

ANÁLISIS DE ESQUEMAS INTENSIFICADOS PARA LA PRODUCCIÓN Y PURIFICACIÓN DE LACTATO DE ETILO

Heriberto Alcocer-García ^{a,b,*}, Josué Ailton Arguello-Villalon ^b, Dayanara García Conejo ^b, José María Ponce-Ortega ^a

^a Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Departamento de Ingeniería Química, Avenida Francisco J. Múgica, SN, Edificio V1, Ciudad Universitaria, 58060, Morelia, Michoacán, México.

h.alcocer@ugto.mx

^b Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Noria Alta S/N, 36050, Guanajuato, Guanajuato, México.

Resumen

Este estudio presenta un análisis comparativo entre esquemas convencionales e intensificados para la producción y purificación de lactato de etilo (EL), considerando criterios de eficiencia energética y sostenibilidad. Partiendo de un diseño base con destilación reactiva y columnas de purificación, se evaluaron cuatro alternativas intensificadas: acoplamiento térmico, diseño termodinámicamente equivalente, columna N-1 y columna de pared divisoria (DWC). El diseño térmicamente acoplado permitió un ahorro energético del 31%, mientras que el diseño con rectificador lateral alcanzó una reducción del 13.58%. Por otro lado, se observó que incluso en el diseño convencional, optimizar la relación de reflujo permitió disminuir la carga térmica en un 38.7%, al ajustar parámetros operativos en C1 y C2. Estos resultados evidencian el potencial de mejora tanto mediante estrategias de intensificación como a través de ajustes operativos dentro de esquemas tradicionales.

Palabras claves: Lactato de etilo; energía; sostenibilidad; intensificación de procesos

ANALYSIS OF INTENSIFIED SCHEMES FOR ETHYL LACTATE PRODUCTION AND PURIFICATION

Abstract

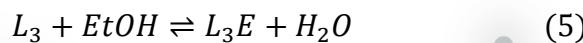
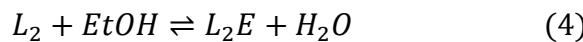
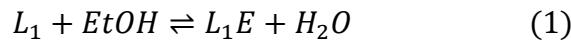
This study presents a comparative analysis between conventional and intensified schemes for the production and purification of ethyl lactate (EL), considering energy efficiency and sustainability criteria. Starting from a base design with reactive distillation and purification columns, four intensified alternatives were evaluated: thermal coupling, thermodynamically equivalent design, N-1 column and partition wall column (DWC). The thermally coupled design allowed for energy savings of 31%, while the side rectifier design achieved a reduction of 13.58%. On the other hand, it was observed that even in conventional design, optimizing the reflux ratio allowed the thermal load by 38.7%, by adjusting operating parameters in C1 and C2. These results show the potential for improvement both through intensification strategies and through operational adjustments within traditional schemes.

