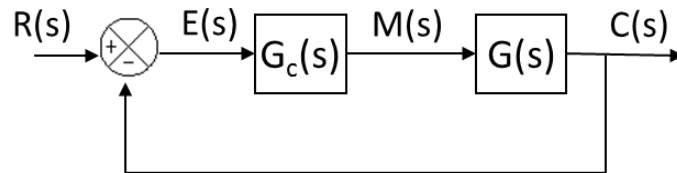


DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS

Repartido 5

5.1. En el diagrama de bloques de la figura se representa un circuito de control con retroalimentación:

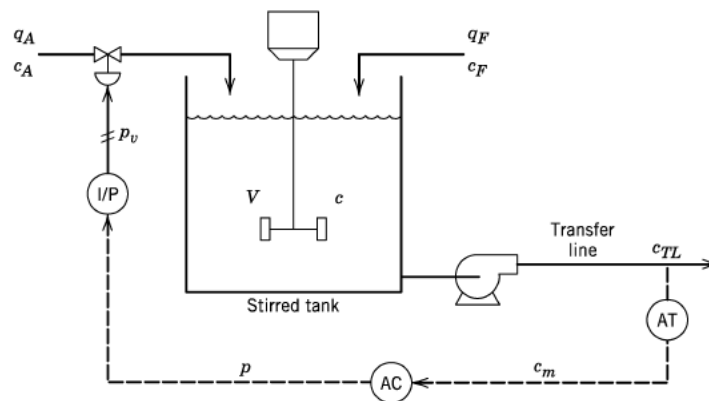


El proceso se puede representar según:

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

Donde la ganancia del proceso es $K = 0,50$ y las constantes de tiempo son $\tau_1 = 1$ min y $\tau_2 = 0,5$ min. El controlador es proporcional, $G_c(s) = K_c$.

- Obtener la función de transferencia de circuito cerrado y la ecuación característica.
 - ¿Para qué valores de la ganancia del controlador, la respuesta del circuito a un escalón en el punto de control es sobreamortiguada, críticamente amortiguada y subamortiguada? ¿Se puede hacer que el circuito sea inestable?
 - Determinar la respuesta del circuito cerrado a un cambio en escalón unitario en el set point para $K_c = 0,16$; $0,25$ y 5 .
 - Diseñar un controlador PID con el método de síntesis directa.
- 5.2. Se tiene el siguiente tanque de mezcla de un componente con dos corrientes de distintas concentraciones:



Como la concentración de la corriente A suele variar se implementa el sistema de control que se muestra en la figura.

Se conocen los siguientes datos:

- $V = 5 \text{ m}^3$ $q_F = 7,0 \text{ m}^3/\text{min}$ (constante) q_A (nominal) = $0,5 \text{ m}^3/\text{min}$
 $C_F = 50 \text{ kg/m}^3$ (constante) C_A (nominal) = 800 kg/m^3 Puede asumirse igual densidad para todas las corrientes.

La línea de transferencia tiene 10 cm de diámetro interno y 200 m de longitud.

El trasmitter mide una concentración entre 0 y 200 kg/m³ para una salida entre 4 y 20 mA y su dinámica es despreciable.

El transductor I/P genera una salida de 3 a 15 psig para una entrada entre 4 y 20 mA.

La válvula de control es una válvula de porcentaje igual que responde a la siguiente expresión

$q_A = 0,17 + 0,03 * 20^{\left(\frac{p_v - 3}{12}\right)}$ y se sabe que, para un cambio en escalón de la presión de entrada, la válvula requiere aproximadamente 1 minuto para alcanzar la nueva posición (unos 5 τ).

