

Diseño de un sistema de control para un proceso químico industrial

*Angel L. Rodríguez
Candidato a graduación*

La idea fundamental de todo sistema de control automático es que el proceso y el controlador formen un lazo cerrado de acción y respuesta. La función principal de un sistema de control es el mantener la variable de salida en el valor interesado.

En este artículo se presenta el diseño de un sistema de control de temperatura para un proceso químico industrial. El objetivo del lazo, en este caso, es el controlar la temperatura de un fluido que reside dentro de un tanque.

El tanque en el cual se encuentra el fluido está completamente aislado para evitar que el calor se pierda. El tanque tiene un chaleco (jacket) alrededor, en el cual se circula vapor para controlar la temperatura en el tanque. El chaleco está construido de acero de 0.25 pulgadas de espesor, tiene un calor específico de $0.12 \text{ BTU/lb}^{\circ}\text{F}$ y su densidad es de 0.29 lb/plg^3 . El área de transferencia entre el tanque y el chaleco es de 144 ft^2 .

La figura 1 presenta un diagrama simplificado de los componentes del sistema. La temperatura del producto, en este caso la variable controlada, la mide un conjunto de sensor y transmisor. Este último genera una señal proporcional a la temperatura y la envía al controlador.

Se utilizó un controlador del tipo PID (proportional-plus integrator - plus derivative), el cual combina funciones de controladores proporcionales, integradores y derivadores. Se usa mayormente en aplicaciones en las cuales la constante de tiempo (el tiempo que toma la variable en llegar a 63.2% de su valor final) es suficientemente grande como en este caso. Debido a que hay que sintonizar su ganancia, el tiempo sin respuesta (reset time) y el tiempo de derivación (derivative time), este controlador es el más difícil de sintonizar.

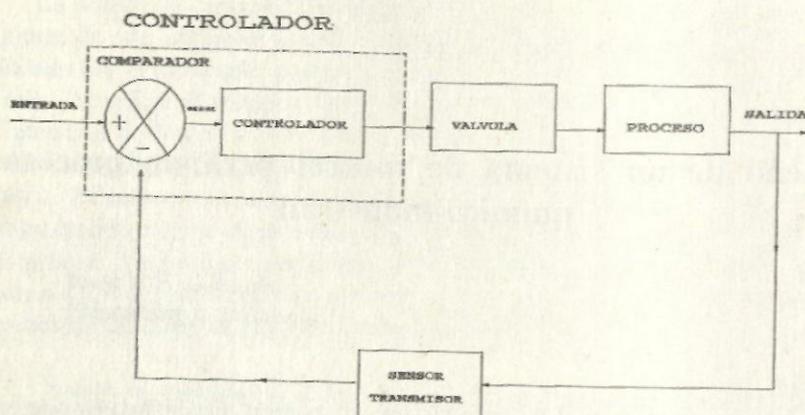


Figura 1: Diagrama simplificado del sistema

En este proceso el controlador compara la señal de salida del transmisor con el valor que se desea obtener finalmente. Inmediatamente éste genera una señal proporcional a la diferencia entre el valor medido y el que se interesa. A esta diferencia se le llama el error. La señal de error se alimenta a un transductor (transducer), el cual cambia la señal eléctrica a una mecánica. Esta versión de la señal es la que recibe el actuador de la válvula de vapor.

La válvula de control consta de un actuador y el cuerpo. El cuerpo es la parte que contiene la restricción variable. El actuador provee la potencia necesaria para mover el vástago, que es el que varía el área de flujo de la restricción. El tamaño de la válvula depende del coeficiente de flujo. Este factor se define como el número de galones de agua por minuto que al pasar por la válvula completamente abierta produce una caída de presión de 1 lb/plg² (psi). En este diseño se usó una válvula del tipo logarítmica, o sea, de igual porcentaje. Para esta clase de válvula, si se incrementa su viaje en un porcentaje dado, entonces su salida aumentará el mismo porcentaje del valor previo al incremento.