Keywords: Ethyl lactate; energy; sustainability; process intensification



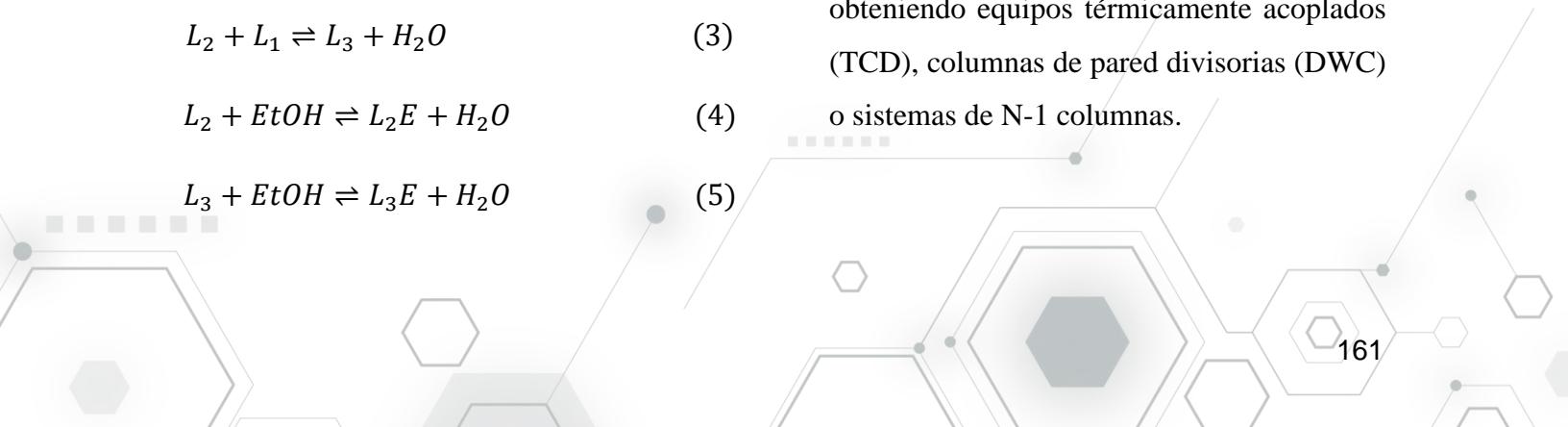
1. Introducción

El lactato de etilo (EL) es un disolvente agroquímico reconocido como GRAS (Generalmente Reconocido como Seguro) y, debido a su baja toxicidad, ha sido aprobado por la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos) y la EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria) como ingrediente farmacéutico y aditivo alimentario. El lactato de etilo se puede formar a partir de la reacción del etanol (EtOH) y el ácido láctico (L1) en presencia de un catalizador. Sin embargo, el ácido láctico presenta reacciones de esterificación intermolecular. Como resultado, se generan reacciones secundarias que forman oligómeros como el ácido diláctico (L2), el ácido triláctico (L3) y sus ésteres (L2E, L3E). La ocurrencia de todas estas reacciones hace que el diseño del proceso sea un desafío (Dai y col. 2019). Las posibles reacciones se presentan a continuación.



Recientemente Valvassore y Costa (2025) han propuesto un esquema intensificado para la producción y purificación del EL mediante el uso de destilación reactiva. Sin embargo, el alto contenido de agua y el remanente de etanol hacen una mezcla azeotrópica que tiene retos energéticos a superar.

Por otro lado, la Intensificación de Procesos (IP) busca aumentar la eficiencia energética y la seguridad del proceso, así como mejorar la rentabilidad económica, a la vez que reduce los residuos y las emisiones mediante la adopción de diseños innovadores, que pueden estar fuera del alcance de la práctica industrial actual (Pistikopoulos y col. 2021). El objetivo general de la IP es sintetizar configuraciones compactas, fáciles de operar, energéticamente eficientes y rentables para una tarea de separación determinada. Una estrategia para alcanzar este objetivo se centra en la intensificación interna. Esta técnica suele implicar modificar la configuración de destilación, como la eliminación de unidades como rehervidor o condensador, y el movimiento o eliminación de secciones, obteniendo equipos térmicamente acoplados (TCD), columnas de pared divisorias (DWC) o sistemas de N-1 columnas.



Se han publicado numerosos trabajos sobre el diseño y análisis de TCDS para separaciones ternarias Malone (1988), Tedder y Rudd (1978), o el reciente estudio de Sun y col. (2020). Estos estudios han demostrado que las configuraciones acopladas térmicamente pueden lograr ahorros de energía de hasta un 30 % en comparación con las secuencias de destilación directa e indirecta convencionales. Estudios teóricos han demostrado que DWC (para mezclas ternarias y multicomponentes) puede ahorrar hasta un 30% del capital invertido y hasta un 40% en costes energéticos (Segovia-Hernández y col. 2021).

Por tanto, en este trabajo se plantea el uso de la intensificación de procesos para el proceso de separación de EL con el objetivo de reducir los consumos energéticos y obtener un proceso más sostenible.

2. Metodología

El presente trabajo se enfoca en la intensificación del proceso de producción de

lactato de etilo, tomando como base el esquema CS1 propuesto por Valvassore y Costa (2025). Dicho esquema consiste en una columna de destilación reactiva, seguida de dos columnas convencionales para la purificación de los productos. Para la parte termodinámica, se aplicaron los modelos NRTL para la fase líquida y Hayden-O’Connell para la fase vapor. Los datos faltantes se estimaron con UNIFAC, siguiendo lo hecho por Dai y col. (2019). Sin embargo, para este estudio se trabajó únicamente con las dos columnas convencionales de destilación, denominadas C1 y C2, con el objetivo de evaluar su desempeño energético y de separación (Figura 1).

