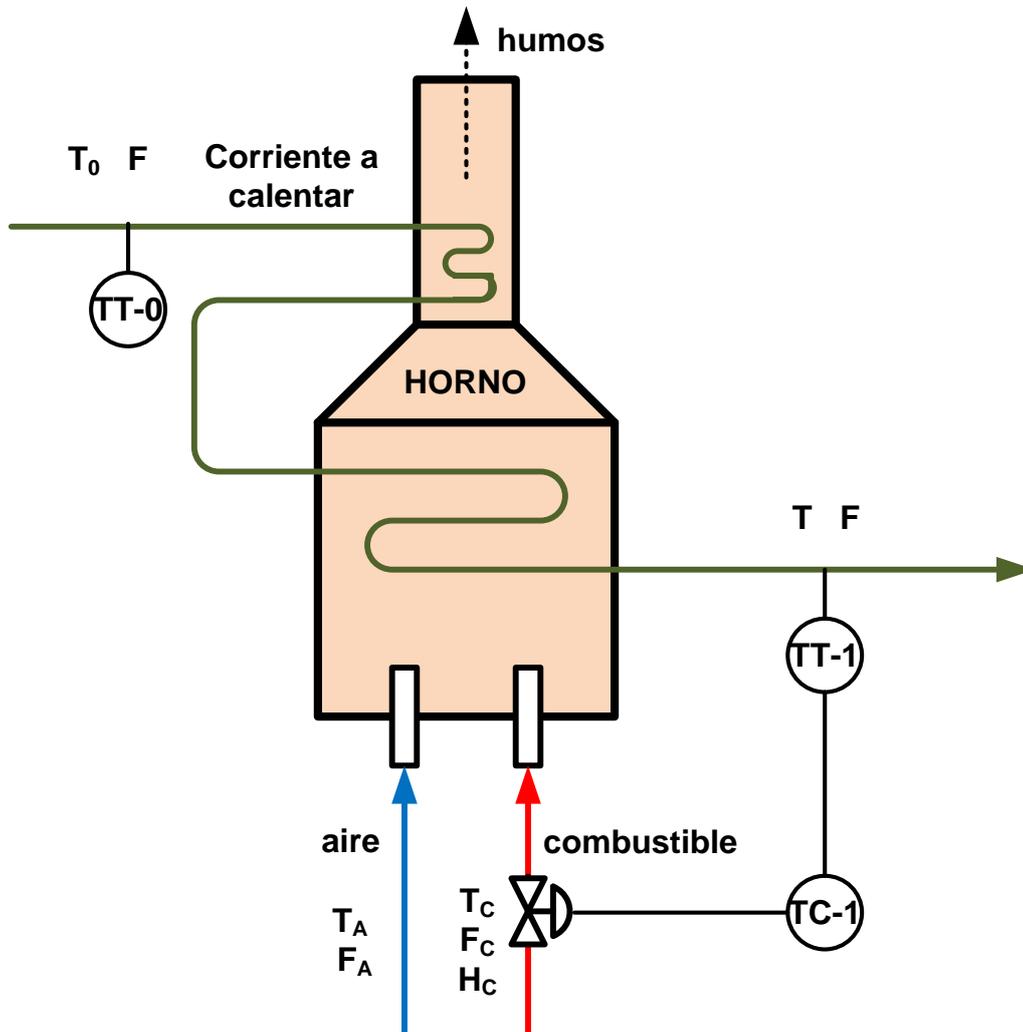


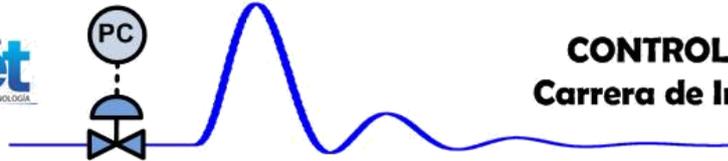
PROBLEMA –Avanación (Feedforward)

En un horno se calienta una corriente de proceso desde una temperatura T_0 hasta un valor de T que debe mantenerse acotado en torno de un valor de consigna de 320°C . El caudal de esta corriente (F) se mantiene prácticamente constante, y sólo en forma esporádica presenta algunos cambios.