- Dibuje el diagrama de bloques y determine las funciones de transferencia (excepto el controlador).
 - Determine el rango de ganancia del controlador para el cual el sistema con bucle cerrado es estable.
 - Implemente el sistema en un diagrama Xcos, con un controlador proporcional, siguiendo el método de Ziegler-Nichols. Asuma que hay un aumento instantáneo de 100 kg/m³ en la concentración CA y grafique la respuesta. Indique cuánto vale el offset.
 - Se consigue otro trasmitter similar pero que trabaja en un rango de 0 a 400 kg/m³; implementar un control para la misma perturbación y mostrarlo en otro diagrama Xcos.
- 5.3. Existen varias expresiones que relacionan la presión de vapor de una sustancia con la temperatura. Una de las más conocidas es la de Clapeyron:

$$\log(P) = A + \frac{B}{T}$$

Donde T es la temperatura absoluta. Otra ecuación es la de Riedel:

$$\log(P) = A + \frac{B}{T} + C \log(T) + DT^\beta$$

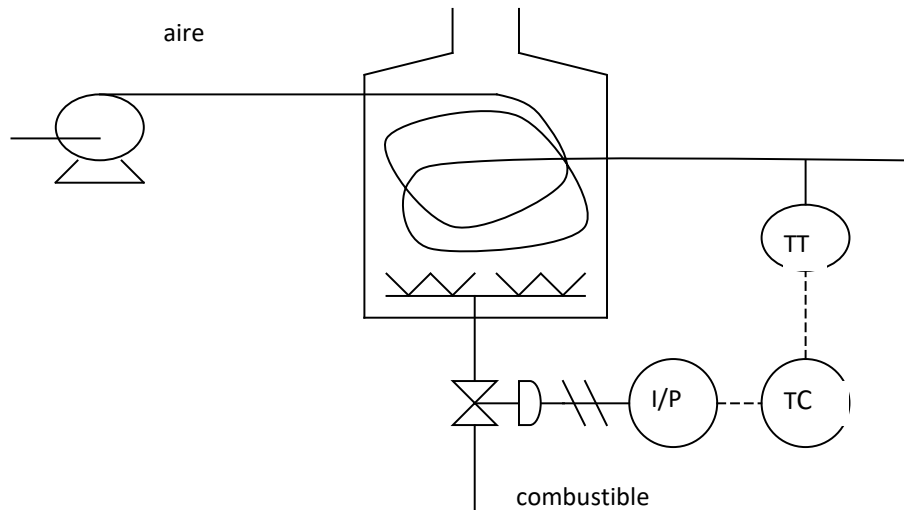
Donde β es un exponente entero que generalmente tiene el valor 2.

Se tienen los siguientes datos experimentales para la presión de vapor del benceno:

| T (K) | P (kPa) | T (K) | P (kPa) |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 290,1 | 8,6 | 353,5 | 102,0 |
| 302,4 | 15,4 | 356,2 | 110,9 |
| 311,2 | 22,5 | 358,9 | 120,1 |
| 318,7 | 30,5 | 362,3 | 132,8 |
| 325,1 | 39,0 | 365,2 | 144,5 |
| 330,5 | 47,6 | 367,9 | 155,8 |
| 334,9 | 55,5 | 370,5 | 167,6 |
| 338,9 | 63,8 | 373,2 | 180,0 |
| 343,0 | 73,0 | 375,8 | 193,5 |
| 346,2 | 81,3 | 378,5 | 207,9 |
| 349,9 | 91,3 | 381,3 | 223,4 |

- Encuentre los coeficientes de ambas expresiones para el benceno. Utilice regresión lineal y búsqueda mediante *fminsearch*.

- b. Grafique los datos experimentales y las predicciones del modelo.
 - c. Grafique los residuos.
 - d. Discuta cuál de las dos expresiones es más adecuada.
- 5.4. El horno mostrado en la figura se utiliza para calentar el aire que se suministra a un regenerador catalítico. El transmisor de temperatura se calibra a 300 – 500 °F.

