

Determinación de las Condiciones de Operación de un Proceso de Destilación de Doble Efecto No Convencional a Nivel Piloto para la Obtención de Bioetanol

Gabriela Leo Avelino¹, María Guadalupe Aguilar Uscanga²,
Javier Gómez Rodríguez², Galo R. Urrea García³, Ma. Teresa Cadenas González¹, José J. Ramos Valencia¹, Carlos B. Castañeda Castañeda¹

Resumen—Se cuenta con un sistema de destilación doble efecto no convencional para purificar bioetanol a partir de mosto fermentado del jugo de Sorgo Dulce. Las columnas constan de platos perforados en la zona de agotamiento y tipo campana en la zona de rectificación. Las condiciones de operación determinadas para cada columna son: flujo y plato de alimentación, reflujo y tasa de calor, evaluadas mediante un diseño de experimentos. Los resultados determinan para la columna 1 y 2 un flujo de alimentación de 50 – 60 L/h y 30 – 40 L/h, plato de alimentación 8 y 7, Reflujo de 1.2 y 1.1 y tasa de calor de 4500W y 6000W, respectivamente. La interacción de las variables proporcionó una concentración de etanol en el destilado en la Columna 1 de 60 %v/v y en la Columna 2 de 96.5 %v/v, es decir, hasta el punto azeotrópico.

Palabras clave—Bioetanol, purificación, destilación.

Introducción

Biocombustible es un término usado para describir la biomasa bruta procesada dentro de las formas convenientes para ser usada como combustible. El uso de biocombustibles presenta diversos beneficios en las áreas ambientales, seguridad energética y desarrollo económico. La sustitución del uso de combustibles fósiles por biocombustibles reduce las emisiones de dióxido de carbono, el cual está estrechamente asociado con el cambio climático global. Debido a sus altos valores de energía, el bioetanol es uno de los biocombustibles más usados como oxigenante, lo que permite una mejor oxigenación de la gasolina y el diésel, por consiguiente, se reduce las emisiones de CO₂ y compuestos aromáticos (Kaminski *et al.*, 2008).

Las tecnologías usadas para la producción de bioetanol se clasifican de acuerdo con la materia prima a utilizar. Los materiales ricos en azúcares simples como la caña, melazas y sorgo dulce; los abundantes en almidón como papa, camote y cereales usan una tecnología de “primera generación” (Lennartsson *et al.*, 2014). En este caso, el costo de la materia prima representa hasta el 80% del costo final del combustible. En el procesamiento de las materias primas ricas en azúcares, primeramente se lleva a cabo la extracción del jugo mediante métodos convencionales, posteriormente es fermentado mediante levaduras del género *Saccharomyces* con rendimientos aproximados en conversión de etanol entre el 6 y 12% (Partida-Sedas *et al.*, 2016). Regularmente, el proceso de destilación en la obtención de bioetanol, se lleva a cabo en un sistema de dos columnas en secuencia, la primera columna llamada “extractiva” separa el etanol del mosto fermentado, la segunda columna llamada “recuperación” en la cual se purifica el solvente. Para la purificación del bioetanol, se requiere de una alta demanda de energía en el proceso de separación, principalmente para superar el azeótropo formado por etanol-agua a una concentración de (95.63 %wt etanol). La separación es usualmente llevada a cabo por procesos de destilación, (luo 2015).

La planta piloto para la producción de bioetanol a partir de jugo de sorgo dulce, ubicada en el Instituto Tecnológico de Veracruz, cuenta con un equipo de destilación, el cual es un sistema con un diseño alternativo (Figura 1) al proceso de destilación convencional. Este sistema en su interior contiene dos tipos de platos: platos perforados posicionados de manera inclinada en la sección de agotamiento y platos tipo campana en la sección de rectificación. El sistema de destilación de la planta piloto consta de dos columnas, ambas con el mismo diseño (dos tipos de platos) pero con diferentes características, sus especificaciones se muestran en la Tabla 1.

