

Control de Procesos Multivariable

Resumen: El presente artículo muestra la utilización de técnicas muy ventajosas para el análisis y diseño de sistemas de control de procesos MIMO interactivo. Para tal fin, se toma como ejemplo el Proceso de Dilución de Carbonato de Calcio utilizado en la fabricación de papeles blancos.

Palabras clave: Industria, Procesos multivariable, Variables.

Fernando Salas Lainez
Ingeniero Electrónico
Docente Instituto Tecnológico de Comfacauca sede Puerto Tejada
fsalaslainez@hotmail.com

En la industria existen numerosos procesos en los que hay que controlar dos o más variables (densidad, concentración, ph, temperatura, etc.), disponen de múltiples entradas (variables que se manipulan, para mantener en un valor estable las variables que se controlan y perturbaciones existentes en el proceso) y múltiples salidas (variables que se controlan). A tales procesos se les denomina procesos MIMO o multivariables.

El control de los procesos MIMO generalmente es complejo y aún más cuando existe interacción entre las múltiples variables.

Proceso de Dilución de Carbonato de Calcio

El carbonato de calcio con una concentración del 70% de sólidos, es bombeado de un tanque de almacenamiento a un segundo tanque de servicio donde se controla el nivel de éste para garantizar una presión hidrostática constante en la succión de la bomba que envía el carbonato de calcio diluido al 35% de sólidos a las máquinas papeleras. La línea de tubería que une a los tanques o línea de dilución empalma con una línea de agua industrial cuyo flujo es manipulado a través de una válvula de control automática.

La dilución del carbonato de calcio se produce directamente en la línea de dilución y se controla manipulando el flujo de agua hacia ésta. El nivel del tanque de servicio se controla manipulando el flujo de carbonato de calcio al 70% de sólidos a través de la línea de dilución.

Diagrama de Bloques del Sistema

En las figuras 1 y 2 se muestra el diagrama de bloques del sistema en lazo abierto.

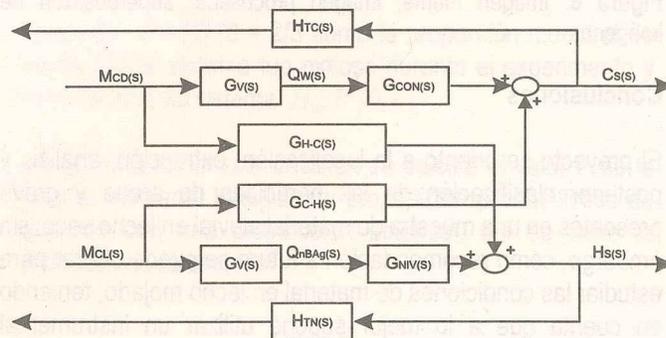


Figura 1. Sistema nivel-concentración en lazo abierto

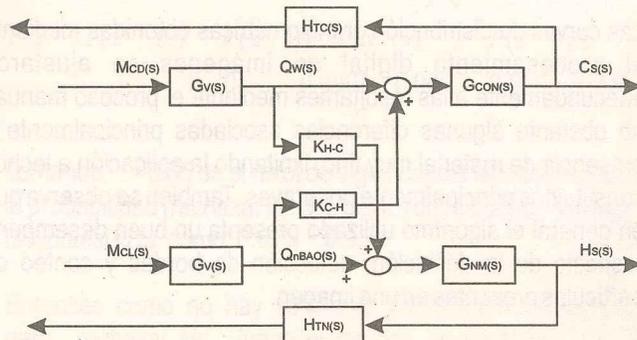


Figura 2. Diagrama de bloques simplificado

Para obtener el diagrama de bloques es necesario haber determinado previamente el modelo matemático (conjunto de ecuaciones) del proceso incluida la instrumentación industrial del mismo (válvulas, sensores y transmisores, variadores de velocidad, conjunto motor bomba, etc.).

Ahora se determina si los pares de variables controlada y manipulada de este sistema han sido seleccionadas adecuadamente, formando la matriz de ganancias de estado estacionario (MGEE) y la matriz de ganancia relativa (MGR) o medida de interacción.

MGEE para un sistema multivariable 2x2, dos entradas y dos salidas:

$$C_i \begin{matrix} m_1 & m_2 \\ K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{matrix}$$

Donde cada elemento K_{ij} de la MGEE representa la ganancia de m_j sobre C_i cuando todas las demás variables manipuladas se mantienen constantes; es decir, es la ganancia que relaciona la variable controlada i con la variable manipulada j .