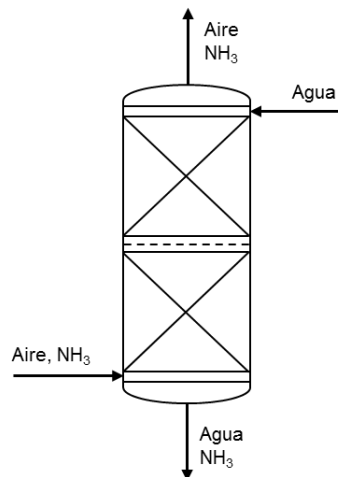


Para un cambio en escalón de 0,2 mA en la salida del controlador se obtuvieron los siguientes datos de respuesta:

| Tiempo (min) | Temp. (°F) | Tiempo (min) | Temp. (°F) |
|--------------|------------|--------------|------------|
| 0 | 425 | 5,5 | 436,6 |
| 0,5 | 425 | 6,0 | 437,6 |
| 1,0 | 425 | 7,0 | 439,4 |
| 1,5 | 425 | 8,0 | 440,7 |
| 2,0 | 425 | 9,0 | 441,7 |
| 2,5 | 426,4 | 10,0 | 442,5 |
| 3,0 | 428,5 | 11,0 | 443,0 |
| 3,5 | 430,6 | 12,0 | 443,5 |
| 4,0 | 432,4 | 14,0 | 444,1 |
| 4,5 | 434,0 | 16,0 | 444,5 |
| 5,0 | 435,3 | 19,0 | 445,0 |

- a. Dibujar el diagrama de bloques completo con la especificación de unidades para cada señal desde/hacia cada bloque.
- b. Adecuar los datos del proceso mediante un modelo de primer orden más tiempo muerto.
- c. Ajustar el controlador proporcional para una respuesta de razón de asentamiento un cuarto y obtener la desviación para un cambio en escalón de + 5 °F en el punto de control.
- d. Ajustar un controlador PI y comparar la respuesta del sistema con el controlador diseñado en c.

5.5. Considérese el absorbedor que aparece en la figura:

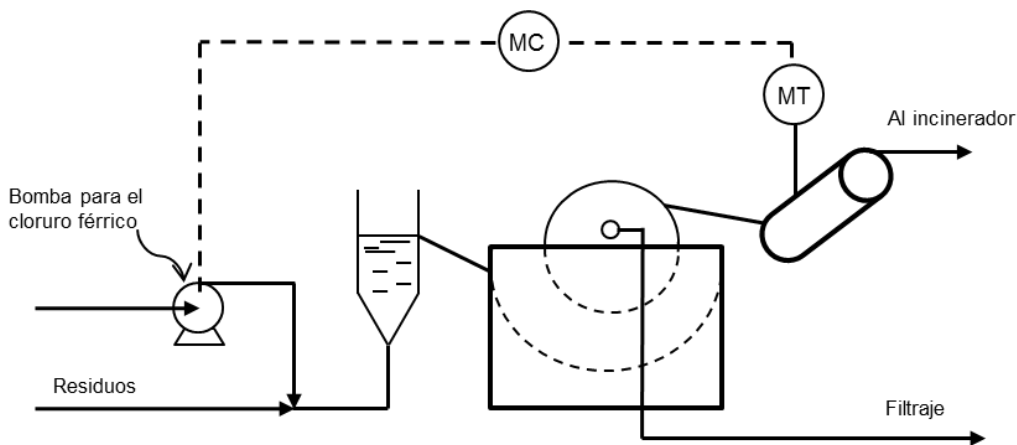


Al absorbedor entra un flujo de gas cuya composición es de 90% molar de aire y 10% molar de amoníaco. Antes de liberar este gas a la atmósfera es necesario remover la mayor parte del NH_3 del mismo, lo cual se puede hacer mediante absorción en agua. La concentración de NH_3 en el vapor que sale no debe sobrepasar las 200 ppm; el absorbedor se diseñó de manera que el vapor de salida tenga una concentración de 50 ppm de NH_3 . Durante el diseño se hicieron varias simulaciones dinámicas, de ellas se obtuvieron los siguientes datos de respuesta frente a un cambio escalón en el caudal de agua que llega al absorbedor:

| Tiempo (s) | Caudal de agua (gpm) | NH_3 a la salida (ppm) | Tiempo (s) | Caudal de agua (gpm) | NH_3 a la salida (ppm) |
|------------|----------------------|---------------------------------|------------|----------------------|---------------------------------|
| 0 | 250 | 50 | 90 | 200 | 51,20 |
| 0 | 200 | 50 | 100 | 200 | 51,26 |
| 10 | 200 | 50 | 110 | 200 | 51,35 |
| 20 | 200 | 50 | 120 | 200 | 51,45 |
| 30 | 200 | 50,12 | 130 | 200 | 51,55 |
| 40 | 200 | 50,30 | 140 | 200 | 51,63 |
| 50 | 200 | 50,60 | 160 | 200 | 51,70 |
| 60 | 200 | 50,77 | 180 | 200 | 51,76 |
| 70 | 200 | 50,90 | 200 | 200 | 51,77 |
| 80 | 200 | 51,05 | 220 | 200 | 51,77 |

- a. Diseñar el circuito de control para mantener la concentración de NH_3 a la salida en un punto de control de 50 ppm y dibujar el diagrama de flujo. En el mercado se cuenta con algunos instrumentos que se pueden utilizar para tal propósito. Existe un sensor y transmisor de concentración electrónico con calibración de 0 – 200 ppm, el cual tiene un retardo de tiempo despreciable. También se cuenta con una válvula accionada por aire que, abierta completamente y con la caída de presión de 10 psi que dispone, permite el paso de 500 gpm; la constante de tiempo del actuador de la válvula es de 5s. Para completar el diseño se pueden requerir más instrumentos. Se debe especificar la acción de la válvula de control y del controlador.

- b. Dibujar el diagrama de bloques de circuito cerrado y obtener la función de transferencia de cada bloque (con excepción del controlador). La respuesta del absorbedor se aproxima con un modelo de primer orden más tiempo muerto. Se debe obtener la ganancia y el período últimos del circuito. El tiempo muerto del sistema se puede aproximar con una aproximación de Padé de primer orden.
 - c. Ajustar un controlador proporcional para una respuesta de razón de asentamiento de un cuarto y obtener la desviación cuando se cambia el punto de control a 60 ppm.
 - d. Repetir la parte c. para un controlador PID.
- 5.6. Considérese el filtro de vacío que se muestra en la figura; este proceso es parte de una planta de tratamiento de residuos. La mezcla de desechos entra al filtro con casi 5% de sólidos; en el filtro de vacío se elimina el agua de la mezcla, con lo que queda cerca del 25% de sólidos. La capacidad para filtrar la mezcla en el filtro rotatorio depende del pH de la mezcla que entra al filtro. Una forma para controlar la humedad en la mezcla que entra al incinerador es añadir compuestos químicos (cloruro férrico) a la mezcla que entra a proceso, para mantener el pH necesario. En la figura se ilustra la estructura de control que se usa; el rango del transmisor de humedad es de 60 a 95%.



