Simulación y Optimización

Fundamentos
Parte IV

Enrique E. Tarifa, Facultad de Ingeniería, UNJu

Mapa curricular de la materia

Simulación

Optimización

Mapa curricular de la materia

Simulación

Optimización

Mapa curricular de Simulación

- Definiciones
- Modelo de espacio de estados
- Resolución de modelos
- Simulación de plantas

Mapa curricular de Simulación

Definiciones

Modelo de espacio de estados

Resolución de modelos

Simulación de plantas

Mapa curricular de ecuaciones constitutivas

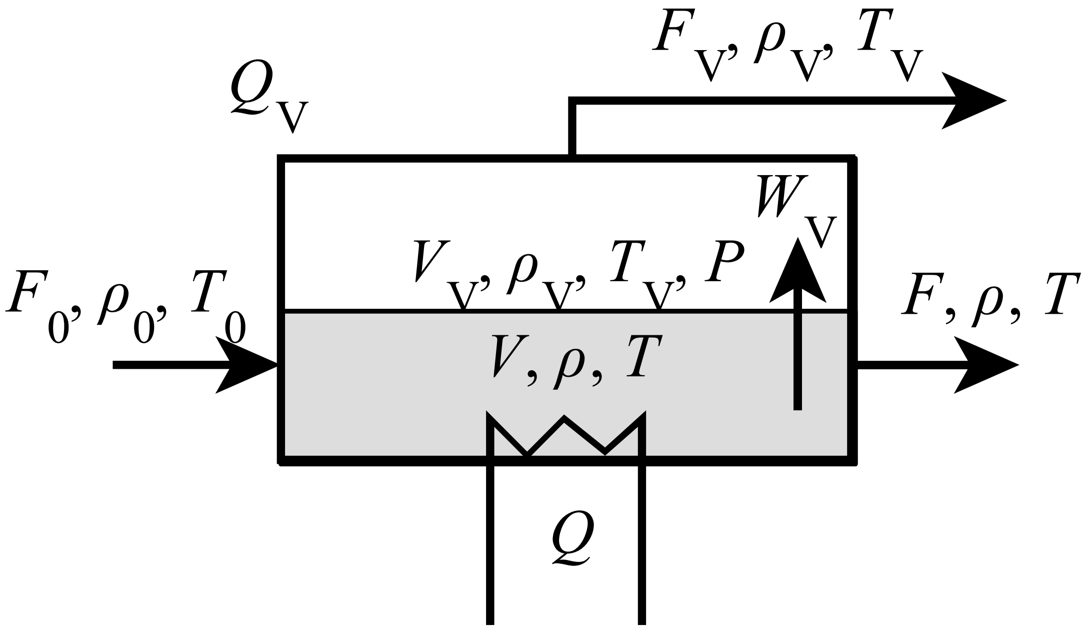
1. Sistema con múltiples fases
2. Balance seudoestacionario
3. Ecuaciones constitutivas
4. Relaciones funcionales
5. Controlador PID
6. Válvulas de control
7. Modos de fallas de válvulas
8. Selección de tipo de acción del controlador

Múltiples fases

Balance para fase líquida

- {vel. de acum.} $= \dfrac{d(V\rho h)}{dt}$
- {vel. de entrada} $= F_0\rho_0 h_0 + Q$
- {vel. de salida} $= F\rho h + W_V h_V(T)$

$$\frac{d(V\rho h)}{dt} = F_0\rho_0 h_0 + Q - F\rho h - W_V h_V(T)$$



Variación de la propiedad intensiva

$$\frac{d(\rho V h)}{dt} = F_0 \rho_0 h_0 + Q - F \rho h - W_V h_V(T)$$

$$V \rho \frac{dh}{dt} + h \frac{d(V \rho)}{dt} = F_0 \rho_0 h_0 + Q - F \rho h - W_V h_V(T)$$

$$-h \left\{ \frac{d(V \rho)}{dt} = F_0 \rho_0 - F \rho - W_V \right\}$$

$$V \rho \frac{dh}{dt} = F_0 \rho_0 (h_0 - h) + Q - W_V \left(h_V(T) - h \right)$$

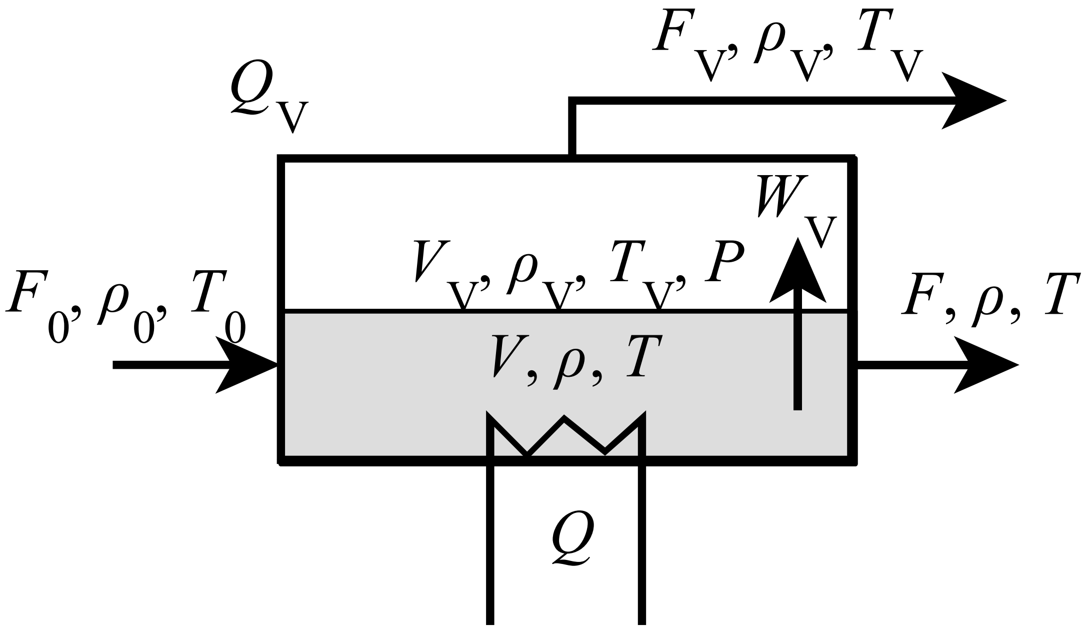
$$h_1 - h_0 = \int_{T_0}^{T_1} Cp(T)\, dT$$

$$\lambda_V(T) = h_V(T) - h$$

$$V \rho Cp \frac{dT}{dt} = F_0 \rho_0 Cp_0 (T_0 - T) + Q - W_V \lambda_V(T)$$

Balance para fase vapor

- {vel. de acum.} $= \dfrac{d\left(V_V\,\rho_V\,h_V\left(T_V\right)\right)}{dt}$
- {vel. de entrada} $= W_V\,h_V(T)$
- {vel. de salida} $= F_V\,\rho_V\,h_V\left(T_V\right) + Q_V$



$$\frac{d\left(V_V\,\rho_V\,h_V\left(T_V\right)\right)}{dt} = W_V\,h_V(T) - F_V\,\rho_V\,h_V\left(T_V\right) - Q_V$$