¹ Dra. Gabriela Leo Avelino, Ing. de Aplicación Especializado, CIATEQ, Tab., Mx. gabriela.leo@ciateq.mx (autor corresponsal)

² Dra. María Guadalupe Aguilar Uscanga, Profesor Investigador del Tecnológico de Veracruz, México gaguilar@itver.edu.mx

² Dr. Javier Gómez Rodríguez, Profesor Investigador del Tecnológico de Veracruz, México javgomezr@gmail.com

³ Dr. Galo R. Urrea García, Profesor Investigador del Tecnológico de Orizaba, Veracruz, Mx. galourrea@hotmail.com

¹ M.C. María Teresa Cadenas González, Ing. de Aplicación Especializado, CIATEQ, Tabasco, Mx. teresa.cadena@ciateq.mx

¹ M.I. José Juan Ramos Valencia, Coordinador de Ingeniería de Procesos, CIATEQ, Querétaro, México. jose.ramos@ciateq.mx

¹ M.I. Carlos Castañeda Castañeda, Director de Ing. Const. de Plantas, CIATEQ, Querétaro, México. carlos.castaneda@ciateq.mx

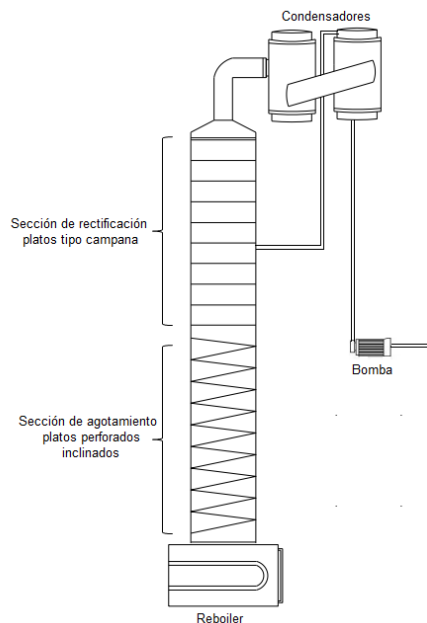


Figura 1. Columna de destilación de la planta piloto

Tabla 1. Especificaciones del sistema de destilación

Característica	Columna 1	Columna 2
Altura de la columna, m	2.2	2.2
Diámetro de la columna, cm	18	14
Número de platos campana	10	8
Número de platos perforados	18	35
Capacidad de la bomba, L/h	30 – 90	30 – 90
Número de condensadores	2	2

El flujo de alimentación de la primera columna de destilación proviene del producto de la fermentación del jugo de Sorgo dulce *RB Cañero* con una composición que oscila entre 8 – 10% v/v de etanol, el cual se encuentra almacenado en un Tanque con capacidad de 3000 L. Mediante la bomba 1 (bomba de flujo variable) el flujo de alimentación es enviado al condensador 1 que forma parte de la columna de destilación, el flujo se precalienta con los vapores de etanol que fluyen de la zona de rectificación, posteriormente se introduce a un plato de alimentación (por determinar) ubicado en la zona media de la columna. El producto destilado de la columna 1 alimentará a la columna de destilación 2, el sistema de alimentación es igual al descrito en la columna 1.

El sistema de destilación no cuenta con especificaciones de operación por parte del fabricante, por lo que se requiere de una evaluación que permita establecer los parámetros como flujos, temperaturas y concentraciones a obtener. Por lo que el objetivo del presente trabajo es evaluar el mejoramiento de la operación de las dos columnas, determinando los parámetros de operación de manera optimizada. Para esto se realizará los siguientes estudios:

- Evaluación del flujo de alimentación
- Evaluación del plato de alimentación
- Determinación de la relación del reflujo
- Determinación de la tasa de calor

Cada uno de estos parámetros debe operar en función de la concentración del etanol en el flujo del destilado, para la primera columna se espera una concentración mayor al 50% v/v y en la segunda columna deberá llegar hasta su punto azeotrópico 96.5% v/v.

Metodología

Evaluación del flujo de alimentación

Para evaluar la variación del flujo de alimentación, en cada columna se encuentra instalada una bomba dosificadora marca Milton Roy que opera mediante pulsaciones, el flujo de alimentación que se evaluará se encuentra en un rango entre 20 - 80 L/h, del cual se harán incrementos de 10 L/h para cada columna.

Determinación de la tasa de reflujo

Las variaciones en la tasa del reflujo en cada una de las columnas se realizan con la válvula tipo compuerta instalada a la salida del condensador. Debido a que el reflujo influye en la concentración del destilado, el reflujo real se determinará al obtener la concentración del destilado más alta. Se tomará como punto de partida la tasa de reflujo que nos proporcione el simulador Aspen Plus al realizar una simulación de un sistema de destilación convencional con características cercanas al sistema propuesto.

