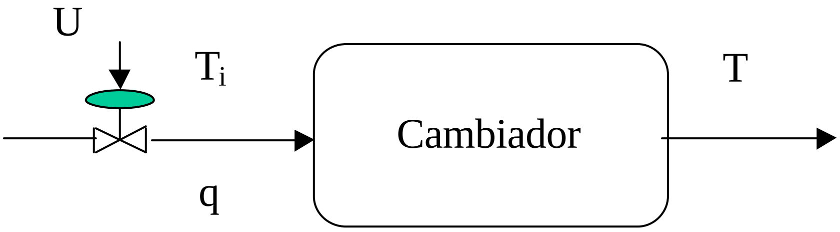
Problemas de "Control e Instrumentación de Procesos Químicos"
4º Ingeniería Química

Problema 3



El sistema de la figura representa un cambiador de calor con un sistema de calefacción interno no manipulable que calienta un flujo q de agua desde una temperatuta T_i a una temperatura T. Para este sistema se sabe que la relación entre la señal de control a la válvula de entrada U en % y la temperatura de salida T en ºC (tiempo en minutos) viene dada por:

$$3\frac{dT}{dt} = -6T + 8.8U^2 + 2T_i$$

y que cuando el sistema está en estado estacionario y la temperatura de entrada es de 10 ºC, la de salida es de 40ºC.

Se pide:

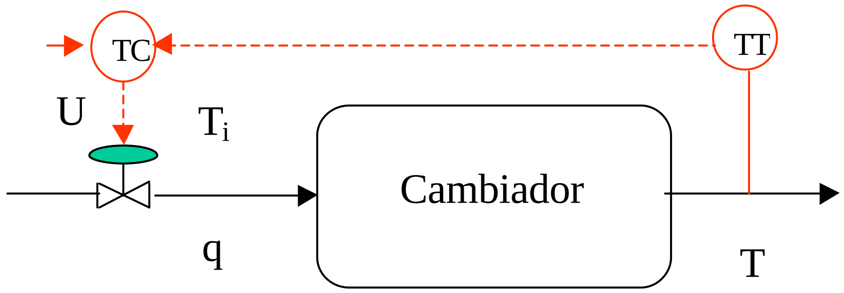
1) Dibujar sobre el esquema un sistema de control de temperatura

2) Suponer que el regulador es de tipo PI, dibujar un diagrama de bloques y calcular la función de transferencia en lazo cerrado despreciando la dinámica del transmisor.

3) Si la ganancia del regulador es 0.1 y el tiempo integral es de 1min estudiar la estabilidad del sistema y la forma de la respuesta ante un salto escalón en la referencia.

4) Calcular el error estacionario frente a un salto de 0.2 ºC en la temperatura de entrada de líquido.

1) Para controlar la temperatura la única posibilidad es actuar sobre el flujo de líquido a través de la válvula, luego el sistema de control deberá ser como en la figura, donde se ha instalado un transmisor de temperatura y un controlador que manipula la válvula:



2) Para poder establecer un diagrama de bloques y calcular la función de transferencia en lazo cerrado hay que calcular la función de transferencia del proceso. Ello ha de hacerse linealizando el modelo matemático que relaciona la temperatura T con la apertura de la válvula y la temperatura T_i :

$$3\frac{dT}{dt} = -6T + 8.8U^2 + 2T_i$$

Para ello comenzaremos calculando un punto de linealización estacionario. De acuerdo a los datos del problema se conoce que cuando la temperatura de entrada es de 10 ºC, la de salida es de 40ºC en equilibrio, de modo que:

$$\begin{aligned}
&0 = -6 * 40 + 8.8U_0^2 + 2 * 10 \\
&U_0 = \sqrt{(240 - 20)/8.8} = 5\ \% \\
&T_0 = 40\ ^\circ C \\
&T_{i0} = 10\ ^\circ C
\end{aligned}$$

Desarrollando en serie de Taylor:

$$\begin{aligned}
3\frac{dT}{dt} &= -6T + 8.8U^2 + 2T_i \\
3\frac{d\Delta T}{dt} &= -6\Delta T + (2 * 8.8U_0)\Delta U + 2\Delta T_i \\
&= -6\Delta T + 88\Delta U + 2\Delta T_i
\end{aligned}$$

$$\text{con}\quad \Delta T = T - T_0 \quad \Delta U = U - U_0 \quad \Delta T_i = T_i - T_{i0}$$