El lazo de control de temperatura consignado en el diagrama P&I manipula el flujo de combustible y tiene las siguientes características:

- Válvula con actuador neumático y convertidor electro neumático incorporado. El comportamiento es lineal y la ganancia vale $4.8 \text{ m}^3/\text{h}/\%$. Dinámica despreciable.
- Transmisor de temperatura, termoresistencia Pt-500, señal electrónica, lineal, alcance 200 a 400°C y de reacción instantánea.
- Controlador PID electrónico, configurable para implementar estrategias de avanación. Compensación dinámica admitida un lead-lag.



- (a) Confeccione un diagrama en bloques del lazo simple de control de composición. Haga un exhaustivo listado de perturbaciones.
- (b) Elija la acción de válvula y controlador teniendo en cuenta que por ningún motivo la temperatura de salida deberá superar los 370 °C.
- (c) Ajuste el controlador PID con las tres acciones sabiendo que la función de transferencia que liga el caudal de combustible con la temperatura de salida se modela adecuadamente como:

$$G_p(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta F_c(s)} = \frac{0.7 e^{-1.4 s}}{(8s + 1)(6s + 1)}$$

La ganancia está en unidades consistentes y los parámetros dinámicos en minutos.

- (d) Desarrolle una estrategia de Avanciación (Control Feedforward) considerando en forma explícita la temperatura de alimentación al horno (T_0). Evalúe la compensación que se necesita. Construya los diagramas en bloques y P&I. La función de transferencia que relaciona la perturbación con la variable controlada puede asumirse igual a:

$$G_d(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta T_0(s)} = \frac{0.8 e^{-1.4 s}}{6s + 1}$$

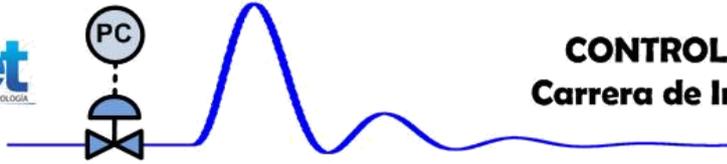
El transmisor de temperatura puede considerarlo similar al instalado en el lazo simple.

- (e) Considere como perturbación un cambio de la temperatura del fluido en el ingreso T_0 de + 20 °C en forma de escalón. Encuentre la respuesta temporal de la variable controlada en los siguientes casos:
- Lazo simple
 - Lazo simple con avanciación estática
 - Lazo simple con feedforward usando compensación dinámica (recordar que el dispositivo de control solo admite un lead-lag)

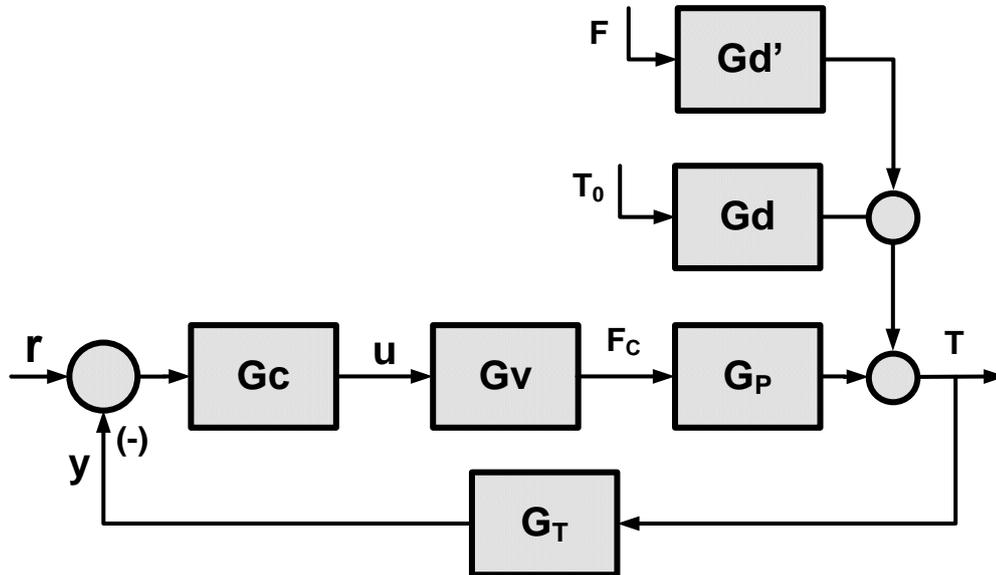
Establezca una comparación cuantitativa. ¿Se justifica en este caso usar avanciación?

