

Sobre el efecto del plato de alimentación en el control en columnas de destilación

Claudio Bedolla*, Miguel Morales-Cabrera*, Héctor Puebla** y Eliseo Hernandez-Martinez*

* Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana-Región Xalapa
Veracruz, México; (e-mail: elisehernandez@uv.mx).

**Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco
D.F., México; (email: hpuebla@correo.azc.uam.mx)

Resumen: Actualmente, el control de las columnas de destilación es un problema abierto y de gran interés en la industria química. El plato de alimentación es una de las variables más importantes en el diseño, ya que define las condiciones de la mezcla de alimentación para alcanzar los estándares requeridos. A pesar de su importancia, dicha variable no es considerada en el diseño del esquema de control. En ese sentido, en este trabajo se presenta un estudio sobre el efecto del plato de alimentación en el diseño del esquema de control en columnas de destilación. Los resultados muestran las regiones donde el controlador puede mejorarse con la posición del plato de alimentación, reduciendo el efecto de las perturbaciones externa e incrementando el flujo de destilado.

Palabras clave: Control PI; columna de destilación; plato de alimentación; desempeño de controlador.

1. INTRODUCCIÓN

Probablemente, la destilación es una de las operaciones de separación más empleadas en la industria química, ya que esta permite alcanzar altos grados de pureza (Bequette, 1998). En general, la operación de la columna de destilación está expuesta a constantes perturbaciones, tales como cambios de operación, variaciones de las condiciones de alimentación, entre otros. Por dicha razón es necesario el desarrollo e implementación de controladores que mantengan constantes las variables del proceso (Torres et al, 2004; Sivakumar y Balu, 2010). El objetivo de control se centra en la regulación de la concentración del destilado (Smith y Corripio, 1991). En ese sentido, diversos trabajos han propuesto la implementación de esquemas de control. Por ejemplo, Cristea y Rueda (2003) proponen un controlador predictivo basado en el modelo de una columna de destilación binaria para regular la fracción molar del destilado, utilizando como variable de control la temperatura del rehervidor. Sus resultados numéricos mostraron buena respuesta de regulación y robustez frente a perturbaciones, sin embargo las aplicaciones físicas son reducidas debido a que el esquema depende completamente del modelo matemático. Por otro lado, Grüner et al, (2003) incorporan un control predictivo a una columna de destilación multicomponentes, donde sus resultados muestran que el controlador es eficiente, logrando regular el destilado de una mezcla ternaria. Torres et al, (2004) consideran un sistema acoplado a un observador de estados que permite la estimación de los términos inciertos del modelo, haciendo más robusto el desempeño del controlador. A pesar de ello, para el diseño del observador y del controlador se considera un modelo simplificado, que limita su aplicación a sistemas no lineales con estructura triangular.

Más adelante, Solar et al. (2010) proponen un esquema de control paralelo para una planta considerando un reactor y dos columnas de destilación, donde la composición de destilado de la segunda columna es controlada mediante la manipulación simultánea de la velocidad de vapor del rehervidor y la temperatura del reactor. Las simulaciones numéricas mostraron que el control propuesto es capaz de regular perturbaciones en la alimentación, distribuyendo el esfuerzo de control de las diferentes unidades del proceso. Sivakumar y Balu (2010) presentan una estrategia de control inteligente que combina el controlador predictivo y neuro-difuso en una columna de destilación binaria. La característica del controlador es que ajusta la salida del controlador predictivo, mejorando la respuesta del controlador. Sus resultados son comparados con un esquema PID de múltiples lazos y un control de redes neuronales (NN), mostrando que el esquema propuesto exhibe mejor desempeño.

Los trabajos arriba descritos presentan avances en el diseño e implementación de esquemas de control para columnas de destilación. Sin embargo, las propuestas se basan en diseños de columnas previamente establecidos, sin considerar el efecto de las variables de operación como el plato de alimentación. Siendo que en diversos trabajos se ha mostrado que la posición del plato de alimentación permite mejorar la eficiencia de la columna (Luyben, 1968; Akashah et al., 1979). En ese sentido, en este trabajo se propone un estudio de la incidencia que tiene el plato de alimentación sobre el desempeño del controlador para una columna con número de platos establecidos. Esto debido a que en aplicaciones prácticas, la columna de destilación ya está establecida y no es posible modificar el número de platos. Por simplicidad, se propone la regulación del destilado mediante un controlador tipo PI considerando dos mezclas binarias, benceno-tolueno (ideal) y etanol-agua (no ideal).