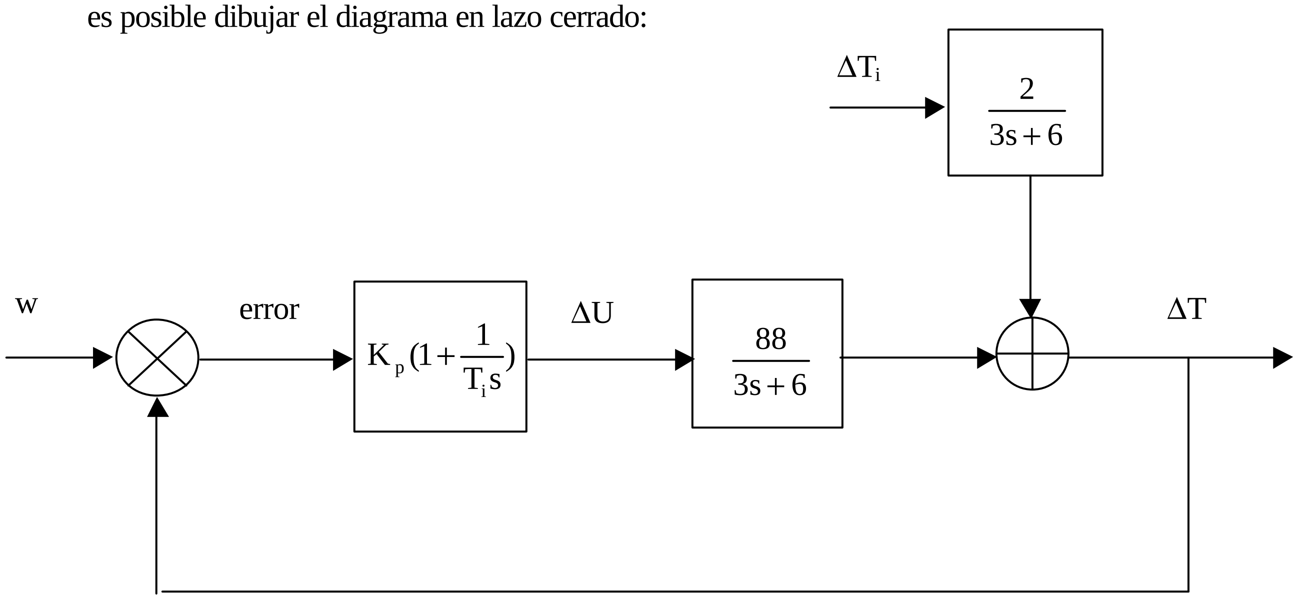
de modo que tomando transformadas de Fourier a ambos lados del signo igual, resulta:

$$3s\Delta T(s) = -6\Delta T(s) + 88\Delta U(s) + 2\Delta T_i(s)$$
$$3s\Delta T(s) + 6\Delta T(s) = 88\Delta U(s) + 2\Delta T_i(s)$$
$$\Delta T(s) = \frac{88}{3s+6}\Delta U(s) + \frac{2}{3s+6}\Delta T_i(s)$$

y ahora, teniendo en cuanta que la función de transferencia de un regulador PI es:

$$K_p(1+\frac{1}{T_i s})$$

es posible dibujar el diagrama en lazo cerrado:



y calcular la función de transferencia en lazo cerrado:

$$\Delta T(s) = \frac{88}{3s+6}\Delta U(s) + \frac{2}{3s+6}\Delta T_i(s) = \frac{88}{3s+6}K_p(\frac{T_i s+1}{T_i s})(W(s) - \Delta T(s)) + \frac{2}{3s+6}\Delta T_i(s)$$

$$\left[1+\frac{88}{3s+6}K_p(\frac{T_i s+1}{T_i s})\right]\Delta T(s) = \frac{88}{3s+6}K_p(\frac{T_i s+1}{T_i s})W(s) + \frac{2}{3s+6}\Delta T_i(s)$$

$$\Delta T(s) = \frac{\frac{88}{3s+6}K_p(\frac{T_i s+1}{T_i s})}{1+\frac{88}{3s+6}K_p(\frac{T_i s+1}{T_i s})}W(s) + \frac{\frac{2}{3s+6}}{1+\frac{88}{3s+6}K_p(\frac{T_i s+1}{T_i s})}\Delta T_i(s) =$$

$$= \frac{K_p 88(T_i s+1)}{(3s+6)T_i s + K_p 88(T_i s+1)}W(s) + \frac{2T_i s}{(3s+6)T_i s + K_p 88(T_i s+1)}\Delta T_i(s)$$