Si bien en estas columnas no se separa el lactato de etilo, su consumo energético representa el 71% del proceso, por lo que es de suma importancia la búsqueda de estrategias para la disminución de este consumo energético ya que impactan en el precio final del producto.



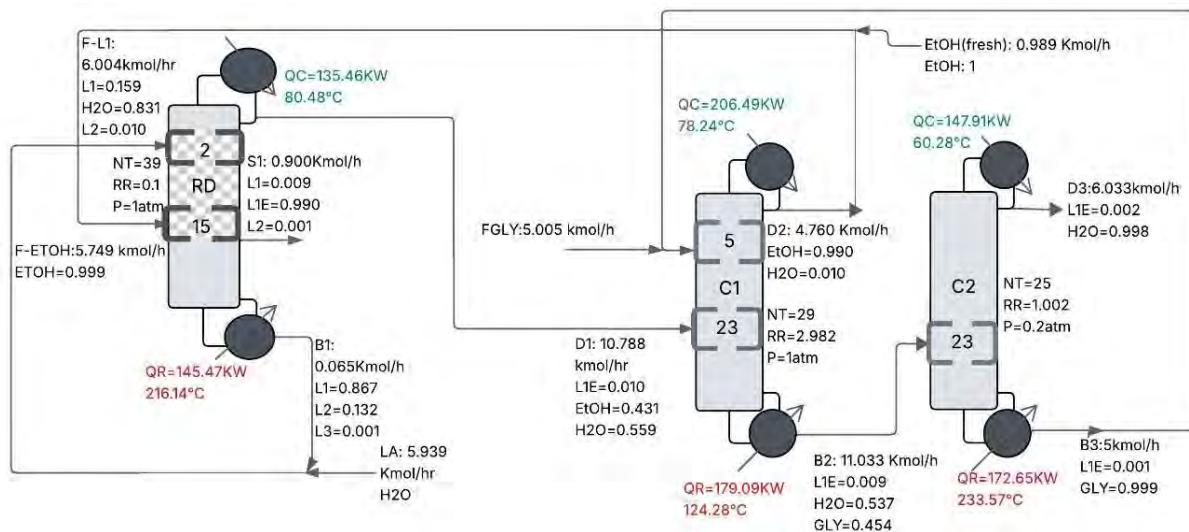


Figura 1. Diseño propuesto por Valvassore y Costa (2025)

1

Aunque la etapa analizada no contempla la producción ni la purificación directa del lactato de etilo, se incluyó en el estudio debido a su relevancia estratégica dentro del diseño global del proceso. La recuperación de subproductos y materia prima impacta significativamente en el costo total, y su adecuada gestión es indispensable desde una perspectiva sustentable. Además, la columna de destilación reactiva no fue considerada para intensificación debido a la alta sensibilidad de las reacciones de esterificación involucradas, ya que modificaciones en los flujos mediante recirculaciones podrían comprometer la eficiencia de producción del lactato de etilo. Por tanto, el análisis de la sección de

recuperación permite optimizar el proceso sin afectar la etapa reactiva, contribuyendo tanto a la viabilidad económica como a la sustentabilidad del sistema.

Las simulaciones se realizaron utilizando el software Aspen Plus V8.8, empleando el modelo RADFRAC para el equilibrio de fases en las columnas de destilación.

La primera modificación que se propuso fue cambiar la presión de la columna C2 de 0.2 atm a 1 atm, ya que al trabajar al vacío esto representa un alto riesgo de seguridad y la necesidad de fabricar una columna de un material que soporte el vacío.