Los resultados indican que el plato de alimentación debe ser considerado en el diseño del controlador, ya que permite mejorar su desempeño frente a perturbaciones y mejorar el flujo de destilado.

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelo

Para describir la dinámica de la columna de destilación se considera el balance de masa de N etapas, bajo las siguientes consideraciones,

- Alimentación en un único plato (variable para el análisis)
- La alimentación entra como líquido saturado
- Flujos molares de vapor y líquido constantes entre cada plato
- No hay pérdidas de calor, la columna es adiabática.
- El condensador es total, por lo que la composición del vapor que abandona la columna por cabeza será la misma que la de la corriente de reflujo y destilado.
- El líquido acumulado en cada plato es incompresible y se encuentra como una mezcla perfecta; la composición será la misma en todos los puntos.
- La fase líquida y vapor que abandonan el plato se encuentran en equilibrio térmico, a la misma temperatura.
- No se considera acumulación de vapor a lo largo del sistema

El modelo matemático se plantea con los balances de materia de la zona de agotamiento, rectificación y de alimentación, así como el rehervidor y el condensador. A continuación se describe cada zona,

Balance del plato de alimentación i

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1} + V_{i-1} + F - L_i - V_i \quad (1)$$

Balance por componente del plato de alimentación i

$$\frac{dM_i x_i}{dt} = L_{i+1} x_{i+1} + V_{i-1} y_{i-1} + F x_F - L_i x_i - V_i y_i \quad (2)$$

donde L_{i+1} es el flujo de líquido del plato $i+1$, V_{i-1} es el flujo de vapor del plato $i-1$, F es el flujo de alimentación, L_i es el flujo de líquido en el plato i , V_i es el flujo de vapor en el plato i , x es la fracción mol de la corriente líquida, y es la fracción mol de la corriente vapor y x_F es la concentración de la alimentación.

Balance para un plato n

$$\frac{dM_n}{dt} = L_{n+1} + V_{n-1} - L_n - V_n \quad (3)$$

Balance por componente para un plato n

$$\frac{dM_n x_n}{dt} = L_{n+1} x_{n+1} + V_{n-1} y_{n-1} - L_n x_n - V_n y_n \quad (4)$$

Balance del condensador

$$\frac{dM_c}{dt} = V_N - D - R \quad (5)$$

Balance por componente para el condensador

$$\frac{dM_c x_c}{dt} = V_N y_N - D x_D - R x_D \quad (6)$$

Balance de materia en el rehervidor

$$\frac{dM_R}{dt} = L_1 - B - V_R \quad (7)$$

Balance por componente para el rehervidor

$$\frac{dM_R x_R}{dt} = L_1 x_1 - B x_B - V_R x_B \quad (8)$$

donde D es el flujo de destilado, R la cantidad de reflujo que ingresa a la columna, x_D es la fracción mol del destilado, B es el flujo de fondo y x_B es la fracción mol del flujo de fondos.

La fracción mol de la fase líquida (x) se obtiene a partir de la solución de las ecuaciones diferenciales, y para la fase vapor (y_i) en la mezcla ideal se calcula con la relación de la volatilidad relativa (α),

$$y_i = \frac{\alpha x_i}{1 + (\alpha - 1)x_i} \quad (9)$$

Para la mezcla no ideal se calcula a partir del equilibrio calculado con la ecuación de Raoult modificada y las constantes de Margules (Smith et al., 2015).

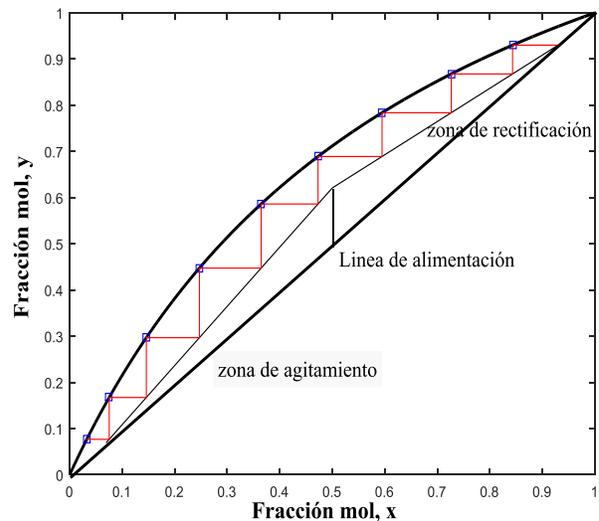


Figura 1. Representación gráfica del método de McCabe-Thiele

Para la determinación del número de platos y tener un parámetro de comparación con las simulaciones se usa el método de McCabe-Thiele. Para ello, se divide la columna en dos secciones, zona de agotamiento (del plato de

