Procesos y Máquinas Industriales II
Clase I

Prof. Mariana Suarez

Aspectos generales

- Objetivos de la asignatura
- Programa y bibliografía
- Requisitos de aprobación

Definición y clasificación de sistemas

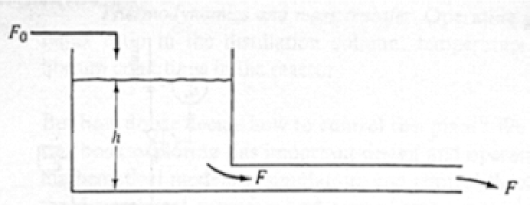
Sistema:ente físico, que es objeto de estudio.
Definido por sus límites.
Clasificación de sistemas según sus límites

- Intercambio de energía térmica con el medio
  $\begin{cases} no: \text{ adiabático} \\ si: \text{no adiabático} \end{cases}$
- Intercambio de materia con el medio $\begin{cases} no: \text{ cerrado} \\ si: \text{abierto} \end{cases}$
- Deformación $\begin{cases} no: \text{rígido} \\ si: \text{no rígido} \end{cases}$

Comportamiento dinámico de sistemas-Ejemplo 1

Tanque cilíndrico vertical con líquido incompresible bombeado a caudal variable

- $F_0[m^3/s]$: caudal de entrada
- $F[m^3/s]$: caudal de salida
- $h[m]$: altura de líquido en el tanque.



F_0, F, h, son funciones del tiempo.

Comportamiento dinámico de sistemas- Ejemplo 1 (cont.)

En el estado estacionario, no hay variación en el tiempo. Entonces:

$$\begin{aligned} flujo\,entrada &= flujo\,salida \\ \bar{F}_0 &= \bar{F} \end{aligned}$$

Dado $\bar{F} \longrightarrow \bar{h}$ (constante)
A mayor $\bar{F} \longrightarrow$ mayor $\bar{h}$

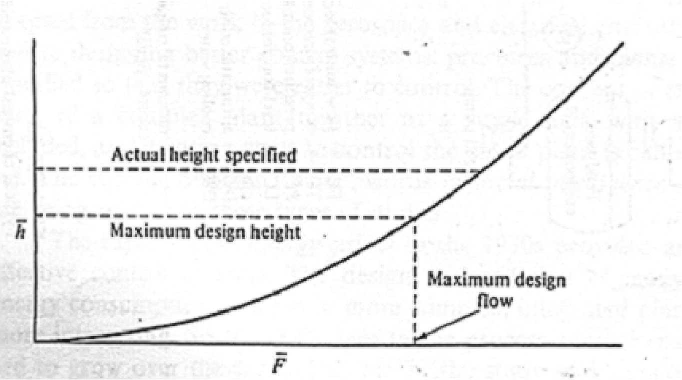
.

Comportamiento dinámico de sistemas- Ejemplo 1 (cont.)

DISEÑO DEL TANQUE EN ESTADO ESTACIONARIO

- Elección de diámetro del caño de salida y altura del tanque para el máximo caudal esperado. Factor de seguridad 20 o $30\,\%$.
- Alarma de nivel.
- Balance económico: tanque grande vs. caño de gran diámetro.
  $\uparrow$ diámetro $\Longrightarrow \downarrow$ altura.

Comportamiento dinámico de sistemas- Ejemplo 1 (cont.)



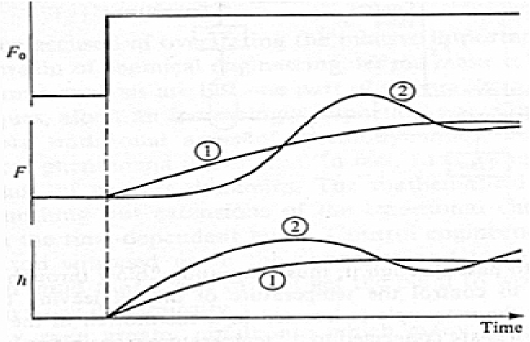
Análisis dinámico del sistema

Variación de $F_0 \Longrightarrow$ variación de $h(t)$ y $F(t)$

- F alcanza un nuevo valor de estado estacionario, F_0^*
- h se determina con la curva anterior.

¿Qué camino se recorre hasta alcanzar el nuevo estado?

Comportamiento dinámico de sistemas- Ejemplo 1 (cont.)