Se realizó un análisis de sensibilidad de la relación de reflujo vs carga térmica en las

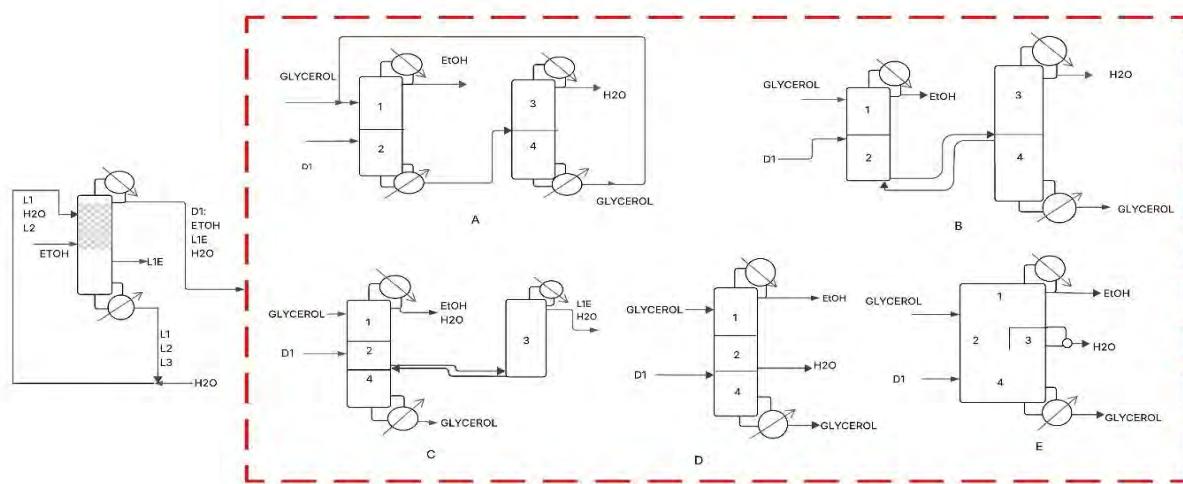


Figura 2. Diseños estudiados por medio de las configuraciones intensificadas propuestas.

columnas convencionales (Figura 2A). La relación de reflujo solo fue estudiada para verificar si los diseños reportados en la literatura operaran cerca del reflujo mínimo.

Además, se propusieron cuatro configuraciones intensificadas con el objetivo de reducir el consumo energético:

- Diseño acoplado. El primer diseño intensificado se realizó mediante un acoplamiento térmico. El acoplamiento se implementó conectando una corriente lateral de vapor proveniente de la columna C2 hacia la columna C1 para suplir la carga térmica del rehervidor, como se muestra en la Figura 2B.
- Diseño termodinámicamente equivalente. En este diseño se realizó

un movimiento de sección, dando como resultado una columna de destilación y un rectificador lateral (Figura 2C). Esta estrategia está fundamentada en los principios de integración energética y diseño de columnas acopladas térmicamente, tal como se describe en estudios de Jiménez y Hernández (2001) y Triantafyllou y Smith (1992), quienes destacan cómo el uso de corrientes laterales permite reducir significativamente el consumo energético y el número de equipos auxiliares, sin comprometer la calidad de los productos.

- Diseño N-1. En este diseño se propuso el movimiento de una sección de la columna C2 a la C1 y la sección

restante de C2 se eliminó. Esta modificación consiste en aumentar el número total de etapas de C1 y extraer el producto que originalmente salía como destilado en C2 mediante una corriente lateral, según muestra la Figura 2D. Con ello se pretende incluir dos columnas en una sola, reduciendo el consumo energético el costo del proceso.

- DWC. Este diseño parte del diseño termodinámicamente equivalente. Donde la sección de rectificación se introduce dentro de la primera columna, según muestra la figura 2E. Obteniendo con ellos un ahorro en el costo de los equipos.

Cabe mencionar que los flujos de alimentación se mantuvieron constantes, así como las composiciones en los flujos y recuperaciones de los flujos de salida, esto para mantener una comparativa justa entre los diseños. Por tanto, para el diseño convencional se modificó la presión de la columna C2 y se realizó un análisis de sensibilidad en el reflujo de C1 y C2 para garantizar que operen a reflujo óptimo. En diseño D, se realizó un análisis de sensibilidad para el reflujo. Y para los diseños B,C y E, además de realizar el análisis del reflujo en la

columna sobre la que recae el consumo energético se ajustó el flujo de vapor de interconexión.