- (f) Considere ahora como perturbación un cambio del caudal de alimentación F de + 5 m³/h en forma de escalón. Encuentre la respuesta temporal con las tres estrategias anteriores. Establezca una comparación cuantitativa y evalúe el efecto del control feedforward. En este caso la función de perturbación es:

$$G_d'(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta F(s)} = \frac{-1.9 e^{-1.4 s}}{7s + 1}$$



(a) Diagrama en Bloques



Perturbaciones:

- Caudal de alimentación (F)
- Temperatura de líquido alimentado (T_0)
- Caudal de aire (F_A)
- Temperatura del aire (T_A)
- Poder calorífico del combustible (H_c)

(b)

Acción de válvula

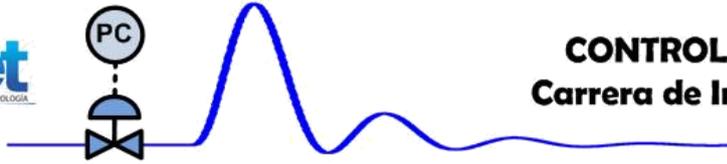
La situación más comprometida se produce cuando ante un fallo, la temperatura crece más allá de $370\text{ }^\circ\text{C}$. En consecuencia, en caso de fallo, la válvula de control deberá cerrar. La válvula deberá ser N/C o FC.

Acción del controlador

Ante un aumento en la temperatura de salida del líquido T la válvula debe cerrar para disminuir el flujo de combustible quemado y haciendo que la Temperatura T descienda. Entonces, a un aumento de la temperatura T , ($y \uparrow$) la válvula debe cerrar (como es N/C, $u \downarrow$). El controlador debe ser de acción inversa.

(c) Sintonización del controlador

Para sintonizar usando el método de Ziegler y Nichols en lazo cerrado, se deben calcular período último y ganancia última:



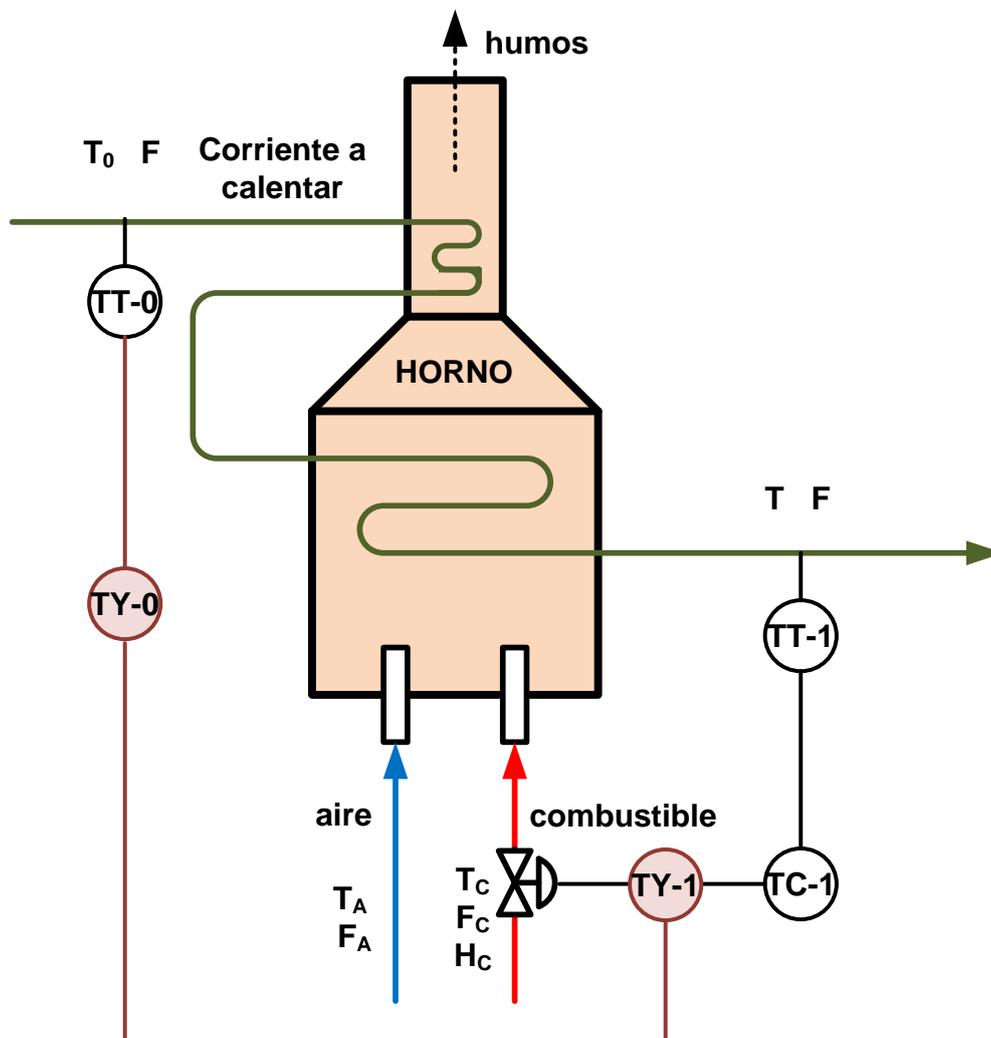
$$Gc(s)G(s) = Kc 4.8 \frac{0.7 e^{-1.4 s}}{(8s + 1)(6s + 1)} 0.5$$

