

## 5. Estructuras de control

---

Los sistemas de regulación basados en la realimentación continua de la señal de error, tienen una gran ventaja, ya que la comparación permanente entre el valor deseado de la variable controlada y su valor actual, les permite corregir el efecto de las perturbaciones, incluso sin un conocimiento completo de las características del proceso.

La principal desventaja que presenta el control de realimentación, es la necesidad de que exista una señal de error para que el controlador actúe iniciando la corrección, es decir, cuanto más retardo posea un proceso, tanto más difícil será controlarlo con el sistema clásico de realimentación.

En otras palabras, el control realimentado corrige después de que las variables perturbadoras han desviado a la controlada de su punto de referencia.

Por las anteriores razones se han generalizado otras técnicas de control que son variantes de los controladores PID o tienen enfoques diferentes al control clásico.

### 5.1 Control en Cascada

El control en cascada consta de dos lazos de realimentación, uno de los cuales es interno al otro. Su objetivo es el de mejorar el desempeño de un lazo de control realimentado que no funciona satisfactoriamente, aunque su controlador esté bien sintonizado, debido a la lentitud de respuesta de su variable controlada, que entra en diferentes puntos del lazo y cuyo efecto sobre la variable controlada no se puede detectar rápidamente, desmejorando la controlabilidad..

Una de las principales aplicaciones del control en cascada es en procesos donde la variable manipulada es un fluido de servicio ( como el agua o el vapor) sometido a perturbaciones.

En el control en cascada la salida del lazo externo o principal , llamado el control maestro, fija el punto de referencia del lazo interno o secundario, denominado el controlador esclavo.

**Ejemplo:** Control de temperatura de un horno

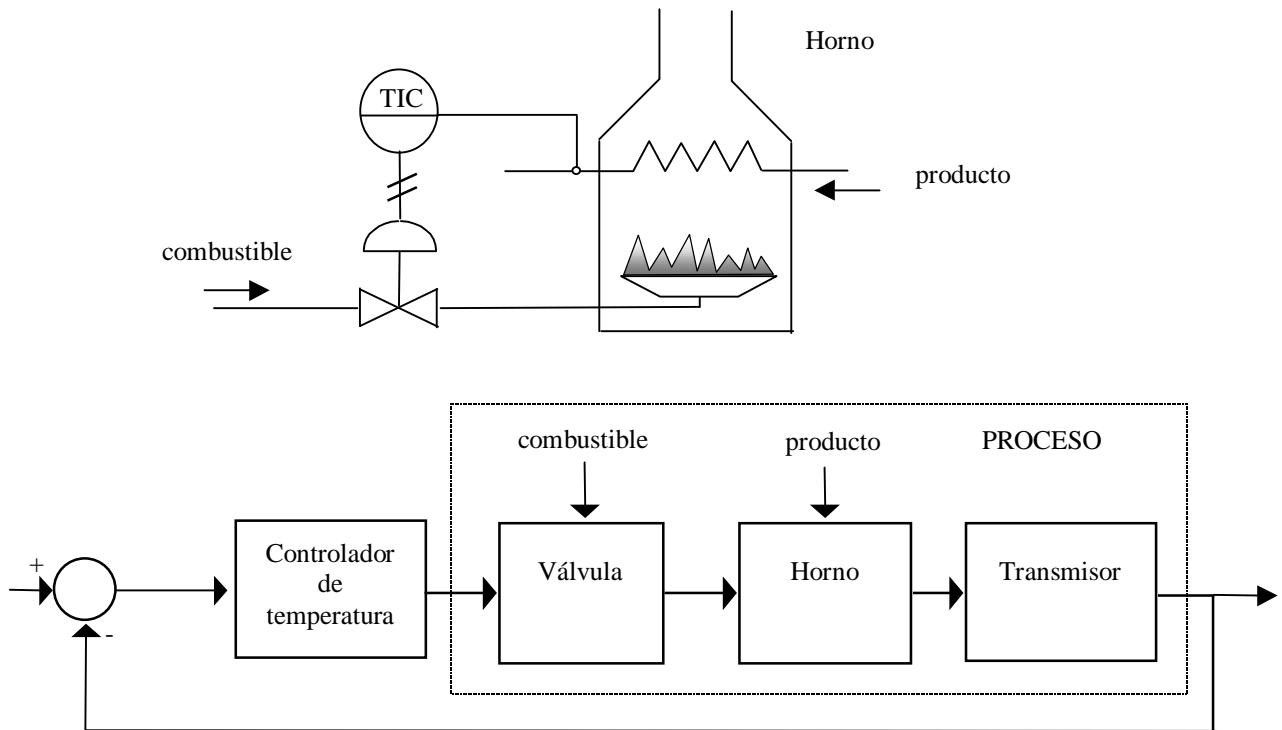


FIGURA 5.1. Control realimentado de un horno de combustible

En el sistema de control realimentado de un horno mostrado en la figura 5.1 cuando la temperatura medida se desvía del punto de consigna, el controlador varía la posición de la válvula de combustible, y si todas las características del mismo ( presión. viscosidad, etc..) se mantienen constantes , el control será generalmente bueno.

Sin embargo, si una de las características, por ejemplo la presión, cambia de forma repentina, el caudal a través de la válvula seguirá la misma variación aunque su vástago permanezca fijo. Cambiará entonces la temperatura y, al cabo de cierto tiempo ( dependiendo de la constante de tiempo y el retardo del sistema), las variaciones de temperatura llegarán al controlador y éste reajustará la posición de la válvula de acuerdo con las acciones de que disponga. Es posible que no se logre una buena regulación e incluso puede impedir totalmente el control del proceso.

Es de anotar que la temperatura se regula más bien por el caudal de combustible que por la posición de la válvula ( si la calidad del combustible es constante). Sin embargo el caudal no está controlado, ya que es de interés secundario, pero sus variaciones afectan a la temperatura, la cual es la variable principal en el control del proceso.

Desde el punto de vista de rapidez en el control del proceso, sería muy conveniente el ajuste rápido de la posición de la válvula, tan pronto como se presente la perturbación en la presión de combustible, mientras que las variaciones de temperatura más lentas que puedan producirse por otras causas deben ser corregidas para mantener la temperatura en el punto de consigna.

Esto puede lograrse utilizando una configuración de dos controladores en cascada, uno de los cuales actúa como principal y el otro como secundario.