Variación de la propiedad intensiva

$$\frac{d\left(V_V\,\rho_V\,h_V(T_V)\right)}{dt}=W_V\,h_V(T)-F_V\,\rho_V\,h_V(T_V)-Q_V$$

$$V_V\,\rho_V\,\frac{dh_V(T_V)}{dt}+h_V(T_V)\frac{d\left(V_V\,\rho_V\right)}{dt}=W_V\,h_V(T)-F_V\,\rho_V\,h_V(T_V)-Q_V$$

$$-h_V(T_V)\left\{\frac{d\left(V_V\,\rho_V\right)}{dt}=W_V-F_V\,\rho_V\right\}$$

$$h_1-h_0=\int_{T_0}^{T_1}Cp(T)\,dT$$

$$V_V\,\rho_V\,\frac{dh_V(T_V)}{dt}=W_V\left(h_V(T)-h_V(T_V)\right)-Q_V$$

$$V_V\,\rho_V\,Cp_V\,\frac{dT_V}{dt}=W_V\,Cp_V\left(T-T_V\right)-Q_V$$

Balance seudoestacionario

Modelo de espacio de estados

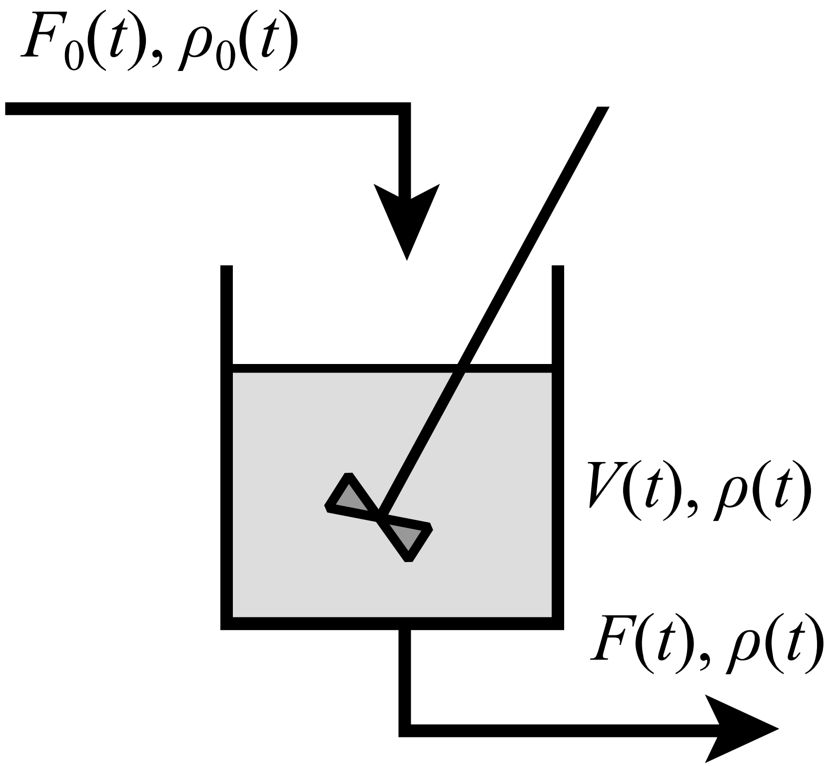
- ODEs:
  - Balances dinámicos
  - Variables de estado
- AEs:
  - Balances seudoestacionarios
  - Ecuaciones constitutivas

ODEs	$\frac{dX}{dt} = F(X,U,D)$
AEs	$Y = H(X,U,D)$
Condición inicial	$X(0) = X_0$

Balance estacionario

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = F_0\,\rho_0 - F\,\rho$$

$$A\cancel{\frac{dL}{dt}} = F_0 - F = 0$$

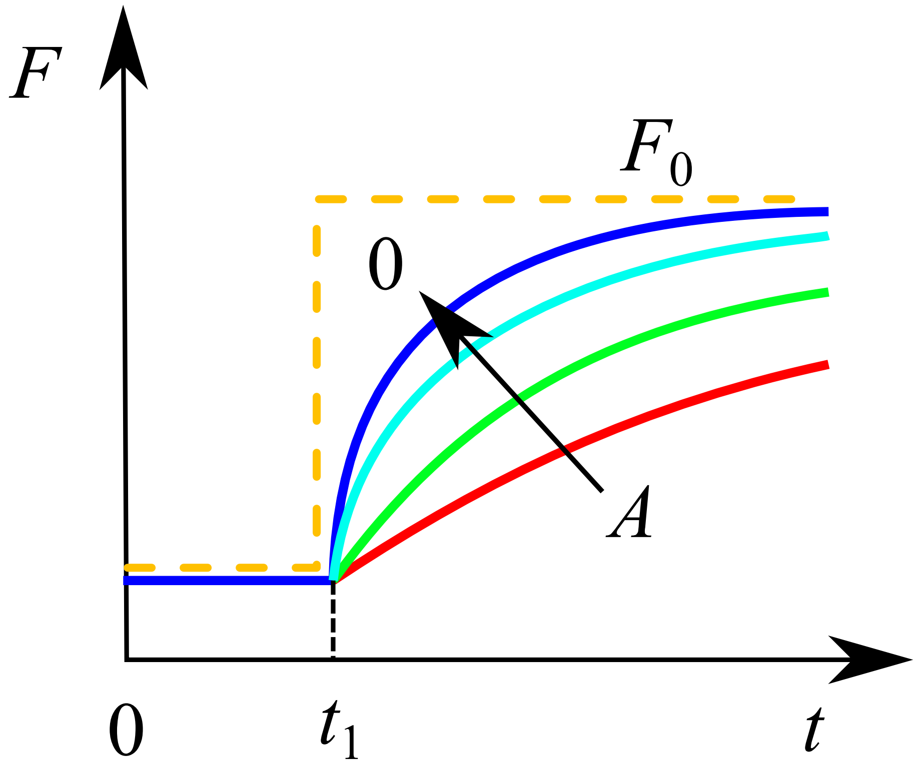


Balance seudoestacionario

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = F_0\,\rho_0 - F\,\rho$$

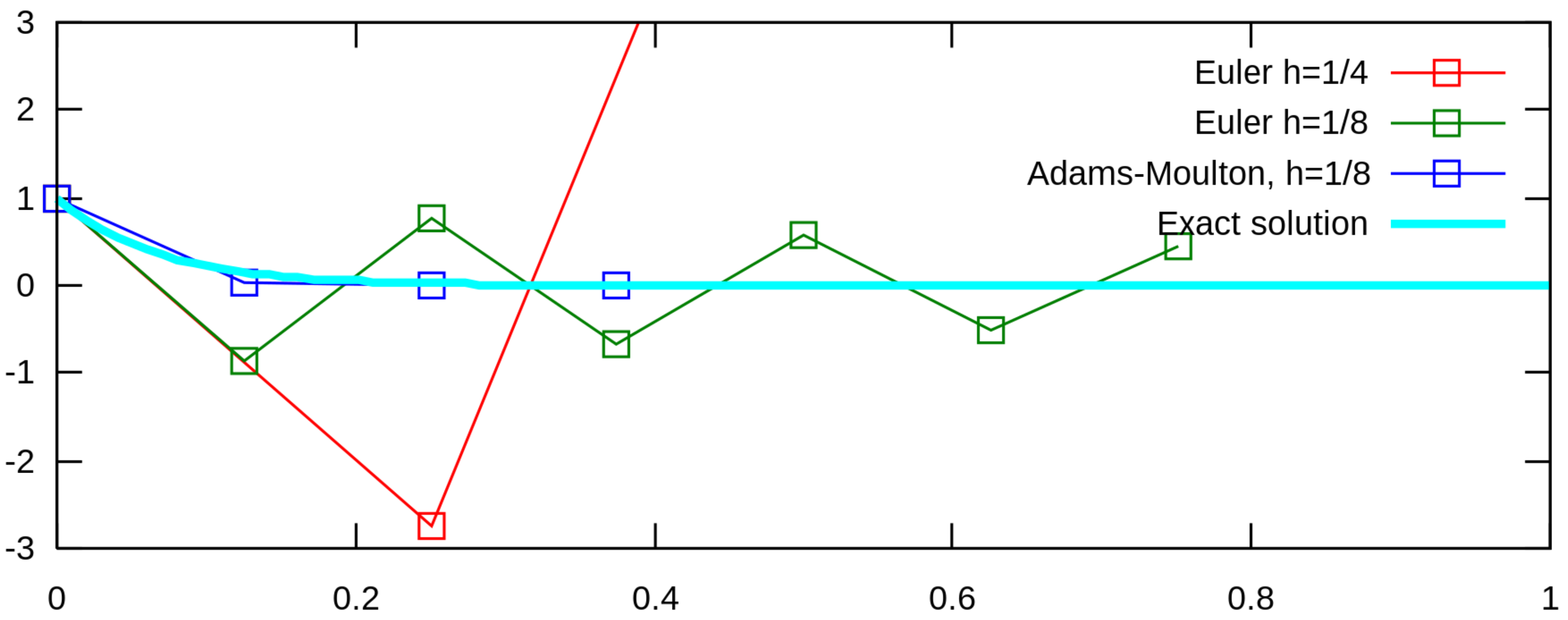
$$\cancel{A}\frac{dL}{dt} = F_0 - F = 0$$

$$F_0(+) \rightarrow L(+) \rightarrow F(+)$$



Se emplean los balances en estado estacionario.

