

Revisión sistemática de metodologías para intensificación de procesos químicos

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química

Modalidad Trabajo de Investigación

Karint Mayerli Ramírez Boada

Danna Gabriela Ramírez Niño

Director

Omar Andrés Benavides Prada

Prof. Escuela de Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por guiarme, sostenerme y acompañarme en cada etapa de este camino.

*A la memoria de tres personas que celebraban cada paso que daba antes de terminarlo, que marcaron mi vida de manera profunda y permanente: mi hermano **Diego Alejandro**, quien me enseñó que la vida se vive en distintos ritmos y que cada etapa tiene su propio valor; mi **abuelo**, quien me mostró la importancia de la familia, de la compañía silenciosa y de un amor que sostiene incluso sin palabras; y **Blanquita**, mi hada madrina de la vida, quien me enseñó que la bondad transforma, que el amor desinteresado siempre deja huella y que estar para los demás es una de las formas más puras de dar.*

*A mis papás, **Diego** y **Claudia**, por el amor en cada palabra, por ser mi apoyo constante y por recordarme siempre, con palabras de aliento, que yo podía lograrlo. Este trabajo no es solo mío, es un sueño compartido y construido en familia. A mi abuelita **Alicia**, por su cariño, su acompañamiento incondicional y por darme siempre fuerzas para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. A mi hermano **Daniel**, porque, a su manera, siempre ha estado presente y me ha apoyado en este proceso. A mi sobrino **Martín**, por ser la luz de mi vida y mi mayor motor, por recordarme cada día por qué vale la pena seguir soñando y esforzándome.*

A mi otra hada madrina, mi tía Erika, que siempre está dispuesta a escucharme, ayudarme y guiarme. Por siempre tener esa voz de aliento y manera particular de decir las cosas. Con mucho cariño, también fue parte de este logro.

*A mis **Paulas**, mi trío dinámico, por ser esas hermanas que la vida me regaló, por estar desde el día cero y por acompañarme en cada etapa con cariño, complicidad y apoyo incondicional.*

A los amigos que la universidad me dio desde el inicio —Valeria, Krisstall, Johan, Felipe y Valentina—, y a quienes con el tiempo se convirtieron en parte esencial de este camino —Camila, Juliana, Diana y Alan—; gracias por el apoyo, las experiencias compartidas y por hacer de esta etapa algo verdaderamente inolvidable, junto a todos los compañeros que la hicieron especial semestre tras semestre.

*A mi compañera **Karint**, quien más que una compañera se convirtió en una de mis mejores amigas. Gracias por aquel mensaje hace cinco años, por atreverte a escribir y abrir, sin saberlo, un camino que terminó siendo maravilloso. Gracias por caminar juntas esta experiencia, por la paciencia en los momentos difíciles, por la comprensión, por el apoyo constante y por estar presente en todas mis facetas. Por escuchar, por acompañar, por sostener y por compartir tanto dentro como fuera de la universidad. Gracias por tu sinceridad, tu respeto y tu cariño. Gracias por hacer de esto algo más llevadero.*

Danna Gabriela Ramirez Niño

*A **mi papito**, mi globito, mi tigre, quien un día decidió dármelo todo cuando él no tenía nada. Me apoyó sin dudarlo... bueno, tal vez sí lo dudó por un segundo. Ese segundo en el que pensó que su hija menor ya no iba a estar en casa. ¿Y cómo se puede interpretar ese segundo? en la rapidez de no dudarme en apoyarme o como el segundo más lento y agrio por dejarme ir? De vez en cuando, en mi pequeño cuarto, sola, imaginaba a mi papá, un señor de 50 años, con el corazón más grande, un señor responsable, grande y digno de admirar, sosteniéndome en su espalda. Y ahora puedo ver que también sostuvo, por mucho tiempo mi futuro. Puedo estar completamente segura de que su timidez en las palabras solo puede interpretarse como un amor a la distancia. Y no puedo estar más orgullosa cuando digo que soy ingeniera, y no puedo estar más orgullosa cuando digo que Javier Ramírez fue quien lo hizo posible.*

*A **mi mamá**, mi mamita, la mujer más hermosa quien un día me abrió las alas y no tuvo miedo de dejarme volar. Quien me ayudó a empacar, me hizo mi comida favorita y me dejó en una ciudad que no era la suya. Tal vez fue el comienzo de una nueva etapa para mí, pero también lo fue para ella. Y, aun así, me llamaba todos los días, y, aun así, siempre me animó. A mi mamita linda, quien todas las mañanas me mandaba mensajes de amor y de aliento, y sin cuyas palabras no habría podido seguir. Quien oró por mí todos los días, y a quien se lo agradezco todos los días. Quien no me dejaba rendirme, incluso en los días en que ella misma quería hacerlo. Quien me ama más que nadie, y a quien yo amo también.*

*Especialmente, este libro se lo dedico a **mi hermana**. Sin ella probablemente hubiera obtenido la ingeniería, pero no la química. Me ayudó, me enseñó, me confundió. Me gritó, me regañó, me perdonó, pero, sobre todo, nunca me dejó. Fue quien me ayudó desde el día uno de la carrera: desde hacer una integral hasta la última coma de mi tesis. A quien me enseñó que a veces toca ir despacio y otras veces un segundo es demasiado; quien me transmite su sabiduría y sus consejos, y de vez en cuando, también me transmite sus errores. Quien me abre camino hacia mi futuro y, muy de vez en cuando, me recuerda el pasado. Quien un día me apoyó a tirar la toalla y otro día me ayudó a recogerla. Ale de mi corazón, esta carrera es más tuya que mía.*

A Franci, Javier y Aleja, los tres pilares de mi vida.