Determinación de la tasa de calor

El flujo a destilar se vaporiza en el reboiler de la columna mediante su fuente de calentamiento, una resistencia. Para determinar la resistencia adecuada se cuenta con tres equipos de diferentes capacidades: 3000, 4500 y 6000 W, por lo que se realizarán pruebas con cada una de ellas en las dos columnas.

Diseño de experimentos para la determinación de parámetros

Debido a la interacción de cada una de las variables a determinar se empleará un diseño de experimentos donde se involucra el plato de alimentación, el flujo de alimentación, la tasa de reflujo y la tasa de calor para cada una de las columnas. Se usará un diseño de experimentos $2^3 + 1$ punto central.

Para la columna 1 se realizarán los experimentos presentados en la Tabla 2 para cada plato de alimentación y para la columna 2 se realizaron los siguientes experimentos presentados en la Tabla 3.

Tabla 2 Diseño de experimento $2^3 + 1$ punto central para la Columna 1

# Exp.	Flujo de alimentación L/h	Relación de reflujo	Tasa de calor, W	Flujo de destilado, X_D^*	Flujo del fondo, X_B^*
1	55	1.1	3000	--	--
2	65	1.1	3000	--	--
3	55	1.3	3000	--	--
4	65	1.3	3000	--	--
5	55	1.1	6000	--	--
6	65	1.1	6000	--	--
7	55	1.3	6000	--	--
8	65	1.3	6000	--	--
9	60	1.2	4500	--	--

Tabla 3 Diseño de experimento $2^3 + 1$ punto central para la Columna 2

# Exp.	Flujo de alimentación, L/h	Relación de reflujo	Tasa de calor, W	Flujo de destilado X_D^*	Flujo del fondo X_B^*
1	20	0.8	3000	--	--
2	30	0.8	3000	--	--
3	20	1.0	3000	--	--
4	30	1.0	3000	--	--
5	20	0.8	6000	--	--
6	30	0.8	6000	--	--
7	20	1.0	6000	--	--
8	30	1.0	6000	--	--
9	25	0.9	4500	--	--

Resultados

Se evaluó la puesta en marcha de dos columnas de destilación instaladas en la planta piloto de bioetanol. El flujo de alimentación para la Columna de destilación 1 fue el mosto fermentado del jugo de sorgo dulce con una concentración entre 8 – 10% de etanol (Partida-Sedas *et al.*, 2016), para la Columna 2 el flujo de alimentación fue el producto del destilado de la Columna 1.

Análisis del Flujo de alimentación

Se realizaron pruebas preliminares en las dos columnas de destilación de la planta piloto para determinar un flujo de alimentación aproximado, ya que el rango que proporciona la bomba dosificadora está entre 20 – 80 L/h. Las pruebas se hicieron a partir de 30 L/h aumentándolo gradualmente observando el comportamiento de la columna y monitoreando los flujos del destilado y del fondo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4 y 5 para la columna 1 y la columna 2, respectivamente.

Tabla 4. Resultados de la variación en el flujo de alimentación Columna 1

Flujo, L/h	Concentración de Etanol, X_D	Observaciones
30	0.5	El flujo del destilado es de 4.73 kg/h
40	0.5	El flujo del destilado es de 6.39 kg/h
45	0.5	El flujo del destilado es de 7.57 kg/h
50	0.5	El flujo del destilado es de 8.5 kg/h
55	0.47	El flujo del destilado es de 9.3 kg/h
60	0.47	El flujo del destilado es de 9.94 kg/h
65	0.45	El flujo del destilado es de 10.6 kg/h con tendencia a desestabilizarse el sistema
70	-	Se presenta inundación en la columna

Tabla 5. Resultados de la variación del flujo de alimentación columna 2

Flujo, L/h	Concentración de Etanol, X_D	Observaciones
30	0.965	El flujo del destilado es de 7.1 kg/h
40	0.96	El flujo del destilado es de 8.28 kg/h
45	0.95	El flujo del destilado es de 9.7 kg/h
50	0.94	El flujo del destilado es de 10.8 kg/h
55	0.94	El flujo del destilado es de 11.5 kg/h con tendencia a desestabilizar el sistema

Para la columna 1 el flujo de alimentación adecuado se encuentra entre 50 – 60 L/h y para la columna 2 entre 30 – 40 L/h asegurando altas concentraciones de etanol y una operación estable.

Análisis del plato de alimentación

Se evaluó la localización del plato de alimentación para la columna 1, para lo que se eligieron los platos 6, 7, 8 y 9 y para la columna 2 los platos 5, 6, 7 y 8. El plato de alimentación influye directamente en la concentración del flujo del destilado, en las Tablas 6 y 7 se presentan los resultados preliminares de los platos evaluados en la columna 1 y 2 respectivamente.