Ecuación *stiff*



Ecuación *stiff*

- Reactor: lento
- Serpentín: rápido

Ecuación *stiff*

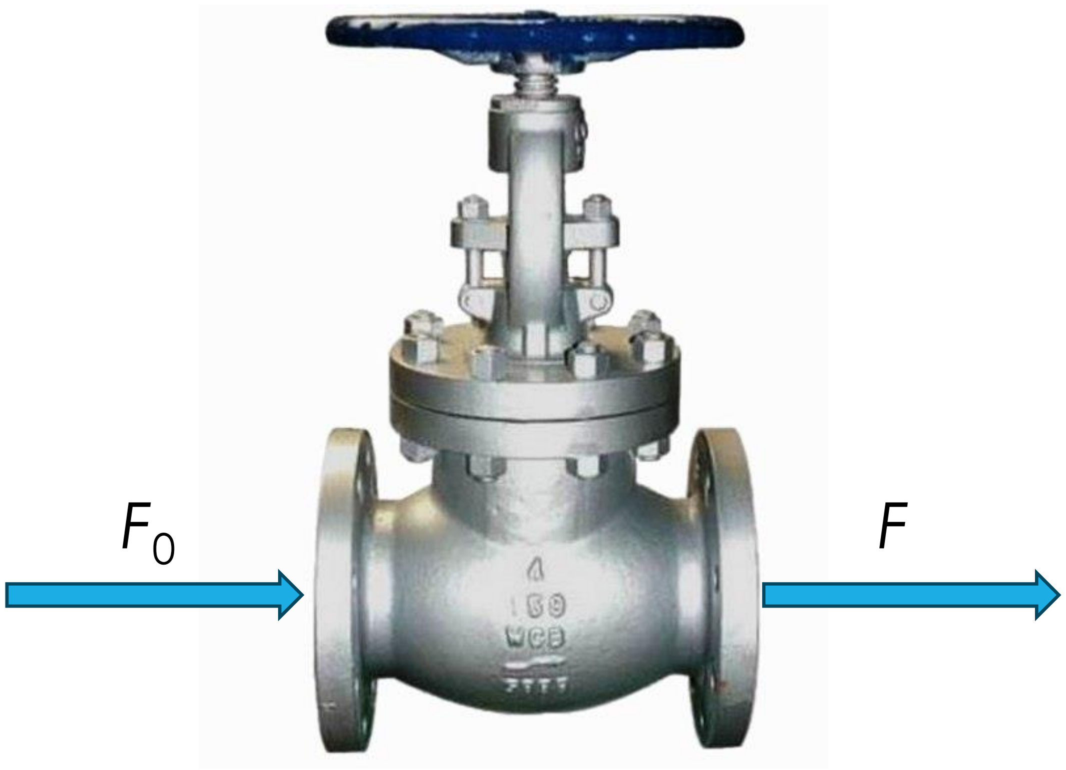
- Si interesa el sistema lento:
  - Suponer el sistema rápido en estado seudoestacionario.
- Si interesa el sistema rápido:
  - Suponer el sistema lento en estado estacionario.

Simplificación

- Reactor: estado dinámico
- Serpentín: estado seudoestacionario
- Consecuencias:
  - Menos ecuaciones diferenciales
  - Paso de integración mayor

Válvula

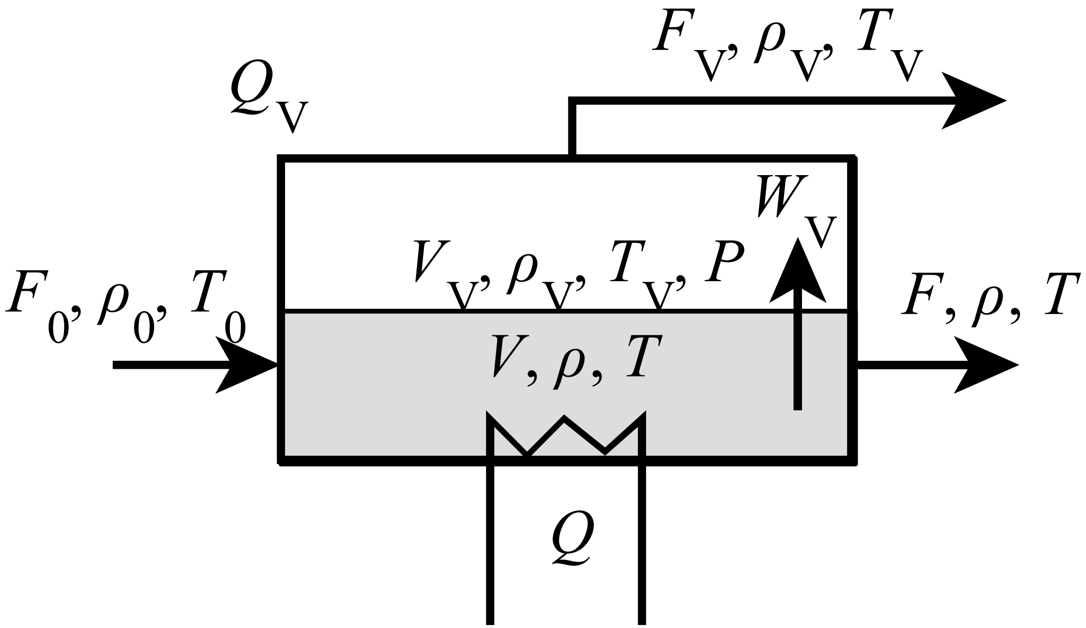
- $\frac{dV}{dt} = F_0 - F$
- $\cancel{A}\frac{dL}{dt} = F_0 - F = 0$
- $F = F_0$



Balance para fase vapor

- {vel. de acum.} $= \dfrac{d\left(V_V\,\rho_V\,h_V(T_V)\right)}{dt}$
- {vel. de entrada} $= W_V\,h_V(T)$
- {vel. de salida} $= F_V\,\rho_V\,h_V(T_V) + Q_V$

$$\frac{d\left(V_V\,\rho_V\,h_V(T_V)\right)}{dt} = W_V\,h_V(T) - F_V\,\rho_V\,h_V(T_V) - Q_V$$



Variación de la propiedad intensiva

$$\frac{d\left(V_V\,\rho_V\,h_V(T_V)\right)}{dt} = W_V\,h_V(T) - F_V\,\rho_V\,h_V(T_V) - Q_V$$

$$V_V\,\rho_V\,\frac{dh_V(T_V)}{dt} + h_V(T_V)\frac{d(V_V\,\rho_V)}{dt} = W_V\,h_V(T) - F_V\,\rho_V\,h_V(T_V) - Q_V$$

$$-h_V(T_V)\left\{\frac{d(V_V\,\rho_V)}{dt} = W_V - F_V\,\rho_V\right\}$$

$$h_1 - h_0 = \int_{T_0}^{T_1} Cp(T)\,dT$$

$$V_V\,\cancel{\rho_V}\,\frac{dh_V(T_V)}{dt} = W_V\left(h_V(T) - h_V(T_V)\right) - Q_V \quad = 0$$

$$V_V\,\cancel{\rho_V}\,Cp_V\,\frac{dT_V}{dt} = W_V\,Cp_V\,(T - T_V) - Q_V \quad = 0$$

