

OBTENCIÓN DEL MODELO DINÁMICO DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN PARA LA CONCENTRACIÓN DE BIOETANOL

Ari García Aguirre, Christopher Gabriel Veyra Navarro, César Augusto Nava Arriaga, Isaac Gael Vite Cervantes, Karla Yadira Cervantes Quintero, Salvador Hernández Castro, Héctor Hernández Escoto, María Dolores López Ramírez *

^a Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, C.P. 36050, Guanajuato, Gto. México. lopez.md@ugto.mx

Resumen

El uso de combustibles fósiles contribuye de manera significativa a la generación de gases de efecto invernadero, por lo que se estudian fuentes alternas de energía como los biocombustibles tales como el bioetanol. Este puede ser obtenido a partir de residuos lignocelulósicos y utilizado como sustituto de la gasolina. Sin embargo, para que pueda ser empleado debe tener una pureza mayor o igual al 99.5% wt, la cual no es posible alcanzar mediante destilación simple debido al azeótropo presente en la mezcla etanol-agua obtenida después de la fermentación. Por lo tanto, el proceso de purificación requiere de una etapa de preconcentración seguida de una destilación extractiva. La columna preconcentradora presenta un alto costo energético debido a la gran cantidad de agua que debe ser removida, en consecuencia, es necesario desarrollar procedimientos de arranque y operación efectivos que garanticen una operación estable y eficiente con un consumo energético mínimo. Así, este trabajo se enfoca en obtener las funciones de transferencia en el espacio de Laplace que describen cómo varía la composición de la mezcla en la columna preconcentradora ante los cambios en la carga térmica y la relación de reflujo, a partir de datos experimentales. Estas funciones de transferencia constituyen el modelo dinámico de la columna preconcentradora y servirán como base para el estudio de diferentes técnicas de diseño y sintonización de sistemas de control.

Palabras clave: Dinámica de columnas de destilación; funciones de transferencia; producción de bioetanol.

OBTAINING DYNAMIC MODEL OF A DISTILLATION COLUMN FOR BIOETHANOL CONCENTRATION

Abstract

The use of fossil fuels contributes significantly to the generation of greenhouse gases, due to this alternative energy sources such as biofuels, like bioethanol, are being studied. This can be obtained from lignocellulosic waste and used as a substitute for gasoline. However, for its use, it must have a purity greater than or equal to 99.5% (w/w), but this is not possible through simple distillation because an azeotrope is formed in the ethanol-water mixture during fermentation. Therefore, the purification stage requires a preconcentration process followed by extractive distillation. The preconcentration column represents a high energy cost due to the large amount of water that must be removed. Consequently, it is necessary to develop effective start-up and operating procedures that guarantee stable and efficient operation with minimal energy consumption. Thus, this work is focused on obtaining the transfer functions in Laplace space that describe how the mixture composition in the preconcentration column varies with changes in the thermal load and reflux ratio, based on experimental data. These transfer functions constitute the dynamic model of the preconcentration column and will serve as a basis for studying different techniques for design and tuning in control systems.

Keywords: Distillation column dynamics; transfer function; bioethanol production.



1. Introducción

El bioetanol es un combustible que puede ser obtenido de residuos lignocelulósicos, los cuales son procesados mediante pretratamiento e hidrólisis enzimática para ser fermentados posteriormente por microorganismos (Jain y Kumar, 2024). De este proceso se obtiene una concentración de alcohol entre 5-12% wt (Kiss e Ignat, 2012). Sin embargo, para que el bioetanol pueda ser utilizado como biocombustible, es necesario que tenga una concentración mayor o igual al 99.5% wt, según estándares internacionales (Moonsamy et al, 2022; Torres-Cantero et al, 2022). Esta composición no puede ser obtenida en una destilación convencional, ya que la mezcla etanol-agua proveniente de la fermentación presenta un azeótropo al 95.6% wt (Taipabu et al, 2023). La destilación extractiva es uno de los métodos más usados para la obtención de bioetanol de alta pureza y se lleva a cabo en dos etapas. En la primera el etanol se preconcentra hasta una composición cercana al azeótropo y, en la segunda, se agrega un agente extractante para alcanzar una concentración superior al azeótropo (Suszwalak y Kiss, 2012). En la columna de destilación preconcentradora se busca recuperar la mayor cantidad de etanol posible y, dado que requiere una gran