3. Resultados

En esta sección se describen los resultados de este trabajo, incluyendo un análisis de sensibilidad sobre el diseño convencional y una comparativa de los requerimientos energéticos de los diseños propuestos. Cabe destacar que en este análisis se fijaron las purezas obtenidas por Valvassore y Costa (2025), para todos los productos obtenidos.

3.1. Análisis de la relación de reflujo

En la Columna C1 la carga térmica disminuyó de 179.194 kW a 90.5184 kW (Figura 3) al reducir el reflujo de 2.982 a 1.28.

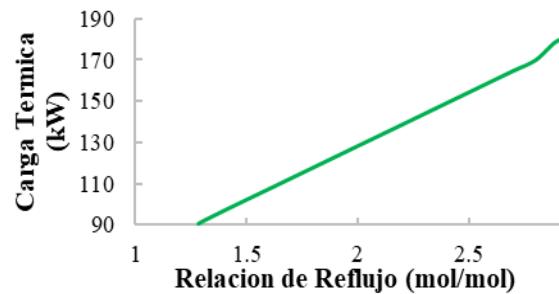
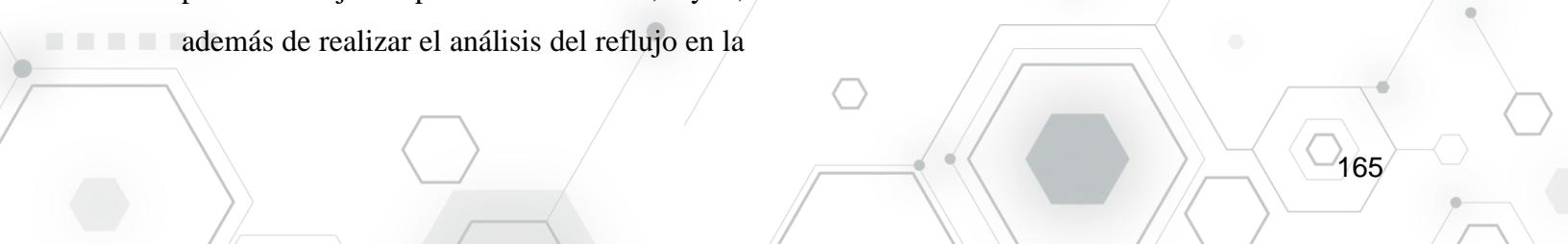


Figura 3. Relación de reflujo y carga térmica para C1.



En C2 la carga disminuyó de 172 a 125 kW (Figura 4) con un reflujo reducido de 1.002 a 0.045. En ambos casos, la disminución del reflujo ayudó a la disminución de la carga térmica, el valor menor de reflujo alcanzado es al cual se sigue manteniendo la pureza. La reducción total de la carga térmica representa un ahorro del 38.7%, respecto al diseño base.

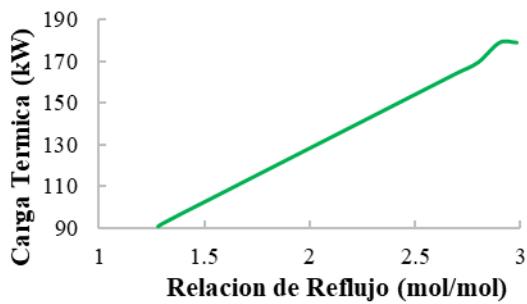


Figura 4. Relación de reflujo y carga térmica para C2.

3.2. Diseño térmicamente acoplado

En el diseño térmicamente acoplado se eliminó completamente la carga de C1 ($Q_1=0$) y el consumo energético recayó sobre el rehervidos de C2, obteniendo un valor de 242.7 kW. El beneficio de esta integración es notable: se evita el remezclado tradicional y se aprovecha el calor residual de una columna para la otra (Barroso-Muñoz y col. 2006). En efecto, este esquema térmicamente acoplado requería 31% menos energía que el diseño base.

