → necesario para que pueda compensar las perturbaciones en la entrada antes de que afecten a la salida.
- Esta estructura mejora el caso de perturbaciones en la entrada pero no afecta al seguimiento de consigna o a las perturbaciones a la salida.
- En general esta estrategia permite aumentar la ganancia en el primario.

Sintonía de controladores en cascada

- En general se sintonizará primero el secundario según los pasos:
 1. Obtener un modelo para el lazo secundario.
 2. Sintonizar el controlador secundario (debe ser suficientemente rápido).
 3. Obtener un modelo de la variable controlada frente a cambios en la consigna del secundario en modo automático.
 4. Sintonizar el controlador primario.

Control Anticipativo

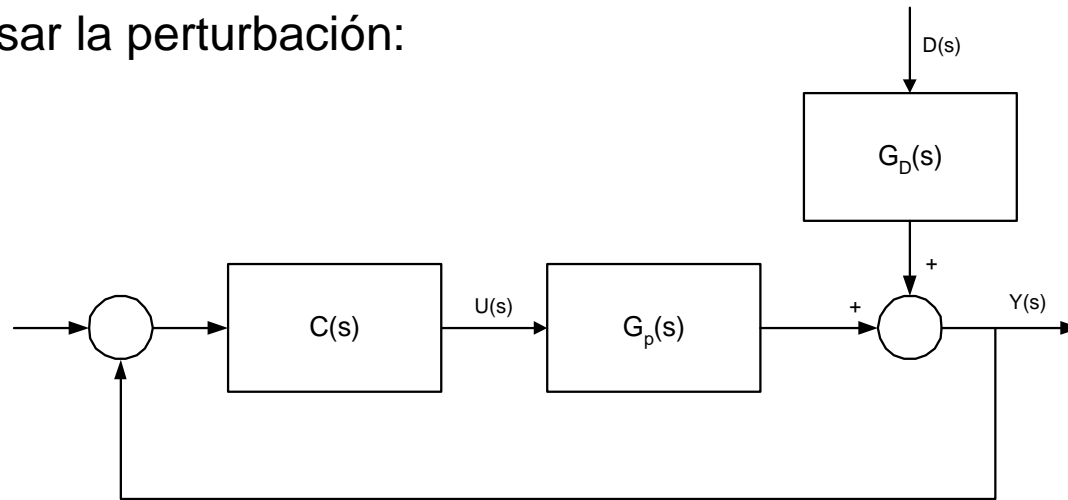
- Un sistema de control realimentado corrige las perturbaciones sobre la salida después de que estas afecten a la salida.
- La idea del control anticipativo es medir las perturbaciones a la salida y actuar antes de que afecten → [modelo de la perturbación](#).
- Modelo de la planta y de las perturbaciones → ¿ Control en B.A. ?, no:
 - No es posible medir todas las perturbaciones.
 - Errores de modelado.
 - Controlador anticipativo resultante no realizable.
- Lo habitual es que el control anticipativo compense las perturbaciones más importantes y el lazo de realimentación las demás.
- El control anticipativo trata sistemas con perturbaciones a la salida:



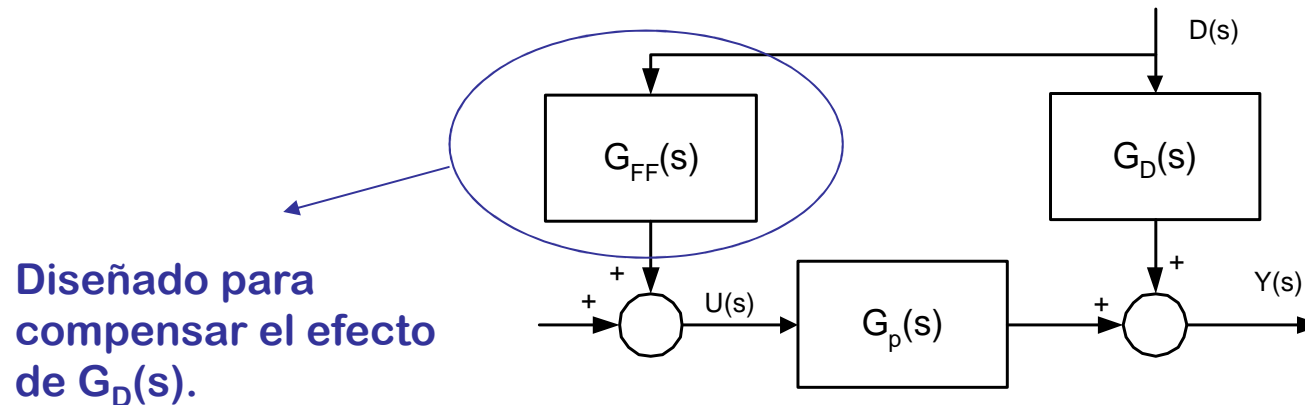
$$Y(s) = G_p(s)U(s) + G_d(s)D(s)$$

Control anticipativo

- En un sistema de control realimentado clásico, el controlador es el que debe compensar la perturbación:



- Un control anticipativo usa la medida de la perturbación para actuar sobre la planta compensándola.



Diseñado para compensar el efecto de $G_D(s)$.