cantidad de energía para remover el agua, también es necesario un sistema de control capaz de mantener el proceso estable y eficiente (Manyele, 2024; Sivieri y Teixeira, 2019). A pesar de que las columnas de destilación han sido estudiadas extensivamente y comparten los mismos objetivos de control: mantener las composiciones en los valores requeridos ante las perturbaciones que pudieran presentarse o alcanzar nuevas composiciones específicas, hay muchos tipos diferentes de columnas y la selección de la mejor estructura de control no es simple, pues varios factores influyen en ella, tales como la volatilidad, las purezas de los productos, la relación de reflujo, la presión de la columna, el costo de la energía, el tamaño de la columna y la composición de la alimentación (Luyben, 2006). En consecuencia, es de gran importancia conocer el comportamiento dinámico del sistema en cuestión y debido a la dificultad que representa medir las concentraciones de los productos en línea, éstas pueden inferirse a partir de las mediciones de las temperaturas (Bequette, 2002). Dado que las columnas de destilación son conocidas por ser no lineales debido al comportamiento del equilibrio líquido-vapor (Skogestad, 1997) y a que la mayoría de los análisis de sistemas de control

y técnicas de diseño están basadas en teoría de sistemas lineales, resulta más fácil trabajar con funciones de transferencia que permitan hacer manipulaciones algebraicas en lugar de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema en función del tiempo (Bequette, 2002), así que la composición de etanol en domo (x_D) y fondo (x_B) en función de la relación de reflujo (RR) y de la carga térmica (QR) toman la forma de la Figura 1, donde las $G_{ij}(s)$ representan las funciones de transferencia que relacionan las variable de salida $[x_D(s), x_B(s)]$ con las variables de entrada $[RR(s), QR(s)]$.

$$\begin{bmatrix} x_D(s) \\ x_B(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} RR(s) \\ QR(s) \end{bmatrix}$$

Figura 1. Modelo de funciones de transferencia tipo entradas salidas para x_D y x_B .

Por lo anterior, en este trabajo se busca obtener a partir de datos experimentales, las funciones de transferencia $G_{ij}(s)$ que describen el comportamiento de la mezcla etanol-agua en la columna preconcentradora en función de QR y RR con el fin de que puedan ser utilizadas en estudios posteriores de sistemas de control.

2. Metodología

Para obtener el modelo dinámico de la columna de destilación preconcentradora se realizó un estudio en Aspen Plus® de la columna de destilación continua PIGNAT ubicada en el laboratorio de Análisis de Bioprocessos Industriales de la División de Ciencias Naturales y Exactas, de la Universidad de Guanajuato, la cual se muestra en la Figura 2 y se describe en Vite Cervantes y col. (2023). Una vez obtenidos los resultados de simulación, éstos fueron reproducidos experimentalmente para determinar los valores nominales de las variables de entrada (QR y RR) y salida: temperatura del reboiler (TI1) y del destilado (TIC5. Los resultados experimentales fueron procesados en Excel® y posteriormente introducidos en Matlab® para la estimación de la función de transferencia.





Figura 2. Columna de destilación Continua PIGNAT.

2.1. Simulación de la columna preconcentradora.

La columna PIGNAT se simuló con 17 etapas, NRTL como modelo termodinámico y a presión atmosférica local (796 mbar).

Tomando en cuenta las restricciones operativas de la columna (QR_{\max} de 2 kW, carga térmica del condensador máxima de 0.698 kW, T_{\max} en fondos de 160 °C y T_{\max} en alimentación de 85 °C) se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de la temperatura de la alimentación, T_{alim}

(70-85°C), QR (0.5-1.5 kW) y flujo de destilado, FD, (8.5-12 kg/día) en x_D y x_B . Cabe mencionar que, debido al funcionamiento de la válvula de reflujo, resultó más conveniente utilizar FD como variable de entrada en lugar de RR. De los resultados del análisis de sensibilidad se eligió el caso que presentó la x_D más alta, la x_B más baja, la menor QR y que cumpliera con todas las restricciones, obteniendo así una T_{alim} de 75°C, QR de 0.7 kW y FD de 9.49 kg/día, con una alimentación de 5 L/h.

2.2. Estudio experimental.

Se utilizaron mezclas sintéticas de etanol-agua al 8% wt. La mezcla fue alimentada al reboiler hasta alcanzar un nivel intermedio, se comenzó el calentamiento y se operó a reflujo total hasta que los perfiles de temperatura se mantuvieron estables. Enseguida, se comenzó a alimentar a 75 °C en la etapa 10 a razón de 5 L/h al mismo tiempo que las válvulas de destilado y fondos fueron abiertas y calibradas de acuerdo con los valores obtenidos en simulación. Una vez que el sistema en operación continua presentó temperaturas estables, se provocaron perturbaciones tipo escalón en las variables de operación QR y FD de un $\pm 10\%$ de su

valor nominal, manipulando una a la vez. Se tomaron muestras en TI1, TI3, TI4 y TIC5 durante la operación para conocer el perfil de concentraciones (Figura 3).