alimentación hacia abajo) y zona de rectificaciones (del plato de alimentación hacia arriba), por cada zona de acuerdo a un balance de masa y las relaciones de reflujo se genera una línea de operación, y una más a partir de las condiciones de la alimentación. Usando las tres líneas de operación y el diagrama de equilibrio x vs. y , se determina el número de platos teóricos y el plato de alimentación (Figura 1). Por su simplicidad, este método es de los más utilizados para el diseño de columnas, sin embargo, solo está limitada para mezclas binarias. La extensión a sistemas multicomponentes y/o híbridos (i.e., destilación reactiva o extractiva) pueden ser usados los métodos rigurosos que se basan en el balance de masa de cada componente

2.2 Esquema de control

El esquema de control propuesto considera la regulación de la fracción mol de destilado mediante la manipulación del reflujo de la columna (u). Para ello se propone un esquema de control de tipo PI, que se puede representar como

$$u(t) = \bar{u} + K_c \left[e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \right]$$

donde

$$e(t) = x_{ref} - x(t)$$

y K_c y K_i son parámetros constantes de la acción proporcional e integral, respectivamente. Para el sintonizado del controlador se usaron las reglas de sintonizado reportadas en Skogestad (2003). Para evaluar el error de regulación se propone como métrica, la integral del error al cuadrado definido como,

$$E^2 = \int_{t_c}^t e(t)^2 dt$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caso I: Mezcla ideal

Para la simulación numérica a lazo abierto se consideraron los siguientes parámetros $F=100$, $x_f=0.5$, $R=128\text{mol}$, $V=178$ y $\alpha=2.46$. La Figura 2a muestra la dinámica de la fracción de destilado variando el plato de alimentación, donde se observa que el máximo valor se alcanza cuando la alimentación es en el plato 5 (Figura 2b). Este resultado coincide con el obtenido por el método McCabe-Thiele que indica que el plato de alimentación debe ser en el quinto plato. Además, se puede notar que para un cambio en escalón (+10% reflujo), el cambio del estado estacionario que se alcanza mayores cambios en el plato cerca del rehervidor, lo que indica que la alimentación en este plato es más sensible.

Para el lazo cerrado se propone como referencia la pureza de destilado como $x_D=0.98$. La Figura 3a muestra la acción de

control considerando diferentes platos de alimentación, donde para todos los casos se observa que se llega al valor de referencia propuesto, siendo el plato 6 el que requiere el menor tiempo para llegar a dicha referencia, por lo que exhibe el menor error de regulación (Figura 3b).

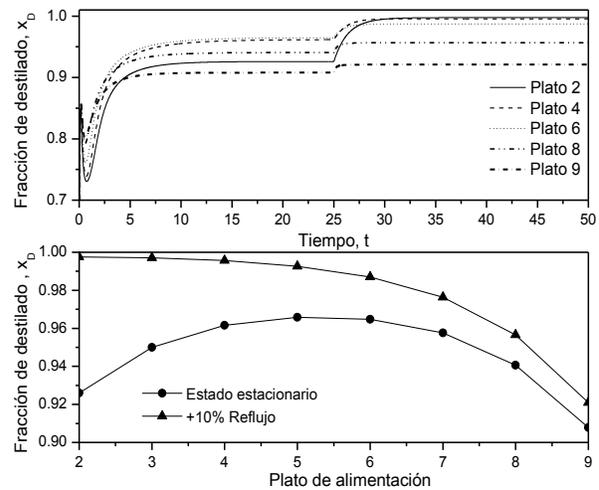


Figura 2. Fracción de destilado con diferente plato de alimentación.