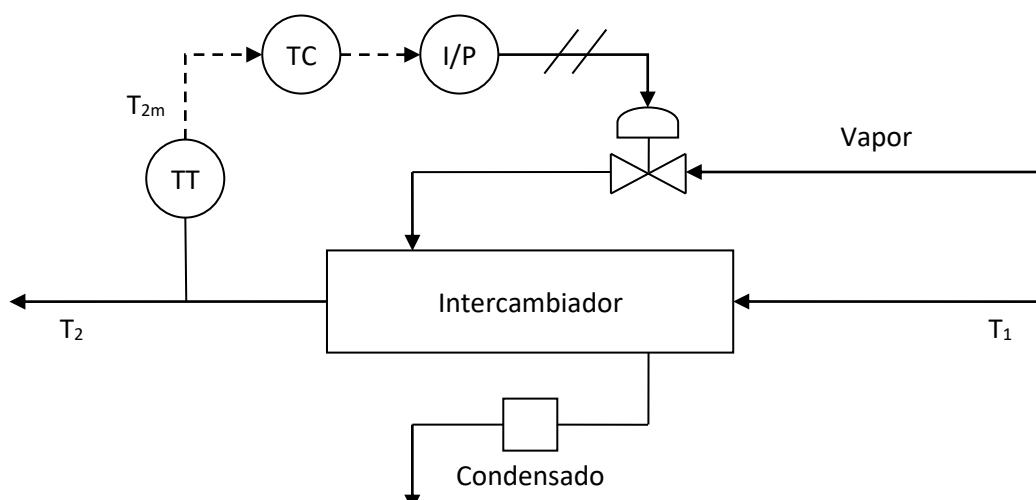
Los siguientes datos se obtuvieron con una prueba de escalón sobre la salida del controlador (MC) de + 2 mA:

| Tiempo (min) | Humedad | Tiempo (min) | Humedad |
|--------------|---------|--------------|---------|
| 0,0 | 75,0 | 10,5 | 70,9 |
| 1,0 | 75,0 | 11,5 | 70,3 |
| 1,5 | 75,0 | 13,5 | 69,3 |
| 2,5 | 75,0 | 15,5 | 68,6 |
| 3,5 | 74,9 | 17,5 | 68,0 |
| 4,5 | 74,6 | 19,5 | 67,6 |
| 5,5 | 74,3 | 21,5 | 67,4 |
| 6,5 | 73,6 | 25,5 | 67,1 |
| 7,5 | 73,0 | 29,5 | 67,0 |
| 8,5 | 72,3 | 33,5 | 67,0 |
| 9,5 | 71,6 | | |

Cuando la entrada de humedad al filtro se cambió en 2%, se obtuvieron los siguientes datos:

| Tiempo (min) | Humedad | Tiempo (min) | Humedad |
|--------------|---------|--------------|---------|
| 0 | 75,0 | 9 | 76,2 |
| 1 | 75,0 | 10 | 76,3 |
| 2 | 75,1 | 11 | 76,4 |
| 3 | 75,3 | 13 | 76,6 |
| 4 | 75,4 | 15 | 76,7 |
| 5 | 75,6 | 17 | 76,8 |
| 6 | 75,7 | 21 | 76,9 |
| 7 | 75,9 | 25 | 77,0 |
| 8 | 76,1 | 29 | 77,0 |

- Dibujar el diagrama de bloques del circuito de control para la humedad; incluir las posibles perturbaciones.
 - Aproximar las funciones de transferencia G_P y G_D mediante modelos de primer orden más tiempo muerto y determinar los parámetros de los modelos. Despreciar la dinámica de la bomba. Discutir sobre la capacidad para controlar la humedad a la salida (Determinar el rango de la ganancia del controlador para el cual puede efectivamente controlarse el sistema).
 - Obtener la ganancia de un controlador proporcional para respuesta de IAE mínima. Calcular la desviación para un cambio del 1% en la humedad de entrada.
 - Obtener la ganancia última y el período último para este circuito de control. El término de tiempo muerto se puede aproximar mediante una aproximación de Padé de primer orden.
 - Ajustar un controlador PI para una respuesta de razón de amortiguamiento de un cuarto.
- 5.7. Una corriente de proceso se calienta usando un intercambiador de camisa y tubos. La temperatura de salida se controla ajustando el flujo de vapor con una válvula.