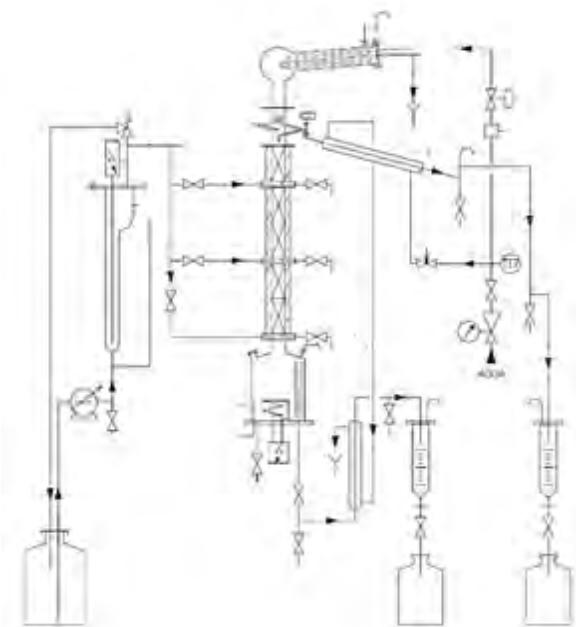


Figura 3. Diagrama de la columna.

2.2.1 Cuantificación de muestras.

Las muestras recolectadas se mantuvieron en refrigeración hasta el momento de su cuantificación, se diluyeron al 50% en volumen exceptuando las de TI1 y tomando en cuenta las correcciones por temperatura, se cuantificaron con un refractómetro óptico ATC, mientras que la concentración global del destilado colectado fue medida a 15 °C utilizando un alcoholímetro de Gay-Lussac.

2.3. Obtención de las funciones de transferencia.

Las funciones de transferencia fueron estimadas mediante la herramienta tfest de Matlab® que utiliza las señales de entrada y salida en el dominio del tiempo. Estas señales de entrada, que para nuestro caso corresponden a las variables de operación (QR y FD) y salida (temperaturas medidas en TI1 y TIC5) se acomodan en una matriz llamada tabla de tiempo (MathWorks, 2025). La tabla de tiempo (tt) se construyó en Excel® utilizando los datos experimentales obtenidos en términos de variables de desviación, las cuales miden la diferencia en las variables de entrada y salida cuando se encuentran en sus valores nominales y cuando se les provoca una perturbación. La ventaja de utilizar las variables de desviación es que todas las condiciones iniciales son cero cuando el sistema se encuentra inicialmente en estado estacionario (Bequette, 2002). En la primera columna de la tt se coloca el tiempo en que fueron medidas las variables de entrada y salida, en la columna siguiente las variables de desviación de las entradas (Ecuaciones 1 y 2) y en la tercera columna las variables de desviación de la salida (Ecuación 3 y 4).

Q_{Rref} y RR_{ref} se refieren a los valores nominales obtenidos de la simulación y $TI1_{ref}$ y $TIC5_{ref}$ a

los valores experimentales de estado estacionario obtenidos con los valores nominales de QR y RR.

$$\widetilde{QR} = QR - QR_{ref} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\widetilde{RR} = RR - RR_{ref} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\widetilde{TI1} = TI1 - TI1_{ref} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\widetilde{TIC5} = TIC5 - TIC5_{ref} \quad \text{Ecuación 4}$$

Las variables de desviación fueron filtradas con un filtro de alta ganancia, ya que éstos eliminan las señales que se presentan a altas frecuencias y, dado que el ruido de las mediciones típicamente se presenta a altas frecuencias (Goodwin et al, 2000), se obtiene una señal libre de ruido.

Una vez construida la tt con las señales filtradas, ésta es llamada desde Matlab mediante la sintaxis “tt = timetable (Var1, Var2, ‘timestep’)” donde Var1 corresponde a la columna de la variable de desviación de la entrada, Var2 a la variable de desviación de las salidas y timestep el intervalo de tiempo en el que se toman las mediciones. La función tfest, proveniente del paquete System Identification Toolbox, es llamada con la sintaxis: “sys = tfest (tt, np, nz)”, donde “sys” es la variable en la cual se guardan las funciones de transferencia, “tt” hace referencia a la tabla de tiempo anteriormente construida, “np” es el número de polos con los cuales se realiza la estimación del modelo y

“nz” es el número de ceros, que se establece por default en np-1. En este estudio se estimaron las funciones de transferencia variando el número de polos de 1 a 4 y se eligió el que presentó un mejor ajuste.

3. Resultados

3.1. Simulación de la columna preconcentradora.

El caso seleccionado mediante el análisis de sensibilidad se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores obtenidos de la simulación.