Tabla 6. Evaluación del plato de alimentación columna 1

Plato de alimentación	Concentración en el destilado, X_D
6	0.35 – 0.40
7	0.50
8	0.55 – 0.60
9	0.60 – 0.65

El plato de la alimentación en la columna 1 óptimo puede encontrarse entre el plato 8 o 9, en esta prueba se alcanzó la concentración más alta en el producto del destilado con $X_D = 0.65$.

Tabla 7 Evaluación del plato de alimentación columna 2

Plato de alimentación	Concentración en el destilado, X_D
5	0.93
6	0.95
7	0.965
8	0.965

El plato de alimentación en la columna 2 adecuado se encuentra entre el plato 7 u 8, alcanzando una concentración de etanol $X_D=0.965$ en el flujo del destilado. Al finalizar las pruebas preliminares se realizó un diseño de experimentos 2^3+1 , donde se consideró el flujo y plato de alimentación, la relación de reflujo y la tasa de calor para el estudio de las dos columnas de destilación. Los resultados se presentan a continuación.

Tabla 8. Resultados del diseño de experimentos columna 1

# Plato	Tasa de calor, W	Flujo de alimentación, L/h	Reflujo	X_D	X_B
8	3000	55	1.1	0.45	0.02
	3000	65	1.1	0.40	0.04
	3000	55	1.3	0.30	0.03
	3000	65	1.3	0.30	0.05
9	3000	55	1.1	0.35	0.03
	3000	65	1.1	0.30	0.05
	3000	55	1.3	0.35	0.03
	3000	65	1.3	0.30	0.05
8	6000	55	1.1	0.55	0.05
	6000	65	1.1	0.40	-
	6000	55	1.3	0.50	0.05
	6000	65	1.3	-	-
9	6000	55	1.1	0.60	0.02
	6000	65	1.1	-	-
	6000	55	1.3	0.55	0.03
	6000	65	1.3	-	-
8	4500	60	1.2	0.65	0.02
9	4500	60	1.2	0.60	0.02

Tabla 9. Resultados del diseño de experimentos columna 2

# Plato	Tasa de calor, W	Flujo de alimentación, L/h	Relación de reflujo	X _D	X _B
7	3000	20	0.8	0.85	0.20
	3000	30	0.8	0.80	0.25
	3000	20	1.0	0.87	0.20
	3000	30	1.0	0.82	0.23
8	3000	20	0.8	0.82	0.20
	3000	30	0.8	0.75	0.23
	3000	20	1.0	0.85	0.22
	3000	30	1.0	0.80	0.22
7	6000	20	0.8	0.94	0.02
	6000	30	0.8	0.92	0.02
	6000	20	1.0	0.965	0.02
	6000	30	1.0	0.92	0.05
8	6000	20	0.8	0.93	0.02
	6000	30	0.8	0.90	0.05
	6000	20	1.0	0.94	0.03
	6000	30	1.0	0.92	0.04
7	4500	25	0.9	0.96	0.02
8	4500	25	0.9	0.95	0.04

Las variables de operación para la columna 1 y 2, de acuerdo con los resultados anteriores se resumen en la Tabla 10

Tabla 10 Resultados de los parámetros de operación

Parámetros de operación	Columna 1	Columna 2
Flujo de alimentación	50 L/h	20 L/h
Relación de reflujo	1.2	1.0
Plato de alimentación	8	7
Tasa de calor	4500 W	6000W
Temperatura de operación	97°C	80°C
Flujo del destilado, kg/h	18.147	7.101
Concentración destilado, X _D	0.6	0.965
Flujo del fondo, kg/h	21.303	8.679
Concentración del fondo, X _B	X _F = 0.02	X _F = 0.02