*A mis amigas que se me cruzaron en el camino, **Kristal y Valeria**, quienes me aportaron un pedacito de cada una, con las que me reí mucho, bailé y a veces lloré, con las que compartí momentos que no olvido. Me las llevo en el corazón.*

*A mi mejor amiga, hermana y compañera de tesis, **Danna**, quien me hizo sentirme en casa cuando estaba lejos, con quien un día un simple trabajo nos unió y nunca nos separamos, quien me brindó la mano, un techo y comida con amor y paciencia, quien me vio en todas mis etapas y estuvo firme en cada una de ellas, quien celebró mis triunfos y también lloró conmigo en los malos momentos, con quien formamos una amistad única de las que pasan muy poco. Dannita, definitivamente gracias por ser tú, una persona extraordinaria en todos los sentidos.*

Karint Mayerli Ramirez Boada

Tabla de contenido

Introducción	10
Estado del arte.....	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Metodología	15
2.1 Elección de bases de datos y creación de estrategia de búsqueda	16
2.2 Organización de documentos y análisis bibliométrico	17
2.3 Identificación de avances y desafíos.....	17
3. Resultados.....	18
3.1 Ecuaciones de búsqueda: resultados protocolo PRISMA.....	18
3.2 Análisis bibliométrico.....	20
3.3 Metodologías de intensificación de procesos en destilación continua.....	25
3.3.1 Indicadores Clave para la Intensificación de Procesos en Destilación Continua	26
3.3.2 Destilación Reactiva	27
3.3.2.1 Integración de destilación reactiva y columnas de pared divisoria: estrategias de intensificación	28
3.3.2.2 Acoplamiento térmico.....	31
3.3.2.3 Aplicaciones avanzadas y funcionales de la destilación reactiva	36
3.3.2.3 Tecnologías Emergentes y Combinaciones Avanzadas.....	37
3.3.3 Destilación extractiva.....	39
3.3.3.3 Integración de destilación extractiva y columnas de pared divisoria: estrategias de integración.	39
3.3.3.4 Destilación extractiva con acoplamiento térmico	41
3.3.3.5 Híbridos de Destilación Reactiva-Extractiva (RED) y sus Intensificaciones.....	43
4. Análisis TRL y desafíos de implementación	44
5. Conclusiones.....	46
Referencias.....	48
Apéndices.....	59

Lista de Tablas

Tabla 1	Criterios de exclusión e inclusión utilizados en la revisión sistemática	16
Tabla 2	Ecuaciones de búsqueda y resultados.....	18
Tabla 3	Número de artículos por editorial.....	20
Tabla 4	Número de artículos y citas por revista	23
Tabla 5	Síntesis de resultados clave en destilación reactiva con DWC	31
Tabla 6	Síntesis de resultados clave en destilación reactiva con acoplamiento térmico.....	34
Tabla 7	Comparación de Metodologías de Diseño y optimización en Destilación Reactiva.....	35
Tabla 8	Síntesis de resultados en aplicaciones avanzadas	36
Tabla 9	Síntesis de resultados de tecnologías emergentes y combinaciones avanzadas	38
Tabla 10	Síntesis de resultados clave en destilación extractiva con DWC	40
Tabla 11	síntesis de resultados de acoplamiento térmico en destilación extractiva	42
Tabla 12	síntesis de resultados de tecnologías híbridas	43
Tabla 13	Nivel TRL según tecnología.....	45

Lista de Figuras

Figura 1	Diagrama metodológico	15
Figura 2	Diagrama de flujo del método PRISMA	19
Figura 3	Número de publicaciones por año	21
Figura 4	Países con mayor número de artículos	22
Figura 5	Mapa sobre la relación entre palabras clave de los artículos seleccionados realizado en VOSviewer.....	24
Figura 6	Columna de pared dividida (DWC).....	26
Figura 7	Esquema básico de Destilación Reactiva	27
Figura 8	(a) Convencional, (b) con pared divisoria, (c) reactiva y (d) columna de destilación reactiva con pared divisoria, mostradas en orden de creciente integración para procesos de separación y reacción. Los componentes A, B y C son compuestos genéricos ordenados.....	28
Figura 9	DWC de Sargent junto con sus arreglos equivalentes con acoplamiento térmico.	30
Figura 10	Esquema conceptual de técnica Bottom Flash	33
Figura 11	Producción de GVL	37

Apéndices

Apéndice A. Ítems metodología PRISMA	59
Apéndice B. Niveles de maduración tecnológica TRL.	62
Apéndice C. Diseño y optimización en RD: estrategias de configuración y modelado	63
Apéndice D. Integración de destilación extractiva y columnas de pared divisoria: estrategias de integración.....	66
Apéndice E. Híbridos de Destilación Reactiva-Extractiva (RED) y sus Intensificaciones	69

Resumen

Título: Intensificación de procesos: Revisión sistemática de metodologías para intensificación de procesos químicos*

Autores: Benavides Prada Omar Andrés, Karint Mayerli Ramirez Boada, Danna Gabriela Ramirez Niño**

Palabras clave: Intensificación de procesos, destilación continua, destilación reactiva, destilación extractiva