Control anticipativo

- En un esquema de control anticipativo la relación entre la perturbación y la salida es:

$$Y(s) = (G_D(s) + G_P(s)G_{FF}(s)) D(s)$$

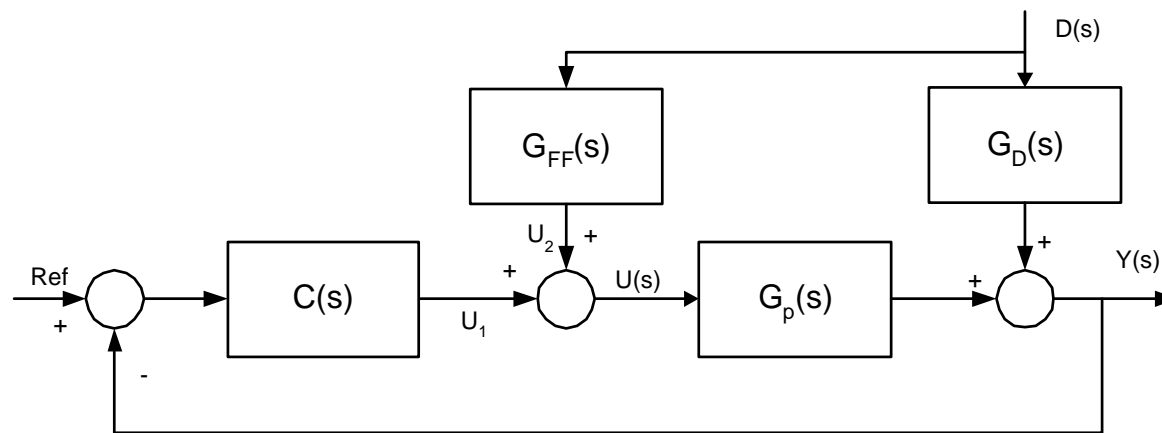
- $G_{FF}(s)$ se puede calcular para compensar el efecto de la perturbación:

$$G_D(s) + G_P(s)G_{FF}(s) = 0$$

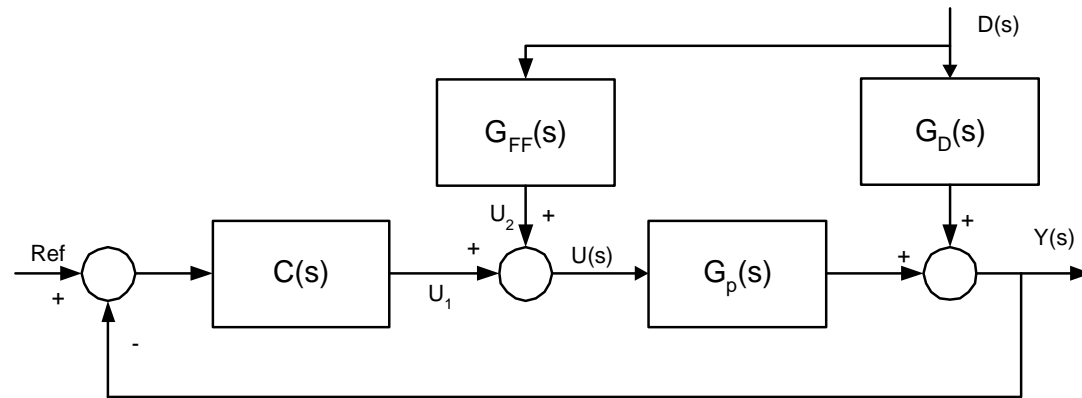
es decir:

$$G_{FF}(s) = -\frac{G_D(s)}{G_P(s)}$$

- A fin de compensar los errores en el modelo de la planta y la perturbación el controlador anticipativo se incluye en un lazo de realimentación:



Feedforward + control realimentado



- La función de transferencia de bucle cerrado es:

$$Y(s) = \frac{G_p(s)C(s)}{1 + G_p(s)C(s)}R(s) + \frac{G_d(s) + G_{ff}(s)G_p(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)}D(s)$$

- La ecuación característica del sistema viene dada por:

$$1 + G_p(s)C(s) = 0$$

Obsérvese que no aparece la $G_{FF}(s)$. Por tanto la estabilidad del sistema en bucle cerrado no se ve perjudicada por el feed-forward.

- Si se conocen con exactitud $G_d(s)$ y $G_p(s)$, el efecto de la perturbación se anula \rightarrow no es realista y parte del efecto de $D(s)$ se manifestará en la salida, aunque será compensada por $C(s)$.

Consideraciones prácticas sobre los controladores anticipativos

- El controlador anticipativo resultante puede no ser realizable.
- El caso más habitual es cuando el retraso entre la perturbación y la salida es menor que el retraso entre la entrada y la salida:

$$G_D(s) = \frac{K_D}{1 + \tau_D s} e^{-t_{mD}s} \quad G_P(s) = \frac{K_P}{1 + \tau_P s} e^{-t_{mP}s}$$

- El controlador anticipativo resultante es:

$$G_{FF}(s) = -\frac{K_D}{K_P} \frac{1 + \tau_P s}{1 + \tau_D s} e^{-(t_{mD} - t_{mP})s}$$

- Esto es realizable sólo si $(t_{mD} - t_{mP}) \geq 0$, que no se cumple si $t_{mD} < t_{mP} \rightarrow$ adelanto imposible de realizar.
- El efecto de D se transmite más rápidamente que el efecto de U \rightarrow no se puede actuar a tiempo sobre el efecto de D mediante U.

