Examen de la Asignatura:

Control e Instrumentación de Procesos Químicos

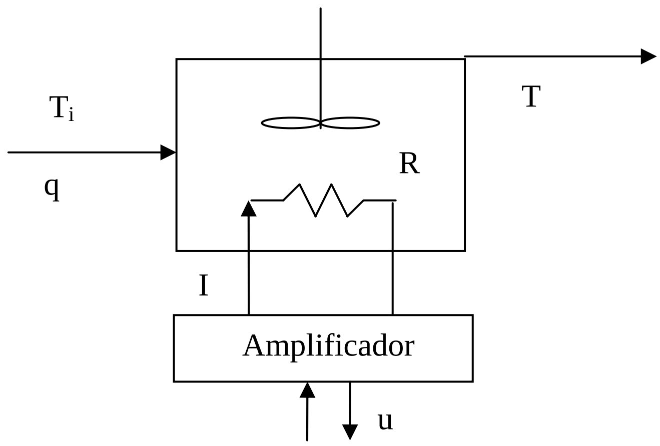
Junio 2007

3.5 h.

Problema 1

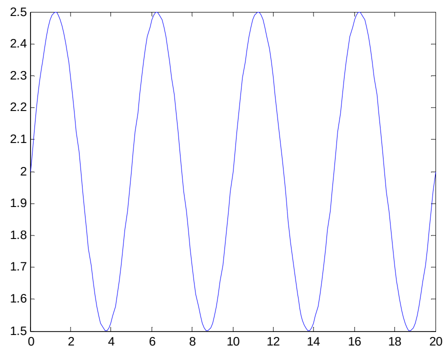
En el proceso de la figura 1 puede verse un recipiente cerrado y aislado térmicamente de 10 l. de volumen que recibe un flujo q de un fluido, que sale por rebose, y se calienta desde una temperatura T_i hasta otra T gracias a una resistencia eléctrica R alimentada por una corriente continua I que procede de un amplificador. Este amplificador tiene una entrada u que admite señales en el rango 4-20 mA y proporciona una salida de corriente variable en el rango 0–8A. Se dispone también de un transmisor de temperatura calibrado en el rango 10-60ºC y de un PID comercial que trabaja en unidades de %.

Las propiedades del fluido son sensiblemente constantes en el rango de temperaturas de operación y se sabe que cuando el sistema está en estado estacionario, el caudal de entrada es de 2 l/min, la corriente del amplificador es de 4A y la temperatura de entrada es de 20ºC, entonces la temperatura de salida es de 28ºC.



Se pide:

a) Calcular un modelo matemático del proceso que relacione las principales variables. Se supondrá que el amplificador tiene una respuesta lineal y rápida.
b) Proponer un esquema de regulación con nomenclatura ISA y dibujar el correspondiente diagrama de bloques indicando las funciones de transferencia.
c) Sintonizar un regulador de la temperatura de salida con el criterio de obtener una respuesta ante cambios de referencia en salto sin error estacionario y con un tiempo de asentamiento en lazo cerrado de 12min. en un entorno del punto de operación antes indicado.
d) Si el caudal de entrada experimenta cambios sinusoidales como los de la figura 2, (Tiempo en min.)¿Cómo evolucionará la temperatura de salida en lazo cerrado?