3.3. Diseño termodinámicamente equivalente

Para el diseño con rectificador lateral la carga térmica de C2 es 0 kW. Esto se logra gracias a la integración térmica mediante un flujo de vapor proveniente de C1. Es importante mencionar que para que el equilibrio líquido vapor no se vea afectado a la columna C1 debe de regresar un flujo de líquido proveniente de C2. El resultado obtenido fue de 13.58% de ahorro en la carga térmica y es consistente con lo reportado por Segovia y Hernández (2001) y Triantafyllou y Smith (1992), quienes señalan que este tipo de acoplamiento puede lograr mejoras energéticas superiores al 10-15% en sistemas multicomponente, con menor complejidad estructural que otros esquemas intensificados más complejos.

3.4. Diseños N-1

El caso N-1 columnas presentó una carga mayor a la del diseño base, pese a que la teoría (Martínez- Cisneros y col. 2009), predice ahorros de orden del 30% usando acoplamientos térmicos, sin embargo, aquí su carga térmica total se incrementa un 30%, esto indica que la columna restante debe asumir tareas adicionales de separación y probablemente opera con mayor reflujo,

aumentando la carga. Dicho de otro modo, se perdió la ventaja de intensificación y reapareció el remezclado, resultando en mayor consumo energético. En la literatura se advierte que los beneficios de esquemas acoplados o DWCs dependen de un diseño convencional. Es posible que el diseño N-1 no esté optimizado para el sistema multicomponente de etil lactato por lo que la columna obtenida trabaja en condiciones desfavorables.

3.5. DWC

El diseño de DWC también arrojó una carga térmica total de 303.99 kW, la DWC es una unidad integrada que separa tres componentes en una sola columna mediante secciones internas, lo cual debería permitir una mejor eficiencia térmica y menor remezclado. Su consumo energético es igual al del diseño termodinámicamente equivalente.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la DWC, tiene menores costos de equipo al incluir dos equipos en uno solo. Esto se debe a que ambos diseños son termodinámicamente iguales, ya que representan el mismo proceso de separación y los mismos flujos energéticos internos, solo que la DWC lo integra todo dentro de un solo equipo físico. Si bien ambos diseños son iguales, es importante su

evaluación por separado, esto para visualizar en una etapa de optimización rigurosa la disminución del costo de la DWC vs el diseño termodinámicamente equivalente

4. Resultados generales

En la Tabla 1. Se muestran los parámetros de diseño de los esquemas estudiados, donde se puede visualizar que en este estudio no se incluyó un análisis sobre el impacto del número de etapas, etapas de alimentación o ajuste del diámetro. Los diseños obtenidos como se mencionó en la metodología fueron obtenidos mediante acoplamientos térmicos, movimientos de secciones y eliminación de secciones. Sin embargo, es importante mencionar, que este es un trabajo preliminar. Para poder obtener una comparativa más justa entre los diseños es necesaria una optimización rigurosa, esto para poder minimizar aún más su consumo energético y asegurarnos de no obtener equipos sobredimensionados. Esta optimización, debe tomar en cuenta variables como: el número de etapas, el diámetro, etapas de alimentación, flujos de destilado y fondos, relación de reflujo, flujos de interconexión. Además, tomando en cuenta la importancia de la operabilidad de los procesos, es crucial

incorporar un análisis de control robusto donde se incluya la perturbación de las variables del proceso, así como parámetros de la alimentación como la composición de entrada o temperatura.

La Tabla 2, resume los resultados obtenidos de los consumos energéticos de los diseños

estudiados. Tres de los diseños propuestos tuvieron ahorros energéticos en comparación con el diseño base. Siendo el diseño convencional el que presento el mejor ahorro (Figura 5).

Tabla 1. Especificaciones de diseño de los esquemas estudiados.