Redes de avance/retraso en control anticipativo

- Es habitual caracterizar la dinámica de un proceso mediante:

$$G_P(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\alpha s}$$

- De la misma manera:

$$G_D(s) = \frac{K_d}{\tau_d s + 1} e^{-\beta s}$$

- Por lo que el compensador anticipativo será:

$$G_{FF}(s) = -\frac{K_d e^{-\beta s} \tau s + 1}{\tau_d s + 1 K e^{-\alpha s}}$$

resultando:

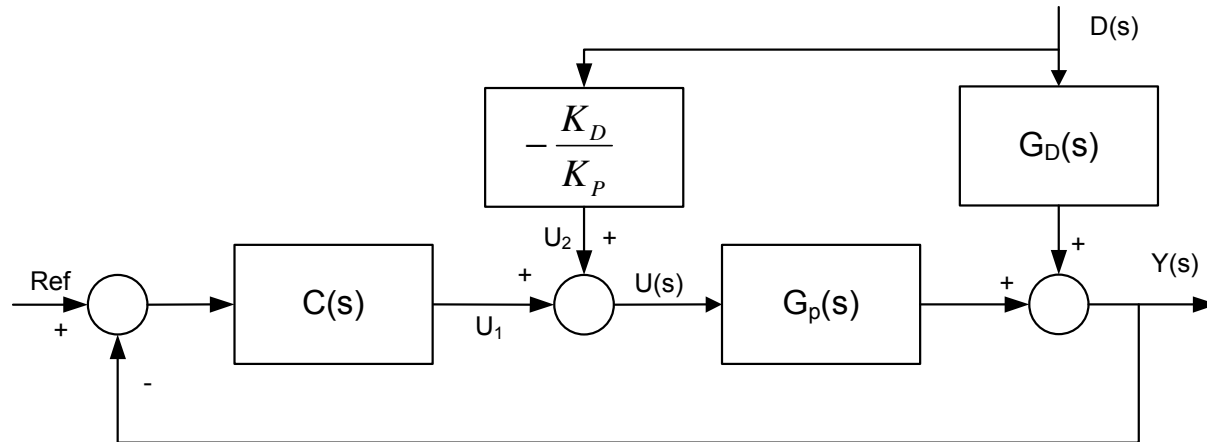
$$G_{FF}(s) = -\frac{K_{ff}(\tau s + 1)}{\tau_d s + 1} e^{-\gamma s} \quad K_{ff} = \frac{K_d}{K}, \quad \gamma = \beta - \alpha$$

El compensador resultante es una red de retraso/avance más retraso

Consideraciones prácticas sobre los controladores anticipativos

- Obtener un modelo preciso de la perturbación puede ser difícil → compensarla totalmente casi imposible.
- Una alternativa menos ambiciosa es compensar el permanente de la perturbación mediante un **controlador anticipativo estático**:

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{FF}(s) = - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{G_D(s)}{G_P(s)} = - \frac{K_D}{K_P}$$



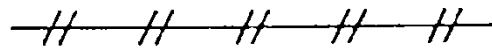
- Este tipo de control anticipativo también reduce el efecto del transitorio de la perturbación.

Algunos símbolos frecuentes en los diagramas P&I

- Los diagramas P&I (Piping & Instrument) incluyen:
 - Instrumentación de control.
 - Representación de los equipos de proceso.
 - Tuberías e interconexiones entre instrumentos.
 - Bombas, válvulas, etc...



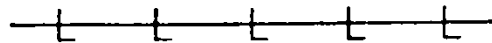
Conexión del proceso



Transmisión de señal neumática



Transmisión de señal eléctrica



Transmisión de señal hidráulica



Transmisión de señal sin hilos

	Primera letra	Letras sucesivas
A	Análisis	Alarma
C	Conductividad	Control
D	Densidad	
E	Voltaje	Elemento primario
F	Caudal (Flow)	
H		Alto
I	Intensidad	Indicador
K	Tiempo	Estación de control
L	Nivel (Level)	Bajo
M	Humedad (Moisture)	Medio
P	Presión	Punto
R	Radioactividad o relación	Registro o impresión
S	Velocidad (Speed)	Interruptor (Switch)
T	Temperatura	Transmisión
V	Viscosidad	Válvula
W	Peso (Weight)	
Y		Función especial o calculador
Z	Posición	Servo

Algunos símbolos P&I

TT : Transmisor de temperatura
TC : Controlador de temperatura
FT : Transmisor de caudal
FC : Controlador de caudal
LR : Registrador de nivel
TRC : Controlador de
temperatura con registrador
FY : Operación o función de
caudales.