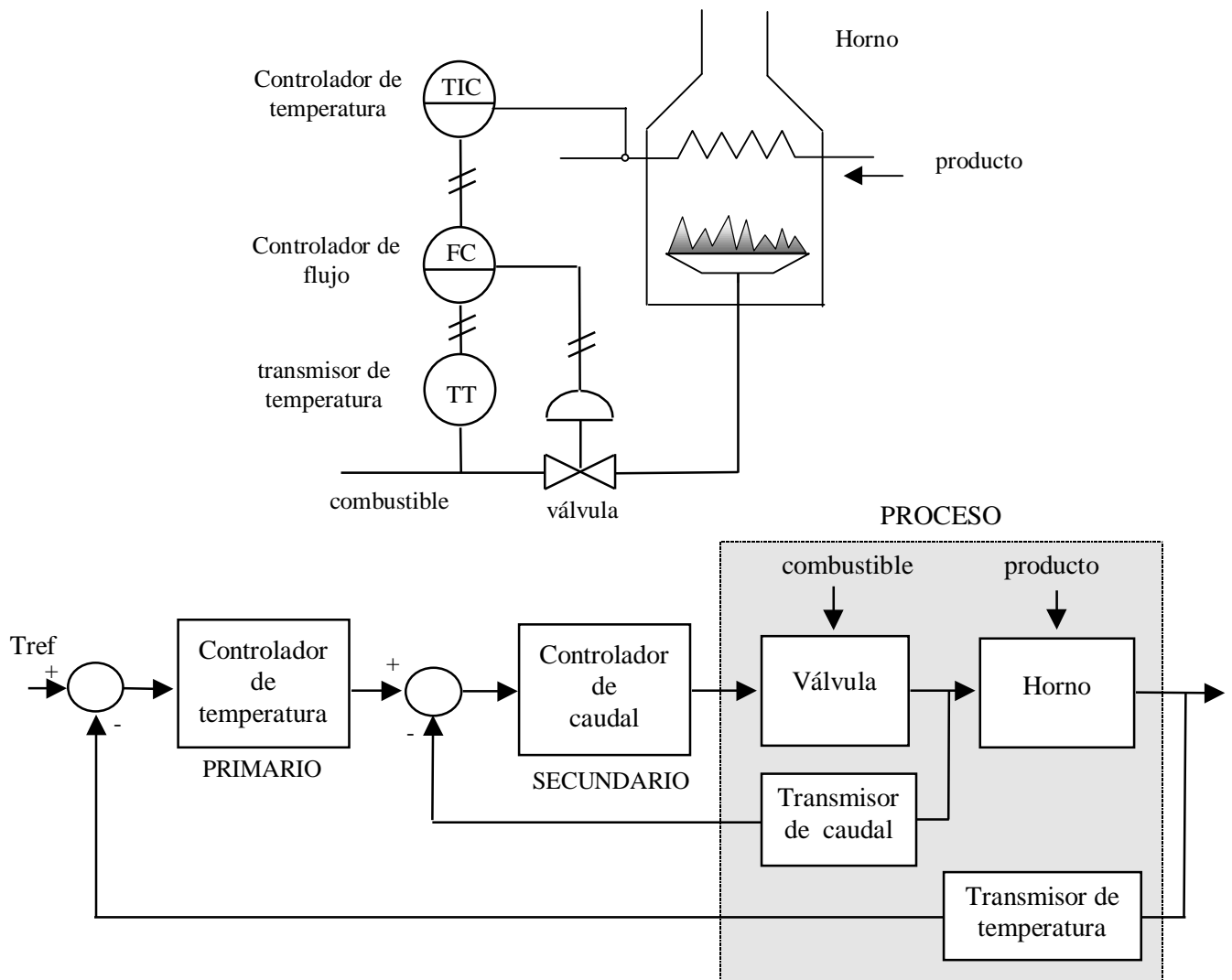


FIGURA 5.2. Control en cascada de un horno de combustible

En éste caso, el controlador primario controla la temperatura y actúa como punto de consigna de un instrumento que controla el caudal y cuya señal de salida ajusta la posición de la válvula.

El segundo controlador permite corregir rápidamente las variaciones de caudal provocadas por perturbaciones en la presión de combustible, manteniendo el sistema en todo momento con capacidad de controlar la temperatura en el instrumento primario.

En ésta disposición el controlador de temperatura (maestro) manda y el de caudal obedece ( esclavo).

Para que el control en cascada sea eficaz, es necesario escoger adecuadamente la variable secundaria teniendo en cuenta las perturbaciones que puedan presentarse y las velocidades de respuesta de los distintos componentes, de acuerdo con los siguientes requisitos:

1. Que el sistema bajo control, pueda dividirse en dos procesos más simples, para cerrar alrededor de estos los lazos de control, principal y secundario.
2. Que el lazo secundario incluya el mayor número de perturbaciones sin llegar a decrecer demasiado su tiempo de respuesta.
3. El lazo secundario debe ser más rápido que el lazo primario. Típicamente  $\tau_p$  debe ser mayor que  $3\tau_s$  ( constante de tiempo del proceso secundario).

Algunas combinaciones típicas se muestran a continuación:

PRIMARIO	SECUNDARIO
Temperatura	Presión
Temperatura	Flujo
Temperatura	temperatura
Nivel	Flujo
Composición	Flujo

Las ventajas del control en cascada son varias:

1. Las perturbaciones en el lazo interno o secundario son corregidas por el controlador secundario, antes de que ellas puedan afectar a la variable primaria.
2. Cualquier variación en la ganancia estática de la parte secundaria del proceso es compensada por su propio lazo.

3. Las constantes de tiempo asociadas al proceso secundario son reducidas drásticamente por el lazo secundario.
4. El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria.

Debido a que el lazo secundario existe como un elemento del lazo primario, el controlador secundario debe ajustarse apropiadamente antes que el controlador primario, colocando a éste en manual.

El ajuste para el controlador secundario debe hacerse para cambios en la referencia o para cambios en la perturbación si se espera que existan cambios severos en esta última.

Igualmente se debe tener en cuenta la regla de oro del control en cascada: " Si el lazo esclavo desaparece, el lazo maestro debe mantenerse estable"

### Control de temperatura en un reactor

Si la temperatura del agua de enfriamiento cambia, se convierte en una perturbación cuyo efecto sobre el lazo principal puede corregirse con un control en cascada como el mostrado en la figura:

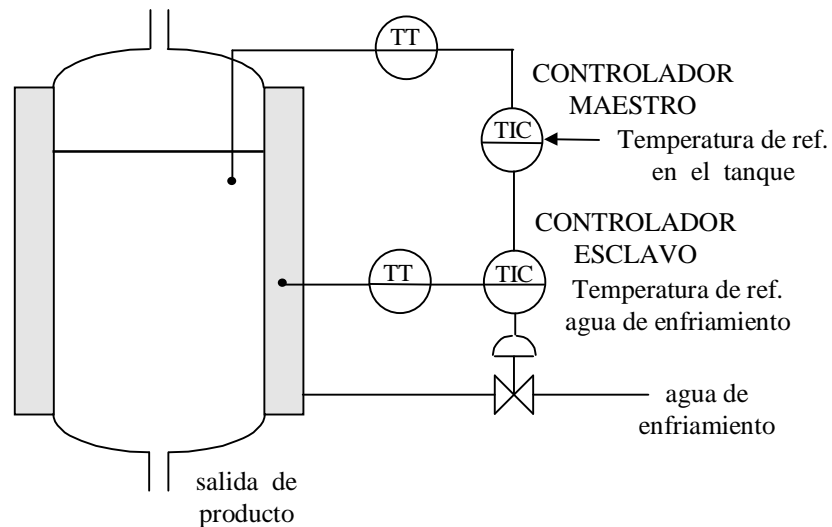


FIGURA 5.3 Control en cascada de un reactor

El diagrama de bloques para éste control se muestra a continuación:

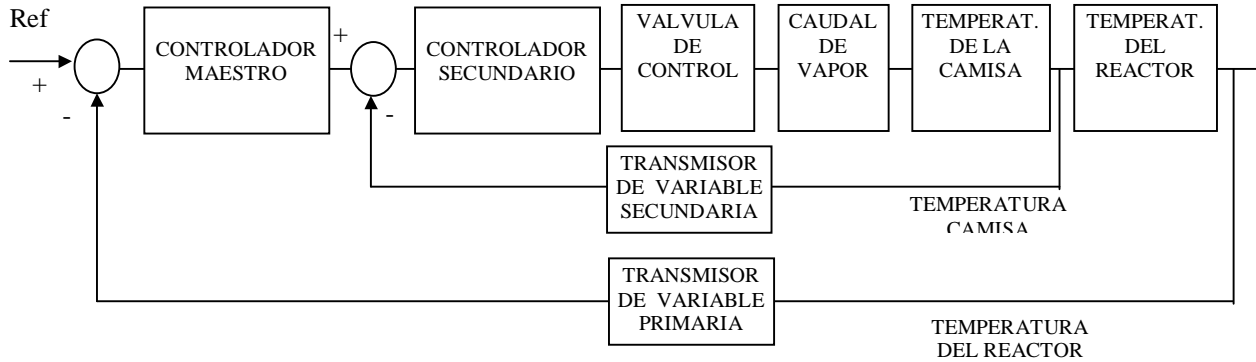


FIGURA 5.4. Diagrama de bloques del control en cascada de un reactor

### Control de nivel de un tanque acumulador

En éste caso, las variaciones en el caudal pueden afectar el nivel en el tanque antes de que el controlador de nivel pueda corregirlas. Por ésta razón se implementa un control en cascada, en el cual, las perturbaciones en el caudal de salida del tanque son controladas por el controlador de flujo ( controlador esclavo ) y las de nivel por el controlador de nivel ( maestro).