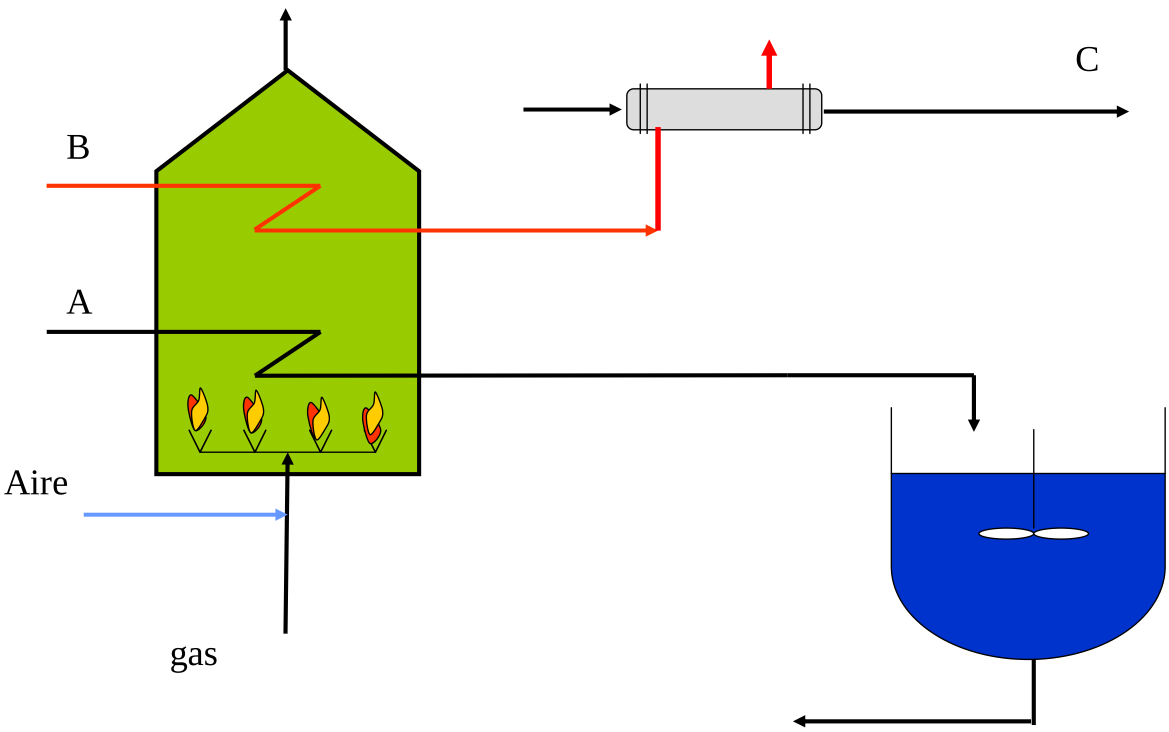
e) Si se aumenta la ganancia del regulador desde su valor de diseño, ¿Cómo evolucionará la respuesta en lazo cerrado del sistema ante cambios en salto de la temperatura de entrada?

Problema 2

En el esquema de la figura, se desea procesar ciertas cantidades del producto líquido A, que requiere calentarlo hasta una temperatura de 90ºC en un horno alimentado por gas y mantener el producto en un tanque un tiempo de residencia de 20 min. Se sabe que la presión de suministro del gas experimenta cambios apreciables.

El horno calienta simultáneamente una corriente no manipulable de otro producto B que debe mantenerse siempre a una temperatura superior a 80ºC y que se utiliza para calentar una tercera corriente C hasta 40ºC, temperatura que debe mantenerse con precisión a pesar de posibles perturbaciones en la corriente de calefacción.

Se pide:
Dibujar un diagrama de control del proceso, con la instrumentación adecuada y nomenclatura ISA, y explicar su funcionamiento.



Examen de la Asignatura:

Control e Instrumentación de Procesos Químicos

Junio 2007

1 h.

Cuestiones

a) ¿Podrias aplicar reguladores PID en el control de un sistema multivariable cuya RGA fuera:? Razona la respuesta.

$$\begin{array}{cc} & \begin{bmatrix} y1 & y2 & y3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.8 & -1{,}2 & 1.4 \\ -1.2 & 0.9 & 1.3 \\ 1.4 & 1.3 & -1.7 \end{bmatrix} \end{array}$$

En caso afirmativo, ¿Cuál seria la mejor combinación de lazos entrada/salida?

b) ¿Qué es el lugar de las raíces y para qué se puede emplear?

c) ¿Qué puedes decir sobre el tipo de respuesta ante un salto en escalón en la entrada que presentaría un sistema cuya función de transferencia fuera:

$$\frac{(s+2)e^{-3s}}{s^2+s+1} \quad ?$$

d) ¿Qué se entiende por robustez de un lazo de control? ¿Qué medidas de robustez conoces?

e) ¿Bajo que condiciones se puede emplear una compensación en adelanto o feedforward?