3) Dando valores a los parámetros del PI según el enunciado:

$$\Delta T(s) = \frac{8.8(s+1)}{(3s+6)s+8.8(s+1)} W(s) + \frac{2s}{(3s+6)s+8.8(s+1)} \Delta T_i(s) =$$

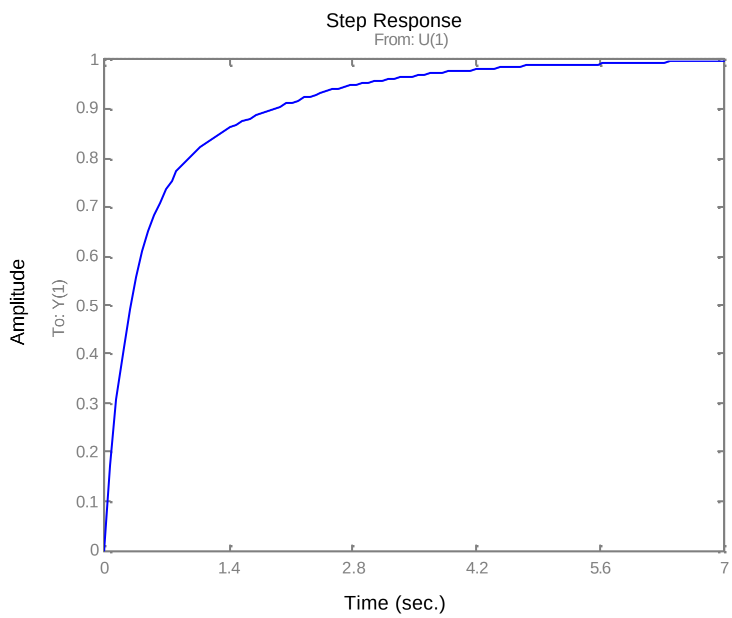
$$= \frac{8.8(s+1)}{3s^2+14.8s+8.8} W(s) + \frac{2s}{3s^2+14.8s+8.8} \Delta T_i(s)$$

y la estabilidad en lazo cerrado puede calcularse mediante las raíces de:

$$3s^2 + 14.8s + 8.8 = 0$$

$$s_{1,2} = \frac{-14.8 \pm \sqrt{14.8^2 - 4\;3\;8.8}}{6} = -0.69, \quad -4.24$$

como ambas son reales y negativas la respuesta ante un cambio en la referencia seriá estable y sin oscilaciones, con un punto de inflexión, aunque no muy acusado debido a que hay un polo (-4.24) bastante mas rápido que el otro (-0.69). El tiempo de asentamiento lo impondrá el polo mas lento y será del orden de 3/0.69 = 4.34 min para un criterio del 5% (4/0.69 = 5.79 min para un criterio del 1%). Sin embargo, como además el sistema tiene un cero en lazo cerrado en s= -1, se producirá un adelantamiento de la misma. La ganancia es 1. La respuesta total se ve en la figura.