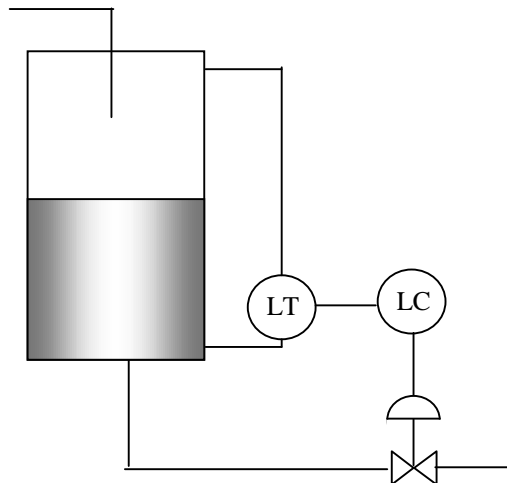


FIGURA 5.5. Control de nivel en un tanque acumulador.

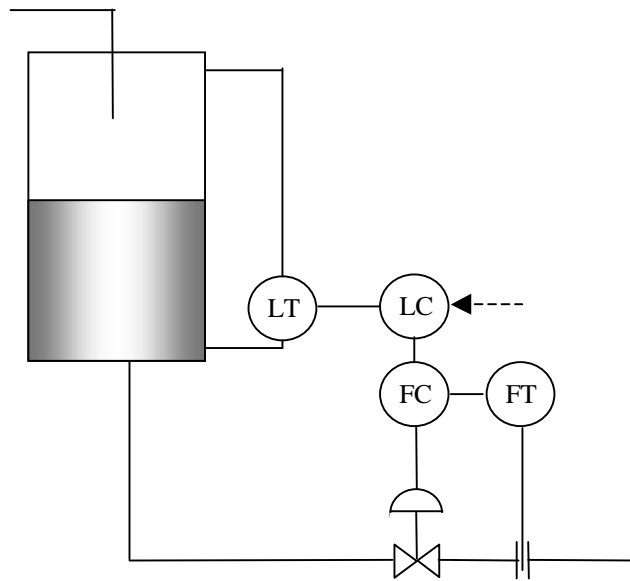


FIGURA 5.5. Control en cascada de un tanque acumulador.

## 5.2 Control anticipativo ( feed-forward control)

En éste tipo de control, la información relacionada con una o más condiciones que puedan perturbar la variable controlada, se realimentan para minimizar la desviación de la variable controlada.

En sistemas que poseen tiempos de retardo importantes con desviaciones de magnitud y duración distintas, la señal de error es detectada mucho tiempo después que se ha producido el cambio de carga, por lo cual, la corrección correspondiente es retardada y ocurre a veces que el controlador actúa cuando no se necesita porque se ha eliminado el cambio de carga que dio lugar a la corrección.

El control anticipativo ( feed-forward ) se basa en la medición de una o más variables de entrada y actúa simultáneamente sobre la variable manipulada que produce la salida deseada del proceso. Con el control anticipativo, se cancelan los efectos indeseables de perturbaciones medibles al compensarlos antes de que se perciban en la salida.

Este tipo de control requiere un conocimiento exacto y completo de las características estáticas y dinámicas del proceso, así como de la forma como las perturbaciones afectan la salida del proceso.

Su diseño se basa en un sistema de cómputo que tiene como entradas las señales que provienen de la medición de las perturbaciones y como salida la modificación que

debe hacerse en la variable manipulada para que la variable controlada no se desvíe de su punto de referencia. De ésta manera, la variable perturbadora entra simultáneamente con la acción correctiva con lo que impide la desviación que se produciría en la variable controlada. Esta corrección antes de que se produzca el error da el nombre de anticipativa a esta acción de control.

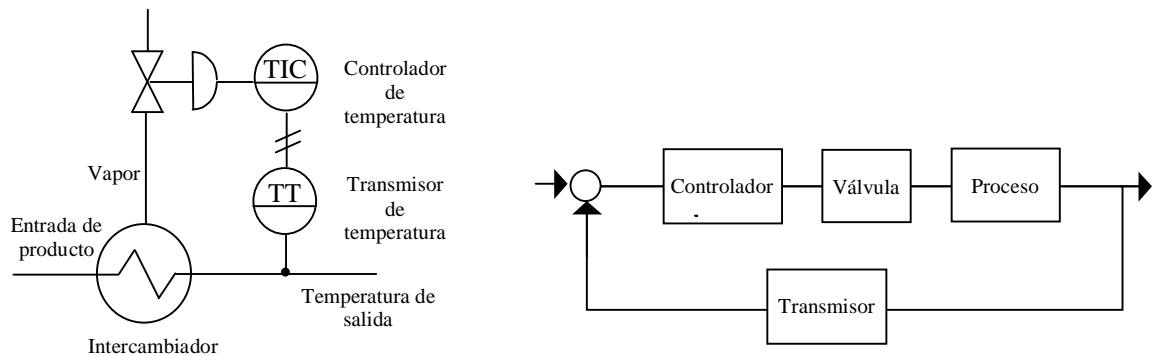
En la Figura 5.6 puede verse una comparación entre controles de realimentación, en cascada y anticipativo aplicados a un intercambiador de calor.

Este caso en particular se requiere el conocimiento de la relación entre el caudal del producto y la temperatura de salida, la influencia que tienen las perturbaciones en la presión de vapor, en la temperatura del producto de entrada, en el rendimiento del intercambiador, etc.

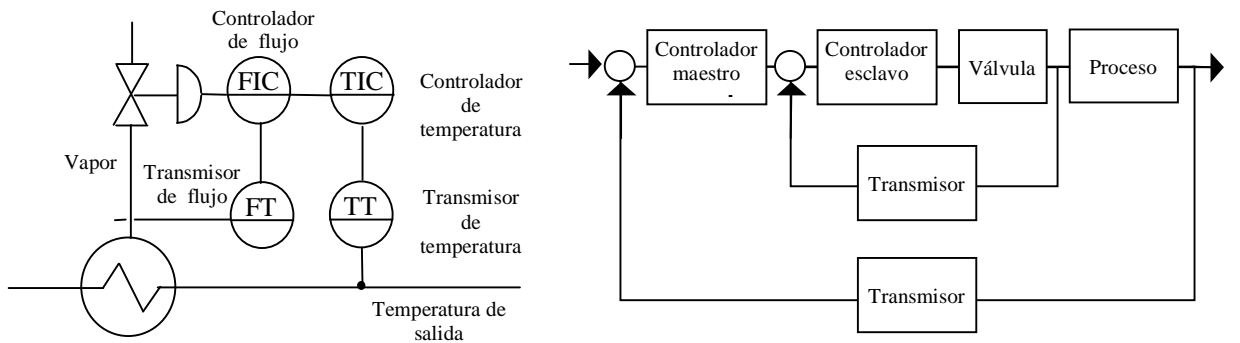
Es decir, la relación entre la temperatura de salida y el caudal de entrada constituye un modelo del proceso y es utilizado para hallar la función de transferencia del sistema de control anticipativo.

La eficacia del control anticipativo depende de la precisión alcanzada en la medida de la variable de entrada y de la precisión del modelo calculado. Por otra parte, puede resultar costoso o imposible determinar el modelo del proceso.