Descripción: Se realizó una revisión sistemática sobre las metodologías utilizadas para la intensificación de procesos en destilación continua, con el objetivo de analizar, clasificar y sintetizar los enfoques de diseño y optimización más relevantes, identificando tecnologías emergentes, principios de diseño, indicadores de rendimiento y desafíos. La metodología se basó en el protocolo PRISMA, que permitió una selección rigurosa de la literatura científica, seguida de un análisis bibliométrico para identificar tendencias y avances tecnológicos. Los resultados evidenciaron un crecimiento sostenido en la investigación de tecnologías destinadas a mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental en procesos de destilación. Se destacan principalmente dos enfoques: La destilación reactiva (RD) y la destilación extractiva (ED). En el caso de la RD, se identificaron avances importantes como la integración con columnas de pared divisoria (RDWC) y el acoplamiento térmico mediante técnicas como bombas de calor, condensadores intermedios. Por su parte, la ED ha evolucionado mediante su combinación con configuraciones avanzadas (EDWC) y el uso de solventes innovadores como los líquidos iónicos. A pesar de estos desarrollos, se identificaron desafíos que limitan la implementación a gran escala de estas tecnologías, pues la mayoría de los estudios se mantiene en etapas computacionales, con niveles de madurez tecnológicas intermedios. Las principales barreras incluyen la complejidad operativa de los sistemas integrados, la necesidad de estrategias de control robustas, el manejo de catalizadores y la falta de estudios experimentales a escala piloto o industrial.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Ingeniería química. Director: Omar Andrés Benavides Prada. Prof. Escuela de Ingeniería Química.

Abstract

Title: Process Intensification: Systematic Review of Methodologies for Process Intensification

Authors: Benavides Prada Omar Andrés, Karint Mayerli Ramirez Boada, Danna Gabriela Ramirez Niño

Keywords: Process intensification, continuous distillation, reactive distillation, extractive distillation

Description: A systematic review was conducted on the methodologies used for process intensification in continuous distillation, with the aim of analyzing, classifying, and synthesizing the most relevant design and optimization approaches, identifying emerging technologies, design principles, performance indicators, and challenges. The methodology was based on the PRISMA protocol, which allowed for a rigorous selection of the scientific literature, followed by a bibliometric analysis to identify trends and technological advances. The results showed sustained growth in research into technologies aimed at improving energy efficiency and reducing the environmental impact of distillation processes. Two approaches stand out: reactive distillation (RD) and extractive distillation (ED). In the case of RD, important advances were identified, such as integration with dividing wall columns (RDWC) and thermal coupling through techniques such as heat pumps and intermediate condensers. ED, for its part, has evolved through its combination with advanced configurations (EDWC) and the use of innovative solvents such as ionic liquids. Despite these developments, challenges have been identified that limit the large-scale implementation of these technologies, as most studies remain in the computational stages, with intermediate technological maturity levels. The main barriers include the operational complexity of integrated systems, the need for robust control strategies, catalyst management, and the lack of pilot- or industrial-scale experimental studies

*Bachelor's Thesis

**Faculty of Physicochemical Engineering, Chemical Engineering Department. Director: Omar Andrés Benavides Prada. Prof. Chemical Engineering Department.

Introducción

Los procesos industriales son cruciales al proporcionar productos y servicios a varios sectores a nivel global. La competitividad de estas industrias depende en gran medida de su capacidad para innovar y optimizar sus operaciones, lo que permite mejorar la eficiencia, reducir costos y hacer un uso más sostenible de los recursos (Becht *et al.*, 2009). En este orden de ideas, la intensificación de procesos surge como una estrategia clave para diseñar equipos y métodos innovadores que ofrezcan mejoras significativas frente a las tecnologías actuales, con el objetivo de reducir el tamaño de los equipos, disminuir el consumo de energía y minimizar la generación de residuos, haciendo que el proceso sea más económico y sostenible (Stankiewicz & Moulijn, 2014).

Uno de los procesos más críticos en la industria química y petroquímica es la destilación, la técnica más utilizada para obtener productos de alta pureza. Sin embargo, su eficiencia térmica es extremadamente baja, alcanzando valores entre 5 y 20 % en los sistemas convencionales (Y. Liu *et al.*, 2015), lo que provoca un desperdicio elevado de energía. Como resultado, aproximadamente el 40 % de la energía total es consumida en las industrias de procesos, y hasta el 60 % del consumo energético de la industria química son destinados a esta operación unitaria (Segovia-Hernández *et al.*, 2021). Así mismo, los avances en la intensificación de procesos carecen de una revisión, compilación y comparación de sus investigaciones metodológicas que se encuentran en sus primeras etapas (Demirel *et al.*, 2017), lo que dificulta la implementación de las técnicas más efectivas y limita el aprovechamiento de los beneficios que ofrece.

La literatura actual presenta una gran cantidad de estudios de casos aislados sobre intensificación de procesos, pero carece de revisiones sistemáticas que sintetizen y comparen las

metodologías de diseño, optimización y evaluación de manera transversal. La elección de una estrategia de intensificación sobre otra, así como su diseño óptimo, depende críticamente de las características del sistema químico y de los objetivos de optimización (económicos, energéticos o ambientales), lo que dificulta la generalización de los resultados. En este contexto, el presente trabajo de grado realiza una revisión sistemática de las metodologías para la intensificación de procesos de destilación continua para responder la siguiente pregunta: *¿qué metodologías se utilizan para intensificar procesos de destilación continua y qué características presentan?* Este trabajo se lleva a cabo con el objetivo de analizar, clasificar y sintetizar los enfoques de diseño y optimización más relevantes, buscando identificar no solo tecnologías emergentes, sino también los principios de diseño, los indicadores de rendimiento utilizados, los conflictos conceptuales y las brechas de conocimiento existentes.

Estado del arte

Demirel *et al.*, (2017) detallan que la intensificación de procesos es un enfoque innovador en la ingeniería química que busca mejorar la eficiencia, sostenibilidad y rendimiento de los procesos industriales, reduciendo el consumo energético, los costos operativos y el impacto ambiental. Sus orígenes se remontan a mediados del siglo XX, cuando los ingenieros comenzaron a explorar formas de optimizar las reacciones químicas y mejorar los mecanismos de transferencia de calor y masa en reactores convencionales. Sin embargo, fue en las décadas de 1980 y 1990 cuando el término *process intensification* comenzó a adquirir reconocimiento, marcando un cambio de paradigma en el diseño de procesos industriales (Boodhoo & Harvey, 2013).