Ecuaciones constitutivas

Ecuaciones constitutivas

- Leyes físico-químicas y mecanismos:
  - Química
  - Termodinámica
  - Fenómenos de transporte
  - Físico-química
  - Operaciones
  - Reacciones
  - Control
  - Válvulas

Propiedades de la materia

- Definiciones:
  - masa: $M = V \rho$
  - momento: $p = m v$
  - energía: $ep = g y$

Velocidad de transporte

- Transporte macroscópico:
  - Cantidad de movimiento: $fr = \frac{2 f \rho v^2}{D} A L$
  - Energía: $Q = U A \Delta T$
  - Materia: $N_A = K_L A \Delta C_A$

Relaciones físico-químicas

- Ecuaciones de estado:
  - Gases ideales: $PV = nRT$
  - Van der Waal: $\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$

Relaciones físico-químicas

- Propiedades:
  - Correlación: $Cp = a + bT + cT^2$
  - Andrade: $\mu = e^{\frac{a}{T+b}+c}$

Relaciones físico-químicas

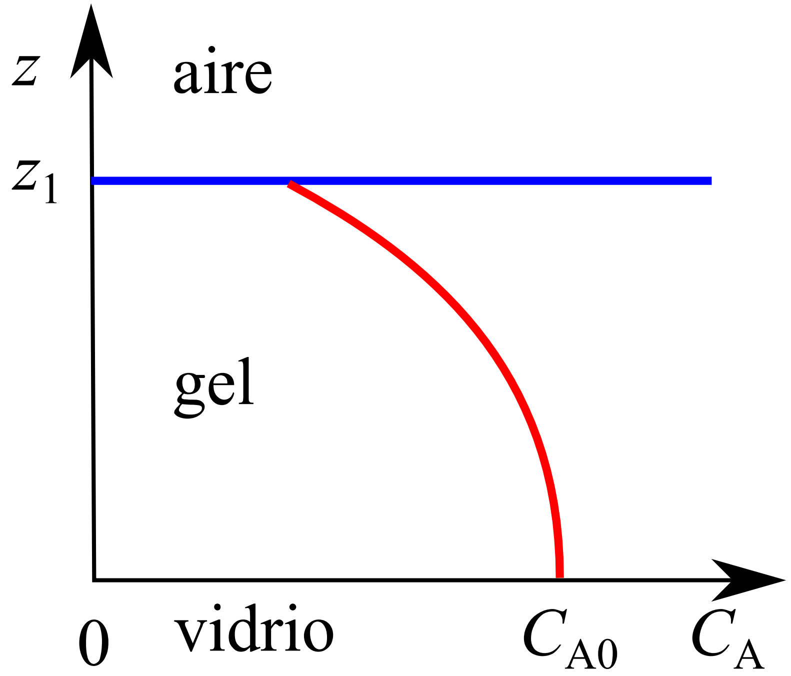
- Equilibrio entre fases:
  - Condición: $\mu_j^{\mathrm{I}} = \mu_j^{\mathrm{II}}$
  - Ley de Dalton y Raoult: $y_j P = x_j P_j^0$
  - Antoine: $\ln\left(P_j^0\right) = a - \dfrac{b}{T + c}$

Cinética

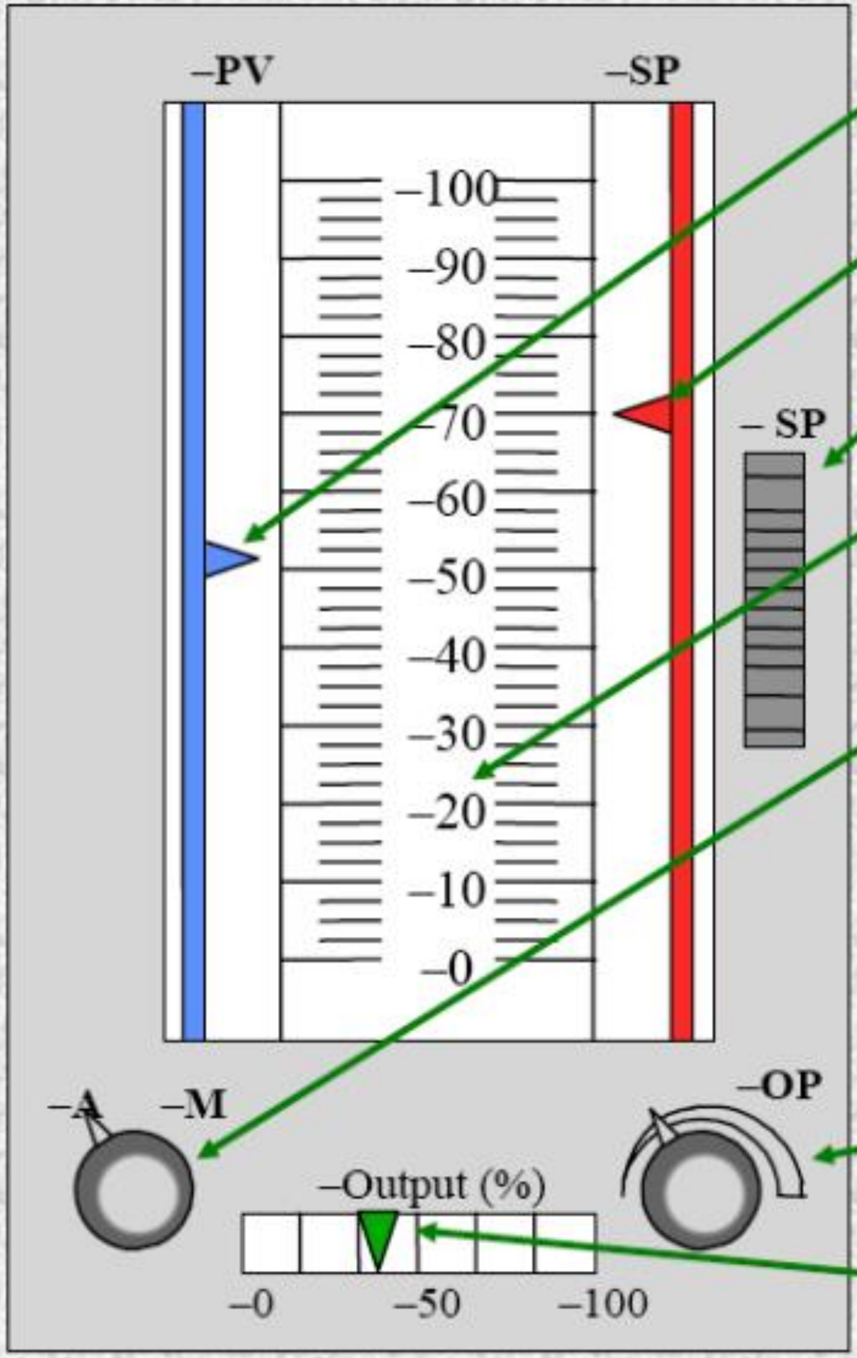
- Velocidad para *j*: $$r_j = \frac{1}{V}\frac{dn_j}{dt}$$
- Velocidad de reacción: $$r = \frac{r_j}{\alpha_j}$$
- Ley de acción de masas: $$r = k\prod_{\forall j \in R} C_j^{\beta_j}$$
- Arrhenius: $$k = \alpha e^{-\frac{E}{RT}}$$

Otras

- Condiciones de frontera: $$\left.\frac{\partial C_j}{\partial z}\right|_{z=0} = 0$$
- Especificaciones de diseño: $$T_V - T = 10$$



Relaciones funcionales



Indicador valor de la variable controlada

Indicador del valor del Set Point

Modificador del Set Point

Escala porcentual para Set point y variable controlada

Conmutador AUTOMÁTICO/MANUAL

- AUTOMÁTICO: el controlador decide el valor de la variable manipulada
- MANUAL: el valor de la variable manipulada se fija de forma manual

Modificador de la variable manipulada

Indicador de la variable manipulada

Controlador de temperatura

Controlador PID

- Controlador PID: $Ac = Ab + Kp\left(e + \frac{1}{\tau_{\mathrm{i}}}\int e\,dt + \tau_{\mathrm{d}}\frac{de}{dt}\right)$
- Ac: Salida del controlador.
- Ab: *Bias* del controlador.
- Kp: Ganancia proporcional o ganancia del controlador.
- e: Error.
- τ_{i}: Tiempo integral.
- τ_{d}: Tiempo derivativo.