Análisis

La interacción de las variables de operación en las columnas de destilación: Flujo de alimentación, relación de reflujo, plato de alimentación y la tasa de calor, proporcionaron una composición del etanol en el destilado (X_D) de 60 % v/v y 96.5 % v/v para la columna 1 y 2 respectivamente, comportamientos similares presentados en columnas azeotrópicas estudiadas por Marriaga, (2009) para mezclas de etanol – agua, donde obtuvo en su columna 1 una X_D de 50.7 % v/v y en la columna 2 de 94.3 % v/v y en la configuración descrita por Dias *et al.*, (2013) para la destilación convencional del jugo de caña de azúcar, donde se obtiene una concentración de etanol en la Columna 1 del 50% v/v y en la Columna 2 de 93.5% v/v aproximadamente. En la literatura comúnmente se estudia el proceso de destilación para soluciones etanol – agua mediante simulaciones (Batista *et al.*, 2012; López-Plaza *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2012) sin embargo se encontraron pocas referencias de estudios usando mezclas reales de vinos fermentados (Bessa *et al.*, 2012; Dias *et al.*, 2011; Palacios-Bereche *et al.*, 2015). No se encontraron estudios sobre la fermentación de jugo de sorgo dulce en columnas de destilación no convencionales, por lo que el aporte de este objetivo es la determinación de parámetros de operación de una columna con dos dispositivos de equilibrio distintos para la purificación del mosto fermentado del Sorgo dulce a nivel planta piloto, el cual presentó características competentes al ser comparado con otras configuraciones.

Conclusiones

La configuración implementada en la columna de destilación evaluada, la cual consta de dos diferentes tipos de platos cumple con su función de contrarrestar la acumulación de la biomasa formada por levaduras fermentativas, las cuales regularmente disminuyen la eficiencia en la transferencia de masa en una columna de destilación convencional. Los resultados obtenidos referente a la determinación de los parámetros de operación optimizados de las dos columnas: relación de la tasa de reflujo, tasa de calor requerida y plato de alimentación de manera interactiva, permitieron determinar la capacidad de purificación del etanol en cada una de ellas, los resultados fueron los esperados ya que estos se asemejan al comportamiento de la destilación de la mezcla agua – etanol, los cuales fueron comprobados mediante simulación. Se recomienda continuar con el estudio de las columnas de destilación implementando sistemas de control automatizado y sistemas de energías renovables que permita una reducción del consumo de energético.

Referencias

- Batista, F.R.M., Follegatti-Romero, L.A. Bessa, L.C.B.A., Meirelles, A.J.A., 2012. Computational simulation applied to the investigation of industrial plants for bioethanol distillation. *Comp. Chem. Eng.* 46: 1 – 16.
- Bessa, L.C.B.A., Batista, F.R.M., Meirelles, A.J.A. 2012. Double – effect integration of multicomponent alcoholic distillation columns. *J. Energy* 45: 603 – 613.
- Dias, M., Modesto, M., Ensinas, A., Nebra, S., Maciel, R., Rossell, C., 2011. Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. *J. Energy* 36: 3691 – 3703.
- Dias, M., Junqueira, T., Rossell, C., 2013. Evaluation of process configuration for second generation integrated with first generation bioethanol production from sugarcane. *Fuel Process. Tech.* 109: 84 – 89.
- Kaminski, W., Marszalek, J., Ciolkowska, A., 2008. Renewable energy source – Dehydrated ethanol. *Chem. Eng. J.* 135 (1 – 2): 95 – 102.
- Lennartsson, P., Erlandsson, P., Taherzadeh, M., 2014. Integration of the first- and second-generation bioethanol processes and the importance of by-products. *Bioresour. technol.* 165: 3 -8.
- López-Plaza, E.L., Hernández, S., Barroso-Muñoz, F.O., Segovia-Hernández, J.G., Aceves, S.M., Martínez – Frías, J., Saxena, S., Dibble, R., 2014. Experimental and theoretical study of the energy savings from wet ethanol production and utilization. *Energy Technol.* 2: 440 - 445.
- Luo, Z., Wang, L., Shanbazi, A., 2014. Optimization of ethanol production from sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) juice using response surface methodology. *Biom. Bioen.* 67: 53 – 59.
- Marriaga, N., 2009. Performance indicators of bioethanol distillation. *Rev. Dyna* 76 (159): 85 – 92
- Palacios – Bereche, R., Ensinas, A.V., Modesto, M., 2015. Double – effect distillation and thermal integration applied to the ethanol production process. *J. Energy* 1 – 12.
- Partida-Sedas, G., Montes-García, N., Carvajal-Zarrabal, O., López-Zamora, L., Gómez-Rodríguez, J., Aguilar-Uscanga, M.G. 2016. Optimization of hydrolysis process to obtain fermentable sugars from sweet sorghum bagasse using a Box-Benken design. *Sug. Tech.* <http://doi.org/10.1007/s12355-016-0461-y>.
- Yang, Y., Boots, K., Zhang, D., 2012. A sustainable ethanol distillation system. *J. Sustainability* 4: 94-105.