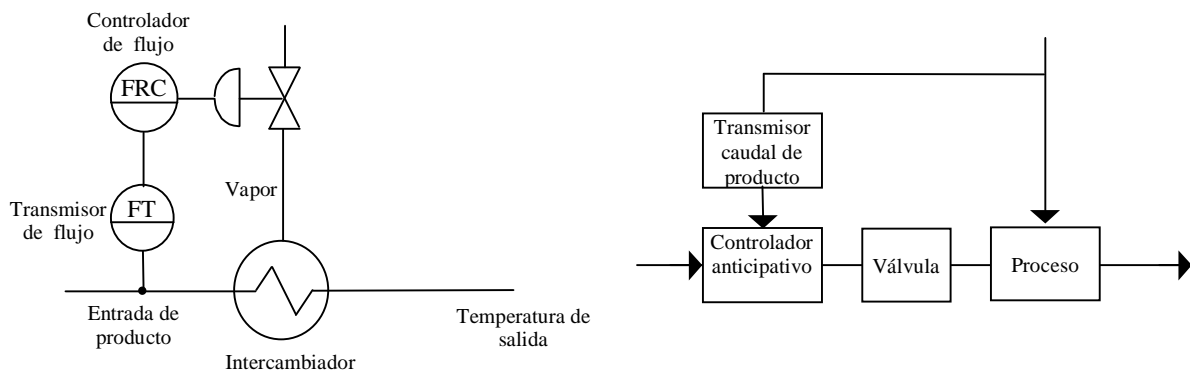
Desde un punto de vista estricto, el control anticipativo puede considerarse como un control en lazo abierto y su aplicación aislada dará lugar a un offset significativo, es decir, la variable de salida (temperatura en éste caso) se apartará significativamente de la deseada.



a. Control de realimentación



### b. Control en cascada



### c. Control Anticipativo

FIGURA 5.6. Comparación entre control de realimentación, en cascada y anticipativo

Como conclusión, se puede afirmar que el control de realimentación puede controlar bien en régimen permanente, pero no lo hace suficientemente en condiciones dinámicas de funcionamiento del proceso.

En cambio, el control anticipativo es capaz de regir rápidamente los cambio dinámicos, pero presenta un offset considerable a la salida.

### Principales aplicaciones:

- 1- En procesos difíciles de controlar por realimentación debido a la presencia de tiempo muerto y retardos considerables.
- 2- En procesos que reciben flujos no controlados provenientes de otras partes de la planta y que pueden afectar a la variable controlada.
- 3- Procesos en el que la variable controlada no puede medirse con precisión o de modo continuo.
- 4- Procesos en el que la variable controlada no es fija y viene determinada por otras variables.

### Diseño del controlador anticipativo:

Considerese el diagrama de bloques del control anticipativo . Se supone que la función de transferencia de la planta  $G_p(s)$  y la función de transferencia de la perturbación  $G_n(s)$  son conocidas:

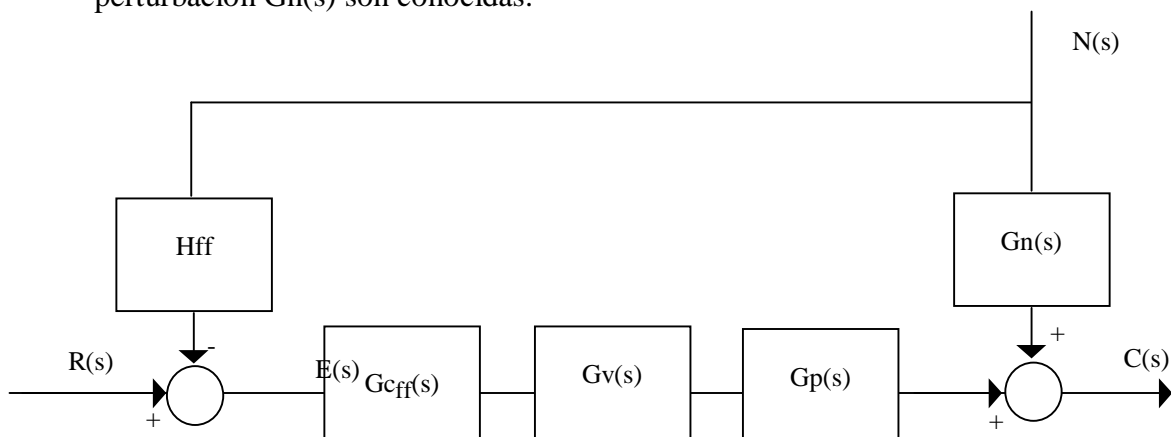


FIGURA 5.7. Diagrama de bloques del control anticipativo

Donde:

- $G_n(s)$  : Función de transferencia de la perturbación
- $G_p(s)$  : Función de transferencia de la planta
- $G_v(s)$  : Función de transferencia de la válvula
- $H_{ff}(s)$  : Función de transferencia del elemento detector primario y del transmisor del lazo anticipativo
- $G_{c_{ff}}(s)$  : Función de la unidad de cómputo del control anticipativo

Del diagrama de bloques:

$$C(s) = G_{c_{ff}} \cdot G_v \cdot G_p \cdot E(s) + G_n \cdot N(s)$$

donde:  $E(s) = R(s) - H_{ff} \cdot N(s)$

reemplazando en la anterior ecuación:

$$C(s) = G_{c_{ff}} \cdot G_v \cdot G_p \cdot [R(s) - H_{ff} \cdot N(s)] + G_n \cdot N(s)$$

$$C(s) = G_{c_{ff}} \cdot G_v \cdot G_p \cdot R(s) - G_{c_{ff}} \cdot G_v \cdot G_p \cdot H_{ff} \cdot N(s) + G_n \cdot N(s)$$

$$C(s) = G_{c_{ff}} \cdot G_v \cdot G_p \cdot R(s) - [G_{c_{ff}} \cdot G_v \cdot G_p \cdot H_{ff} + G_n] \cdot N(s)$$

Como se desea eliminar la perturbación, entonces  $[G_{c_{ff}} \cdot G_v \cdot G_p \cdot H_{ff} + G_n] \cdot N(s) = 0$ :

Luego la función de transferencia del controlador Feed- Forward es:

$$G_{c_{ff}} = \frac{G_n(s)}{H_{ff} \cdot G_v(s) \cdot G_p(s)}$$

Esta ecuación muestra que el diseño del controlador Feed-Forward requiere un conocimiento completo del proceso que permita deducir  $G_p(s)$  y  $G_n(s)$ . Las funciones  $G_v(s)$  y  $H_{ff}$  pueden obtenerse de especificaciones de los fabricantes de instrumentos.

### **Ventajas del control anticipativo:**

- Detecta las variables perturbadoras y toma la acción correctiva antes de que la variable controlada se desvie de su punto de referencia.
- Util para procesos con tiempo muerto y de respuesta dinámica muy lenta.

### **Desventajas:**

- Requiere medir todas las variables perturbadoras.
- Requiere conocimiento exacto del proceso.
- El modelo puede resultar físicamente irrealizable. ( Si el polinomio del numerador de la función de transferencia del controlador es de mayor grado que el polinomio del denominador)
- No corrige perturbaciones no medidas.
- Es insensible a variaciones en los parámetros de los elementos del lazo de control.

### 5.3 Control anticipativo + realimentado:

Aunque el control anticipado podría llevar al control perfecto, las desventajas antes anotadas hace aconsejable que se combine el control anticipativo con el realimentado para que éste corrija por perturbaciones en el modelo de la planta y los cambios en los parámetros de los elementos del lazo de control.