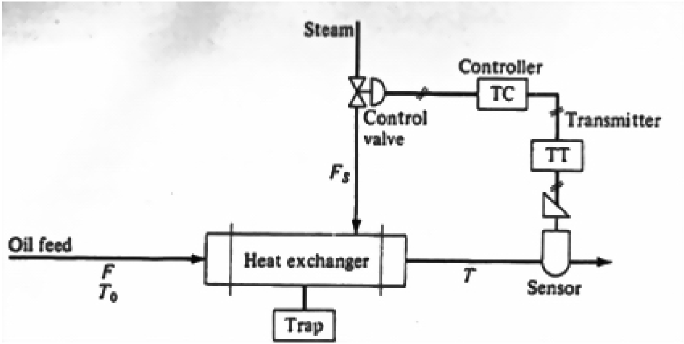
$\longrightarrow$ Necesidad del estudio del comportamiento dinámico del sistema.

Comportamiento dinámico de sistemas- Ejemplo 2

Intercambiador de calor

Objetivo: calentar aceite hasta una temperatura deseada (T_d)

Variable a controlar: T



Comportamiento dinámico de sistemas- Ejemplo 2

Elementos del lazo de control de temperatura

a.- sensor

b.- transmisor

c.- controlador

d.- elemento final de control (válvula)

Descripción de los elementos del lazo de control

a.- sensor: termocupla.

b.- transmisor: elemento electrónico que transforma la salida de la termocupla (mV) en una señal $4-20mA$ (señal de control).

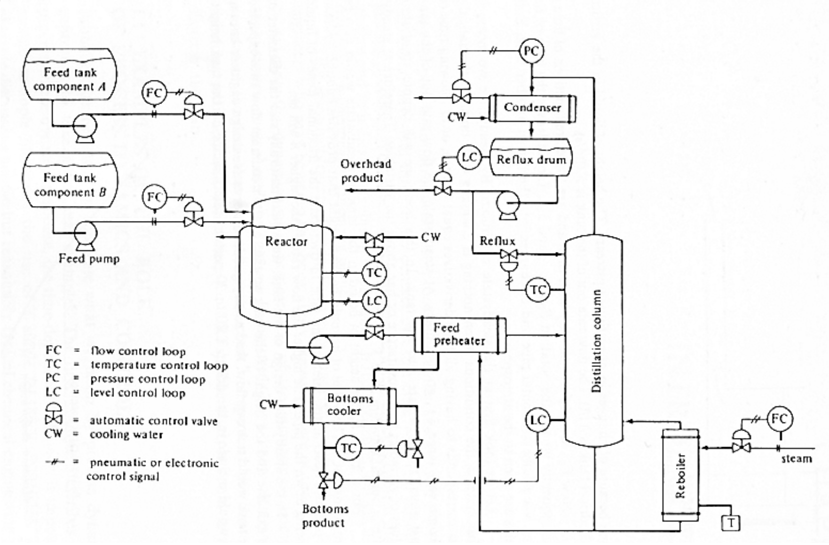
c.- controlador: compara la señal del transmisor (temperatura real) con el set-point del controlador (temperatura deseada.)

d.- elemento final de control (válvula):abre o cierra de acuerdo a la señal de salida del controlador.

Comportamiento dinámico de sistemas- Ejemplo 3

Esquema de control para una planta química sencilla
Requerimientos de las técnicas tradicionales de diseño en estado estacionario.

- Mecánica de fluídos: diseño y dimensionamiento de bombas, caños, intercambiadores de calor, platos de columnas.
- Transferencia de calor: enfriamiento en reactores; áreas de transf. en precalentador, condensador y hervidor en las torres de destilación; temp. para el vapor y el agua de enfriamiento.
- Cinética química: dimensionamiento de reactores; condiciones de operación (temperatura, presión, catalizadores).
- Termodinámica y transferencia de masa: En columnas de destilación, presión de operación, número de platos, relación de reflujo y perfiles de temp. En reactores, condiciones de equilibrio.


Feed tank component A
FC
Feed tank component B
FC
Feed pump
PC
Condenser
CW
LC
Reflux drum
Overhead product
Reactor
CW
TC
LC
Reflux
TC
Distillation column
Feed preheater
FC = flow control loop
TC = temperature control loop
PC = pressure control loop
LC = level control loop
= automatic control valve
CW = cooling water
= pneumatic or electronic control signal
CW
Bottoms cooler
TC
LC
FC
steam
Reboiler
T
Bottoms product

Modelización

Pasos:

Definir el sistema (límites)

$\downarrow$

Modelado físico: $\begin{cases} \text{parámetros} \\ \text{variables} \end{cases}$

$\downarrow$

Derivación del modelo matemático (ecuaciones)

$\downarrow$

Resolución (teoría, métodos, herramientas)

$\downarrow$

Estudio de la dinámica de LA (simulación)

$\downarrow$

Diseño de un controlador

$\downarrow$

Estudio de la dinámica de LC (simulación)