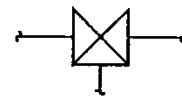
Algunos símbolos de diagramas P & I



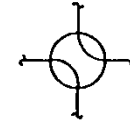
Válvula de globo



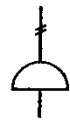
Válvula de mariposa



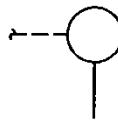
Válvula de tres vías



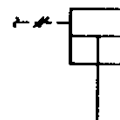
Válvula alternativa



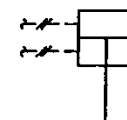
Accionador neumático



Motor



Émbolo de acción simple



Émbolo de doble acción



Instrumento local



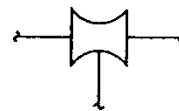
Instrumento en centro de control



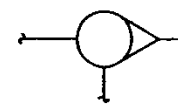
Instrumento detrás del panel



Caudalímetro de placa orificio



Caudalímetro Venturi

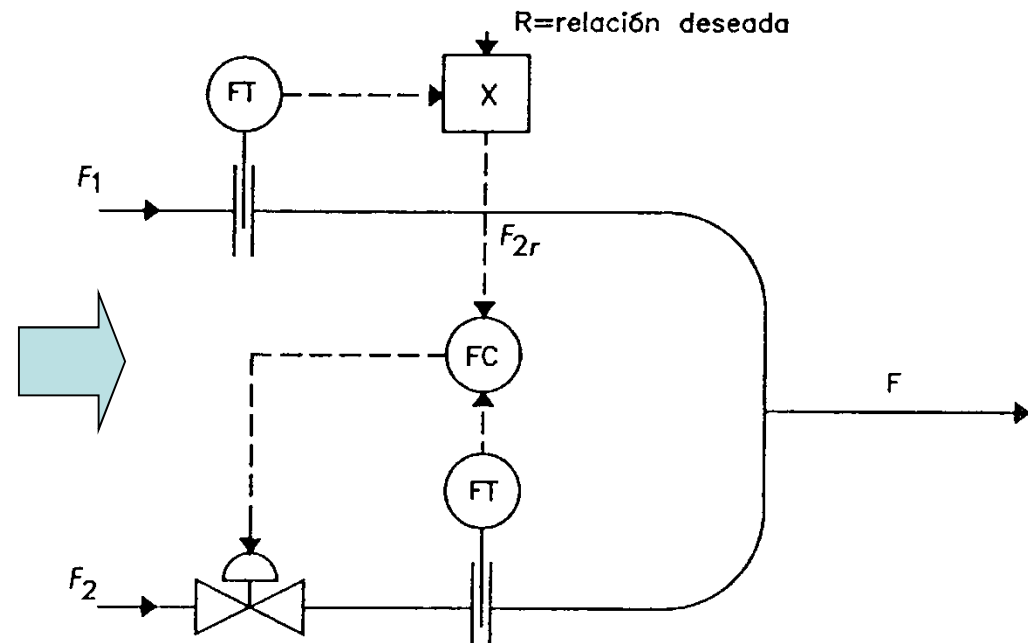


Rotámetro

Control de proporción (ratio control)

- Tipo especial de control anticipativo usado en procesos en los que hay que mantener una relación constante entre algunas de sus variables.
- Una de las variables no es manipulable pero si medible → actúa como perturbación.
- La otra es la que se manipula para mantener la relación.
- Muy utilizado en mezclas para obtener composición o temperatura intermedia.
- Ejemplo: mezcla de dos corrientes, de caudales F_1 y F_2 , ambos medibles pero sólo F_2 es manipulable a través de una válvula. Se desea mantener la relación entre F_1 y F_2 .

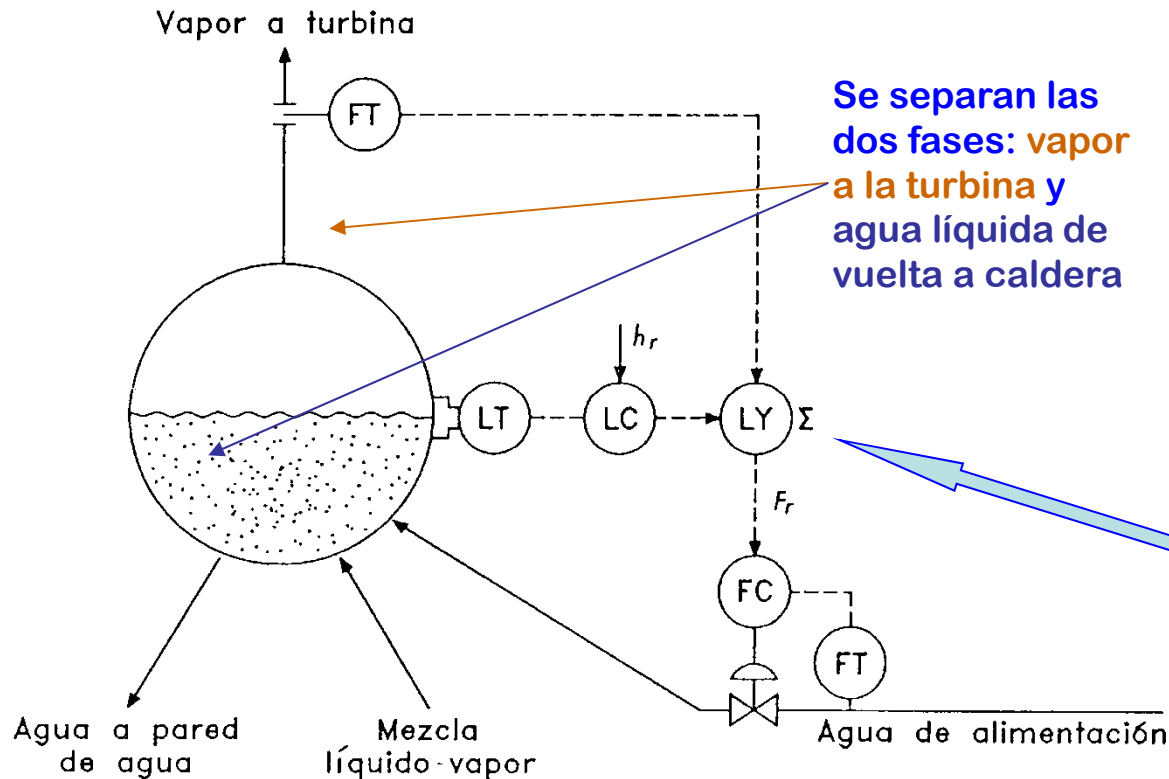
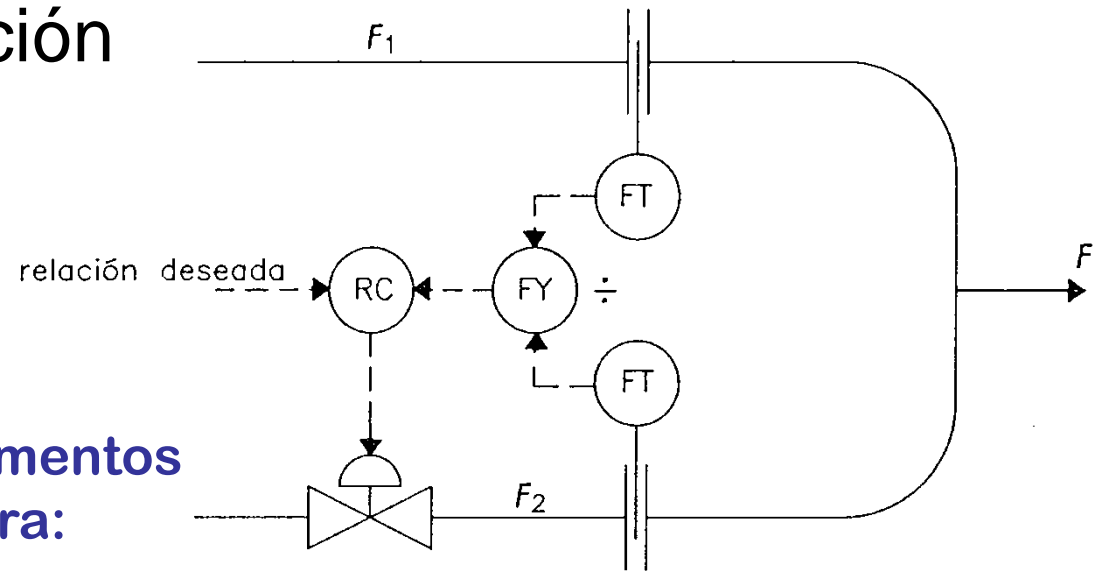
Se mide F_1 y a partir de la relación deseada se obtiene la consigna para F_2