En concordancia con lo anterior, Maleta *et al.*, (2011) analizaron la intensificación de procesos en destilación mediante la implementación de la destilación cíclica, una estrategia que ha cobrado interés en los últimos años. En su estudio describieron el funcionamiento de la destilación cíclica controlada, en la que el proceso opera en dos fases alternas: un período de flujo de vapor y un período de flujo de líquido, lo que mejora la eficiencia de separación y el rendimiento del sistema. Los autores reportaron que este método puede aumentar el rendimiento de separación hasta dos o tres veces más en comparación con procesos convencionales. Además, resaltaron que la combinación de esta tecnología con la destilación reactiva podría potenciar aún más los beneficios en términos de ahorro energético y reducción del impacto ambiental.

Por otra parte, Boraey, (2018) destaca varios estudios significativos en el campo de la intensificación de procesos (PI), observando un crecimiento notable en la investigación y aplicación industrial de tecnologías como la destilación reactiva, que cuenta con más de 150 instalaciones en operación, y las columnas de pared divisoria, con más de 125 instalaciones. Estas

tecnologías han demostrado su capacidad para reducir drásticamente el consumo energético y los costos operativos. Los autores también señalan que persisten desafíos en la sistematización del diseño de procesos intensificados y en la garantía de su operabilidad y seguridad, lo que subraya la necesidad de continuar investigando para maximizar los beneficios de estas tecnologías en la industria química.

En lo que respecta a vigilancias tecnológicas, Jiang & Agrawal, (2019) realizaron una revisión sobre la intensificación de procesos en destilación multicomponente, evaluando estrategias como acoplamientos térmicos, integración de calor y masa, y destilación de múltiples efectos para mejorar la eficiencia energética. En su estudio demostraron que estas técnicas permiten reducir significativamente el consumo de energía y el número de columnas necesarias, optimizando así los costos operativos. Además, destacaron que la implementación de configuraciones compactas y acopladas térmicamente no solo minimiza el impacto ambiental, sino que también mejora la operabilidad y controlabilidad del proceso.

Por otra parte, se ha encontrado que la metodología PRISMA es aplicada para elaborar revisiones sistemáticas en la literatura. Según Esmeria *et al.*, (2023), el método consta de un conjunto de directrices diseñadas para mejorar la calidad, transparencia y reproducibilidad en la elaboración de revisiones sistemáticas y metaanálisis; su proceso incluye cuatro fases: identificación, selección, elegibilidad e inclusión. Algunos ejemplos de aplicación de PRISMA desarrollados en la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander son los trabajos de Becerra Castro *et al.*, (2024), enfocado en la producción de proteína a partir de insectos; el de Hernández, (2024), que profundizó en la elaboración de Bioplásticos a partir de almidón; y la revisión de Niño, (2022), orientada al estado del arte de los contaminantes emergentes de productos cosméticos en cuerpos de agua.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Elaborar una revisión sistemática de las metodologías utilizadas para la intensificación de procesos químicos, orientada hacia técnicas de destilación continua.

1.2 Objetivos específicos

Aplicar el protocolo PRISMA para definir los criterios de selección, análisis y clasificación de la información.

Elaborar un análisis bibliométrico sobre los avances tecnológicos más relevantes en cuando a la intensificación de procesos de destilación.

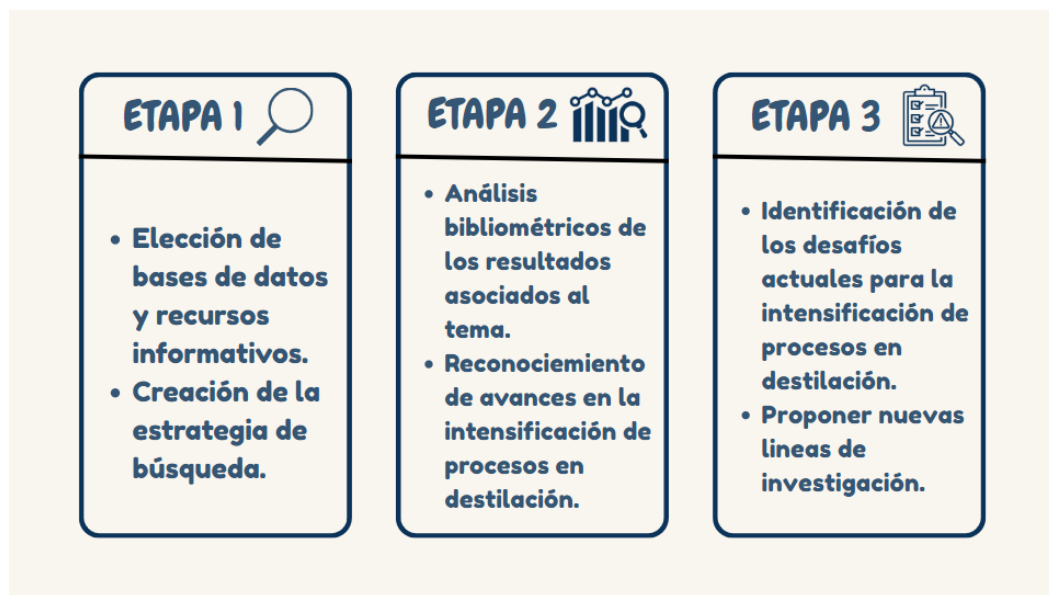
Identificar los retos y desafíos actuales para la intensificación de procesos de destilación ya existentes en la industria química.