Variable	Valor nominal
QR (kW)	0.7
FD (mL/min)	8.74
T _{alim} (°C)	75
T _{fondo} (°C)	92.2
T _{domo} (°C)	72.2
<i>x_B</i> etanol (% wt)	0.0008752
<i>x_D</i> etanol (% wt)	85.51



3.2. Estudio experimental.

La Figura 4 muestra el perfil de temperaturas durante el tiempo de operación en estado estacionario, utilizando los valores obtenidos del estudio de simulación. Se tomaron muestras a diferentes tiempos, t_0 corresponde a la operación a reflujo total, t_1, t_2, t_3, t_4 y t_5 a los tiempos indicados en la gráfica. Se observa que TI1 y TIC5 se mantienen con poca variación de t_1 a t_5 . Sin embargo, las temperaturas TI2, TI3 y TI4 presentan fluctuaciones, las cuales corresponden al período de ajuste de flujos de destilado, fondos, alimentación y nivel del reboiler para operar en continuo, observándose un estado estacionario al final de la operación.

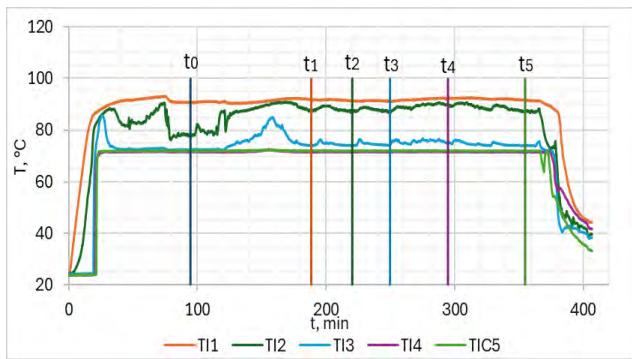


Figura 4. Perfiles de temperatura de la operación en continuo sin perturbaciones.

En la Figura 5 se observa el perfil de composiciones de la columna a lo largo del tiempo. Se observa que al final de la operación las composiciones tienden a estabilizarse, lo cual coincide con el

comportamiento observado en el perfil de temperatura. También es de notarse que la composición del fondo está cercana a cero, mientras que la del destilado ronda el 90% v/v.

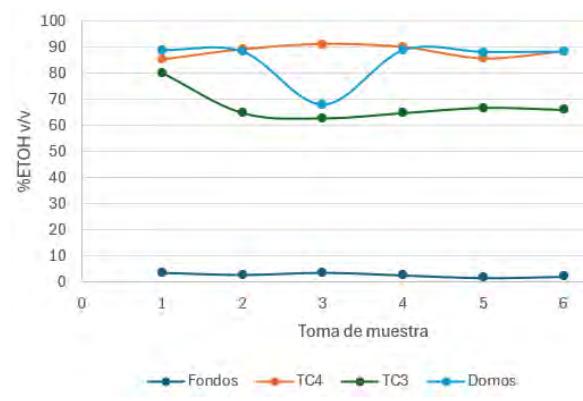


Figura 5. Perfiles de composición de etanol a lo largo del tiempo durante la operación sin perturbaciones.

En las Figuras 6 y 7 se muestra una comparación entre los datos de temperatura y composición obtenidos de la simulación y los experimentales, respectivamente. En el caso de la temperatura se puede observar que la simulación describe correctamente el comportamiento del perfil. La etapa 10 presenta la mayor diferencia, lo cual puede deberse a la diferencia de temperatura que presenta la alimentación. Respecto al perfil de composiciones, los valores experimentales son muy cercanos a los valores teóricos, excepto en la etapa 10, la cual presenta una temperatura menor y, en consecuencia, la composición del etanol es mayor.



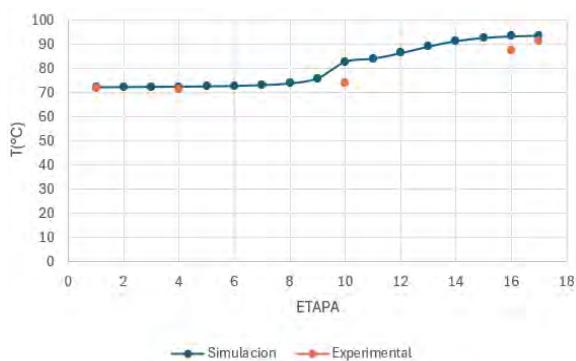


Figura 6. Comparación de los perfiles de temperatura del estudio experimental y teórico.

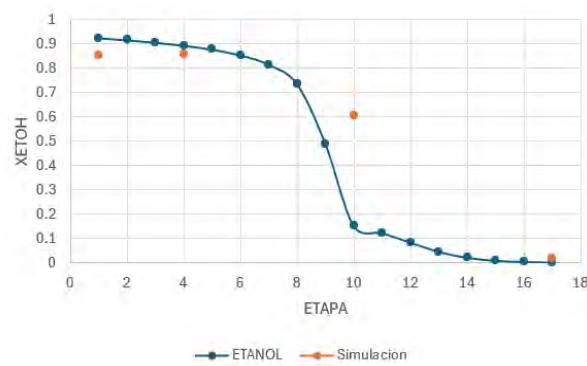


Figura 7. Perfil de composiciones de etanol, simulación vs experimentación.