Control de proporción

Calcular en línea la relación de caudales y controlarla

Control de nivel de tres elementos en el calderín de una caldera:



Se separan las dos fases: vapor a la turbina y agua líquida de vuelta a caldera

Se debe mantener una relación de caudales másicos entre vapor y agua de reposición = 1.

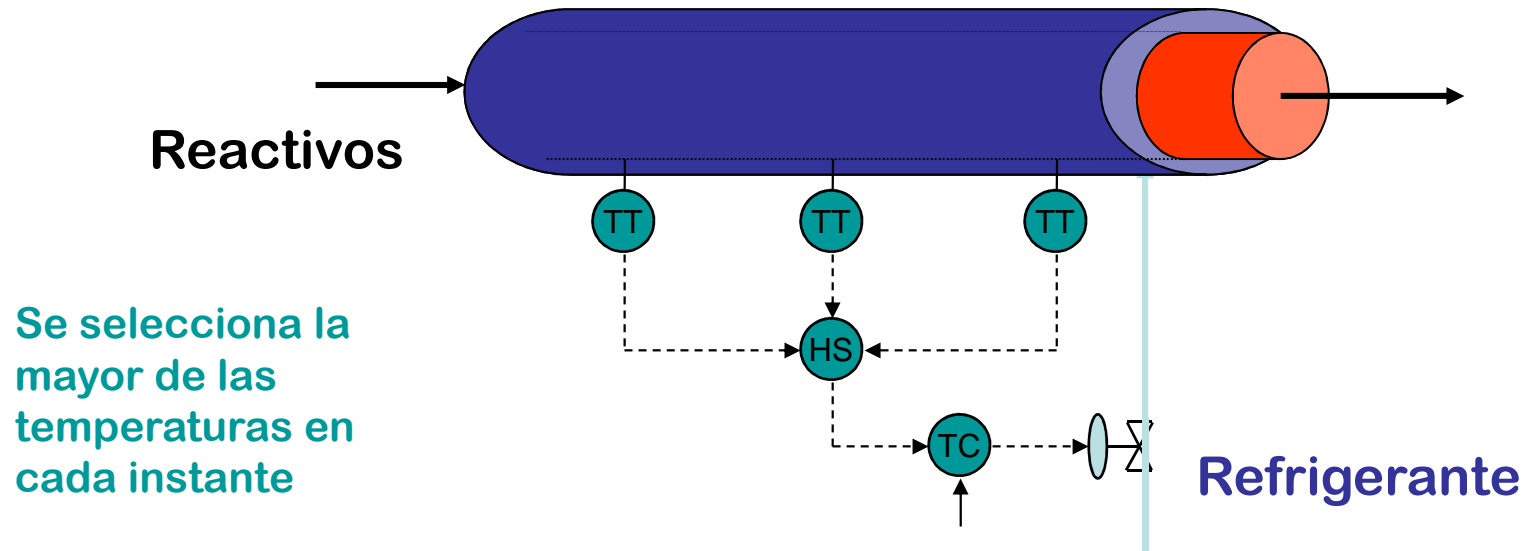
Los errores en la medida de caudal másico vapor se corrigen sumando la salida de un controlador de nivel

Control selectivo

- Tiene como misión mantener bajo control **varias** variables manipulando **una sola** entrada.
- No se puede obtener control perfecto → mantener las variables en unos límites.
- Los objetivos pueden ser contrapuestos, debiendo seleccionar el más prioritario.