Controlador PID

$e(-) \rightarrow Ac(-)$

- Controlador PID: $Ac = Ab + Kp\left(e + \frac{1}{\tau_i}\int e\,dt + \tau_d\frac{de}{dt}\right)$
- Tipo de acción $(Kp > 0)$:
  - Directa: $e = y - y_{sp}$ $y_{sp}(+) \rightarrow e(-)$
  - Inversa: $e = y_{sp} - y$
- y: Variable de proceso.
- y_{sp}: *Setpoint*.

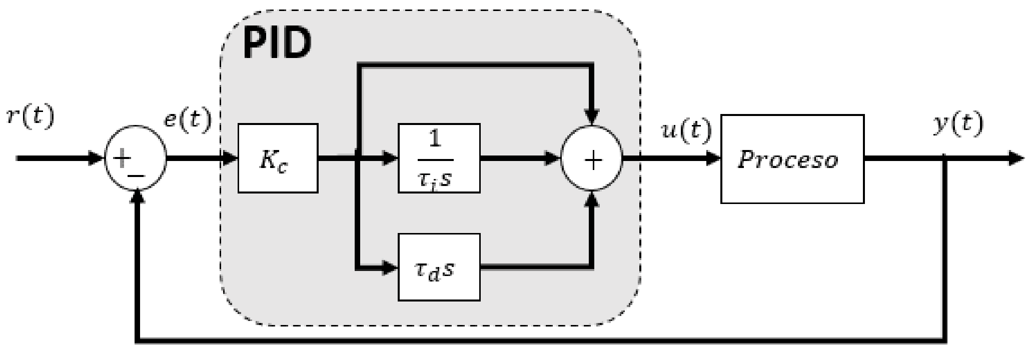
Controlador proporcional

Ac	%	mA	psi
0.00	0%	4.00	3.00
0.10	10%	5.60	4.20
0.20	20%	7.20	5.40
0.30	30%	8.80	6.60
0.40	40%	10.40	7.80
0.50	50%	12.00	9.00
0.60	60%	13.60	10.20
0.70	70%	15.20	11.40
0.80	80%	16.80	12.60
0.90	90%	18.40	13.80
1.00	100%	20.00	15.00

Saturación

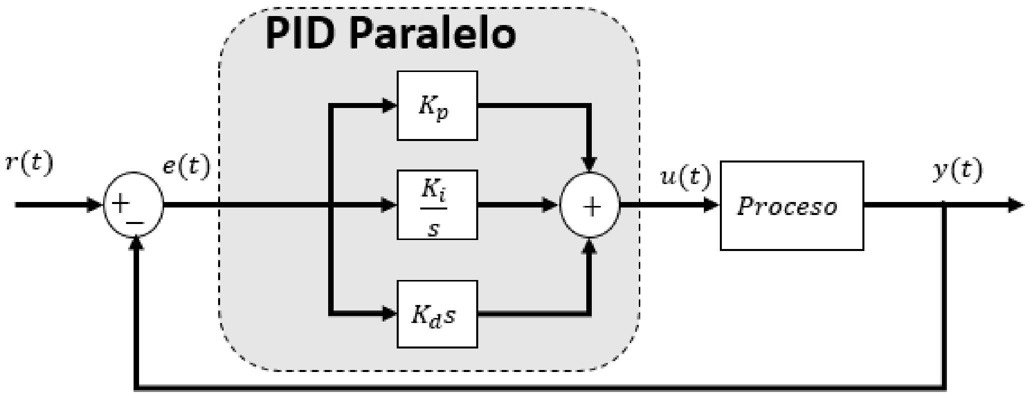
Tipos de controlador PID

En serie



$$Ac = Ab + Kp\left(e + \frac{1}{\tau_i}\int e\,dt + \tau_d \frac{de}{dt}\right)$$

En paralelo



$$Ac = Ab + Kp\,e + K_i\int e\,dt + K_d \frac{de}{dt}$$

Modelos de controladores

Modelo riguroso

y, y_{sp} → $y\%$, $y_{sp}\%$ → $C\%$ → $Ac\%$

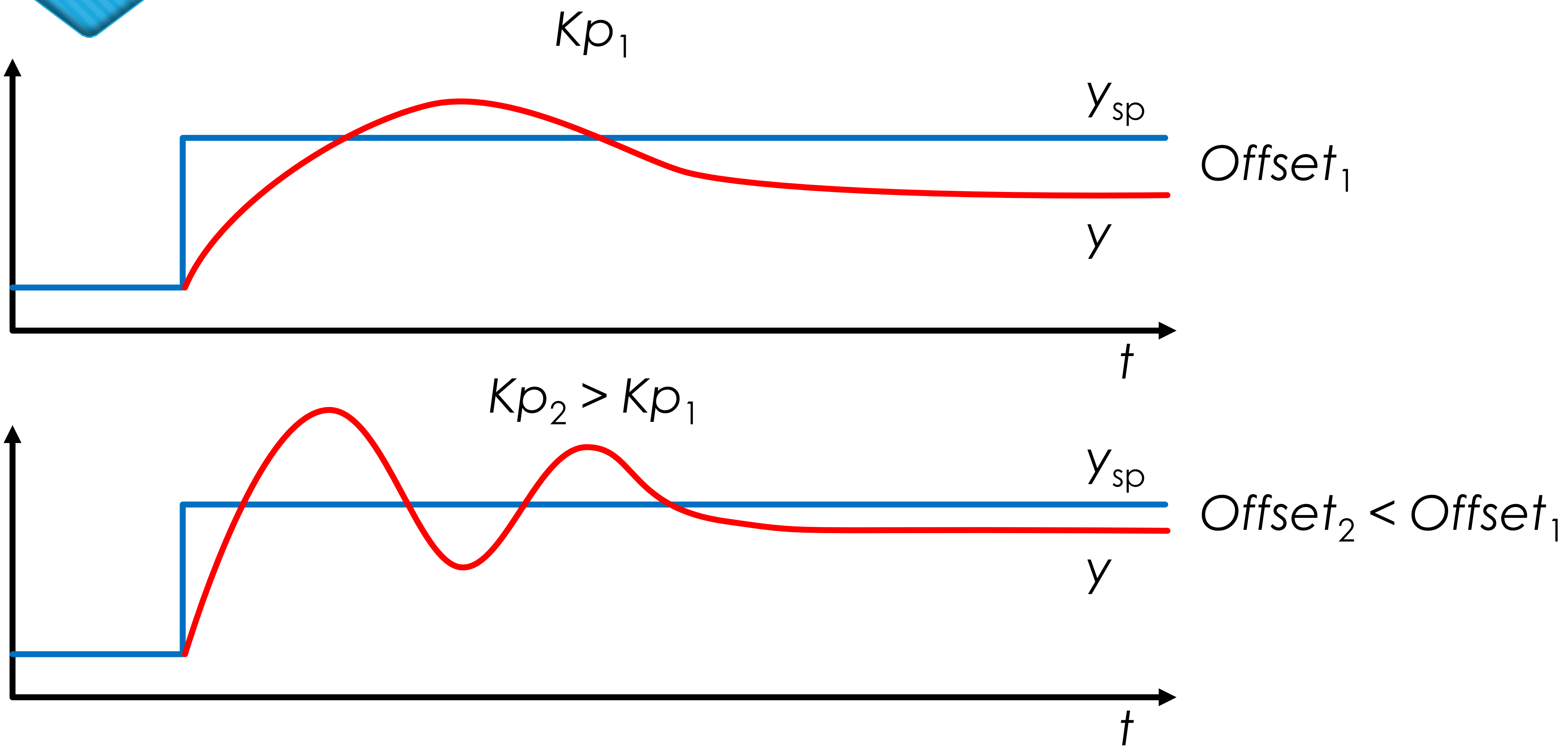
$y\%, y_{\text{sp}}\%, Ac\% \in [0,100]$