Para obtener las funciones de transferencia se utilizaron los valores de las perturbaciones en las variables de entrada mostrados en el Tabla 2.

Tabla 2. Perturbaciones tipo escalón utilizadas.

Variable	Valor nominal	+10%	-10%
QR (kW)	0.7	0.770	0.630
FD (ml/min)	8.74	9.614	7.866

La Figura 8 se muestra que la TIC5 se mantiene prácticamente constante ante las perturbaciones en QR, mientras que la TI1 aumenta con el incremento en QR, haciendo que x_B se mantenga cercana al cero, mientras que para una diminución de QR la temperatura decrece, provocando un aumento en x_B , como puede observarse en la Figura 9.

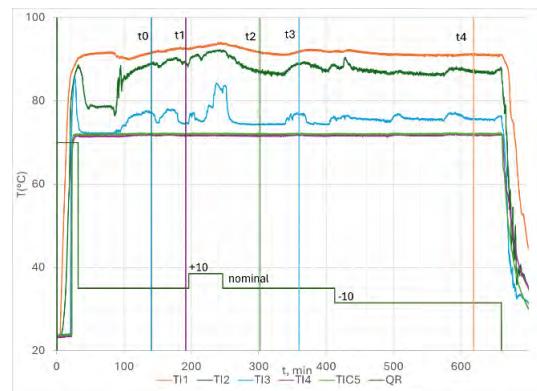


Figura 8. Perfiles de temperatura para las perturbaciones $\pm 10\%$ en QR.

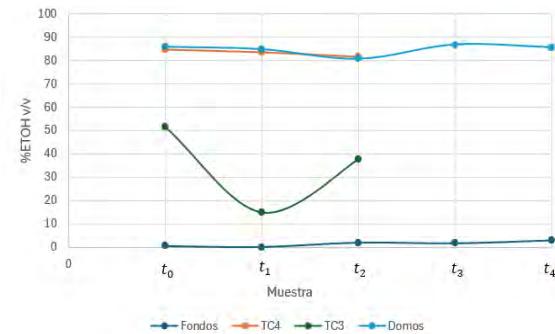


Figura 9. Perfiles de composición de etanol a lo largo del tiempo durante la perturbación $\pm 10\%$ en QR.

Respecto a la perturbación en FD, se registraron las RR correspondientes a los valores de FD nominales y sus respectivas perturbaciones. Los perfiles de temperatura



obtenidos, los tiempos de muestreo y los cambios tipo escalón en RR se muestran en la Figura 10. Igual que en el caso anterior, no se observaron variaciones en TIC5 pero sí en TII. En esta operación, la composición del destilado se mantuvo alrededor de 90% v/v y la de fondos disminuyó hasta cerca de cero, lo cual se debe al incremento de temperatura cuando se reduce RR (Figura 11).

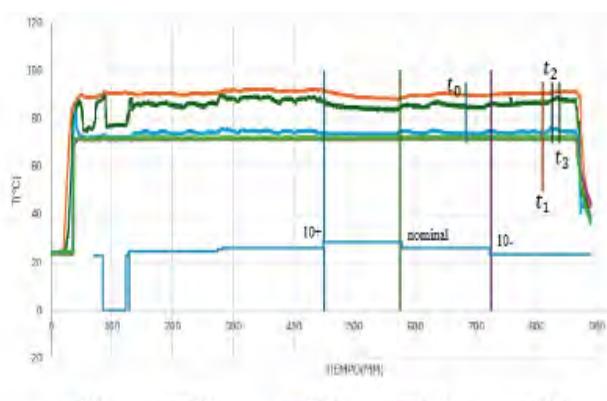


Figura 10. Perfiles de temperatura para las perturbaciones $\pm 10\%$ en RR.

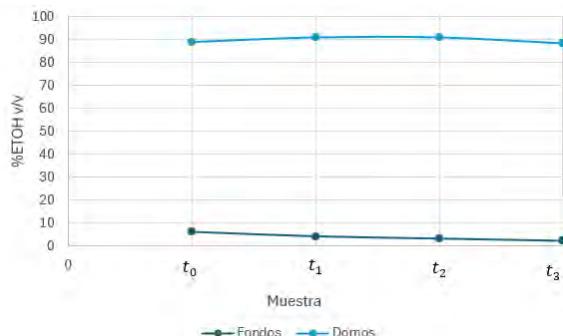


Figura 11. Perfiles de composición de etanol a lo largo del tiempo durante la perturbación $\pm 10\%$ en RR.