Reactor Tubular

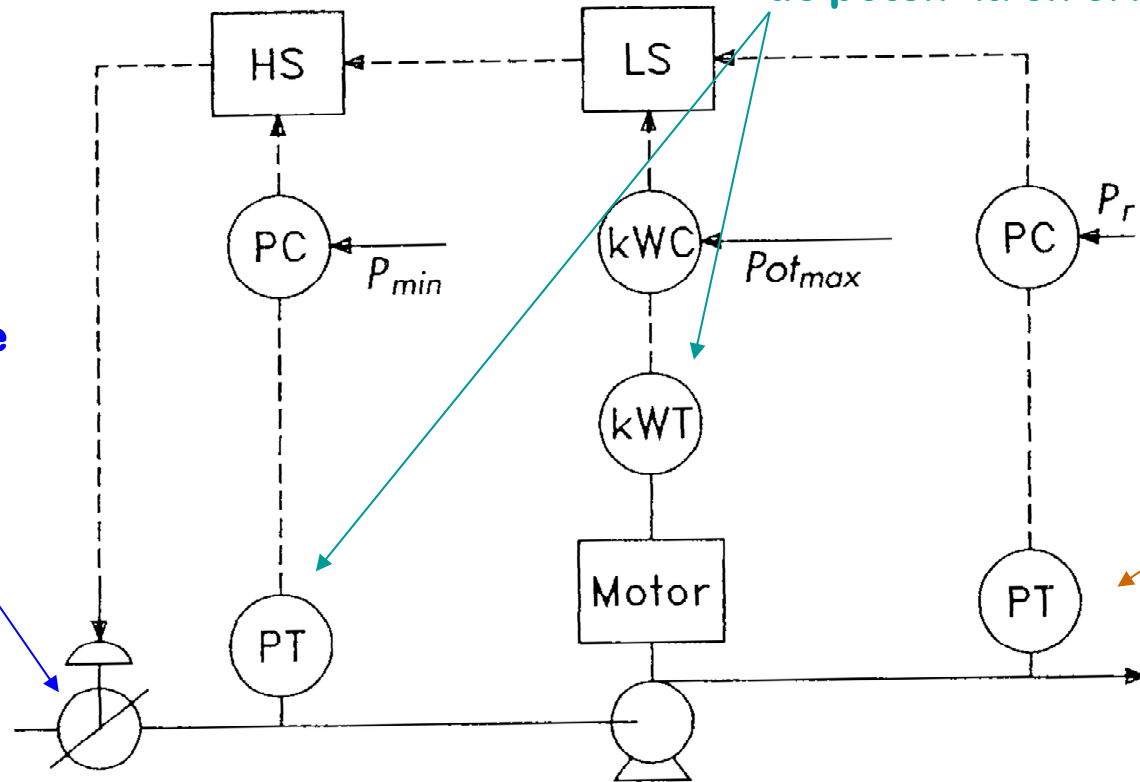
La temperatura no debe exceder el límite máximo a lo largo del reactor.



Control selectivo

- Ejemplo: Compresor que suministra gas a presión. El motor no debe sobrepasar una potencia máxima y la presión en la aspiración debe ser superior a un mínimo.
- Al aumentar la presión demandada el controlador abre válvula aumentando la potencia consumida y la presión en aspiración. Al disminuir la demanda disminuyen las variables restringidas.

UNICA Variable manipulada:
apertura del damper

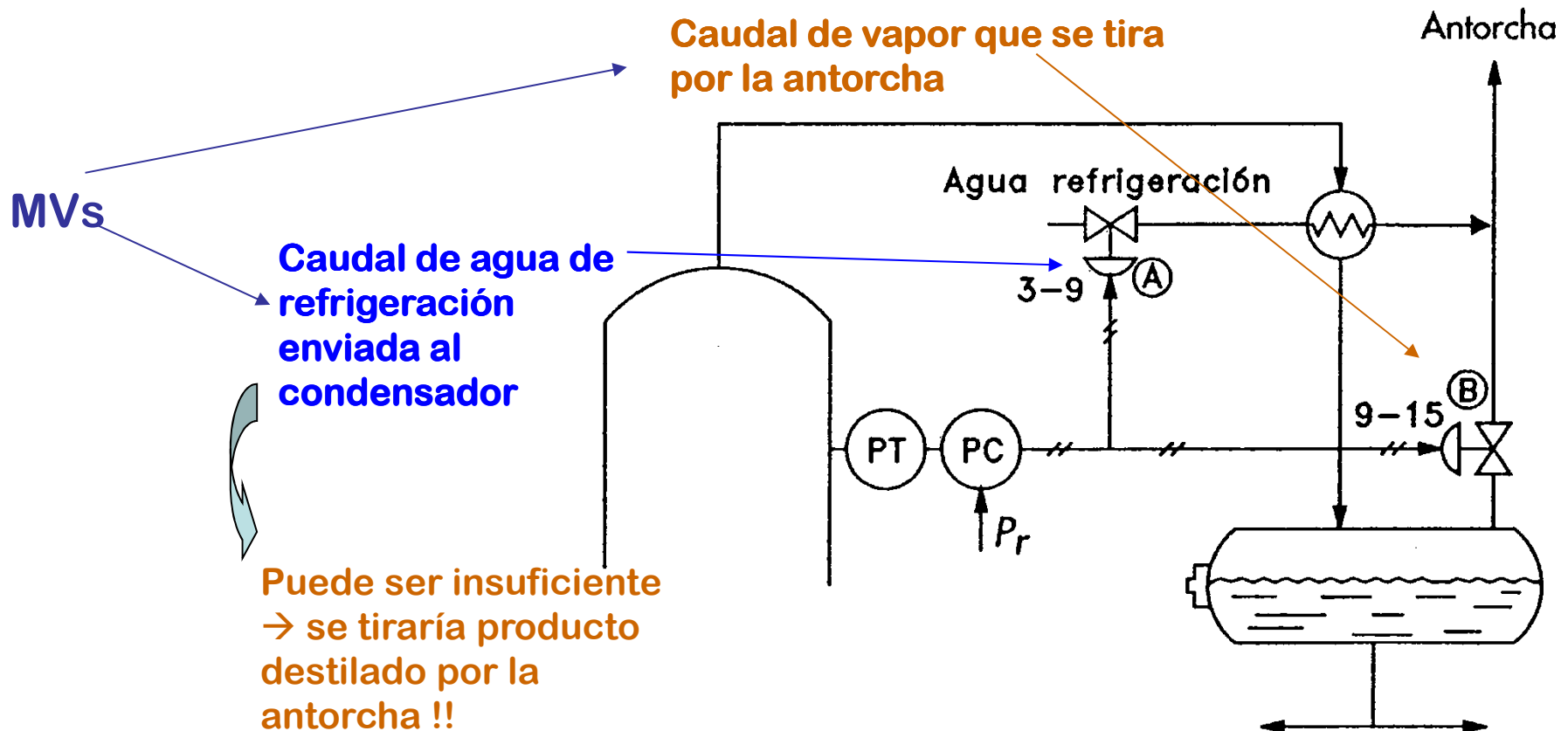


Variables restringidas: presión medida en la aspiración y consumo de potencia en el motor.