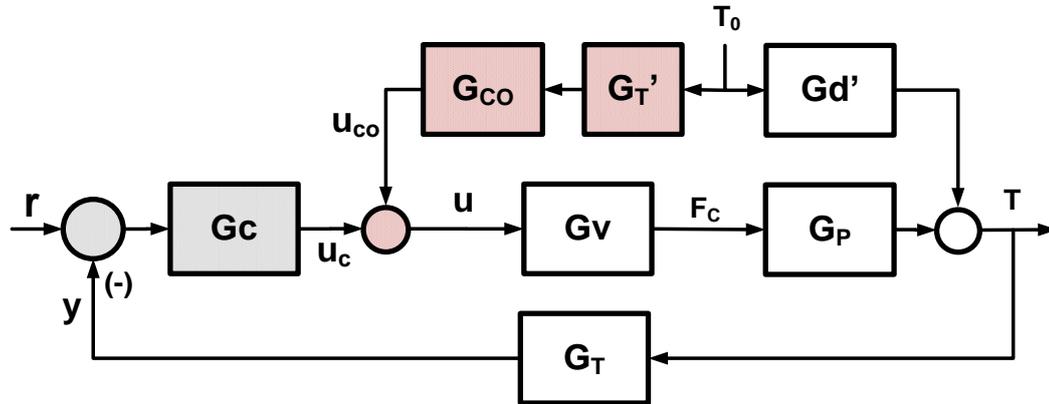
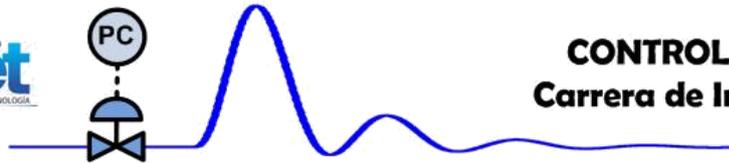
$$\omega_u = 0.448 \quad \tau_u = 14.0 \text{ min} \quad Kc_u = 4.39$$