2. Metodología

Para desarrollar esta revisión sistemática se siguieron las pautas propuestas por la declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items of Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que ofrece una guía clara y estructurada para realizar este tipo de estudios. Este protocolo está compuesto por 27 ítems (ver Anexo A), agrupados en 7 etapas principales: planteamiento de la pregunta de investigación, búsqueda de información, selección de estudios, extracción de datos, evaluación del riesgo de sesgo, análisis de resultados y presentación de hallazgos (Page *et al.*, 2021). Además, se usaron herramientas especializadas para organizar los datos recopilados y facilitar su análisis, siguiendo la metodología mostrada en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama metodológico



Es importante mencionar que no se realizó un metaanálisis en el presente trabajo, ya que los estudios encontrados presentan diferencias importantes en cuanto a enfoques, metodologías y resultados, lo que hace difícil agruparlos estadísticamente. En lugar de eso, se optó por un análisis

cualitativo, comparando las ideas principales de cada trabajo para identificar tendencias, avances y desafíos en el tema estudiado.

2.1 Elección de bases de datos y creación de estrategia de búsqueda

Se eligieron las bases de datos Web of Science (WOS) y Scopus, ya que en ellas se pueden acceder a información de diferentes editoriales reconocidas como *Taylor & Francis*, *ACS Publications*, *ScienceDirect* y *Springer*, que son muy relevantes para el área de ingeniería. Además, estas plataformas están disponibles gracias a las licencias que ofrece la Universidad Industrial de Santander, lo cual facilita el acceso a artículos científicos actualizados y de calidad, haciendo más ágil y completa la búsqueda de información.

Para la construcción de la ecuación de búsqueda se partió de la siguiente pregunta: *¿qué metodologías se utilizan para intensificar procesos de destilación continua y qué características presentan?* A partir de esta formulación, se seleccionaron términos claves como *distillation*, *intensified processes*, *continuous distillation*, *process optimization*, junto con sus sinónimos, cada una de ellas separadas por los operadores booleanos “AND” y “OR”. En la Tabla 1 se evidencian los criterios de inclusión y exclusión de la revisión.

Tabla 1

Criterios de exclusión e inclusión utilizados en la revisión sistemática

Criterio	Inclusión	Exclusión
Tipo de documento	Artículos respaldados científicamente	Artículos de opinión y documentación extraída de fuentes no confiables
Actualidad	Documentos comprendidos entre 2020 a la actualidad	Información previa al año 2020 (a excepción si son relevantes para el proceso)
Idioma	Inglés y/o español	Artículos en idiomas que no sean posible su comprensión o traducción confiable

Indagación	Documento que hable de intensificación de procesos y destilación continua en el título, <i>abstract</i> y palabras clave	Documento que no incluya ni intensificación de procesos ni destilación continua en su título, <i>abstract</i> y palabras clave
------------	--	--

2.2 Organización de documentos y análisis bibliométrico

Después de aplicar los criterios de inclusión directamente en los motores de búsqueda, los conjuntos de datos obtenidos se exportaron en formato CSV para su posterior procesamiento en Microsoft Excel. Allí se unificaron los resultados obtenidos de todas las ecuaciones de búsqueda y se eliminaron los registros duplicados. Adicionalmente, se aplicó un filtro específico para incluir únicamente documentos catalogados como artículos científicos, excluyendo capítulos de libros, revisiones bibliográficas (*reviews*), editoriales y otros tipos de documentos. A continuación, se realizó un cribado manual, en el cual se analizaron elementos claves como el título, el resumen y las palabras clave de cada artículo, excluyendo aquellos que no se relacionan directamente con el objetivo principal de la investigación. Posteriormente, se exportó la base de datos a la herramienta *Bibliometrix*, un software gratuito que permite el análisis estadístico y bibliométrico (López *et al.*, 2024). En este punto se realizó la última depuración apoyada en las herramientas de inteligencia artificial integradas en el software. Como resultado, se identificaron 77 artículos que cumplían de forma íntegra con los criterios establecidos, destinados a la lectura completa con respectivo análisis bibliométrico y bibliográfico.

2.3 Identificación de avances y desafíos

Después de obtener la base de datos final, se identificaron distintas tecnologías utilizadas continuamente, así como aquellas emergentes centradas en la intensificación de procesos. La clasificación se estructuró considerando múltiples criterios técnicos, tales como el tipo de intensificación implementada, la configuración específica del sistema, el tipo de mezcla tratada y

los indicadores de rendimiento reportados (reducción del TAC, ahorro energético, disminución de emisiones de CO₂, entre otros).

Por último, se examinaron los desafíos que afrontan las tecnologías comúnmente empleadas, lo que proporcionó una base sólida para la planificación de futuras propuestas de investigación en este campo. Como complemento, se realizó un análisis TRL (Technology Readiness Levels), el cual consiste en una escala para medir el grado de madurez de una tecnología a partir de 9 niveles (ver Anexo B), desde el Nivel 1, que representa la idea básica o principios teóricos de la tecnología, hasta el Nivel 9, que indica el haber alcanzado un estado de madurez completo y es apta para uso comercial (Salazar, 2022).

3. Resultados

3.1 Ecuaciones de búsqueda: resultados protocolo PRISMA

Los resultados obtenidos a partir de las bases de datos se presentan en la Tabla 2, tras haber sido depurados conforme a los criterios establecidos en la metodología.