MGR está dada por:

$$C_i \begin{matrix} m_1 & m_2 \\ i_1 & i_2 \\ i_1 & i_2 \end{matrix}$$

$$i_1 \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \quad i_2 \frac{K_{12}K_{21}}{K_{12}K_{21} - K_{11}K_{22}}$$

El valor numérico de i_j es una medida de la interacción entre los circuitos:

Si $i_j = 1$, no hay interacción entre el circuito de interés y los demás circuitos.

Si $i_j = 0$, C_i no se debe controlar con m_j .

Si $i_j = -1$, m_j afecta a C_i muy poco o nada en absoluto.

Si $i_j = 0.5$, indica el grado más alto de interacción entre los circuitos.

Del diagrama de bloques de la figura 3:

$$G_{C_H}(s) = \frac{1.5625}{1.8s + 1} \quad \frac{3.222}{2.75s + 1} \quad G_{H_C}(s) = \frac{2.5491}{2s + 1} \quad \frac{0.05}{81.86s + 1}$$

$$G_V(s) = \frac{2.549}{2s + 1} \quad G_{V_B}(s) = \frac{1.5625}{1.8s + 1}$$

$$G_{CON}(s) = \frac{1.8}{2.75s + 1} \quad G_{MIV}(s) = \frac{0.0894}{81.86s + 1}$$

MGEE:

$$c_s \begin{matrix} q_w & q_{BAO} \\ 4.588 & 5.031 \end{matrix}$$

$$h_s \begin{matrix} 0.1274 & 0.1398 \end{matrix}$$

MGR:

$$c_s \begin{matrix} q_w & q_{BAO} \\ 0.5012 & 0.4988 \end{matrix}$$

$$h_s \begin{matrix} 0.4988 & 0.5012 \end{matrix}$$

El hecho de que todos los elementos de la MGR sean positivos indica que los circuitos de control en interacción se ayudan mutuamente, lo cual se puede verificar fácilmente: supóngase que el nivel del tanque baja de su punto de control, entonces el controlador de nivel incrementará su señal de salida para aumentar el flujo de carbonato de calcio con lo cual se produce un aumento en la concentración de salida. Por lo tanto el controlador de densidad incrementa su señal de salida, ya que es de acción directa, con el fin de aumentar el flujo de agua industrial y llevar nuevamente la concentración al punto de control; en consecuencia el nivel volverá a su punto de control en un tiempo (tiempo de establecimiento) menor al que tomaría como circuito independiente. De forma similar ocurre si el nivel del tanque aumenta por encima de su punto de control.

Si ahora se supone que la concentración desciende de su punto de control, el controlador de densidad disminuirá su señal de salida con lo cual desciende el flujo de agua industrial y por lo tanto el nivel del tanque; entonces el controlador de nivel incrementa su señal de salida con el fin de aumentar el flujo de carbonato de calcio y llevar el nivel a su punto control. En consecuencia, la concentración deberá volver a su punto de control en un tiempo menor al que normalmente tomaría como circuito individual. Un razonamiento semejante se obtiene si por el contrario la concentración de carbonato de calcio aumenta por encima de su punto de control.

Aplicando la regla de agrupación por pares en la MGR, la concentración del carbonato de calcio se debe controlar mediante el flujo de agua industrial; es decir, la variable controlada c_s se debe controlar mediante la variable manipulada q_w . Por lo tanto, el nivel del tanque de servicio se debe controlar a través del flujo de la bomba de la línea de dilución; esto es, la variable controlada h_s se debe controlar por medio de la variable manipulada q_{BAO} .

Se aplica el teorema de Niederlinski para verificar la estabilidad del proceso con los pares seleccionados:

$$\frac{|MGEE|}{n} = \frac{1.999}{K_{ii}} \quad 0$$

Por lo tanto el sistema de circuito cerrado, con las variables agrupadas actuales del proceso, es estable. No obstante, los elementos de la MGR son muy próximos a 0.5 lo cual indica una fuerte interacción entre los circuitos. Lo anterior se puede verificar mediante el índice de interacción de Nisenfeld y Schultz:

$$I_{ij} = \left| \frac{1}{ij} \right|$$

En la cual, con $I_{ij} < 1$ se evita la inestabilidad que se debe a la interacción de los circuitos.

$$I_{11} = \left| \frac{105012}{05012} \right| \quad I_{22}$$

$$I_{11} \quad I_{22} \quad 0.995 \quad 1$$

El índice de interacción muy cercano a uno es una muestra de la tendencia del circuito a volverse marginalmente estable (oscilaciones periódicas de amplitud constante de las variables controladas; es decir, las variables controladas son funciones senosoidales del tiempo) y llegar fácilmente a la inestabilidad.