Lo anterior sugiere que el uso del método McCabe-Thiele para la localización del plato de alimentación también provee información del plato que favorece al controlador. Sin embargo, cabe mencionar que la exigencia del controlador es menor para los platos 5, 6 y 7 debido a que la fracción de destilado a lazo abierto son las más cercanas a la referencia en el lazo cerrado.

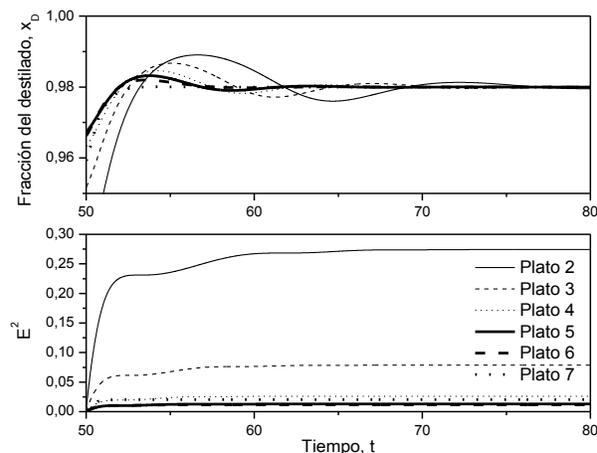


Figura 3. Control de la fracción de destilado para diferentes platos de alimentación

En general, en la Figura 3 se puede observar una tendencia del desempeño del controlador en relación al plato de alimentación, tal que si el plato de alimentación se coloca

cerca del rehervidor (primeros platos) el error incrementa, mientras que, si el plato de alimentación se coloca en los últimos platos de la columna, el error disminuye. La tendencia se verifica al incorporar perturbaciones y evaluar el desempeño del controlador. Para una secuencia de perturbaciones +10%, +20%, -10% y -20% en la fracción mol de alimentación, a los tiempos 100, 150, 200 y 250 unidades de tiempo, respectivamente, la Figura 4 muestra la regulación de la fracción mol de destilado y el error de regulación considerando como plato de alimentación los platos 2 al 8 de la columna. Se observa que los platos 6 y 8 son los que exhiben mejor desempeño del controlador, lo que indica que operar con alimentación en los últimos platos de la columna ayuda a reducir los efectos adversos de las perturbaciones en la alimentación. Sin embargo, para ello el reflujo debe incrementar, por lo que el flujo de destilado disminuye (Figura 5), es decir, se el producto de valor agregado se reduce.

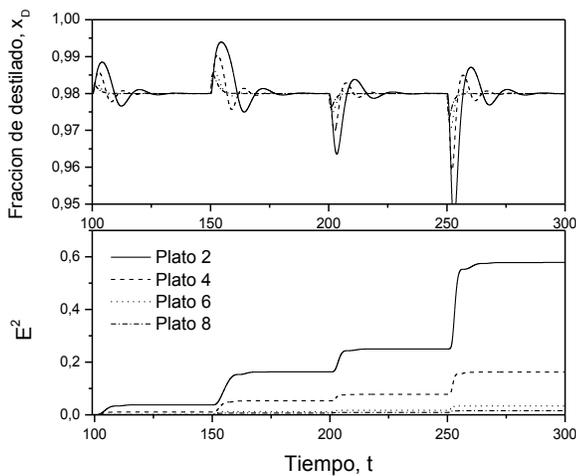


Figura 4. Desempeño del controlador para perturbaciones en la alimentación

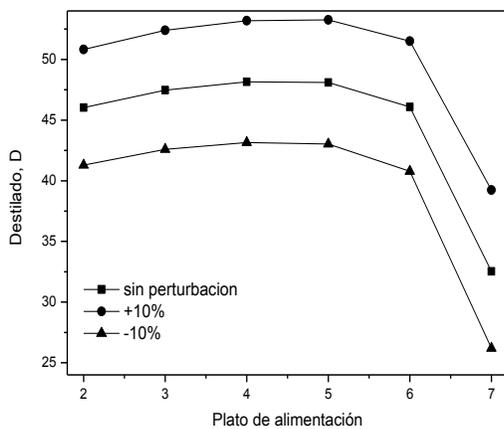


Figura 5. Flujo de destilado para la mezcla ideal

3.2 Caso II: Mezcla no ideal

Las condiciones de operación para la simulación son las mismas que las del caso anterior. Sin embargo, la mezcla etanol-agua exhibe en el equilibrio un azeotropo al 96% de etanol, lo cual limita alcanzar purezas mayores a este porcentaje. Esto se refleja en las condiciones de operación y por consecuencia en las consideraciones en el diseño de los controladores.