Las ecuaciones que describen el proceso son las siguientes:

$$VPC_p \frac{dT_p}{dt} = UA[T_v(t) - T_p(t)]$$

$$C_m \frac{dT_v(t)}{dt} = \lambda m(t) - UA[T_v(t) + T_p(t)]$$

en las cuales:

P = densidad del líquido en el tanque = 2.255 lb/litro

C_p = calor específico del fluido = 1 BTU/lb^oF

V = calor específico del fluido en el tanque

= 5000 litros

U = factor de transferencia de calor

= 2.5 BTU / min ft² °F

A = área de transferencia de energía entre el chaleco y el tanque

= 144 ft²

T_v = temperatura del vapor que calienta el tanque

= 274° F

$UA(T_v(t) - T_p(t))$ = razón de transferencia de calor

C_m = capacidad calorífica del chaleco

= producto de la masa por C_p

λ = calor latente de condensación = 966 BTU/lb

m = flujo de vapor (lb/min)

Aplicando la transformada de Laplace se consiguen las siguientes expresiones:

$$T_p(s) = \frac{1}{(\tau_p s + 1)} T_v(s)$$

$$T_v(s) = \frac{K_m m(s)}{(\tau_{ch} s + 1)} + \frac{T_p(s)}{(\tau_{ch} s + 1)}$$

Las constantes en las ecuaciones anteriores tienen los siguientes valores:

$$\tau_p = \frac{VPC_p}{UA} = 31.31 \text{ minutos}$$

$$\tau_{ch} = \frac{C_m}{UA} = \frac{10.8}{2.5 \times 144} = 0.03 \text{ minutos}$$

$$K_m = \frac{\lambda}{UA} = \frac{966}{360} = 2.68^\circ \text{F/lb/minuto}$$

Para calcular la función de transferencia de la válvula es necesario computar el flujo de vapor requerido para elevar la temperatura del fluido en un tiempo dado. A base de tener disponibles 15 lb/min de vapor, el flujo de vapor es

$$q = m\lambda (\text{BTU/minuto}) = (15 \text{ lb/min})(966 \text{ btu/lb}) = 14490 \text{ BTU/minuto}$$

$$Q = MC_p T = (5000 \text{ litros})(2.255 \frac{\text{lb}}{\text{litros}})(1 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ \text{F}})(121^\circ \text{F}) = 1,364,275 \text{ BTU}$$

En las ecuaciones que preceden, las variables representan lo siguiente:

T = cambio temperatura del producto = $195 - 174 = 121^{\circ}\text{F}$

q = flujo de calor

Q = total BTU requeridos

M = masa dentro del tanque

El tiempo necesario para llevar la temperatura del fluido a 195°F es

$$q = \frac{Q}{\text{minutos}} = \frac{1364275}{14490} = 94 \text{ minutos}$$

Para una válvula de igual porcentaje, su función de transferencia se define como

$$\frac{m_v(s)}{M(s)} = \frac{K_v(s+1)}{\tau_v}$$

$$K_v = \ln R C_v F_{\max} / 100\% = \frac{\ln 50 (15 \text{ lb/min})}{100\%} = 0.58 \frac{\text{lb}}{\text{min}\%}$$

La constante de tiempo de la válvula es

$$\tau_v = 0.75 \text{ minutos}$$

El funcionamiento del lazo de control se puede analizar utilizando la versión detallada del sistema en la figura 2. En éste las variables se definen como sigue:

E_s = señal de error

G_c = función de transferencia del controlador

G_v = función de transferencia de la válvula

H = función de transferencia del sensor transmisor

K_{sp} = factor de escalación

G_p = función de transferencia del proceso

$$G_p = \frac{K_m}{[(\tau_{ck}s+1)(\tau_p s+1)] - 1}$$

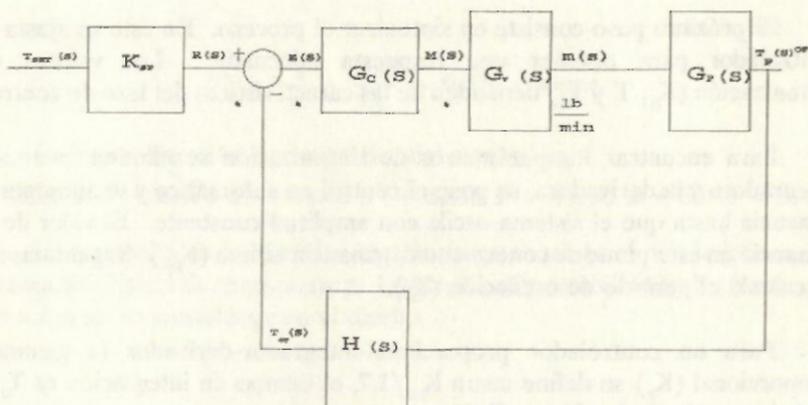


Figura 2: Diagrama detallado del sistema de control

La función de transferencia del lazo de control es

$$\frac{T_p}{T_{set}} = \frac{K_p G_c(s) G_v(s) G_p(s)}{1 + [H(s) G_c(s) G_v(s) G_p(s)]}$$