Variable controlada: presión de suministro.

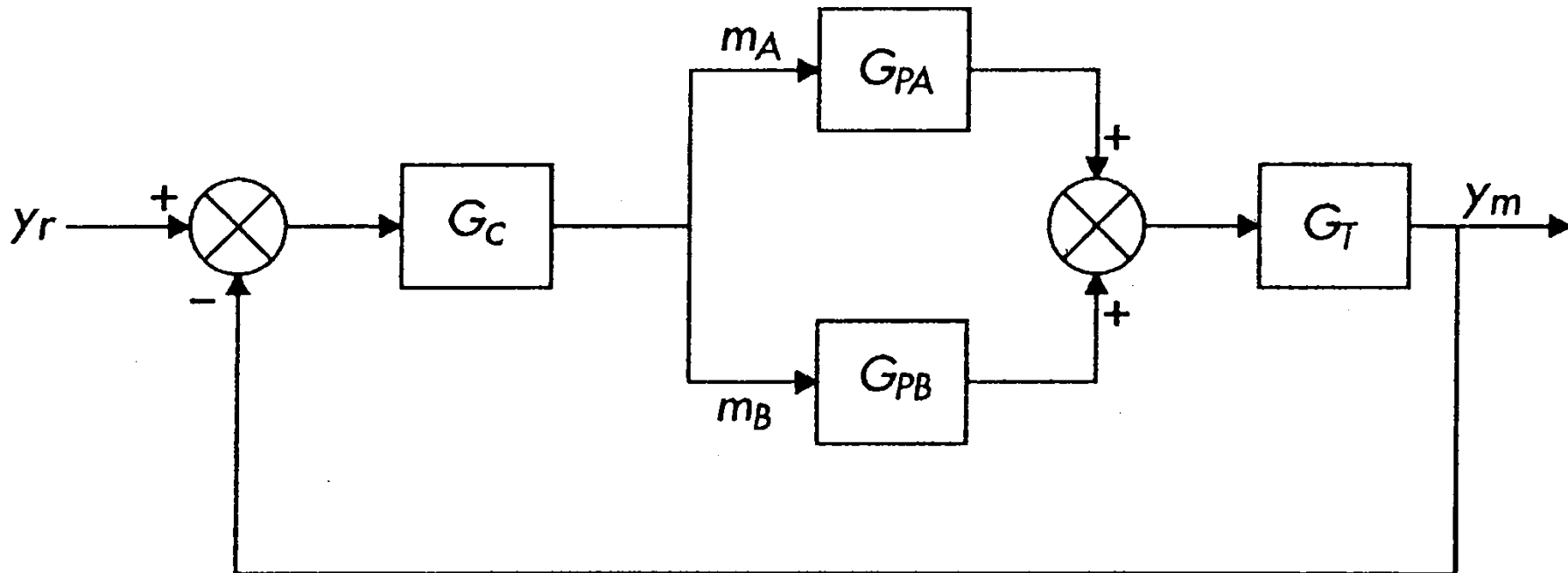
Control de gama partida (split range)

- Esquema que se utiliza cuando:
 - Existe **una** variable controlada y **varias** variables manipuladas.
 - Las variables manipuladas (MVs) afectan a la variable controlada.
 - Existe un orden de prioridad en el uso de las variables manipuladas.
- Control de presión en una columna de destilación:



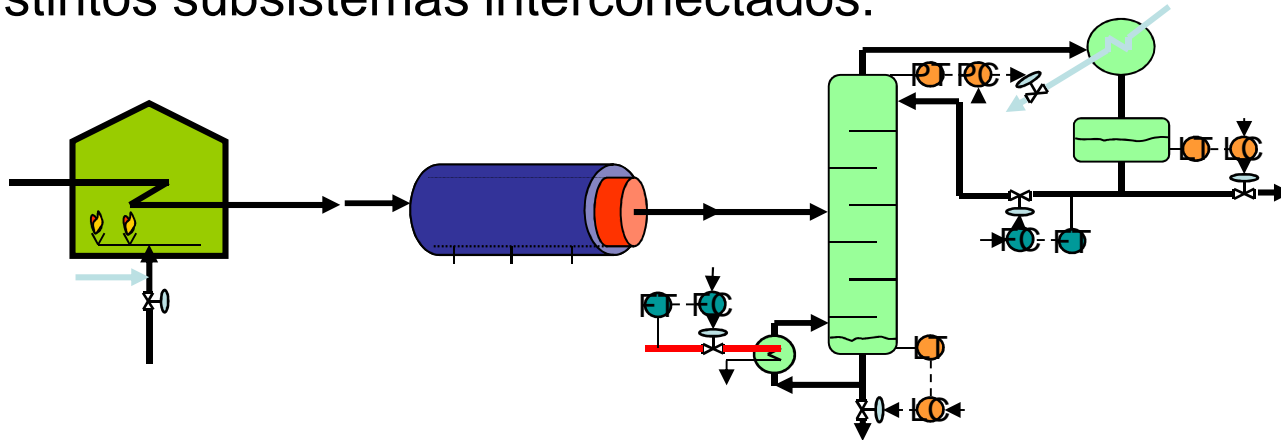
Control de gama partida (split range)

- El rango (gama) de salida del controlador se divide en dos:
 - 0-50% : Abre la válvula del agua de refrigeración de 0-100%.
 - 50-100%: Válvula de agua de refrigeración a 100% y válvula de antorcha de 0-100%.
- Los parámetros del controlador en cada modo pueden ser muy diferentes.