Durante una prueba con bucle abierto la presión de vapor P_s se cambia bruscamente de 18 a 20 psig, y se obtiene la siguiente tabla de temperaturas.

| t (min) | T_{2m} (mA) |
|---------|---------------|
| 0 | 12,0 |
| 1 | 12,0 |
| 2 | 12,5 |
| 3 | 13,1 |
| 4 | 14,0 |
| 5 | 14,8 |
| 6 | 15,4 |
| 7 | 16,1 |
| 8 | 16,4 |
| 9 | 16,8 |
| 10 | 16,9 |
| 11 | 17,0 |
| 12 | 16,9 |

En las condiciones nominales de operación la válvula de control tiene una ganancia $K_v = 0,9$ psi/psi y el transductor una ganancia $K_{TP} = 0,75$ psi/mA. Determinar los parámetros del controlador PID y graficar las respuestas a un aumento instantáneo de la presión de vapor de 2 psig, usando:

- Síntesis directa (seleccionar τ_c)
 - Cohen-Coon
 - ITAE
- 5.8. Considere un tanque calefactor completamente agitado con un controlador PI que controla la temperatura del tanque ajustando el calor intercambiado mediante una resistencia eléctrica. La medida de la corriente de salida, efectuada mediante un termopar, se describe por un sistema de primer orden con tiempo muerto.

$$\rho VC_p = 4000 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$wC_p = 500 \text{ kJ/min.}^\circ\text{C}$$

$$T_{in} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_r = 80 \text{ }^\circ\text{C (set point)}$$

$$\theta_m = 1 \text{ min (termopar)}$$

$$\tau_m = 5 \text{ min (termopar)}$$

- Estudie la dinámica del bucle abierto cuando la T_{in} pasa instantáneamente a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a los 10 minutos.
- Estudie el comportamiento de ciclo cerrado con $K_c = 50 \text{ kJ/min.}^\circ\text{C}$ y $\tau_I = 2 \text{ min}$.
- Repita lo anterior para $K_c = 500 \text{ kJ/min.}^\circ\text{C}$.
- Repita b. con controlador solamente proporcional.
- Implemente límites para el calor aportado al tanque (por ejemplo, entre 0 y 2,5 veces el valor de estado estacionario). Evalúe la respuesta de un controlador proporcional con $K_c = 5000 \text{ kJ/min.}^\circ\text{C}$ cuando el set point se cambia de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a $90 \text{ }^\circ\text{C}$.

- f. Determine la ganancia última y el período último para el proceso del tanque calentador del problema anterior.
- g. Calcule los parámetros de ajuste de Ziegler-Nichols del controlador PI y determine la respuesta esperada de la temperatura del tanque cuando la temperatura del fluido de entrada desciende a 50 °C.
- 5.9. Considere un fermentador (batch) con una camisa para refrigeración en el que los microorganismos verifican la cinética de Monod.

$$C_p = C_{pj} = 1 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

$$\rho = \rho_j = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$UA = 0,4 \text{ kcal/h}\cdot^\circ\text{C}$$

$$Y_{X/S} = 0,5 \text{ kg/kg}_{\text{sustrato}}$$

$$\Delta H_R = -0,466 \text{ kcal/kg}_{\text{sustrato}}$$

$$S_0 = 20 \text{ kg/m}^3$$

$$v_j = 2 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_s = 0,1 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_m = 1 \text{ h}^{-1}$$

$$T_{set} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$X_0 = 0,1 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 20 \text{ m}^3$$

$$V_j = 1 \text{ m}^3$$

$$T_{j,in} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

- a. Determinar el tiempo de fermentación para que la concentración de sustrato llegue a 0,1 kg/m³ en una operación de bucle abierto.
- b. Implementar un control PI de la temperatura manipulando el flujo de la camisa con $K_c = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}\cdot^\circ\text{C}$, $\tau_I = 0,8 \text{ h}$ (cuando la temperatura inicial del caldo es 25 °C.) Discuta la eventual incidencia de partir de diferentes temperaturas iniciales y la incidencia de diferentes temperaturas de refrigerante.