El control por retroalimentación simple (cada variable de control se controla de forma independientemente, sin que exista una retroalimentación mutua de información sensada entre las variables de control del proceso) que presenta el proceso de nivel y concentración no es suficiente para garantizar un óptimo desempeño.

Implementación del Desacoplador

El desacoplador (instrumentación, hardware y software, utilizada para anular o disminuir al máximo el efecto de inestabilidad u otro efecto negativo causado por la interacción entre las variables del proceso.) se debe diseñar de tal manera que con la combinación proceso desacoplador se obtenga el circuito de control de concentración independiente del circuito de nivel y viceversa; es decir,

$$\left. \frac{C_s}{M_{CL}} \right|_{M_{CD}} = 0 \quad \text{y} \quad \left. \frac{H_s}{M_{CD}} \right|_{M_{CL}} = 0$$

Lo cual implica que el desacoplador debe actuar de tal manera que con un cambio en la salida del controlador de nivel, $M_{CL}(s)$, se produzca un cambio en $H_s(s)$ pero no en $C_s(s)$; de igual forma, con un cambio en la salida del controlador de concentración, $M_{CD}(s)$, se debe producir un cambio en $C_s(s)$ pero no en $H_s(s)$

De acuerdo con la figura 3, el efecto de la salida del controlador de nivel, $M_{CL}(s)$, sobre la variable de concentración, $C_s(s)$, se puede expresar de la siguiente manera:

$$C_s(s) = [D_{CH}(s).G_V(s).G_{CON}(s) + G_{CH}(s)]M_{CL}(s)$$

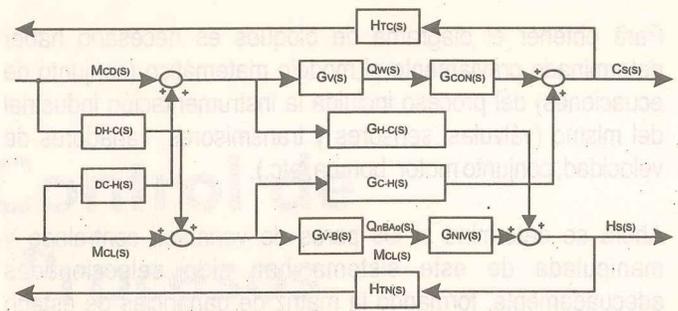


Figura 3. Diagrama de bloques sistema nivel concentración con desacoplador

De igual forma, la salida del controlador de concentración, $M_{CD}(s)$, afecta la variable de nivel, $H_s(s)$, como se expresa a continuación:

$$H_s(s) = [D_{HC}(s).G_{VB}(s).G_{NV}(s) + G_{HC}(s)]M_{CD}(s)$$

Donde:

$D_{CH}(s)$ = ecuación para el desacoplador del circuito de concentración.

$D_{HC}(s)$ = ecuación para el desacoplador del circuito de nivel. Cuando $M_{CL}(s)$ cambie, se desea que la variable de concentración permanezca constante y por lo tanto su variable de desviación es cero, $C_s(s)=0$; esto es,

$$0 = [D_{CH}(s).G_V(s).G_{CON}(s) + G_{CH}(s)]M_{CL}(s)$$

$$D_{CH}(s) = \frac{G_{CH}(s)}{G_V(s).G_{CON}(s)}$$

De manera semejante, se desea que cuando $M_{CD}(s)$ cambie, la variable de nivel permanezca constante y por lo tanto su variable de desviación es cero, $H_s(s)=0$; esto es,

$$0 = [D_{HC}(s).G_{VB}(s).G_{NV}(s) + G_{HC}(s)]M_{CD}(s)$$

$$D_{HC}(s) = \frac{G_{HC}(s)}{G_{VB}(s).G_{NV}(s)}$$

$$D_{CH}(s) = 1.0972 \frac{2s + 1}{1.8s + 1} \quad D_{HC}(s) = -0.9125 \frac{1.8s + 1}{2s + 1}$$

Las ecuaciones anteriores constan de una ganancia y un término de adelanto retardo, lo cual indica que el diseño de los desacopladores son equivalentes al diseño de un controlador por acción precalculada en el que la variable manipulada del circuito de control de nivel es la perturbación mayor para el circuito de control de concentración y viceversa, con la diferencia de que los desacopladores forman parte de la ecuación característica (denominador de la función de transferencia de circuito cerrado) de los circuitos de control y por lo tanto, afectan su estabilidad. La figura 4 muestra el diagrama de bloques simplificado del sistema con desacoplador y la figura 6 muestra el proceso con la instrumentación que se requiere para implementar el desacoplador.