3.3 Procesamiento de datos y obtención de funciones de transferencia.

La Figura 12 muestra el esquema general de la matriz de funciones de transferencia a estimar para la columna preconcentradora.

$$\begin{bmatrix} TIC5(s) \\ TII(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} RR(s) \\ QR(s) \end{bmatrix}$$

Figura 12. Matriz de funciones de transferencia para la columna preconcentradora.

La Tabla 3 muestra los valores nominales de las variables de entrada y salida obtenidos experimentalmente y utilizados para calcular las variables de desviación.

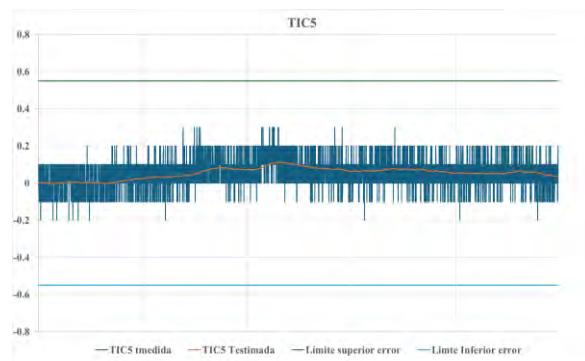
Tabla 3. Valores de referencia experimentales (nominales) utilizados.

Variable	Valor nominal
TII_{ref} (°C)	92.55
$TIC5_{ref}$ (°C)	72.05
QR_{ref} (%)	35
RR_{ref}	22.8

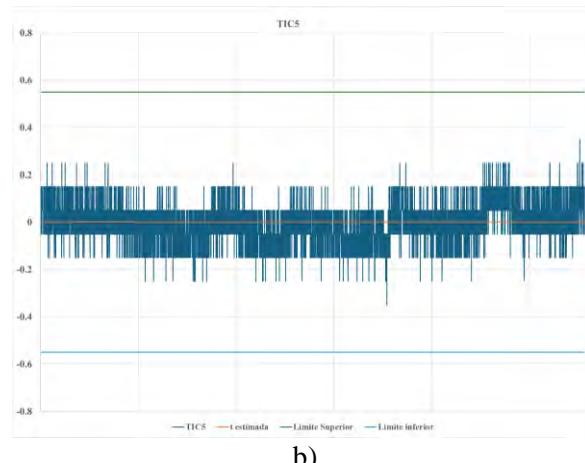
En la Figura 13 se observan las variables de desviación para TIC5 y la señal filtrada de la misma ante las perturbaciones en RR (a) y QR (b), no hay variaciones significativas, pues los valores se encuentran dentro de la



incertidumbre del aparato de medición (± 0.5 °C), por lo que las funciones de transferencia son iguales a cero: $G_{11}(s) = 0$ y $G_{12}(s) = 0$.



a)



b)

Figura 13. Variaciones de TIC5 ante perturbaciones en a) RR, b) QR.

En cuanto a TI1, las variables de desviación fueron graficadas y comparadas con el comportamiento estimado por la función de transferencia para las perturbaciones en RR (Figura 14) y en QR (Figura 15).

Para perturbaciones en RR, la función de transferencia obtenida $G_{21}(s)$ se muestra en la Ecuación 5, con un ajuste del 83.28%. Se observa que cuando ocurre el cambio de +10%, la temperatura en el reboiler baja, debido al aumento del flujo del reflujo. Al regresar al valor nominal, la respuesta presenta oscilaciones, pero no logra estabilizarse en la temperatura de referencia, al menos en el tiempo de análisis. Por otro lado, al hacer el cambio en -10% la temperatura en el fondo aumenta hasta un valor cercano a la temperatura de referencia debido a que se retira más destilado.

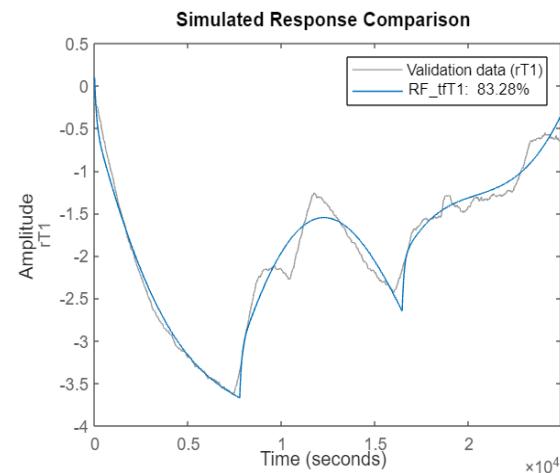


Figura 14. Comparación de datos experimentales de TI1 y la respuesta estimada por la función de transferencia ante cambios en RR.