Diseño		A	B	C	D	E
C1	Etapas	29	35	32	60	32
	Etapa de alimentación	5,23	5,23	5,23	5,23	5,23
	Reflujo (mol/mol)	1.28	1.74	1.70	9.38	1.70
	Flujo de vapor (Kg/h)	-	350.00	-	-	-
	Entrada de flujo de vapor	-	35	-	-	-
	Carga térmica (kW)	90.51	0.00	303.98	457.26	303.98
C2	Etapas	25	25	22	-	22
	Etapa de alimentación	23	23	22	-	23
	Reflujo	0.05	0.10	1.00	-	1.00
	Flujo de vapor	-	-	412.80	-	412.80
	Entrada de flujo de vapor	-	-	22.00	-	22.00
	Carga térmica (kW)	125.00	242.65	0.00	-	0.00



Tabla 2. Comparación de la carga térmica y ahorro energético en diferentes configuraciones de columnas de destilación.

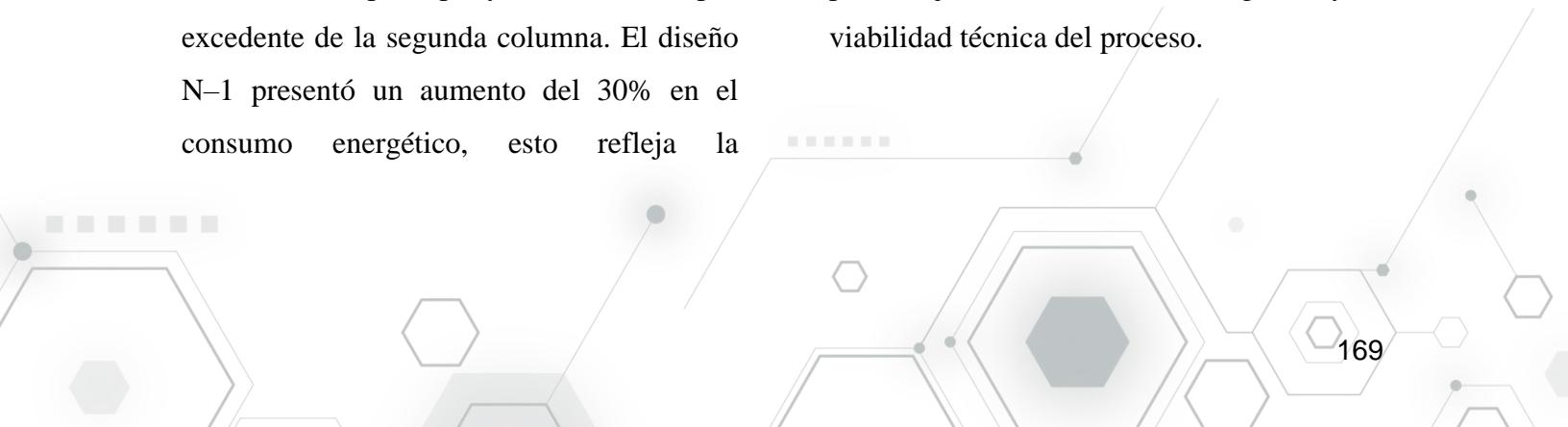
	C1	C2	Carga Térmica (KW)	Ahorro (%)
Diseño base	179.09	172.65	351.74	-
Convencional	90.52	125	215.52	38.73
Acoplado	0	242.65	242.65	31.01
N-1	457.26	0	457.26	-30
Diseño termodinámicamente equivalente	303.99	-	303.99	13.57
Columna de pared divisora	303.99	-	303.99	13.57

5. Conclusiones

La aplicación de estrategias de intensificación de procesos permite reducir significativamente el consumo energético en la producción de lactato de etilo, contribuyendo a un proceso más sustentable y eficiente. El diseño térmicamente acoplado presentó el mejor desempeño de los esquemas intensificados, con una reducción del 31% en la carga térmica total, eliminando el rehervido en la columna principal y reutilizando vapor excedente de la segunda columna. El diseño N-1 presentó un aumento del 30% en el consumo energético, esto refleja la

importancia de una optimización integral en configuraciones intensificadas.

Además, el análisis de sensibilidad sobre la relación de reflujo en el esquema convencional mostró que, al optimizar los parámetros operativos, se logró un ahorro energético total del 38.7%. En conjunto, los resultados demuestran que tanto el rediseño estructural como el ajuste operacional son herramientas complementarias y poderosas para mejorar la eficiencia energética y la viabilidad técnica del proceso.