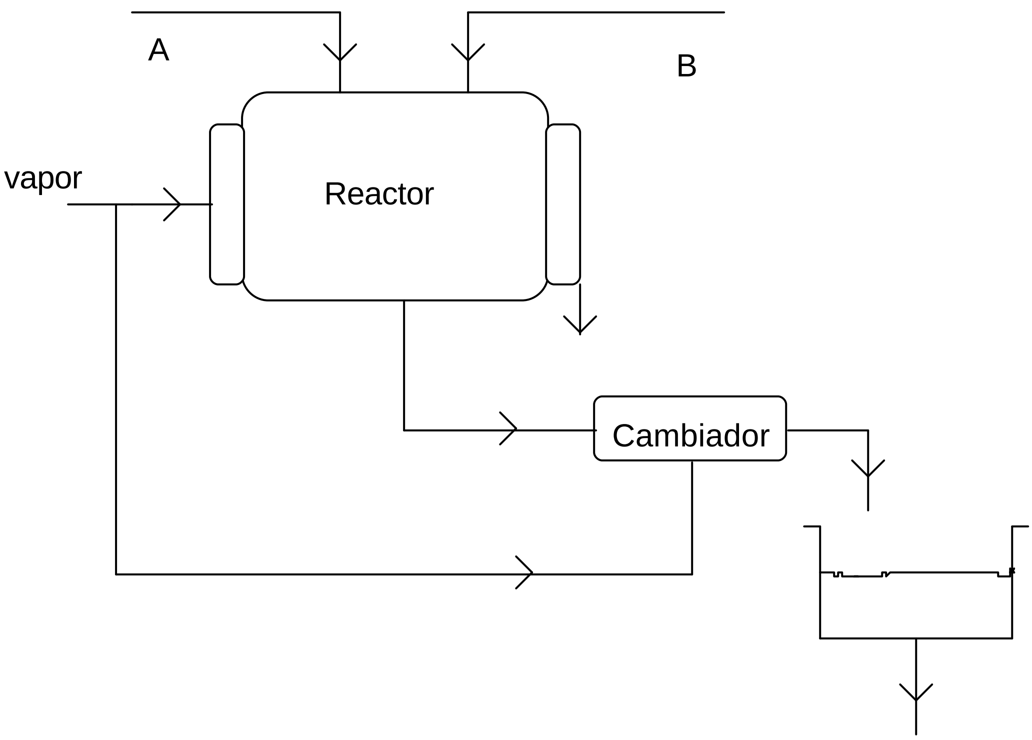
4) Para calcular el error estacionario ante un cambio de 0.2 ºC en T_i :

$$E(s) = \frac{-D(s)}{1+G(s)R(s)} \Delta T_i(s) = \frac{-2s}{3s^2+14.8s+8.8}\frac{0.2}{s}$$

$$e_{ss} = \lim_{s\to 0} sE(s) = \lim_{s\to 0} s\frac{-2s}{3s^2+14.8s+8.8}\frac{0.2}{s} = 0$$

y no habrá error estacionario.