$$G_{21}(s) = \frac{-0.002672 s^3 - 3.325 \times 10^{-6} s^2 + 1.335 \times 10^{-10} s - 1.783 \times 10^{-13}}{s^4 + 0.01003 s^3 + 5.871 \times 10^{-7} s^2 + 7.124 \times 10^{-10} s + 2.203 \times 10^{-14}}$$

Ecuación 5

182

La Ecuación 6 muestra la función de transferencia $G_{22}(s)$, obtenida con las perturbaciones en QR. Se alcanzó un ajuste del 77.24% y se observa que TI1 aumenta al incrementarse QR y disminuye cuando decrece. Al igual que para RR, cuando se regresa al valor nominal se presenta una respuesta oscilatoria y no se alcanza el valor nominal, al menos en el tiempo de análisis.

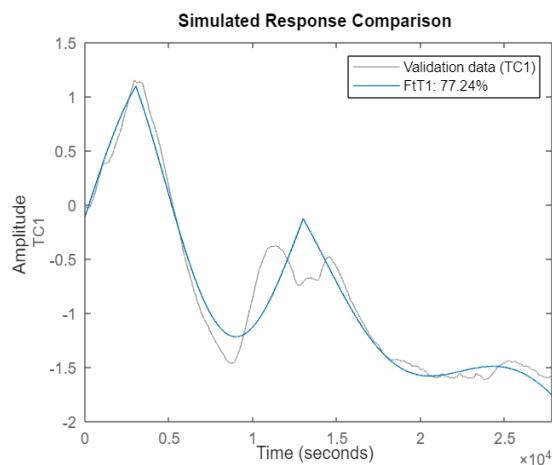


Figura 15. Comparación de datos experimentales de TI1 y la respuesta estimada por la función de transferencia ante cambios en QR.

$$G_{22}(s) = \frac{0.000195s^2 + 2.281 \times 10^{-8}s + 5.204 \times 10^{-12}}{s^3 + 8.367 \times 10^{-5}s^2 + 1.552 \times 10^{-7}s + 1.433 \times 10^{-12}}$$

Ecuación 6

4. Análisis de resultados

Los resultados experimentales de la operación en estado estacionario sin perturbaciones están bien representados por la simulación, ya que los valores son muy similares, sobre todo en la temperatura de fondo y domo. En la etapa 10 se observan las mayores fluctuaciones, las cuales pueden deberse a la oscilación del control de temperatura de la alimentación y a un aislamiento deficiente en ese punto. La desviación en la concentración se debe a la diferencia en el perfil de temperatura, dado que la temperatura es menor, la concentración de etanol es mayor, lo cual concuerda con el diagrama de equilibrio de la mezcla.

En las operaciones con perturbaciones se observó que TI1 es directamente proporcional a QR, tal como era de esperarse, pues la temperatura está directamente relacionada con la cantidad de energía suministrada. La etapa 10 resultó ser la más afectada por estas variaciones de QR, el aumento de la carga térmica provocó una caída drástica en la composición, esto se debe al mayor flujo de vapor que sale del reboiler debido al aumento en QR.

Para el caso de la TIC5 no se observó un cambio significativo debido a que la

concentración se encuentra cercana al punto azeotrópico, lo cual se comprobó al cuantificar el etanol en el destilado global, dando composiciones superiores al 94% v/v en las 3 operaciones. En consecuencia, las funciones de transferencia son iguales a cero.

Respecto a la observación de que el sistema no es capaz de volver al valor de referencia por sí mismo cuando QR y RR regresaron a sus valores nominales, esto se debe a la variación en el nivel de mezcla en el reboiler, es decir, cuando éste cambia, al regresar a los valores nominales, el sistema no puede disminuir ni aumentar el nivel por sí mismo, llegando entonces a un nuevo valor de temperatura, es decir, a un nuevo estado estable. Como podemos observar, esta variable tiene gran importancia en la operación de la columna.

Los porcentajes de ajuste alcanzados con las funciones de transferencia mejoraron con el uso del filtro de alta ganancia, esto indica que el ruido propio de las mediciones sí debe ser tomado en cuenta para una mejor estimación de las funciones de transferencia.

Aunque en un sistema multivariable, como lo es la columna preconcentradora, se espera que el polinomio característico (denominador de la función de transferencia) sea el mismo,

esto no sucede en este caso de estudio debido a la naturaleza no ideal de la mezcla etanol-agua, la cual presenta un azeótropo y, dado que nos encontramos cerca de esta composición en el destilado, ante un mismo cambio tipo escalón positivo y negativo en la variable de entrada no se obtiene una respuesta simétrica en la variable de salida, pues ésta está limitada por la composición azeotrópica. Es importante recordar que la no idealidad de las columnas de destilación se presenta principalmente por las ecuaciones que describen el comportamiento termodinámico de las sustancias que van a ser separados en ellas, siendo la presencia de azeótropos uno de los casos más característicos de desviación del comportamiento ideal, por lo que, al menos para esta mezcla, resulta más conveniente evaluar cada par de variables de entrada y salida por separado.