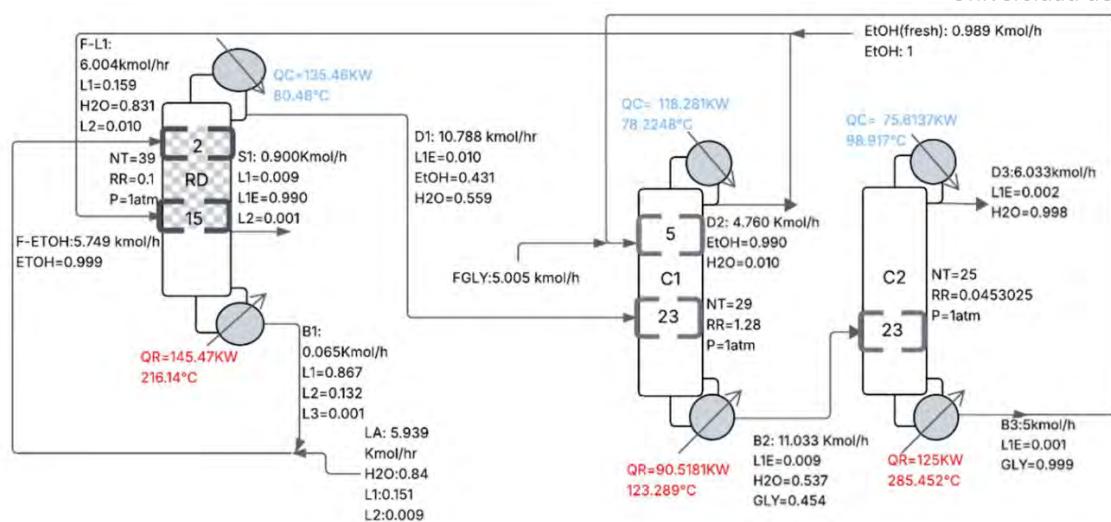


Figura 5. La mejor estructura y condiciones de funcionamiento.

Referencias bibliográficas

Barroso-Muñoz, F. O., Hernández-Castro, S., Segovia-Hernández, J. G., y Aguilera-Alvarado, A. F. (2006). Estudio de sistemas de destilación térmicamente acoplados con reacción química. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(3), 255–263. Recuperado de <https://www.segovia-hernandez.com/publicaciones/fabricio%20RMIQ.pdf>

Dai, S.B., Lee, H.Y., Chen, C.L. (2019). Design and economic evaluation for the production of Ethyl lactate via reactive distillation combined with various separation configurations. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 58 6121–6132.

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03343>

Malone, M. F. (1988). Optimality regions for complex column alternatives in distillation systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 66, 229–240.

Martínez-Cisneros, C. S., Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., y Bonilla-Petriciolet, A. (2009). Thermally coupled distillation sequences for the separation of bioethanol–water mixtures. *Separation and Purification Technology*, 63(3), 617–623. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.07.024>

Pistikopoulos, E. N., Tian, Y., y Bindlish, R. (2021). Operability and control in process intensification and modular design: Challenges and opportunities. *AIChE Journal*, 67(5), e17204.

<https://doi.org/10.1002/aic.17204>

Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Sánchez-Ramírez, E., y Mendoza-Pedroza, J. (2021). A short review of dividing wall distillation column as an application of process intensification: Geographical development and the pioneering contribution of Prof. Arturo Jimenez in Latin America.

Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 160, 108275.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108275>

Sun, S., Yang, A., y Shen, W. (2020). Research advances in thermally coupled intensification technology for special distillation. *CIESC Journal*, 71, 4575–4589.

Tedder, D. W., y Rudd, D. F. (1978). Parametric studies in industrial distillation: Part I. Design. *AICHE Journal*, 24(2), 303–315. <https://doi.org/10.1002/aic.690240219>

Triantafyllou, C., y Smith, R. (1992). The design and optimization of fully thermally coupled distillation columns. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 70(Part A), 118–132.

Valvassore, M. S., y Costa, C. B. B. (2025). Analysis of novel configurations of an intensified process for ethyl lactate production. *Chemical Engineering and*

Processing – Process Intensification, 110, 110146.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.110146>