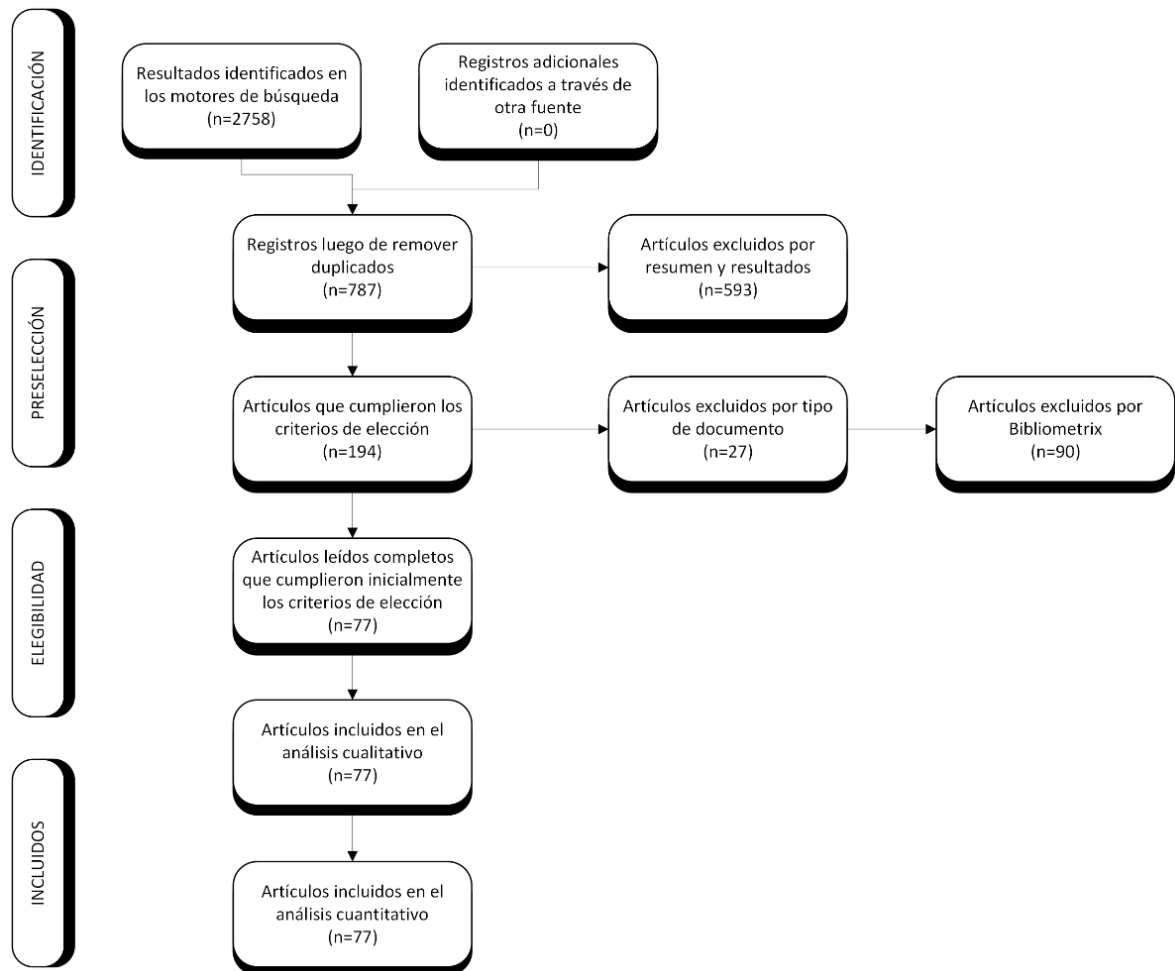
Tabla 2

Ecuaciones de búsqueda y resultados

Búsqueda inicial			
n	Ecuaciones de búsqueda	Base de datos	Resultados
1	Process intensification AND continuous distillation	Scopus WOS	366
2	Process intensification AND (continuous distillation OR distillation column) AND (energy efficiency OR process optimization)		2031
3	Process intensification AND continuous distillation AND (method OR technology OR design OR process optimization)		361
Total			2758

Figura 2

Diagrama de flujo del método PRISMA



A partir de las tres ecuaciones de búsqueda aplicadas en las bases de datos *Scopus* y *Web of Science*, se obtuvieron inicialmente 2758 artículos. Luego, se realizó una depuración preliminar en *Microsoft Excel*, donde se eliminaron los artículos duplicados, dejando un total de 787 registros únicos. Posteriormente, se aplicó un filtro más específico basado en el título, resumen y palabras clave, lo que permitió excluir 593 artículos que no se ajustaban al objetivo del estudio. Con esto, la base de datos quedó conformada por 194 artículos, los cuales fueron exportados a la herramienta *Bibliometrix*. Allí, a través del análisis temático realizado con esta herramienta, y apoyado en la inteligencia artificial que integra, se sugirió eliminar aquellos artículos cuya temática principal se

alejaba del enfoque de la investigación. Finalmente, se seleccionaron 77 artículos que cumplieron con los criterios establecidos y que pasaron a la etapa de lectura a texto completo. Los resultados al aplicar el protocolo PRISMA se presentan en la Figura 2.

3.2 Análisis bibliométrico

Con los documentos seleccionados en la etapa final, se construyó una base de datos definitiva que sirvió como punto de partida para el análisis bibliométrico. Esta base fue consolidada a partir de la opción de crear listas de documentos con *Scopus*, complementada con el uso de la herramienta *Bibliometrix*, que permitió extraer información detallada de cada publicación. Entre los datos recopilados se encuentran el año de publicación, el tipo de documento, el número de citas, las palabras clave, el país de origen de la publicación, entre otros elementos relevantes para el análisis. La Tabla 3 revela que las editoriales que presentaron mayor número de artículos acorde con los objetivos de la revisión fueron *Elsevier*, *Institution of Chemical Engineers* y *John Wiley and Sons*.