Con las recomendaciones de Ziegler y Nichols resulta:

$$Kc = 0.26 \quad T_I = 7.0 \text{ min} \quad T_D = 3.5 \text{ min}$$

(d) Estrategia de Control por Avanzación





El transmisor de temperatura es similar al del lazo de realimentación:

$$G'_T(s) = G_T(s) = 0.5$$

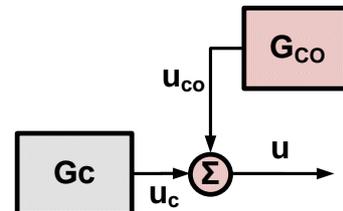
Primero hay que ver la forma en la que se relaciona la señal de corrección de la avanzación (u_{co}) con la del controlador de retroacción (u_c). Para analizar si se combina como suma o como producto, hay que relacionar la variable controlada con las dos variables de entrada al proceso: manipulación y perturbación, en condiciones de estado estacionario. En este caso, se vinculan a través del balance de energía:

$$F_C H_C \eta = F \rho C_P (T - T_0)$$

$$T = \frac{H_C \eta}{F \rho C_P} F_C + T_0 = \alpha F_C + T_0$$

Como la variable controlada es una combinación lineal de las otras dos, se establece que la avanzación es lineal y las señales se deben relacionarse a través de un sumador.

$$\Delta u(s) = \Delta u_c(s) + \beta \Delta u_{co}(s)$$



Para sintetizar el compensador se debe relacionar la entrada ΔT_0 con la salida $\Delta T(s)$.

$$\Delta T(s) = \frac{Gd(s) + G'_T(s)G_{CO}(s)Gv(s) G_P(s)}{1 + Gc(s)Gv(s) G_P(s)G_T(s)} \Delta T_0(s)$$

Para que sea nulo el efecto de los cambios de T_0 en la variable controlada, debe ser cero el numerador:

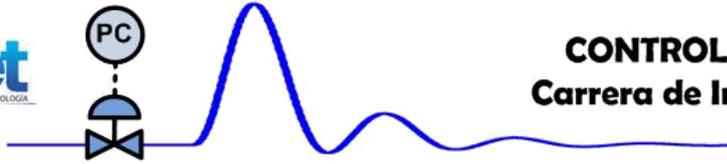
$$Gd(s) + G'_T(s)G_{CO}(s)Gv(s) G_P(s) = 0$$

Con lo que:

$$G_{CO}(s) = -\frac{Gd(s)}{G'_T(s)Gv(s) G_P(s)}$$

Para este caso particular:

$$G_{CO}(s) = -\frac{0.8}{0.5 \cdot 4.8 \cdot 0.7} (8s + 1) = -0.48 (8s + 1)$$



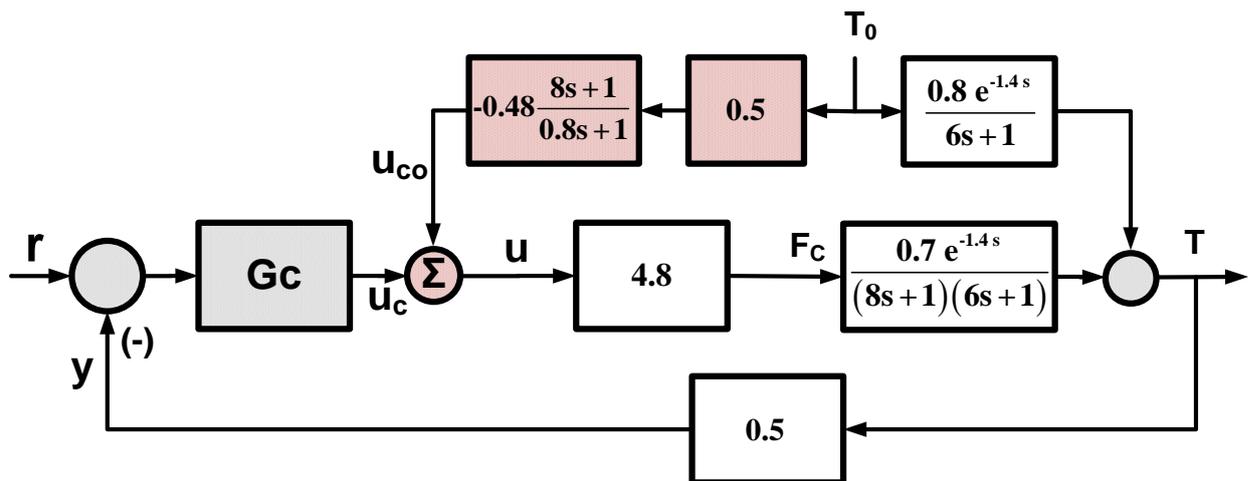
Como este es un elemento no causal (por lo tanto no se puede construir), debe recurrirse a uno similar que logre una compensación similar. Como se dispone de un lead-lag, el compensador tendrá la función de transferencia:

$$G_{CO}(s) = -0.48 \frac{8s + 1}{0.8s + 1}$$

Se pone una constante de tiempo lo más pequeña posible en el denominador (normalmente 10 veces menor que la del numerador). Si el compensador solo es una ganancia (-0.48), entonces la compensación es solamente estática.

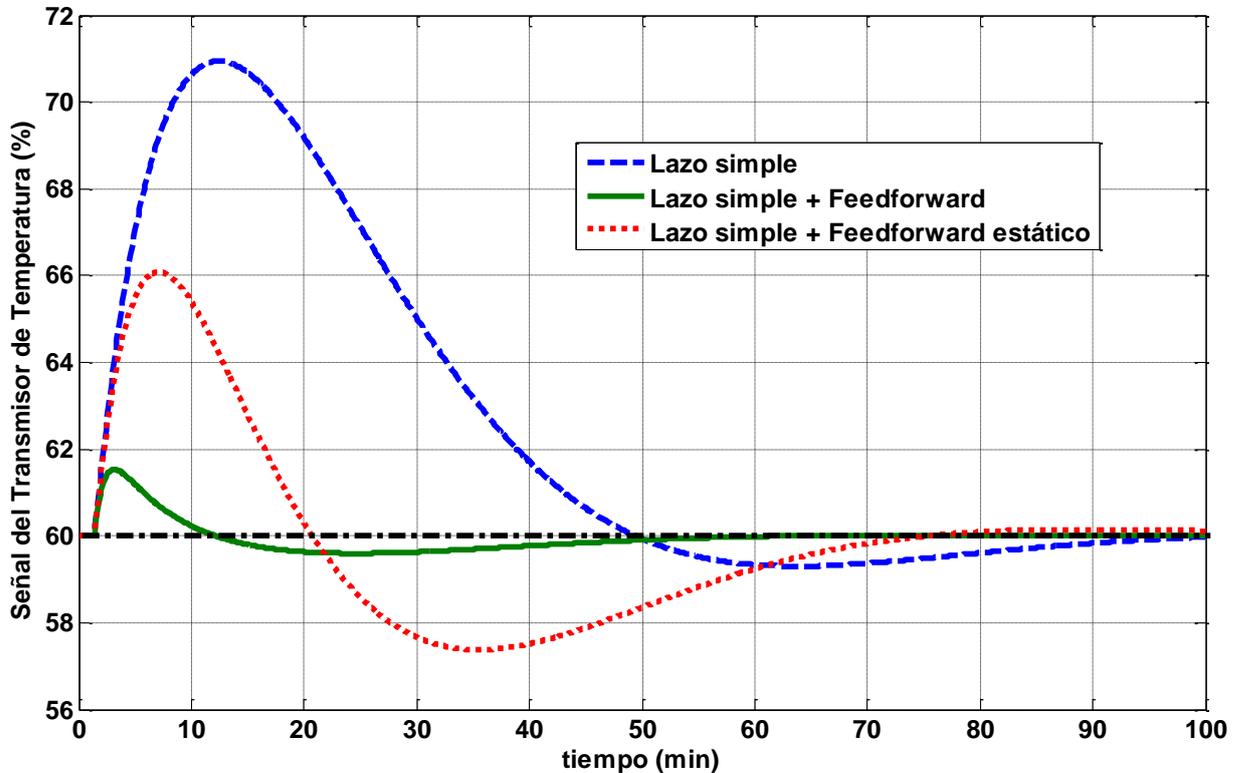
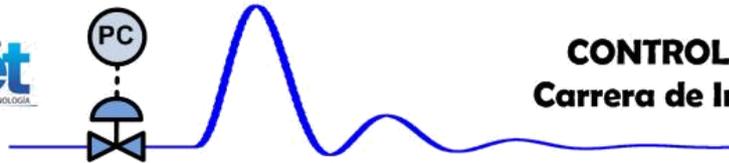
(e) Respuesta a una perturbación escalón de T_0 de + 10 °C

El sistema a simular es el mostrado en el diagrama en bloques.