Control de Planta Completa (Plantwide Control)

- La mayoría de las técnicas de control analizadas hasta ahora consideran un sistema a controlar aislado.
- La situación es usualmente distinta y en una instalación industrial hay distintos subsistemas interconectados:



- El control de planta completa involucra:
 - Descomposición del problema de control global en sub-problemas.
 - Decidir dónde se van a colocar sensores y elementos de control.
 - Diseño de los lazos de control para que se cumplan los objetivos de producción.

Control de Planta Completa (Plantwide Control)

- No hay una metodología comunmente aceptada.
- Pasos sugeridos (Skogestad):
 - Top-Down:
 1. Definición de los objetivos globales de control.
 - Minimizar una medida del coste de producción.
 - Hay que tener en cuenta restricciones ambientales, suministro, etc...
 2. Análisis de los grados de libertad.
 - Número de válvulas.
 3. Selección de las variables controladas primarias.
 - Intuitivamente (variables dominantes).
 - Sistemáticamente (minimizar un índice de bondad de control con respecto a los grados de libertad).
 4. Diseño de la estrategia de producción.
 - Determina estructuras de control.
 - Cuello de botella: rendimiento del sistema de control.

Control de Planta Completa (Plantwide Control)

– Bottom-Up:

5. Diseño del Control Regulatorio:

- Estabilizar la planta mediante lazos locales (PID) y permitir su operación.
- Elección de variables controladas secundarias.
- Emparejamiento de variables controladas con manipuladas.

6. Diseño del Control Supervisor:

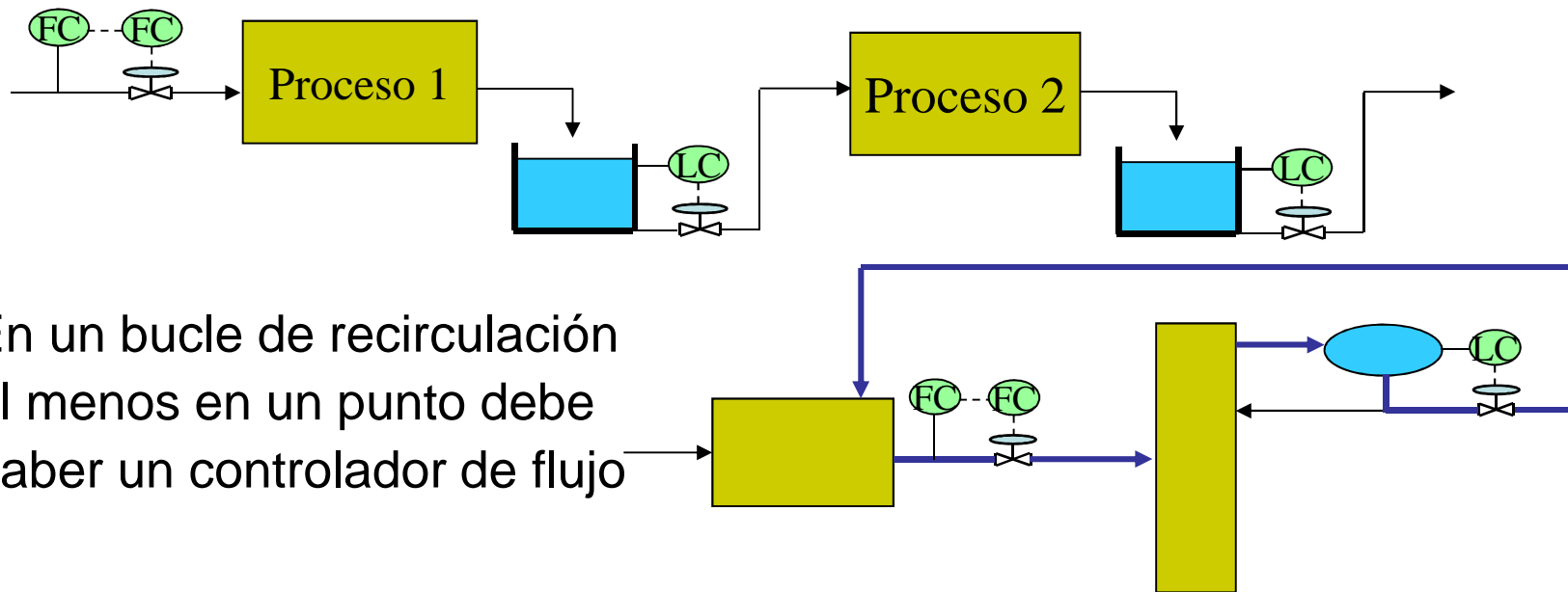
- Mantener las variables controladas primarias en los puntos de consigna óptimos.
- Grados de libertad: los puntos de consigna de los controladores locales (paso 5).
- Sistema de control ¿ distribuido o centralizado ?

7. Optimización:

- Identificar restricciones y calcular puntos de consigna óptimos (paso 6).

Control de Planta Completa (Plantwide Control)

- En el diseño de la estructura del sistema de control se deben seguir algunas normas:
 - No puede haber dos válvulas de control en una misma tubería.
 - La misma variable no debe controlarse con dos lazos de regulación distintos
 - Los lazos de control de nivel deben seguir todos la misma dirección a partir de un punto en que se fije el caudal:



- En un bucle de recirculación al menos en un punto debe haber un controlador de flujo