Tabla 3

Número de artículos por editorial

Editoriales	Artículos publicados
Elsevier	59
Institution of Chemical Engineers	9
John Wiley and Sons	3
American Chemical Society	2
MDPI	2
Springer	1
Walter De Gruyter	1
Total	77

La distribución de los artículos según su año de publicación se presenta en la Figura 3, donde se observa un interés constante en la intensificación de procesos en destilación continua en

los últimos 5 años, teniendo un pico en el año 2022 donde se registraron 19 artículos. Es importante destacar que la cifra para el año 2025 (16 artículos) representa las publicaciones disponibles hasta la fecha de finalización de la búsqueda de esta revisión (Junio 2025), y se espera que este número se incremente a medida que el año progrese y se publiquen más estudios.

La Figura 4 presenta la distribución geográfica de los artículos incluidos en la revisión. Se destaca que China lidera con un total de 38 publicaciones, reflejando la posición del país como líder global en inversión y desarrollo tecnológico (OCDE, 2025). Esta alta concentración va de la mano con el plan de transición energética, que son medidas gubernamentales dirigidas hacia la sostenibilidad ambiental y eficiencia energética, especialmente en sectores industriales (CETP, 2022). Además, el acelerado crecimiento industrial y económico del país demanda mejoras continuas en eficiencia energética, sostenibilidad de procesos y reducción de costos operativos, aspectos directamente vinculados con la intensificación de procesos.

Figura 3

Número de publicaciones por año

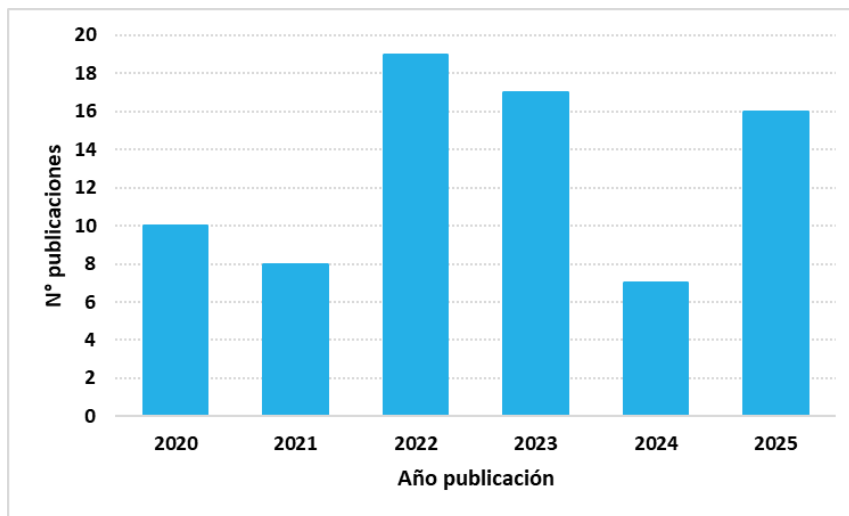
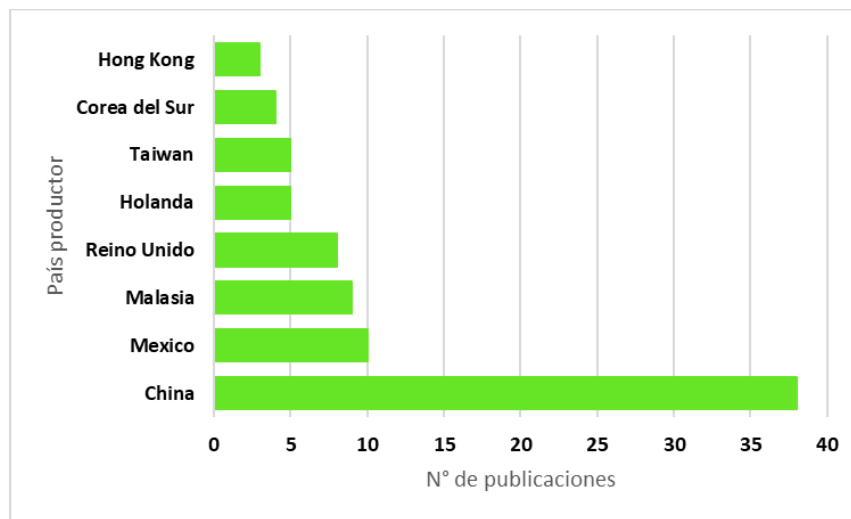


Figura 4

Países con mayor número de artículos



Por otro lado, se observa una destacada participación de México y Malasia, con 10 y 9 artículos respectivamente, seguida del Reino Unido con 8 publicaciones. Otros países relevantes son Holanda y Taiwán, ambos con 5 artículos. Estos resultados evidencian una fuerte concentración de producción científica en Asia y una creciente participación de América Latina, representada por México. La destacada presencia de México se explica, en parte, por la sólida red de colaboraciones científicas internacionales, especialmente con países de Europa, Estados Unidos y organizaciones multilaterales. A través del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), México ha participado activamente en programas como Horizonte 2020 y Horizonte Europa, y mantiene convenios bilaterales con instituciones de Estados Unidos, Francia, Alemania, Corea del Sur y China, entre otros (CONAHCYT, 2023).