Solución Problema 1

a) Calcular un modelo matemático del proceso que relacione las principales variables. Se supondrá que el amplificador tiene una respuesta lineal y rápida.

Un balance energético conduce a:

$$V\frac{dT}{dt} = q(T_i - T) + \frac{I^2 R}{\rho c_e} \quad \text{con V, R}, \rho, \text{c}_\text{e} = \text{cte.}$$

$$\text{I} = \frac{\text{8-0}}{\text{20-4}}(u_m - 4) = 0.5(u_m - 4) \quad \text{con u}_\text{m} \text{ en mA}$$

$$\text{I} = \frac{\text{8-0}}{\text{20-4}}\frac{16}{100}u = 0.08u \quad \text{con u en \%}$$

En estado estacionario:

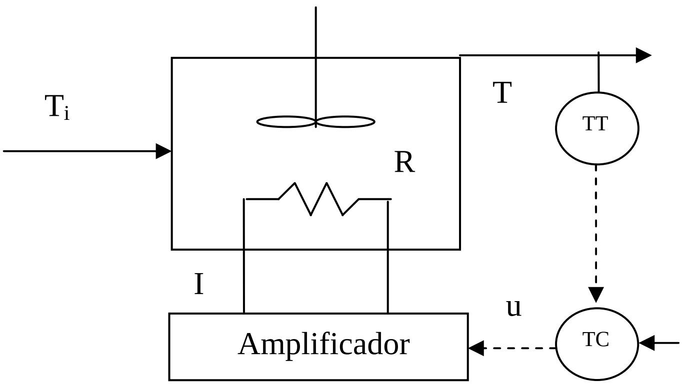
$$0 = 2(20-28) + \frac{4^2 R}{\rho c_e} \qquad \Rightarrow \quad \frac{R}{\rho c_e} = 16/16 = 1$$

$$4 = \frac{8-0}{20-4}(u-4) \qquad \Rightarrow \quad u_0 = 12mA = 50\ \%$$

por tanto:

$$10\frac{dT}{dt} = q(T_i - T) + 0.0064u^2 \quad \text{T en ºC} \quad \text{u en \%}$$

b) Proponer un esquema de regulación con nomenclatura ISA y dibujar el correspondiente diagrama de bloques indicando las funciones de transferencia.



Para calcular las funciones de transferencia hemos de linealizar previamente el modelo:

$$V\frac{dT}{dt}=q(T_i-T)+6410^{-4}u^2$$

$$f(\dot{T},T,T_i,q,I)=0$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial \dot{T}}\right|_0(\dot{T}-\dot{T}_0)+\left.\frac{\partial f}{\partial T}\right|_0(T-T_0)+\left.\frac{\partial f}{\partial T_i}\right|_0(T_i-T_{i0})+\left.\frac{\partial f}{\partial q}\right|_0(q-q_0)+\left.\frac{\partial f}{\partial u}\right|_0(u-u_0)=0$$

$$V\frac{d\Delta T}{dt}=-q_0\Delta T+q_0\Delta T_i+(T_{i0}-T_0)\Delta q+0.0128u_0\Delta u$$

$$\frac{V}{q_0}\frac{d\Delta T}{dt}+\Delta T=\Delta T_i+\frac{(T_{i0}-T_0)}{q_0}\Delta q+\frac{0.0128\,u_0}{q_0}\Delta u$$

$$\tau\frac{d\Delta T}{dt}+\Delta T=K_1\Delta T_i+K_2\Delta q+K_3\Delta u$$

$$5\frac{d\Delta T}{dt}+\Delta T=\Delta T_i-4\Delta q+0.32\Delta u$$

y tomando transformadas de Laplace resultan las funciones de transferencia:

$$T(s)=\frac{K_1}{\tau s+1}T_i(s)+\frac{K_2}{\tau s+1}Q(s)+\frac{K_3}{\tau s+1}U(s)$$