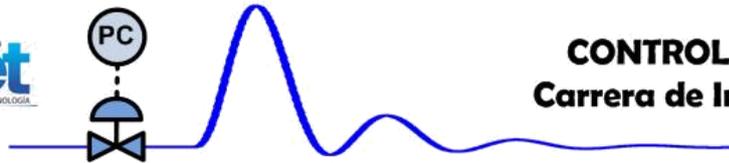
Queda claro que la perturbación es precisamente la considerada en el diseño de avanzación. Los parámetros para comparar la performance de cada estrategia serán el máximo y mínimo apartamiento y la integral del valor absoluto del error:

Estrategia	Δy_{max}	Δy_{min}	IAE
Lazo simple	10.9 %	-0.7 %	29.5
Lazo simple + Feedforward	1.5 %	-0.4 %	1.9
Lazo simple + Feedforward Estático	6.1 %	-2.6 %	14.9



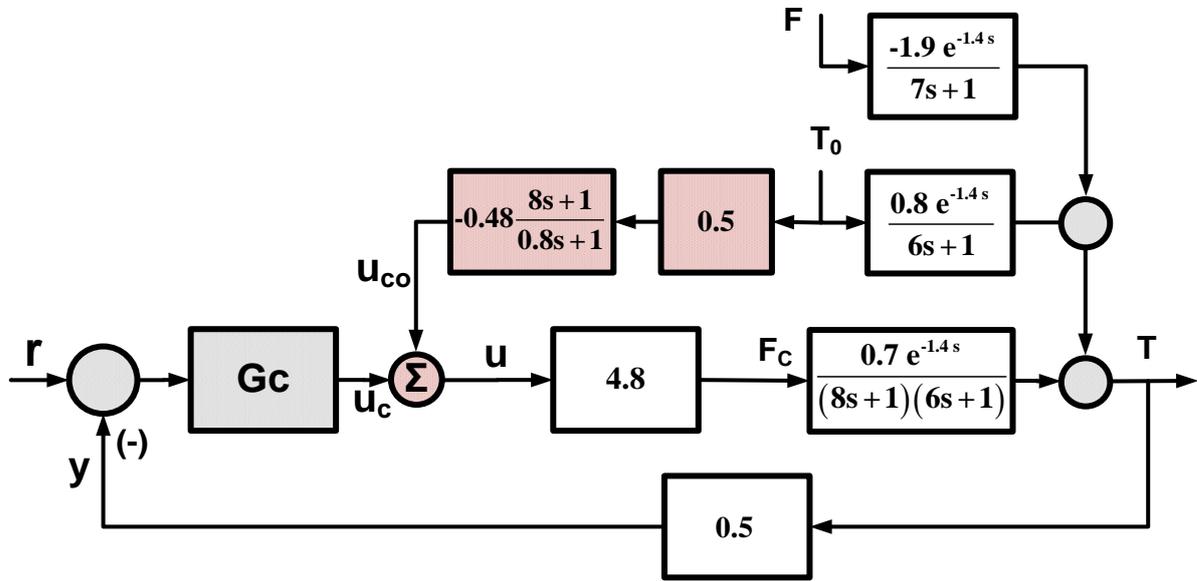
Se puede apreciar que la compensación estática y dinámica es un excelente complemento de la retroacción ya que acota notablemente la excusión de la variable controlada haciendo que la IEA disminuya casi 15 veces.

El feedforward solamente estático también produce mejoras, pero claramente este beneficio no es tan importante comparado con la compensación dinámica.



(f) Perturbación: cambio del caudal de alimentación F de + 5 m³/h

El sistema a simular es el mostrado en el diagrama en bloques, siendo la entrada el caudal de alimentación.



La respuesta para los tres casos es la misma ya que la avanzación no toma en cuenta el efecto de esta perturbación y toda la corrección corre por cuenta de la retroacción.