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

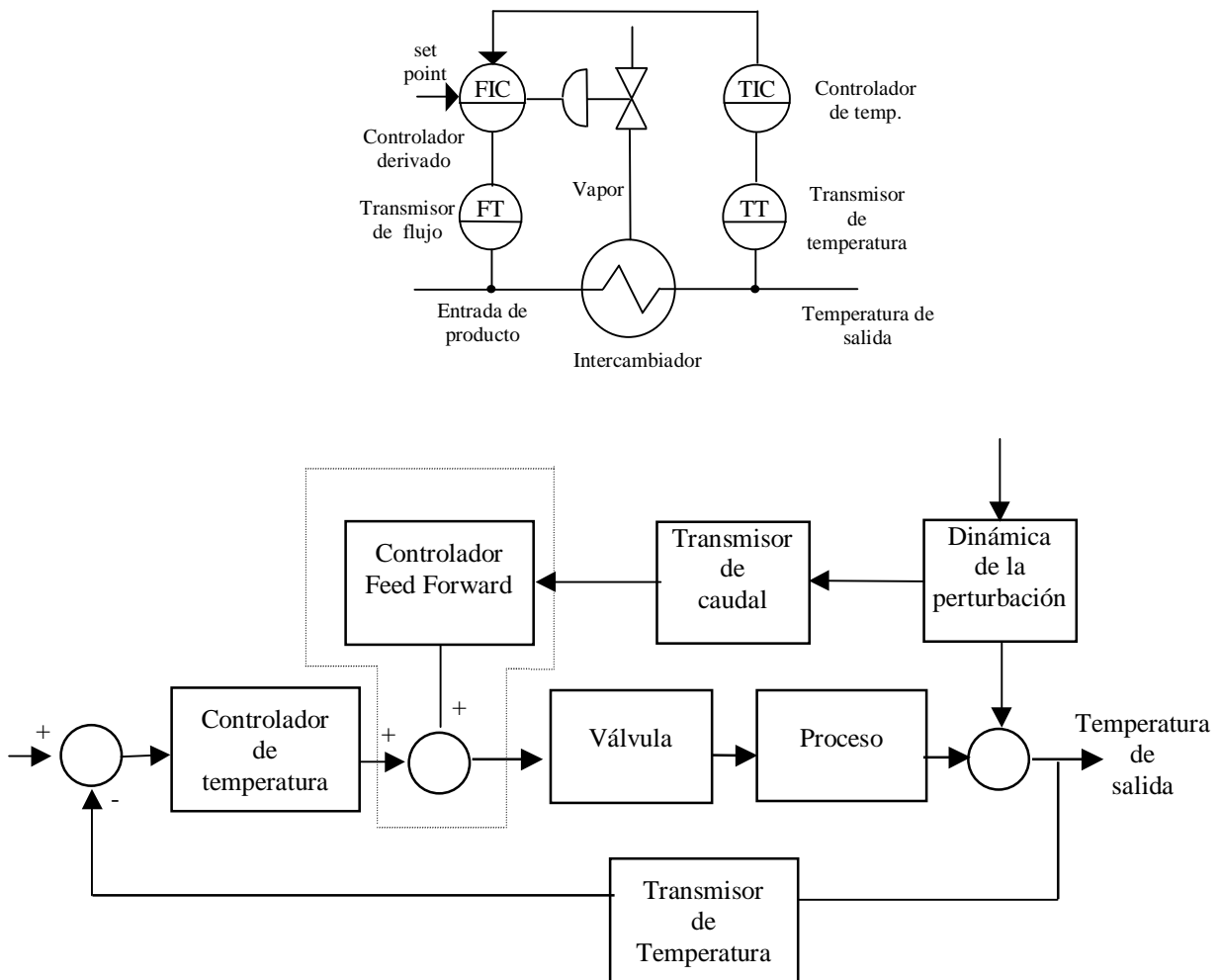


FIGURA 5.8. Control anticipativo + realimentado

En este caso si el caudal es constante la señal procedente del controlador de temperatura pasa sin cambios hacia la válvula. En cambio si se presentan variaciones en el caudal, la señal proveniente del controlador Feed Forward correspondiente se suma o se resta, según el sentido de variación en la temperatura.

De este modo, los cambios de carga en el caudal del producto son detectados y corregidos inmediatamente y compensan los cambios anticipados, que por esta causa, pudiesen producirse en la temperatura.

**Diseño del controlador Feedforward+Feedback:**

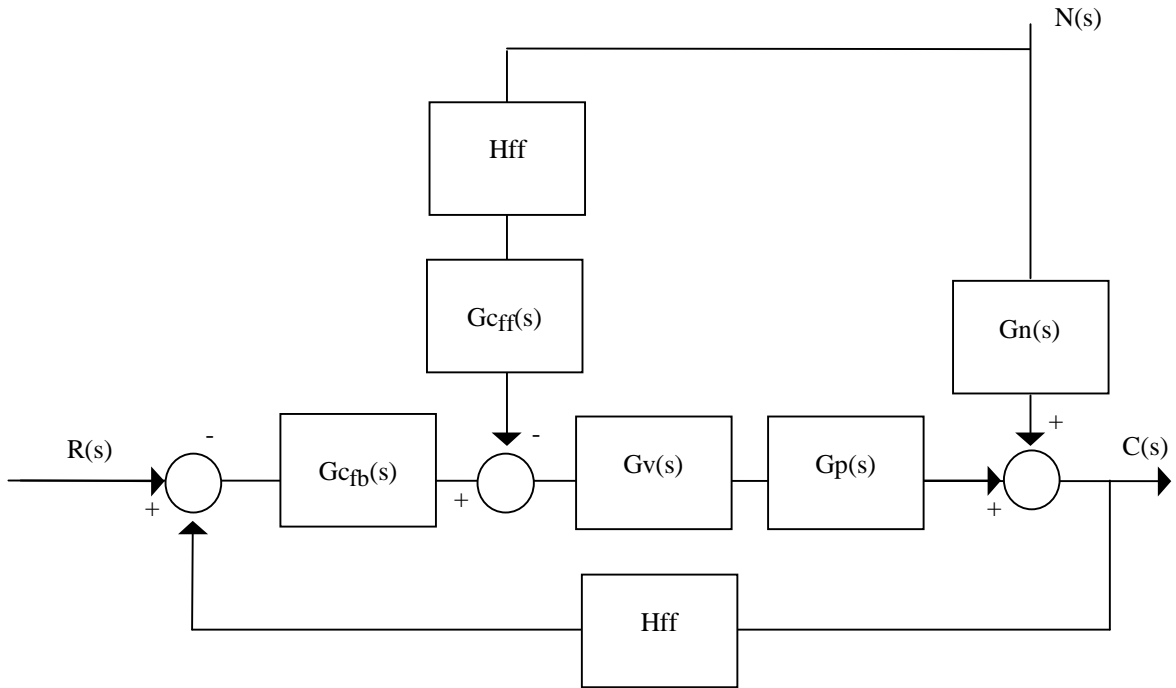


FIGURA 5.9. Diagrama de bloques del control anticipativo + realimentado

De acuerdo con el diagrama de bloques, se puede demostrar que la función de transferencia del controlador Feedforward sigue siendo:

$$G_{c_{ff}} = \frac{G_n(s)}{H_{ff} \cdot G_v(s) \cdot G_p(s)}$$

**5.4 Control de relación ( ratio control )**

El control de relación es un sistema de control en el que una variable de proceso es controlada con relación a otra variable en una proporción fija. Generalmente las variables que se deseen mantener en una relación fija son las ratas de flujo de dos corrientes, una de las cuales, la que no se controla esté sometida a perturbaciones frecuentes porque proviene de la unidad de producción.

El control de relación puede hacerse mediante un divisor o una estación de relación.; en el primer caso se introduce un elemento no lineal al lazo de control por lo que resulta no recomendable. La estación de relación es un amplificador de ganancia ajustable.