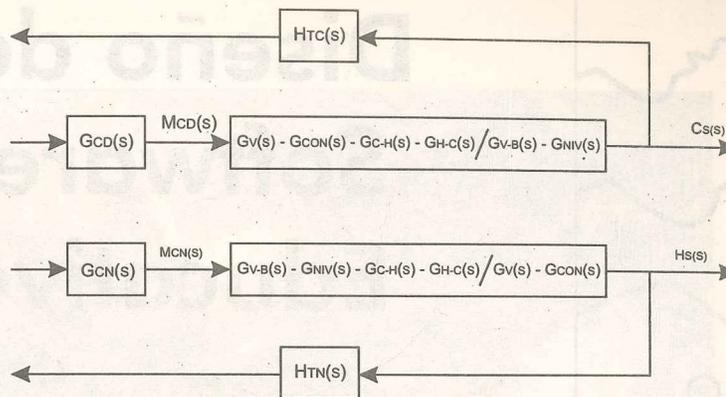


Figura 4. Diagrama de bloques simplificado del sistema nivel-concentración con desacoplador

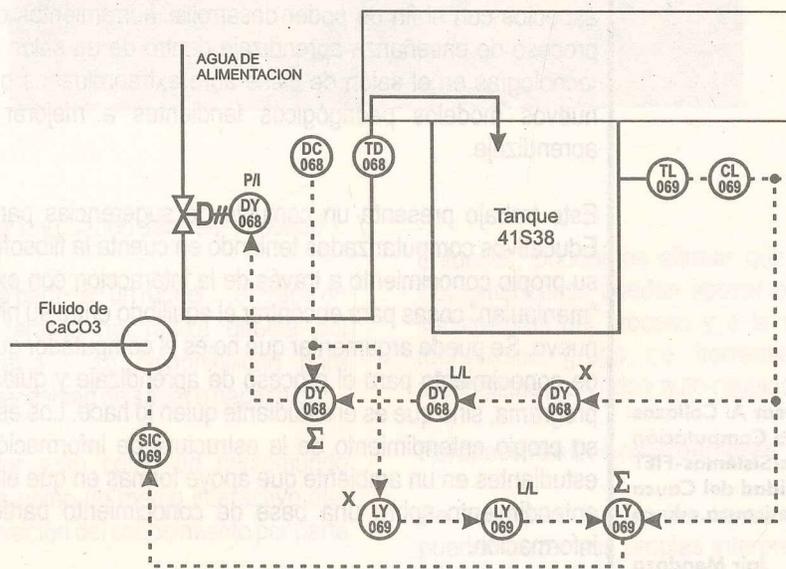


Figura 5. Diagrama de proceso con instrumentación para implementar el desacoplador

Conclusión

Los circuitos de retroalimentación simple como estrategias de control para un proceso multivariable no son suficientes para garantizar la estabilidad de los circuitos y de los tiempos deseados de establecimiento (tiempo en el cual la variable controlada) pues el ajuste por ensayo y error implica que se baje la ganancia y se incremente el tiempo de reajuste de uno de los controladores limitando su banda proporcional y su zona de estabilidad relativa.

Las técnicas descritas para el análisis de sistemas MIMO muestran la naturaleza dinámica del proceso; la eliminación o atenuación del efecto de las interacciones mutuas entre las variables a través de los desacopladores, permite que el análisis y diseño del compensador (parámetros del controlador) para cada variable de control sea una tarea más sencilla.

Bibliografía

- SMITH, Carlos A. Multivariable Process Control. Principles and Practice of Automatic Process Control, Editorial Prentice Hall, 1997.
- BEQUETTE, B. Wayne. Multivariable Control. Process Control. Editorial Wiley, 2003.
- LIUA, Xiaoping. Paper - Almost disturbance decoupling of MIMO nonlinear systems and application to chemical processes. Automática, 2003.
- SMITH, Carlos A. (1997). Multivariable Process Control. Principles and Practice of Automatic Process Control, 1997.