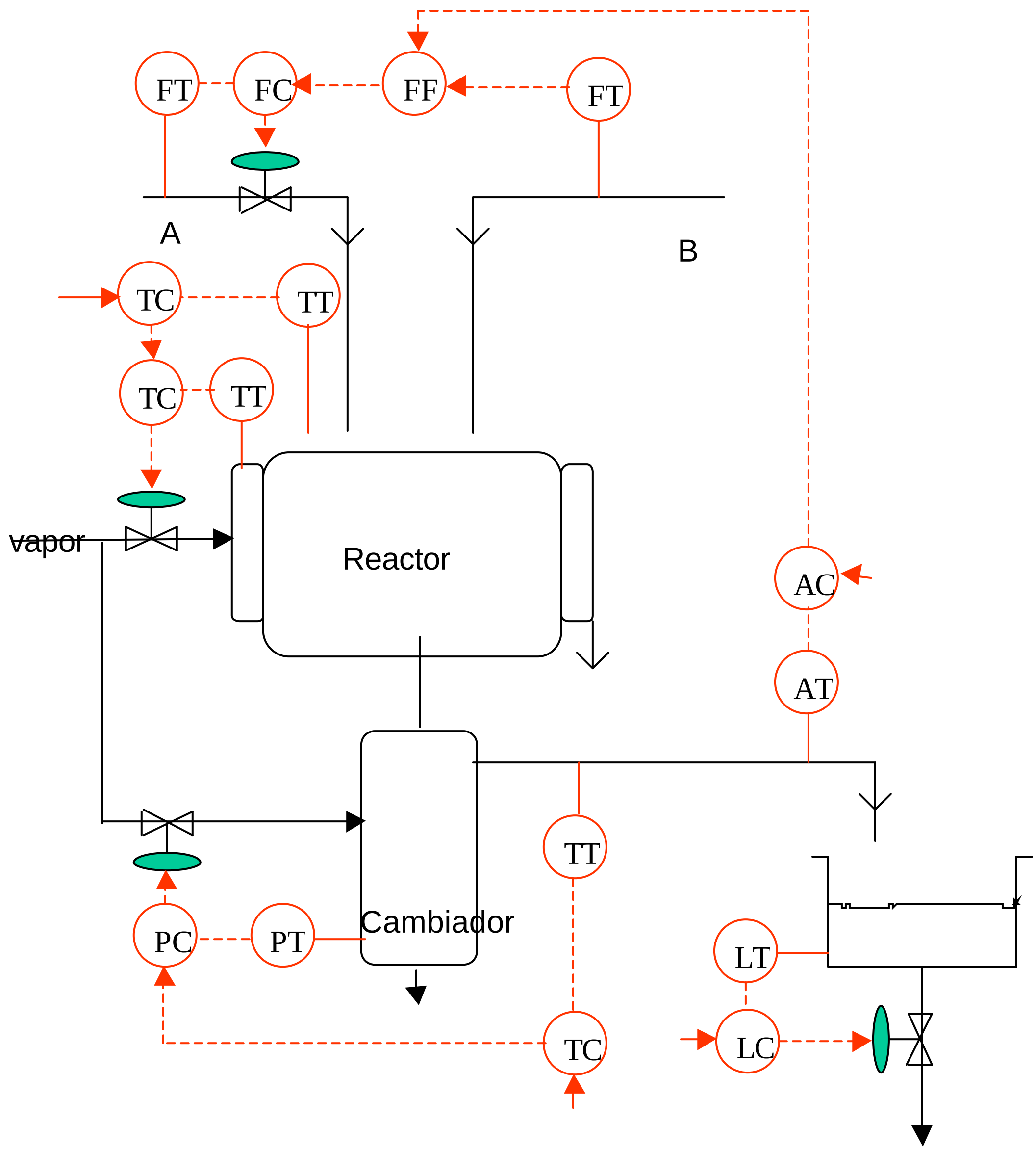
Problema 4



En la figura se representa un reactor químico endotérmico en el que dos productos A y B reaccionan a una cierta temperatura para formar el producto C, el cual, tras calentarse en el intercambiador de calor, se almacena transitoriamente en un depósito. El líquido sale por rebose de la cámara de reacción por lo que siempre está llena de productos, mientras que la cámara de calefacción recibe un vapor cuya presión experimenta fuertes cambios y sale como condensado. El caudal del producto B no es manipulable.

Diseñar un sistema de control tal que sea capaz de mantener con precisión la temperatura final del producto C, así como su concentración. Colocar la instrumentación, transmisores y actuadores, necesarios y explicar su funcionamiento.

Solución:



Los objetivos que deben cubrirse son:

- Mantener en el nivel en el depósito, como debe hacerse en todos ellos.
- Dado que se trata de una reacción química, mantener las proporciones en la entrada de productos al reactor.
- Mantener la temperatura del reactor exotérmico para asegurar una adecuada operación a pesar de los cambios en la presión del vapor de calefacción
- Mantener la temperatura requerida en el producto C
- Mantener la concentración del producto C

Para ello se ha diseñado un esquema de control como el de la figura. Dado que el caudal del producto B no es manipulable, implementaremos el control de proporciones de productos A y B como un ratio sobre B, manejando el caudal de A.

Esto hace que el caudal de salida del reactor venga impuesto, y la única alternativa para instalar el control de nivel del depósito es actuando sobre su salida.

El control de temperatura del reactor se implementa como una cascada con un lazo interno de control de temperatura de la camisa, a fin de absorber mas rápidamente en este último las variaciones de presión de vapor de suministro.

El control de temperatura de C tras el cambiador se implementa también como otra cascada cuyo lazo interno es uno de presión de vapor por la misma razón.

El control de composición de C se realiza utilizando un analizador para su medida y actuando sobre la proporción de ambos productos, que puede de este modo corregirse si la composición de C no es la adecuada.

Nótese que tanto la temperatura como la composición de C podrían medirse en el depósito, esto incluiría en el lazo de control las posibles perturbaciones que se produjeran en el mismo y actuaría como un filtro para cambios rápidos, aunque también introduciría un elemento mas lento que haría menos ágil la respuesta del sistema.