En la Figura 5.10. se muestra un ejemplo de control de relación de dos fluidos:

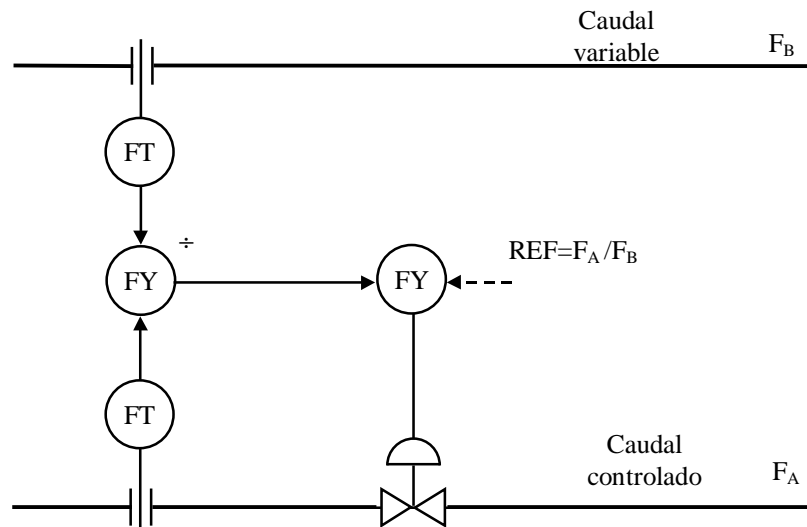


FIGURA 5.10. Control de relación utilizando un divisor

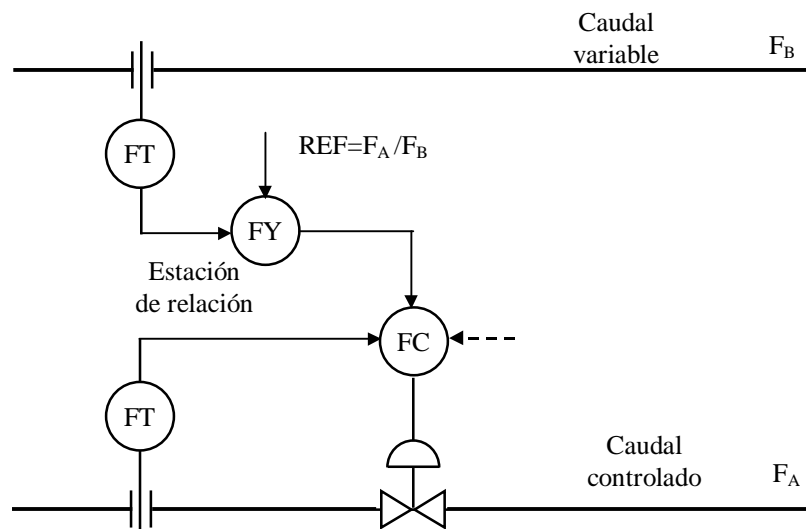


FIGURA 5.11. Control de relación utilizando una estación de relación

Mientras que el control en cascada es un método que mejora la regulación en una variable, el control de relación satisface una necesidad específica, el control de relación entre dos cantidades.

La señal del transmisor de señal es multiplicada por un factor fijado manual o automáticamente. La señal de salida del multiplicador es el punto de consigna del controlador cuya señal de salida actúa directamente sobre la válvula de control

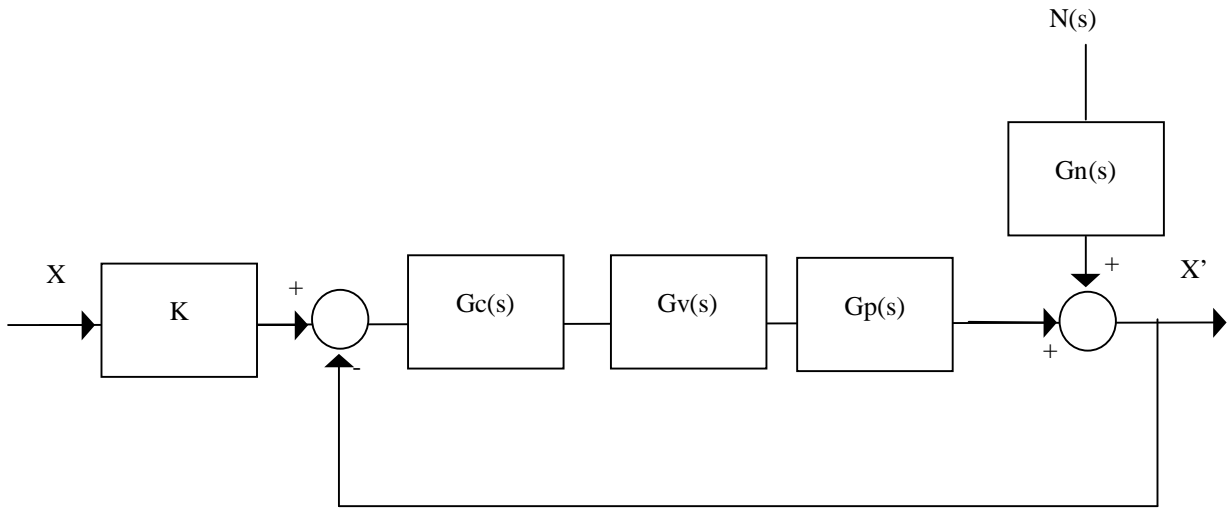


FIGURA 5.12. Diagrama de bloques del control de relación

Aquí se tiene un controlador esclavo  $G_C$  y el controlador maestro está abierto, no hay lazo maestro. Por ejemplo, se desea tener 3 veces  $X$  o  $KX$ , el maestro es un comando fijado al esclavo y el esclavo es el único control que permanece. Este tipo de control se puede considerar en control en cascada degenerado.

Cuando se usa el control de relación debe tenerse presente :

1. Expresar los flujos en las mismas unidades
2. las señales que lleguen a las divisiones, estación de relación y controlador deben tener las mismas características lineal o cuadrática.
3. Ajustar la relación de estación teniendo en cuenta el rango de las transmisiones

$$\text{Relación} = \frac{F_C \cdot \Delta C_1}{F_1 \cdot \Delta C_C}$$

Donde:

$F_C$  = relación de flujo manipulado

$F_1$  = relación de flujo libre o no controlado  
 $\Delta C_C$  = Rango del transmisor de flujo controlado  
 $\Delta C_1$  = Rango del transmisor de flujo no controlado

**aplicaciones:**

1. Mantener constante la relación de dos corrientes que se mezclan para garantizar la composición de la mezcla.
2. Mantener una relación óptima entre las ratas de flujo de combustible y aire en una caldera
3. Conservar la rata de flujo de líquido a la rata de flujo de vapor ( L /V ) en una torre de absorción