5. Conclusiones

Las funciones de transferencia que constituyen el modelo dinámico de la columna preconcentradora de la mezcla etanol-agua en función de QR y RR, partiendo de datos experimentales fueron obtenidas utilizando tablas de tiempo en

Excel® y la función tfest de Matlab®. Se alcanzaron porcentajes de ajuste del 83.28 % y 77.24%, para RR y QR, respectivamente, los cuales representan una buena aproximación. Sin embargo, es necesario realizar más experimentos para su validación y poder así utilizar estas funciones de transferencia como base para el diseño de sistemas de control, pues es más sencillo trabajar con estas funciones de transferencia en lugar de ecuaciones diferenciales. Así mismo, de estas funciones se pueden obtener los polos y ceros que se usan para la obtención de parámetros útiles en la sintonización de controladores, a la vez que son también indicadores del comportamiento y estabilidad de la respuesta de salida.

En cuanto a la diferencia en los polinomios característicos de las funciones de transferencia, esto es consecuencia de la no idealidad de la mezcla etanol agua, la cual, al presentar un azeótropo, no tendrá la misma respuesta de salida con la manipulación de las variables de entrada.

Respecto al uso de filtros en los datos experimentales, éste resultó de gran utilidad para mejorar el ajuste de las funciones de transferencia y es importante mencionar que

se debe tener cuidado en la manipulación y cuantificación de las muestras, así como en el aislamiento térmico del equipo, pues la temperatura ambiente puede llegar a afectar las mediciones y el experimento.

Referencias bibliográficas

Bequette, B.W. (2002). *Process Control: Modeling, Design and Simulation*. Prentice Hall.

Goodwin, G.C., Graebe, S.F., Salgado, M.E. (2000). *Control System Design*. Prentice Hall PTR.

Jain, S., & Kumar, S. (2024). A comprehensive review of bioethanol production from diverse feedstocks: Current advancements and economic perspectives. *Energy*, 296, 131130.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131130>

Kiss, A. A., & Ignat, R. M. (2012). Innovative single step bioethanol dehydration in an extractive dividing-wall column. *Separation and purification technology*, 98, 290-297.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.06.029>

Luyben, W.L., 2006, Evaluation of criteria for selecting temperature control trays in distillation columns. *Journal of Process*

Control, 16, 115–134.

<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2005.05.004>

Manyele, S. V. (2024). Distillation plant performance implications of high distillate-purity during ethanol-water pre-concentration. International Journal of Engineering, Science and Technology, 16(4), 45-65. <https://doi.org/10.4314/ijest.v16i4.5>

MathWorks documentation for tfest (2025). <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html#description>

Moonsamy, T. A., Mandegari, M., Farzad, S., & Görgens, J. F. (2022). A new insight into integrated first and second-generation bioethanol production from sugarcane. *Industrial Crops and Products*, 188, 115675. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115675>

Sivieri, F.M., Teixeira, E.P. (2019). Identification of the dynamic model of a distillation column. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 6(6), 466-470.] <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.6.6.47>

Skogestad, S. (1997). Dynamics and control of distillation columns: A tutorial

introduction. *Institute of Chemical Engineering Transactions*, 75(A), 539-562. <https://doi.org/10.1205/026387697524092>

Suzwalak, D., Kiss, A.A. (2012). Enhanced bioethanol dehydration in extractive dividing-wall columns. *Proceedings of the 22nd ESCAPE*. 667-671. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.022>

Taipabu, M. I., Wu, W., Viswanathana, K., Hattu, N., Rumpakwakra, E., & Kololu, M. (2023). Separation of ethanol-water azeotrope mixtures using extractive distillation method. *ALE Proceeding*, 6, 198-203.

<https://doi.org/10.30598/ale.6.2023.198-203>

Vite Cervantes, I.G., García Lira, F.D., Quintanilla Rocha, M., Martínez Díaz, F.E., Correa-Ibarra, M.G., López Ramírez, M.D., Ceervantes-Quintero, K., Meléndez-Hernández, P.A., Hernández Escoto, H. (2023). Estudio teórico-experimental sobre el uso de etilenglicol como extractante para la purificación de bioetanol. *Jóvenes en la Ciencia*, 21, 1-13. <https://www.jovenesenlacienca.ugto.mx/index.php/jovenesenlacienca/article/view/4045>