Modelo simplificado

y, y_{sp} → C → Ac

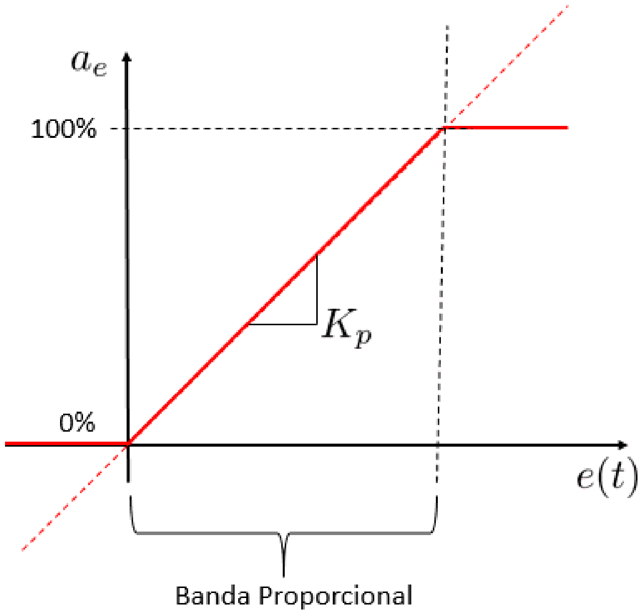
Sin acotamiento

El *offset* de la acción proporcional



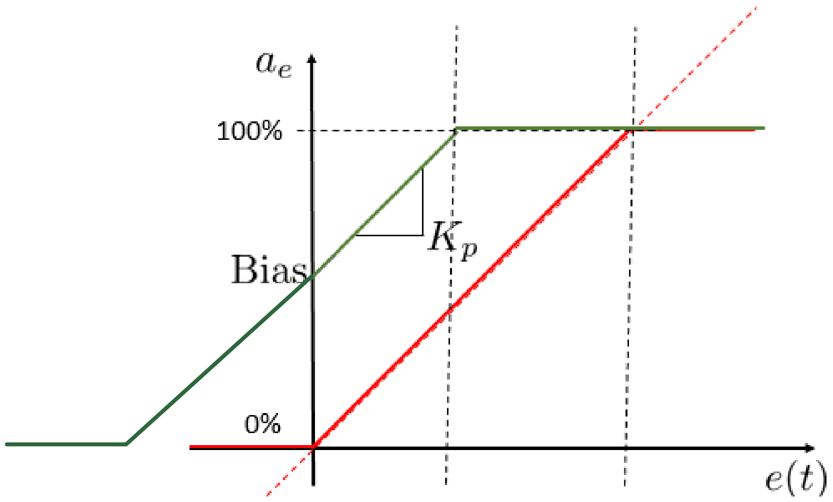
Banda proporcional

Sin *bias*



$$Ac = Kpe$$

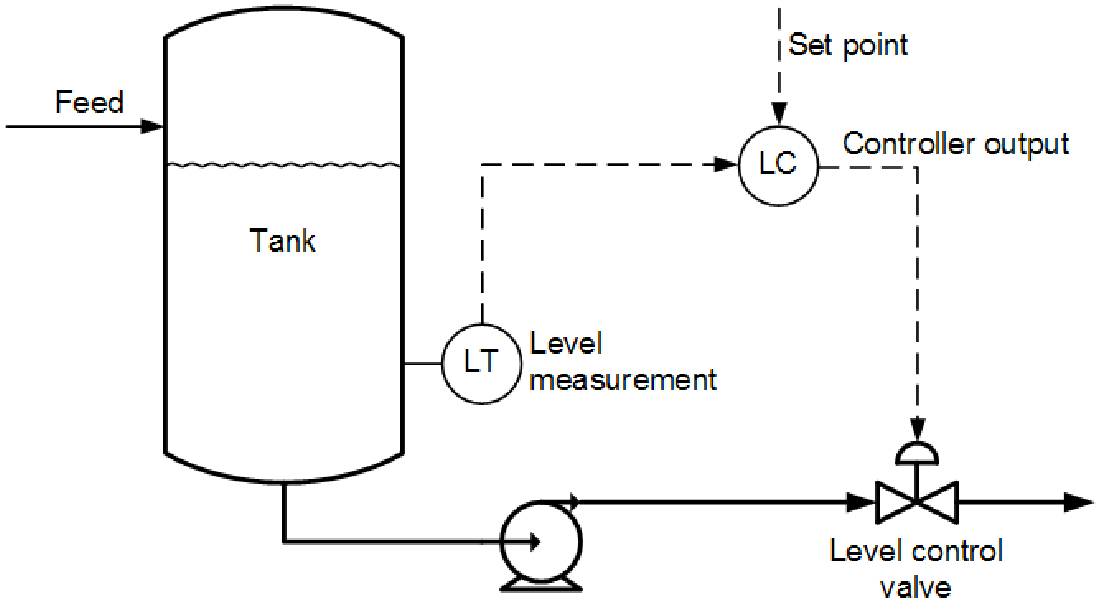
Con *bias*



$$Ac = Ab + Kpe$$

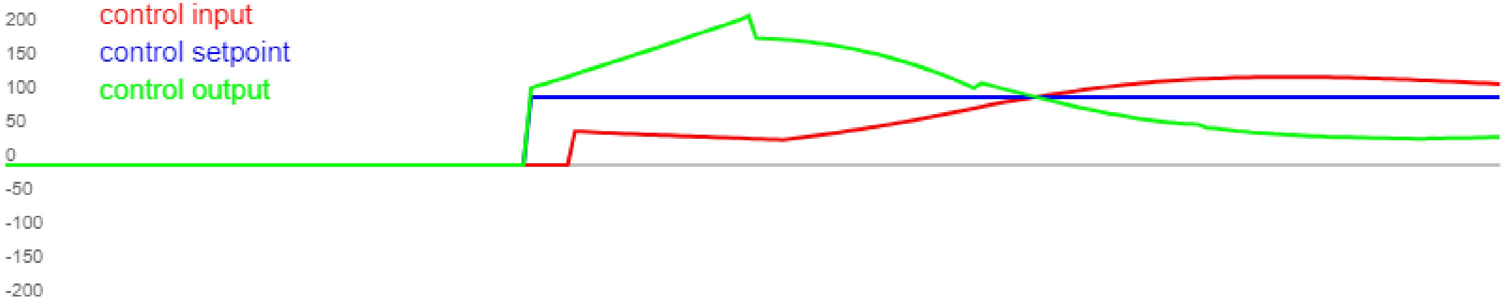
Reset manual

1. Colocar el controlador en manual.
2. Elegir un punto de operación y_{sp}.
3. Variar Ac manualmente para lograr que $y = y_{sp}$.
4. Hacer $Ab \leftarrow Ac$.



- El valor ideal para Ab es 0.5.
- El punto de operación elegido será el único libre de *offset*.

This PID control simulator allows you to try out a PID controller interactively by adjusting the tuning parameters in realtime. Also, you can adjust the process model by Javascript code below. This simulator was developed by porting the Arduino PID library and the Arduino-PID-AutoTune-Library to Javascript.