La ecuación característica del lazo de control es el determinante de la ecuación anterior, esto es

$$1 + H(s) G_c(s) G_v(s) G_p(s)$$

Al sustituir las variables de cada función de transferencia se obtiene

$$1 + \left(\frac{K_t}{\tau_i s + 1} \right) \left(\frac{K_p}{1 + \left(\frac{1}{\tau_i} \right) + (T_d s)} \right) \frac{K_v}{(\tau_v s + 1)} \frac{K_m}{(\tau_p + 1)(\tau_{ch} s + 1) - 1}$$

Los valores de las constantes en esta ecuación se definen a continuación:

$$\tau_t = 0.20 \text{ minutos} \quad \tau_v = 0.75 \text{ minutos}$$

$$\tau_p = 31.31 \text{ minutos} \quad \tau_{ch} = 0.03 \text{ minutos}$$

$$K_t = 0.66 \% / ^\circ F$$

$$K_v = 0.58 \text{ lb} / \text{minuto} / \%$$

$$K_m = 2.68 ^\circ F / \text{lb} / \text{minuto}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación característica, la expresión toma la siguiente forma:

$$0.2818s^5 + 6.484s^4 + 31.68s^3 + (31.37 + 1.28K_p T_d)s^2 + 1.28K_p s + 1.28 \frac{K_p}{T_i} = 0$$

El próximo paso consiste en sintonizar el proceso. En éste se ajusta el controlador para obtener una respuesta adecuada. Los valores de sintonización (K_p , T_i y T_d) dependen de las características del lazo de control.

Para encontrar los parámetros de sintonización se elimina la acción integradora y la derivadora, se pone el control en automático y se aumenta la ganancia hasta que el sistema oscile con amplitud constante. El valor de la ganancia en este punto se conoce como ganancia última (K_{pu}). Seguidamente se calcula el período de oscilación (T_u).

Para un controlador proporcional-integrador-derivador la ganancia proporcional (K_p) se define como $K_{pu}/1.7$, el tiempo de integración es $T_u/2$ y el tiempo de derivación es $T_u/8$.

Al dejar que T_d y $1/T_i$ sean cero, se puede calcular la ganancia última y el período de oscilación.

$$0.2818s^5 + 6.484s^4 + 31.68s^3 + 31.37s^2 + 1.28s K_p = 0$$

$$0.2818s^4 + 6.484s^3 + 31.68s^2 + 31.37s + 1.28 K_p = 0 + j0$$

$$s = j\omega \quad K_p = K_{pu}$$

$$6.484 (j\omega)^3 + 31.37 (j\omega) = 0$$

$$0.2818 (j\omega_u)^4 + 31.68 (j\omega_u)^2 + 1.28 K_{pu} = 0$$

$$\omega_u = \sqrt{\frac{-31.37}{-6.484}} = 2.20 \text{ rad / minuto}$$

$$T_u = \frac{6.28}{2.2} = 2.85 \text{ minutos}$$

$$K_{pu} = \frac{1}{1.28} [-0.2818(2.20)^4 + 31.68(2.20)^2] = 114.63$$

De esta forma, los parámetros de sintonización para el controlador son los siguientes:

$$K_p = \frac{K_{pu}}{1.7} = \frac{114.63}{1.7} = 67.43$$

$$T_i = \frac{T_u}{2} = \frac{2.85}{2} = 1.42 \text{ minutos}$$

$$T_d = \frac{T_u}{8} = \frac{2.85}{8} = 0.356 \text{ minutos}$$

La nueva ecuación característica del sistema es:

$$0.2818 s^5 + 6.484 s^4 + 31.68 s^3 + 62.10 s^2 + 86.31 s + 60.78 = 0$$

El desarrollo de la ecuación característica concluye el diseño básico del sistema de control de temperatura. Los análisis de estabilidad y las funciones forzantes no se consideran en el diseño.