Conceptos generales

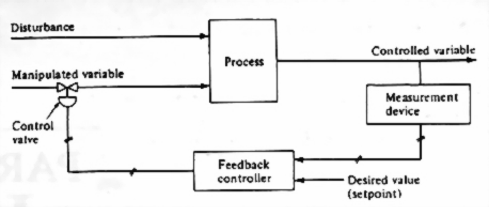
- Dinámica:Comportamiento dependiente en el tiempo de un proceso.
  sin controlador $\rightarrow$ LA   con controlador $\rightarrow$ LC
- Variables:
  a.- *manipuladas:* corrientes, flujos entrantes o salientes que pueden modificarse en función del control.
  b.- *controladas:* flujos, composiciones, temperaturas, niveles, presiones en el proceso a controlar.
  c.- *no controladas*
  d.- *perturbaciones de carga:* flujos, temperaturas, composiciones de corrientes de entrada (a veces de salida), cuyos valores se fijan en otro lugar de la planta, no susceptibles de ser manipuladas.
  $\mapsto$ Robustez frente a perturbaciones.

Ejemplo: En el intercambiador de calor del Ejemplo 2

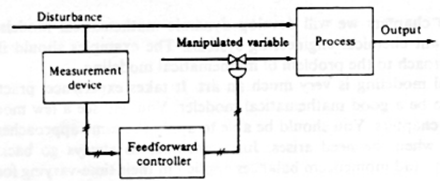
- $\surd$ Variable controlada: temp. de salida del aceite.
- $\surd$ Variable manipulada: caudal de vapor.
- $\surd$ Perturbaciones de carga: caudal aceite, temp. entrada aceite.

Posibles esquemas de control:

- $\surd$ control por realimentación



- $\surd$ control adelantado



Estabilidad: En general, sist. estables a lazo abierto.
Excepciones: reactores exotérmicos.
A lazo cerrado, todos los procesos pueden tornarse inestables al aumentar la ganancia del controlador.

$\mapsto$ Compromiso entre desempeño y robustez.

Representación de un sistema en variables de estado

- Variables de estado: conjunto de variables que permiten definir al sistema en forma unívoca.
- Representación en variables de estado: conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, cuyas variables son los estados del sistema.
  La solución es una trayectoria en el espacio de estados.

Representación de un sistema en variables de estado

Ventajas del diseño en el espacio de estados:

- permite el estudio de sistemas MIMO (múltiples entradas y salidas)
- proporciona una descripción interna del sistema.
- permite considerar condiciones iniciales (la función de transferencia no).

Representación de un sistema en variables de estado

EJEMPLO

Sea una masa M que se mueve bajo una fuerza F. Aplicando la Ley de Newton,

$$M\ddot{x} = F$$

Definimos las variables de estado como:

- $x_1 = x$, posición
- $x_2 = \dot{x}$, velocidad

Reescribimos el sistema:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{F}{M} \end{aligned}$$

Representación de un sistema en variables de estado

El sistema puede escribirse matricialmente como sigue.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{F}{M}$$

o también

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Si la salida es la posición, $y = x_1$, puede escribirse

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

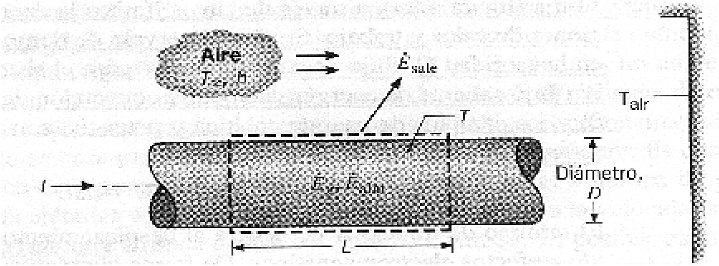
o también

$$y = Hx$$

Ejemplos de modelado de sistemas

Ejemplo 1:Barra conductora larga
Por una barra conductora larga que se encuentra inicialmente en equilibrio con el ambiente comienza a circular una corriente eléctrica. ¿Cómo puede modelarse la variación de la temperatura en función del tiempo a partir de ese momento?

Ejemplo 1:Barra conductora larga



- barra conductora larga, diámetro D.
- Resistencia eléctrica por u. de long. R'_e
- Cond. inicial: equilibrio térmico con el ambiente.
- A un cierto t, pasa una corriente eléctrica I

Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Análisis del sistema:

1. Definición de sus límites
2. Modelado físico (variables, leyes intervinientes)
3. Ecuación del modelo (balance de energía)

Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Modelado físico:

- Hipótesis
- Modos de transferencia de calor
- Generación de energía, Ley de Ohm
- Balance de energía instantáneo, en estado transitorio

Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Obtención de la ecuación:

$$\frac{I^2 R'_e - h(\pi D)(T - T_\infty) - \varepsilon\sigma(\pi D)(T^4 - T_{amb}^4)}{\rho\, c\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} = \frac{dT}{dt}$$