**Ejemplo 1 :** Control de relación de un sistema de mezcla cuando se manipulan ambos flujos.

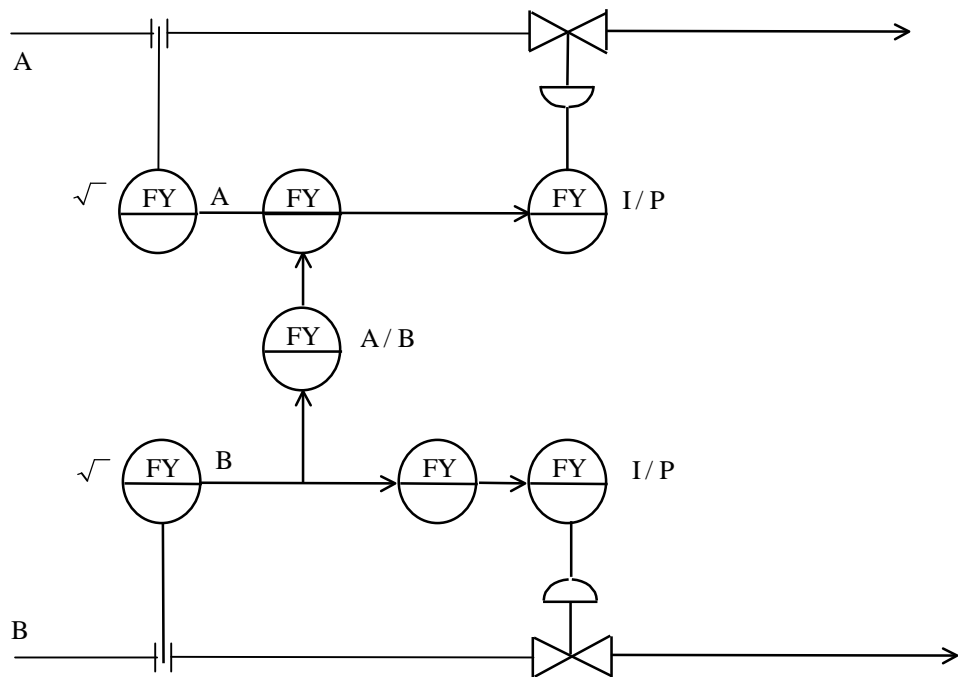


FIG: 5.13 Control de relación de un sistema de mezcla

## 5.4 Control de sobremando (Override control)

El control de sobremando es un sistema que se emplea para limitar la variable de procesos en un valor alto o bajo con el fin de evitar daños en el proceso, en el personal o en el equipo.

Para su aplicación se requiere aplicar control sobre dos variables en un proceso, relacionados entre si de tal manera que una u otra pueda ser controlada por la misma variable manipulada.

Como una variable manipulada sólo puede controlarse por una variable, debe existir la posibilidad de transferir el mando de una de los lazos de control al otro cuando las complicaciones de funcionamiento así lo exigen. La transferencia del mando se logra conectando la salida de los dos controladores a un interruptor selector de la más baja o de la más alta, de dos señales cuya salida esté conectada al elemento final de control.

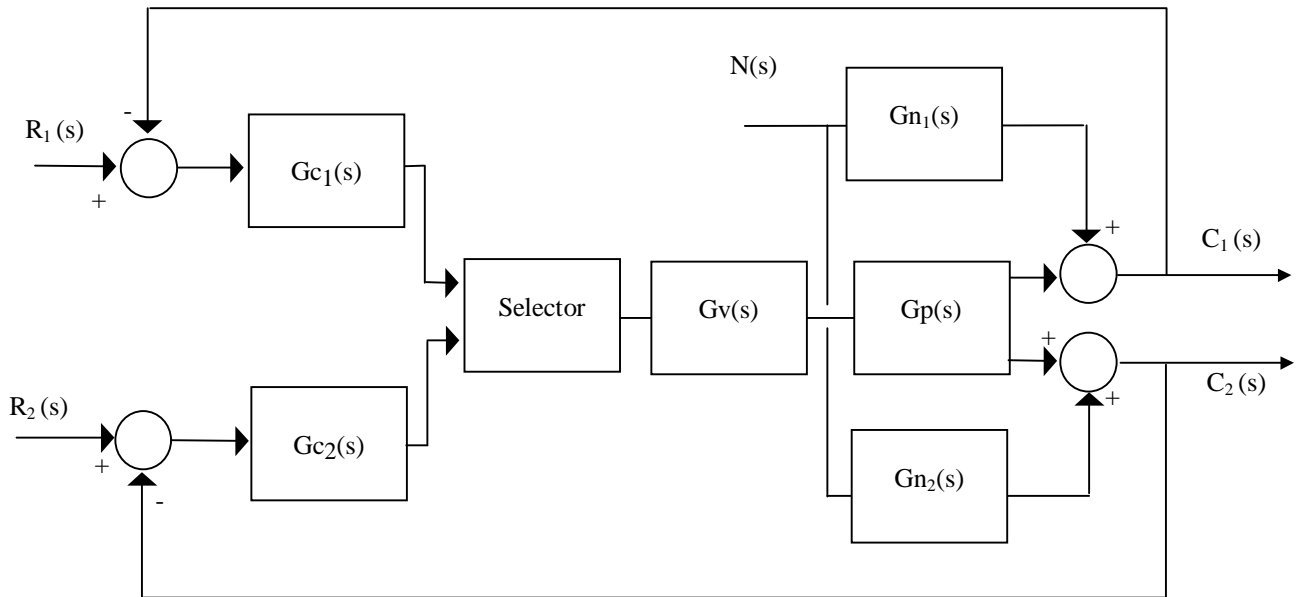


FIGURA 5.13. Diagrama de bloques del control de sobremando

En el control de sobremando se emplean dos controladores  $G_{C1}$  y  $G_{C2}$  que controlan las variables  $C_1$  y  $C_2$  respectivamente. Las salidas de los controladores se conectan a las entradas de un interruptor selector de señales, la salida del interruptor maneja el elemento final de control. El punto de referencia del controlador 2 subdivide el rango de valores de su variable controlada en rango de valores aceptados y rangos de valores no aceptados o de riesgo.

El controlador 1 mantiene el valor de la variable controlada 1 a su punto de referencia, si se cumple la condición de que el valor de la variable controlada 2 esté

dentro del rango de valores de no riesgo. Para la variable controlada 2 se toleran desviaciones de su punto de referencia si ocurren en el rango de no riesgo. Si la variable controlada 2 entra en el rango de valores de riesgo el interruptor opera por transferir el manejo del elemento final al controlador 2 para que lleve su variable controlada al rango de no riesgo. Cuando esto ocurre el interruptor transfiere el mando al interruptor 1.

### Ejemplo: Bombeo de oleoductos

En esta aplicación hay dos controladores de presión, uno en la aspiración y otro en la impulsión cuya señal de salida es seleccionada por un relé selector de comunicación con la válvula de control.

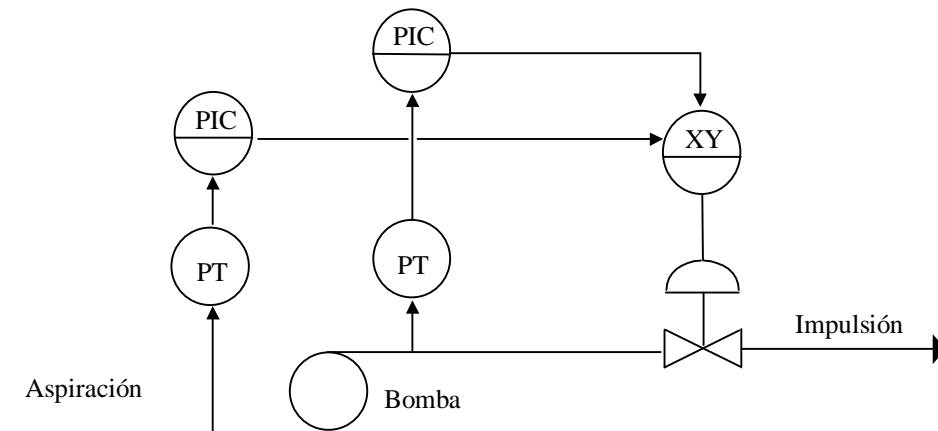


FIGURA 5.14. Control de sobremando en un oleoducto

El control se efectúa en condiciones de funcionamiento normal en el control de impulsión y cuando por cualquier avería baja la presión de aspiración de la bomba por debajo del límite de seguridad, debe entrar en funcionamiento el controlador de aspiración en lugar del de impulsión para conseguirlo, el controlador de aspiración es de acción inversa a los valores nominales de trabajo y relé selector, selecciona la mínima de las dos señales que le llegan.

De este modo, el control normal se efectuará con el controlados de impulsión y cuando baje demasiado la presión de aspiración y llegue a ser inferior a su punto de consigna, la señal de salida disminuye y llega a ser inferior a la salida del controlador de impulsión, con lo cual el relé selector lo selecciona y la válvula pasa a ser controlada directamente por la presión de aspiración.