Start | Stop | PID is ON | time:1715521344285 | Auto tune is OFF | tune step 50 | tune noise 1 | tune start 100 | tune loopback (sec) 20

Process example: model
Sample time (ms): 100

Setpoint: 100

Noise: 0

Kp (proportional gain): 2

Ki (integral gain): 0.5

Kd (derivative gain): 2

Process function (model): control input = function(time, input, noise, output, user):

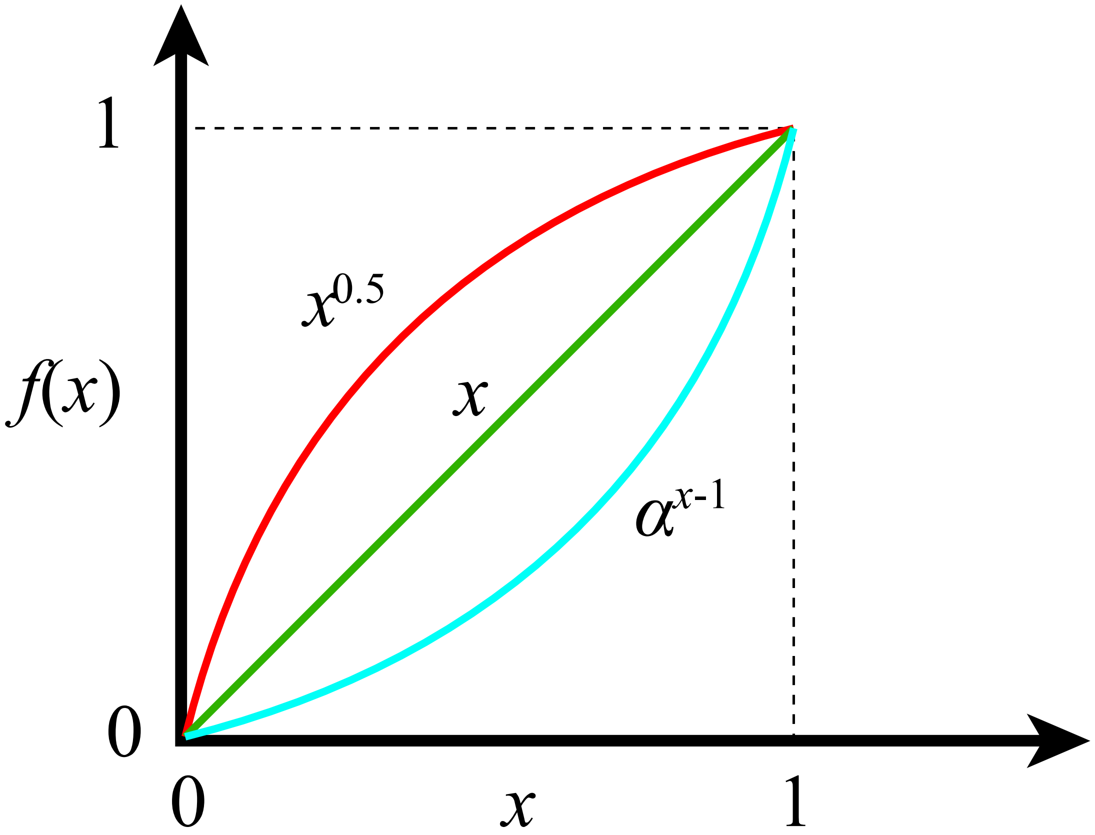
```
if (typeof user.kpmodel === 'undefined'){
  user.kpmodel=1.5, user.taup=100, user.theta = []; user.outputStart = 5;
  for(var i=0;i<50;i++){ user.theta[i]=user.outputStart }
}
user.theta[30]=output;
for(var i=0;i<49;i++){ user.theta[i] = user.theta[i+1] };
return (user.kpmodel / user.taup) *(user.theta[0]-user.outputStart) + input*(1-1/user.taup) +
(Math.random()-0.5)*0.02
```

Simulador de un control PID

Válvulas de control

- Válvula: $F = C_V f(x)\sqrt{\dfrac{\Delta P_V}{\rho / \rho_w}}$
- Curva característica:
  - Lineal: $f(x) = x$
  - De apertura rápida: $f(x) = \sqrt{x}$
  - De igual porcentaje: $f(x) = \alpha^{x-1}$

$x(+) \rightarrow F(+)$



Modos de fallas de válvulas de control

- Modo de falla de una válvula:

$$Ac(+) \rightarrow x(+)$$

  - Falla cerrada, NC, abre con señal:

$$x = \begin{cases} 0 & Ac < 0 \\ 1 & Ac > 1 \\ Ac & \text{en otro caso} \end{cases}$$

  - Falla abierta, NA, cierra con señal:

$$x = \begin{cases} 1 & Ac < 0 \\ 0 & Ac > 1 \\ 1 - Ac & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Selección de acción en modo servo

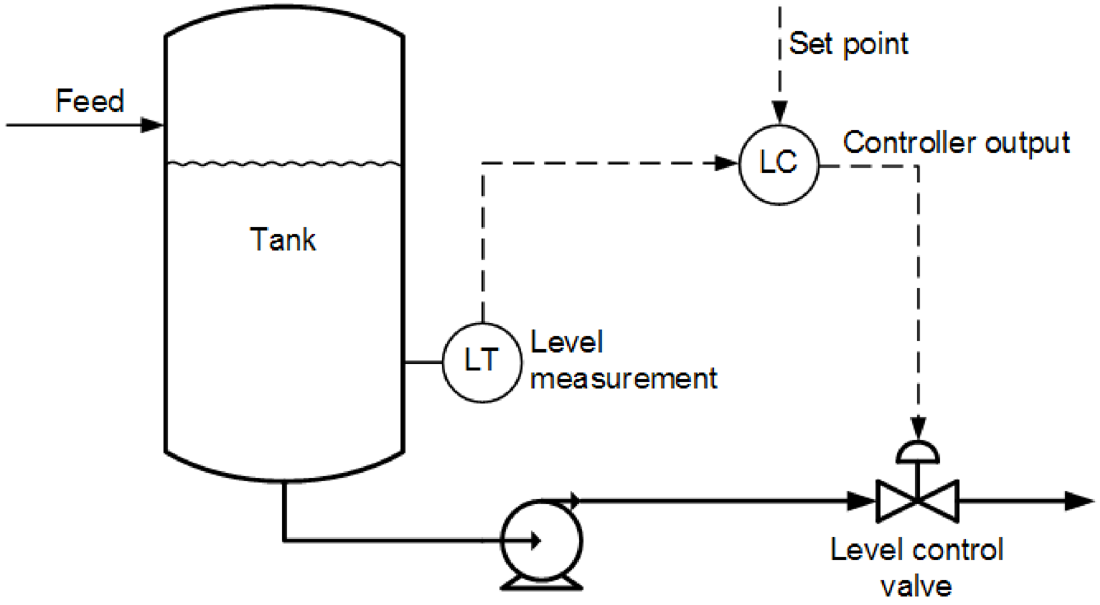
1. Proponer acción inversa y tipo de válvula.
2. Suponer un aumento del *setpoint* $y_{sp}(+)$.
3. Propagar cualitativamente ese aumento a través de e, Ac, x e y.
4. Si $y(+)$, aceptar la acción.

Selección de acción en modo regulador

1. Proponer tipo de acción inversa y tipo de válvula.
2. Suponer un aumento $y(+)$.
3. Propagar cualitativamente ese aumento a través de e, Ac, x e y.
4. Si $y(-)$, aceptar la acción.