A pesar de ello, en la Figura 6 se observa que la máxima concentración de destilado es cuando se alimenta en el plato 2, lo cual es lo sugerido por el método de McCabe-Thiele. Este resultado sugiere que dicho método puede ser usado para el análisis del efecto del plato de alimentación para el diseño de controladores en columnas de destilación considerando mezclas no ideales.

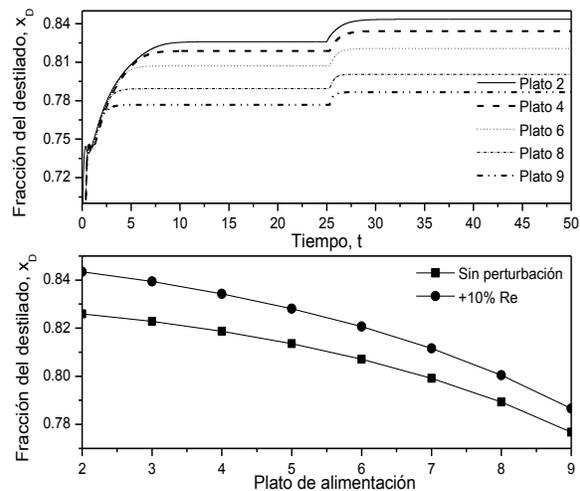


Figura 6 Simulación a lazo abierto para el sistema etanol-agua.

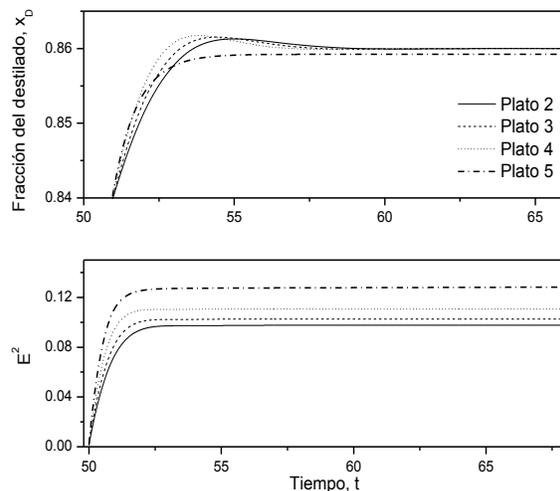


Figura 7 Regulación del destilado a diferentes posiciones del plato de alimentación.

Para el lazo cerrado, se considera un valor de referencia de $x_D=0.86$. La Figura 7 muestra la regulación del destilado para diferentes posiciones del plato de alimentación, donde se observa la referencia solo se alcanza cuando el plato de alimentación se coloca en los primeros platos de la columna, i.e., antes del plato 5. Esto se debe a que la alimentación después del plato 5 exige un reflujo mayor al vapor generado en la columna (reflujo total), lo que indica que no es posible la regulación de la fracción de destilado en platos superiores.

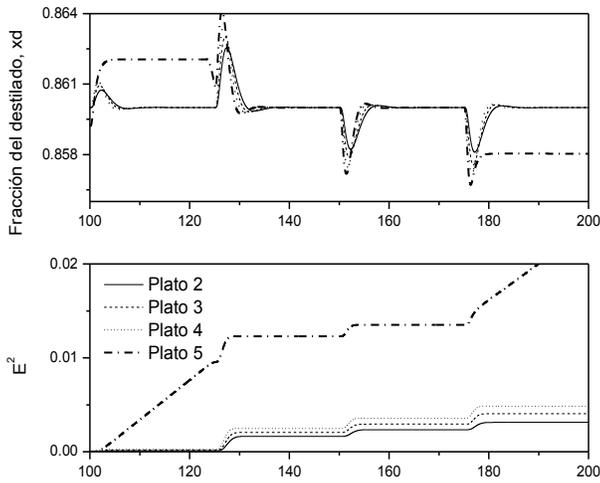


Figura 8 Desempeño del controlador frente a perturbaciones para la mezcla no ideal.