## 5.5 Control de gama partida ( split range control )

Es un sistema de control en el cual existe una sola variable controlada y dos o más variables manipuladas que deben tener el mismo efecto sobre la variable controlada.

Para realizar este sistema se requiere compartir la señal de salida del controlador con varios elementos finales de control.

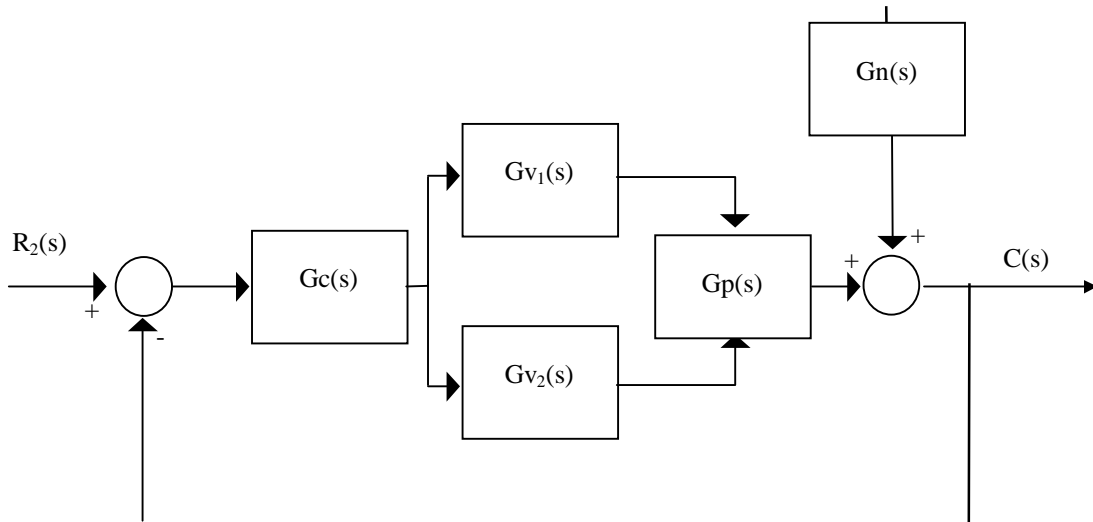


FIGURA 5.15. Diagrama de bloques del control de gama partida

### Ejemplo: Control de temperatura de un baño electrolítico

En estos baños el calor producido por el paso de la corriente eléctrica, es removido por un flujo controlado de agua de enfriamiento.

Cuando se requiere recubrir piezas de gran tamaño la temperatura del baño descende, por lo que se emplean serpentines que transportan flujos regulados de vapor para llevarlo hasta su punto de referencia.

Cuando la solución electrolítica está en el punto de referencia, los flujos de agua y de vapor deben ser nulos. Las acciones anteriores deben realizarse con un controlador de gama partida, cuya salida va a los posicionadores de las válvulas de agua y de vapor.

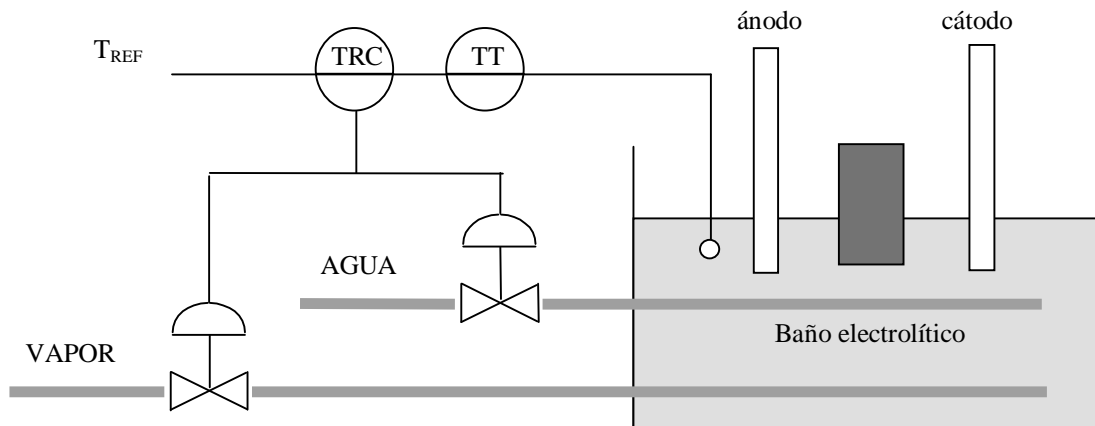


FIGURA 5.16. Control de temperatura de gama partida de un baño electrolítico

Las siguientes figuras ilustran el funcionamiento del controlador y las válvulas frente a perturbaciones

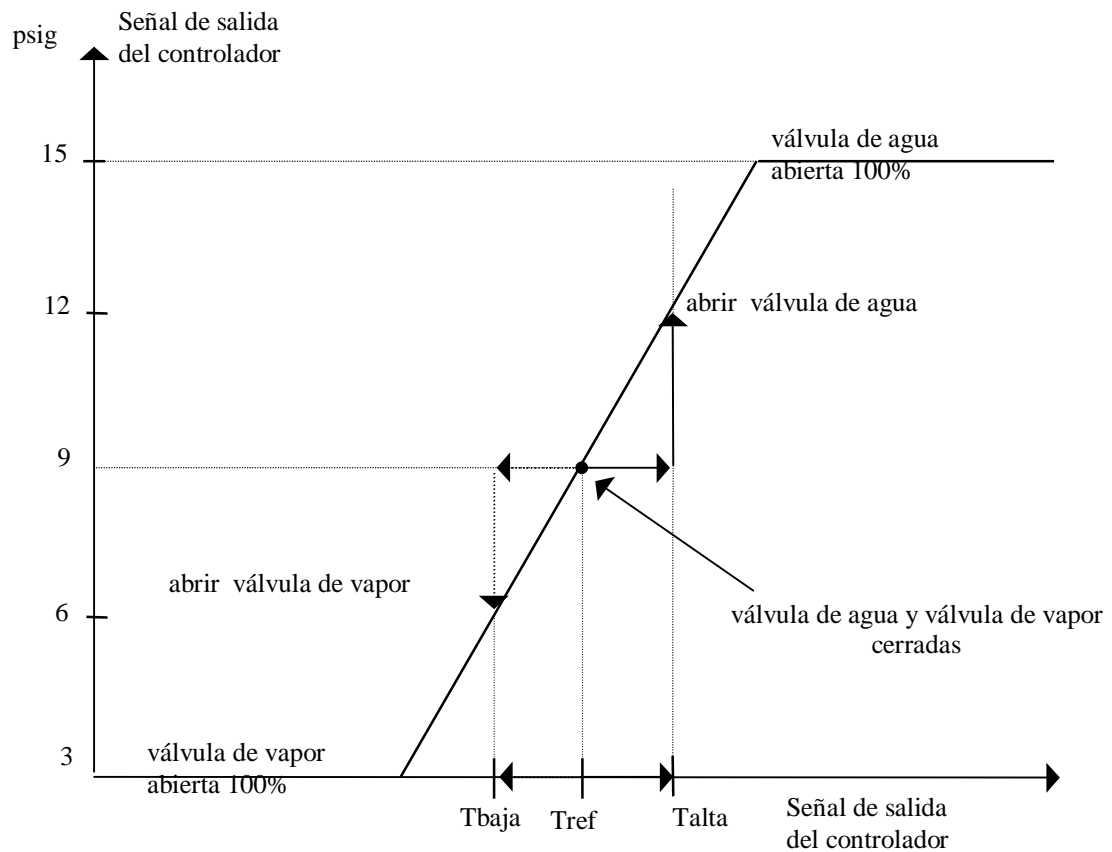


FIGURA 5.17. Funcionamiento del controlador de gama partida