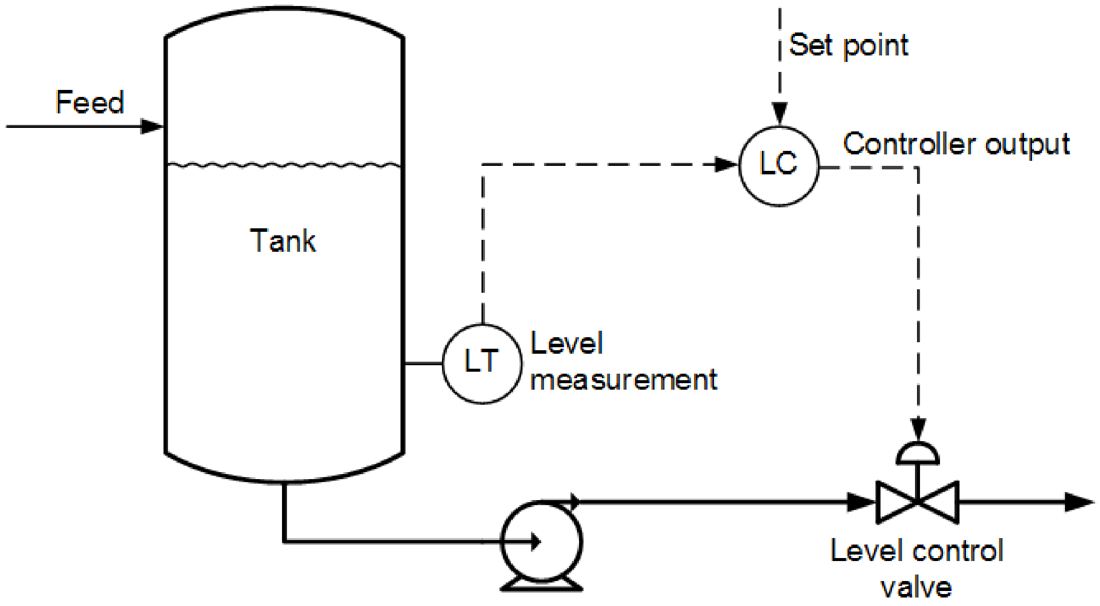
Selección de acción en modo servo

1. Acción inversa y válvula NC
2. *Setpoint* $y_{sp}(+)$
3. $y_{sp}(+) \rightarrow e(+) \rightarrow Ac(+) \rightarrow x(+) \rightarrow F(+) \rightarrow y(-)$
4. Si $y(+)$, aceptar la acción.



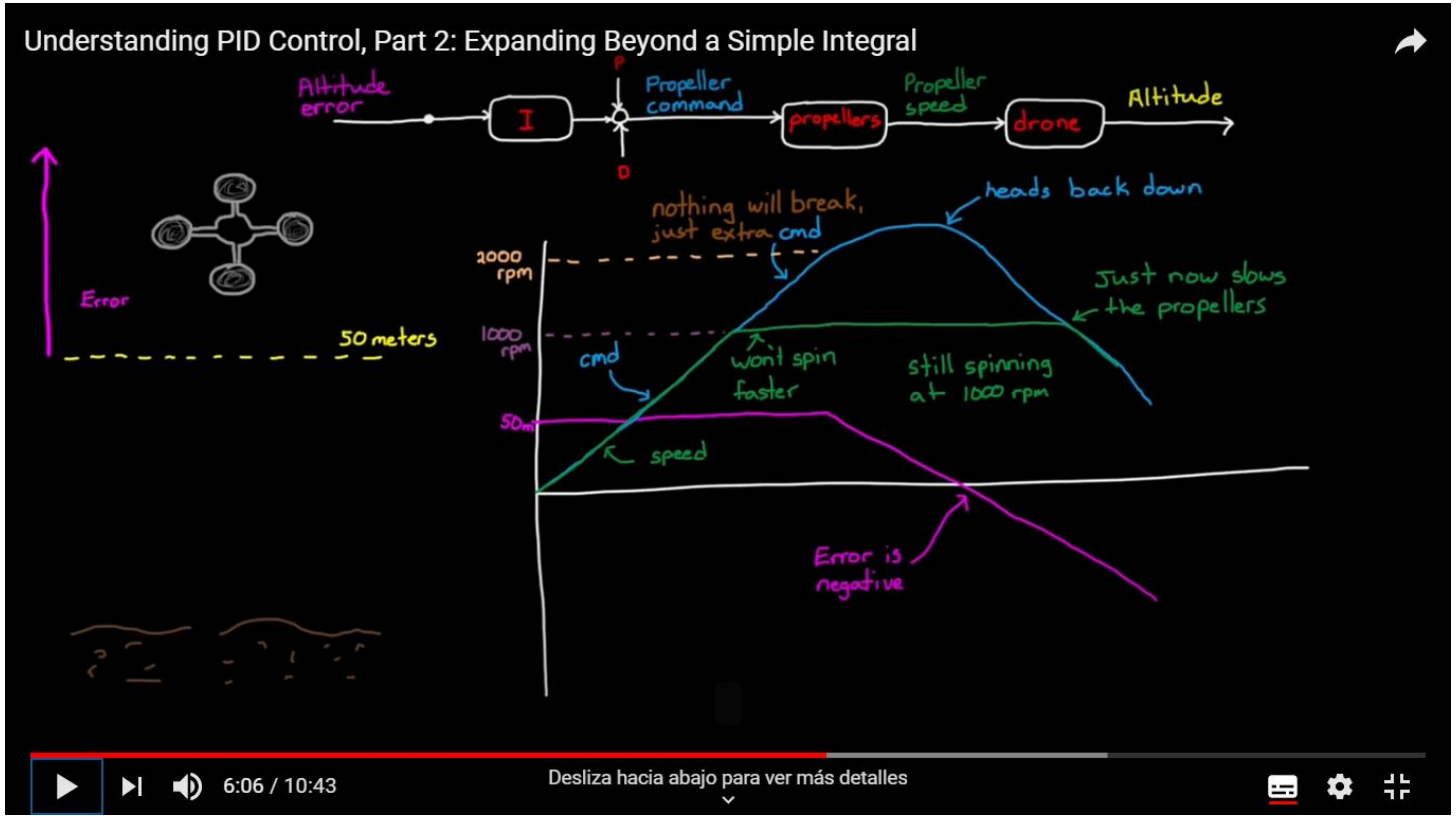
Selección de acción en modo regulador

1. Acción inversa y válvula NC
2. $y(+)$
3. $y(+) \rightarrow e(-) \rightarrow Ac(-) \rightarrow x(-) \rightarrow F(-) \rightarrow y(+)$
4. Si $y(-)$, aceptar la acción.

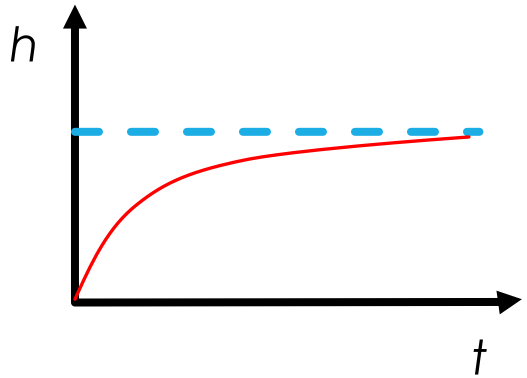


Control PID

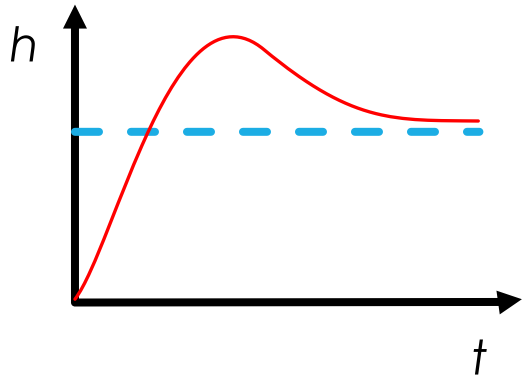
- Acción de cada efecto
- Windup



Windup



Windup



Windup

El *windup*, también conocido como "*reset windup*" o "sobreacumulación integral", es un problema común en controladores con acción integral (como PI o PID) en sistemas de control automático. Ocurre cuando el actuador se satura (alcanza sus límites físicos, como una válvula totalmente abierta), pero el término integral sigue integrando el error acumulado, lo que provoca una sobrecarga excesiva en esa acción.

Mapa curricular de ecuaciones constitutivas

1. Sistema con múltiples fases
2. Balance seudoestacionario
3. Ecuaciones constitutivas
4. Relaciones funcionales
5. Controlador PID
6. Válvulas de control
7. Modos de fallas de válvulas
8. Selección de tipo de acción del controlador