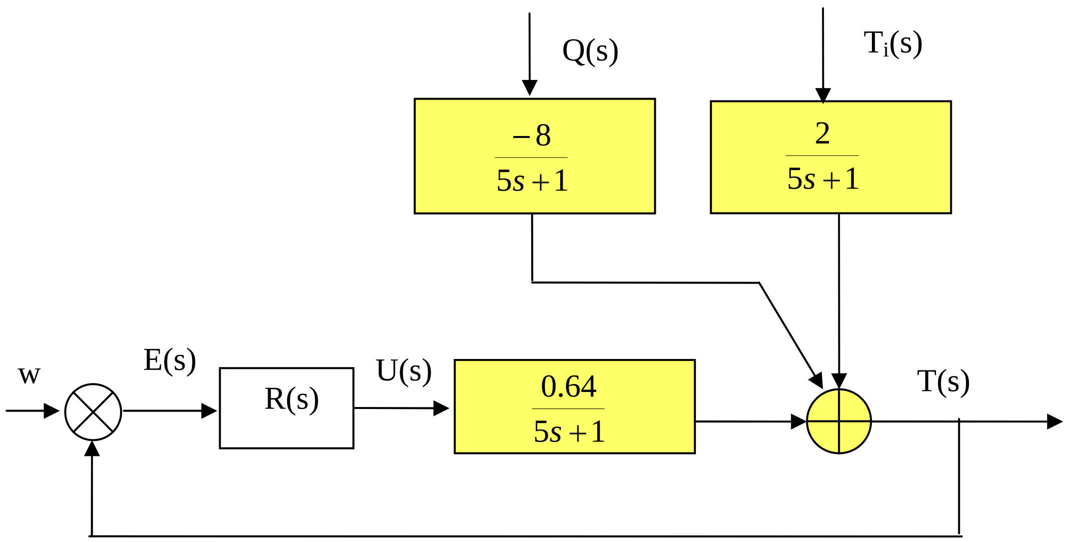
$$T(s)=\frac{1}{5s+1}T_i(s)+\frac{-4}{5s+1}Q(s)+\frac{0.32}{5s+1}U(s)$$

T en ºC , u en %

y como el span es 100/(60-10) = 2,

$$T(s)=\frac{2}{5s+1}T_i(s)+\frac{-8}{5s+1}Q(s)+\frac{0.64}{5s+1}U(s)$$ T en % del span, u en %

El diagrama de bloques es entonces:



c) Sintonizar un regulador de la temperatura de salida con el criterio de obtener una respuesta ante cambios de referencia en salto sin error estacionario y con un tiempo de asentamiento en lazo cerrado de 12min. en un entorno del punto de operación antes indicado.

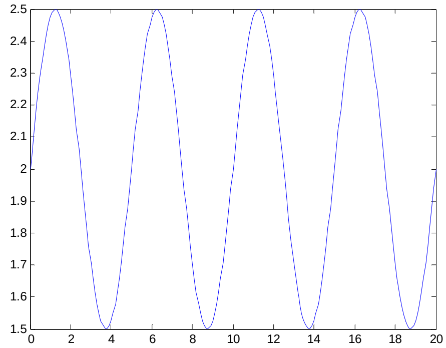
En función del objetivo de sintonía Podemos utilizar el criterio de λ-tuning o Rivera-Morari IMC, con un PI o un PID. El λ deseado tendría que ser 12/3 = 4 min. el cual cumple el mínimo $\lambda > 0.2\tau = 0.2 * 5 = 1$

En nuestro caso el retardo es cero, luego el criterio de sintonía da:

$$K_p = \frac{2\tau + d}{2K\lambda} = \frac{5}{0.64 * 4} = 1.953 \, \% / \%$$
$$T_i = \tau + d/2 = 5 \text{ min}$$

siendo igual para un PID pues resulta $T_d = 0$. $R(s) = k_p(1 + \frac{1}{T_i s}) = 1.953 \frac{5s+1}{5s}$

d) Si el caudal de entrada experimenta cambios sinusoidales como los de la figura 2, (Tiempo en min.)¿Cómo evolucionará la temperatura de salida en lazo cerrado?