Incorporando una secuencia de perturbaciones (+10%, +20%, -10% y -20% en la fracción mol de alimentación), se observa en la Figura 8 que el desempeño del controlador no cambia cuando se incorporan perturbaciones, siendo el plato 2 el que exhibe mejor desempeño. Cabe mencionar que el controlador con alimentación en el plato 5 solo llega a la referencia en perturbaciones específicas.

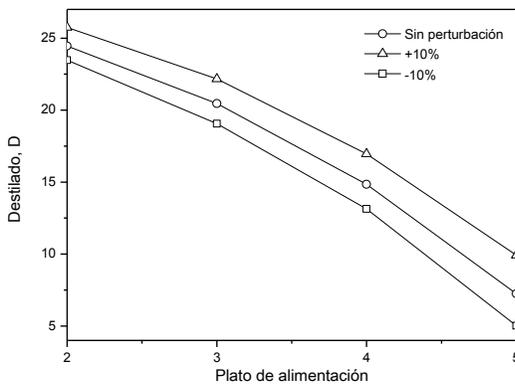


Figura 9 Flujo de destilado para la mezcla no ideal

Respecto al flujo de destilado se obtienen resultados similares a los obtenidos para el caso ideal, donde a medida

que se incrementa la posición del plato de alimentación el destilado disminuye, conduciendo la dinámica de la columna a reflujo total (Figura 9).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un estudio para analizar el efecto del plato de destilación sobre el esquema de control en una columna destilación. Por simplicidad, se considera un esquema de control PI en un sistema binario considerando una mezcla ideal y no ideal. En general, se encontró que para el sistema ideal, la posición del plato de alimentación cerca del condensador mejora el desempeño del controlador frente a perturbaciones externas, sin embargo reduce el flujo de destilado. Por el contrario, si la alimentación se realiza cerca del fondo de la columna, el sistema muestra mayor ganancia con cambios en la variable manipulada. Esto indica que la selección del plato de alimentación está en función del objetivo de producción. Mientras que para el caso no ideal, la alimentación cerca del rehervidor muestra mejoras tanto en el flujo de destilado como en el desempeño del controlador. Lo que indica que para este caso, lo dicho por el método de McCabe-Thiele resulta ser favorable. En general, considerar el efecto del plato de alimentación como parámetro en el diseño de control, que puede ayudar al diseño de la columna (escoger el mejor plato de alimentación) y/o provee mayor información que permite mejorar el desempeño del controlador, sin estar sujeto a cambios de operación del proceso. En un trabajo próximo se presentarán resultados considerando esquemas de control no lineal y modelos de columnas de destilación más complejas (i.e., destilación reactiva).

REFERENCIAS

Akashah, S., Erbar, J. H., & Maddox, R. N. (1979). Optimum feed plate location for multi-component distillation separations. *Chemical Engineering Communications*, 3(6), 461-468.

Alzate Ibáñez, A. M. Modelado y control de una columna de destilación binaria (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales).

Bequette, B. W., & Bequette, W. B. (1998). *Process dynamics: modeling, analysis, and simulation*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR.

Cristea, S., & Rueda Ferreiro, A. (2003). Control predictivo no lineal aplicado a columnas de destilación. 2ª Reunión de Usuarios de EcosimPro, UNED, Madrid, 24-25.

Grüner, S., Schwarzkopf, S., Disli-Uslu, I., Kienle, A., & Gilles, E. D. (2004, January). Nonlinear model predictive control of multicomponent distillation columns using wave models. In *Proc. 7th International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, ADECHEM* (pp. 11-14).

Luyben, W. L. (1968). *Feed Plate Manipulation in Distillation Column Feedforward Control. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 7(3), 502-508.

Torres, L., Astorga C. M., Vela, L. G., Santiago A. (2004). *Observador no lineal para el monitoreo y control de columnas de destilación. Congreso Anual de la AMCA.*

Sivakumar, R., & Balu, K. (2010). *ANFIS based distillation column control. International Journal of Computer Applications Special issue on Evolutionary Computation*, 2, 67-73.

Smith, C.A., & Corripio, A.B. (1991). *Control automático de procesos. Teoría y práctica. México: Editorial Limusa.*

Solar, R., Monroy R., Álvarez, J. (2010). *Control de sistemas ternarios con dos corrientes de recirculado. Ing. Invest. Y tecnol. Vol. 11 no. 4.*

Skogestad, S. (2003). *Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. Journal of process control*, 13(4), 291-309.