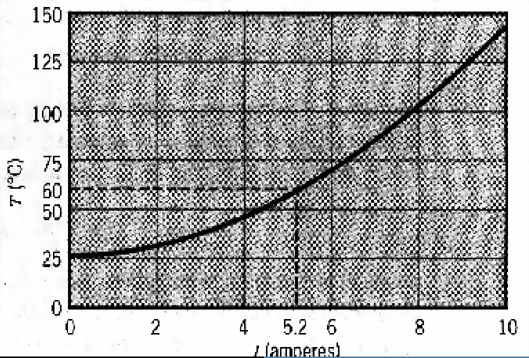
$\hookrightarrow$ Es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden

En el estado estacionario, $\frac{dT}{dt} = 0$

$$h(\pi D)(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(\pi D)(T^4 - T_{amb}^4) = I^2 R'_e$$

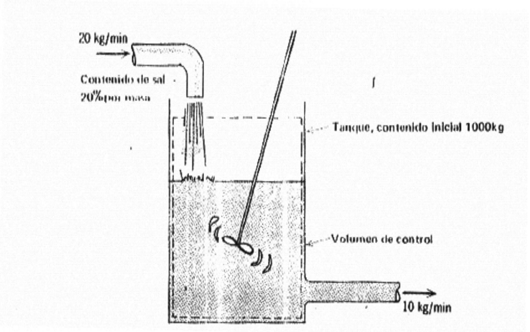
Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Gráfica de la temperatura alcanzada por la barra en estado estacionario en función de la intensidad de corriente circulante



Ejemplo 2:Tanque con solución salina

El tanque es un sistema continuo, perfectamente mezclado, en donde ingresa una solución salina y se extrae otra con diferente concentración. ¿Cómo puede modelarse el sistema para conocer la cantidad de sal que hay en el tanque en cada instante?



Ejemplo 2:Tanque con solución salina

Análisis del sistema:

1. Definición de sus límites (¿abierto o cerrado?)
2. Modelado físico (variables)
3. Ecuación del modelo (balance de masa o ecuación de continuidad)

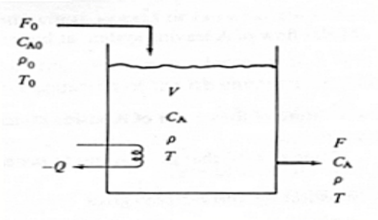
Ejemplo 2:Tanque con solución salina

Obtención de la ecuación:

$$\frac{dS}{dt} + \frac{S}{100+t} = K$$

$\hookrightarrow$ Es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden, no lineal

Ejemplo 3:Tanque reactor refrigerado



$$A \xrightarrow{k} B$$

Ejemplo 3:Tanque reactor refrigerado

La figura muestra un reactor TAC con dos componentes: A y B. En él ocurre la reacción irreversible, exotérmica y de primer orden.
El reactor es refrigerado por un serpentín. Se desea estudiar la puesta en marcha y la estabilidad del estado estacionario de operación.

Ejemplo 3:Tanque reactor refrigerado

Análisis del sistema:

1. Definición de sus límites (¿abierto o cerrado?, ¿adiabático?)
2. Modelado físico (variables, leyes físicas y químicas)
3. Ecuación del modelo (balance de masa o ecuación de continuidad, total y por componentes)

Ejemplo 3:Tanque reactor refrigerado

Modelado físico:

- Hipótesis (mezclado perfecto, no isotérmico)
- Modelado de la reacción química (orden, irreversible, exotérmica)
- Balances de masa total y por componentes

Ejemplo 3:Tanque reactor refrigerado

Obtención del sistema de ecuaciones:

Se llega al siguiente modelo dinámico del proceso.

$$
\begin{aligned}
\frac{dL}{dt} &= \frac{F_0 - F}{A} \\
\frac{dC_A}{dt} &= \frac{F_0}{AL}(C_{A0} - C_A) - C_A\,\alpha\,e^{-E/RT} \\
\frac{dC_B}{dt} &= \frac{F_0}{AL}(C_{B0} - C_B) + C_A\,\alpha\,e^{-E/RT} \\
\frac{dT}{dt} &= \frac{F_0\rho_0 C_{P0}(T_0 - T) + AL\,\alpha\,e^{-E/RT}(-\lambda) - U A_H (T - T_m)}{AL\rho_0 C_{P0}} \\
F &= C_v\,x\sqrt{\rho_w\,g\,L}
\end{aligned}
$$

Ejemplo 3:Tanque reactor refrigerado

Este modelo tiene

1. Cuatro variables de estado (L, C_A, C_B, T)
2. Una variable de salida (F)
3. Cinco variables manipulables (F_0, C_{A0}, C_{B0}, T_m y x)
4. Diez parámetros (A, λ,ρ_0, C_{P0},α, E, R,UA_H,C_v, g y ρ_w).