La función de transferencia en lazo cerrado es:

$$Y(s) = \frac{G(s)R(s)}{1 + G(s)R(s)} W(s) + \frac{D_1(s)}{1 + G(s)R(s)} V_1(s) + \frac{D_2(s)}{1 + G(s)R(s)} V_2(s)$$

$$T(s) = \frac{\frac{0.64}{5s+1} 1.953 \frac{5s+1}{5s}}{1 + \frac{0.64}{5s+1} 1.953 \frac{5s+1}{5s}} W(s) + \frac{\frac{2}{5s+1}}{1 + \frac{0.64}{5s+1} 1.953 \frac{5s+1}{5s}} T_i(s) + \frac{\frac{-8}{5s+1}}{1 + \frac{0.64}{5s+1} 1.953 \frac{5s+1}{5s}} Q(s)$$

$$T(s) = \frac{-40s}{(5s+1)(5s+1.235)} Q(s)$$

La frecuencia de oscilación es:
2*pi/5 = 1.256 rad/min
La respuesta será una sinusoide de frecuencia 1.256 rad/min, amplitud de oscilación |G(jω)| y desfase arg G(jω):

$$T(j\omega) = \frac{-40j\omega}{(5j\omega+1)(5j\omega+1.235)}Q(j\omega)$$

$$\left|\frac{-40j\omega}{(5j\omega+1)(5j\omega+1.235)}\right| = \left|\frac{-40 \quad 1.256}{(5j1.256+1)(5j1.256+1.235)}\right| = 1.2344$$

$$\arg\frac{-40j\omega}{(5j\omega+1)(5j\omega+1.235)} = -\pi/2 - arctg\,\frac{1}{5\omega} - arctg\,\frac{1.235}{5\omega} = -1.9294\ rad$$

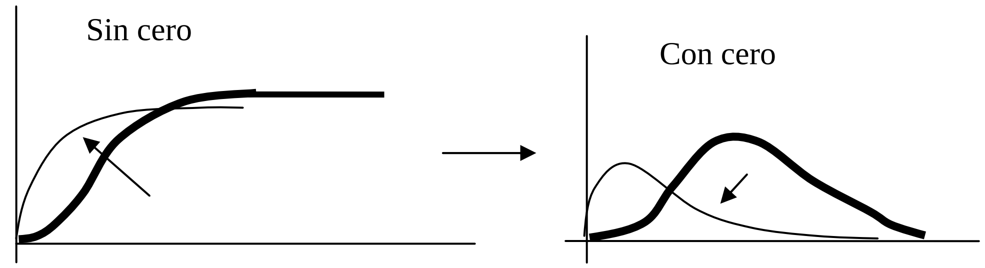
f) Si se aumenta la ganancia del regulador desde su valor de diseño, ¿Cómo evolucionará la respuesta en lazo cerrado del sistema ante cambios en salto de la temperatura de entrada?

Puesto que

$$T(s) = \frac{\dfrac{2}{5s+1}}{1+\dfrac{0.64}{5s+1}k_p\dfrac{5s+1}{5s}}T_i(s) = \frac{10s}{(5s+1)(5s+0.64k_p)}T_i(s)$$

El sistema tiene un polo en -1/5, otro en -0.64k_p/5 que irá haciéndose mas negativo, y siempre será real, a medida que la ganancia k_p aumente, así como un cero en 0.

Nótese que un cero en s=0 produce una respuesta que es la derivada de la misma respuesta sin el cero. La respuesta si no hubiese cero seria la de un sistema de segundo orden sobreamortiguado cada vez mas rápido que acercaría su respuesta a uno de primer orden con constante de tiempo 5, y por tanto, con tiempo de asentamiento 15 min. Por tanto ante un salto en la temperatura de entrada la respuesta será:



Problema 2 Solución