En el análisis bibliométrico se pudo indagar que las revistas más destacadas en la publicación de artículos fueron *Separation and Purification Technology*, *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, *Computers and Chemical Engineering*, seguidas de *Chemistry Research Chemical Engineering Research and Process Safety and Environmental*

Protection, las dos primeras fuentes mencionadas tienen el mayor número de citas (ver Tabla 4). Estas revistas, además de contar con factores de alto impacto y estar clasificadas en los cuartiles Q1 o Q2 (*SJR - International Science Ranking*, s. f.), son reconocidas por su enfoque técnico en procesos de separación, modelado y optimización de sistemas de ingeniería química. La concentración de publicaciones en estas fuentes sugiere una estrecha relación entre la visibilidad internacional de los artículos y su publicación en revistas especializadas y de alta calidad (Bornmann & Leydesdorff, 2014). Esta tendencia también se vincula con los países que lideran la producción científica dentro del campo. Por ejemplo, China, que encabeza la lista de publicaciones en esta revisión, tiene una fuerte presencia en estas revistas, lo que refleja no solo su alto volumen de producción científica, sino también su orientación hacia publicaciones de alto impacto (*OECD*, 2025).

Tabla 4

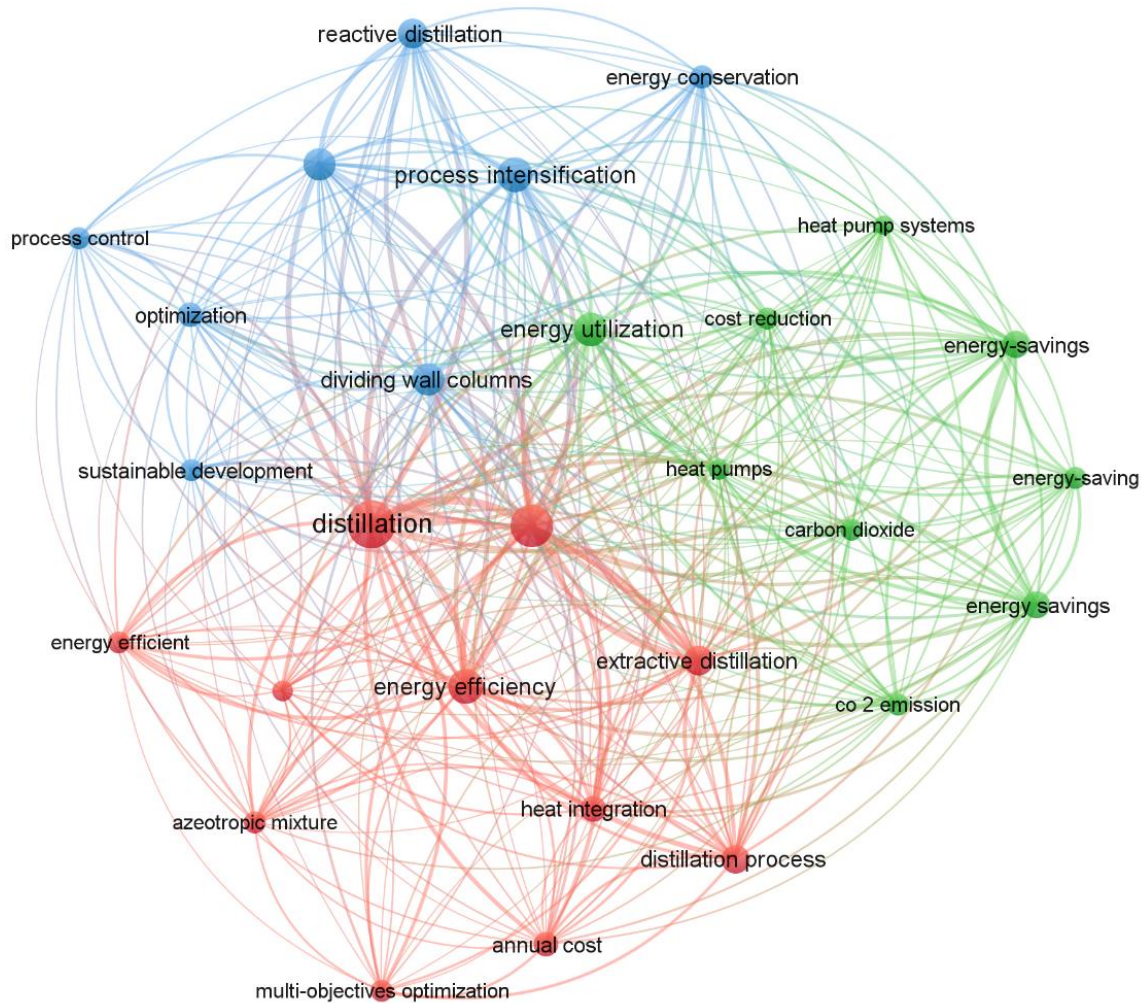
Número de artículos y citas por revista

Revista	Citas	Artículos publicados
Separation and Purification Technology	590	24
Chemical Engineering and Processing – Process Intensification	254	22
Computers and Chemical Engineering	57	2
Chemical Engineering Research and Design	41	6
Process Safety and Environmental Protection	23	3

Finalmente, se construyó una red de co-ocurrencia de palabras clave. Esta representación gráfica, generada mediante la herramienta *VOSviewer*, agrupa las palabras clave según su frecuencia conjunta en los documentos y permite visualizar clústeres temáticos predominantes. En la red se distinguen tres agrupaciones principales que representan ejes conceptuales relevantes en el campo (ver Figura 5).

Figura 5

Mapa sobre la relación entre palabras clave de los artículos seleccionados realizado en VOSviewer



El primer clúster, identificado en color rojo, está centrado en la temática de la eficiencia energética en procesos de destilación. Agrupa términos como *distillation*, *energy efficiency*, *extractive distillation*, *heat integration*, *azeotropic mixture* y *anual cost*, lo que indica un enfoque común en estrategias dirigidas a reducir el consumo energético y los costos operativos mediante configuraciones intensificadas. El segundo clúster, representado en azul, abarca el enfoque de intensificación y control de procesos, destacando palabras *process intensification*, *reactive*

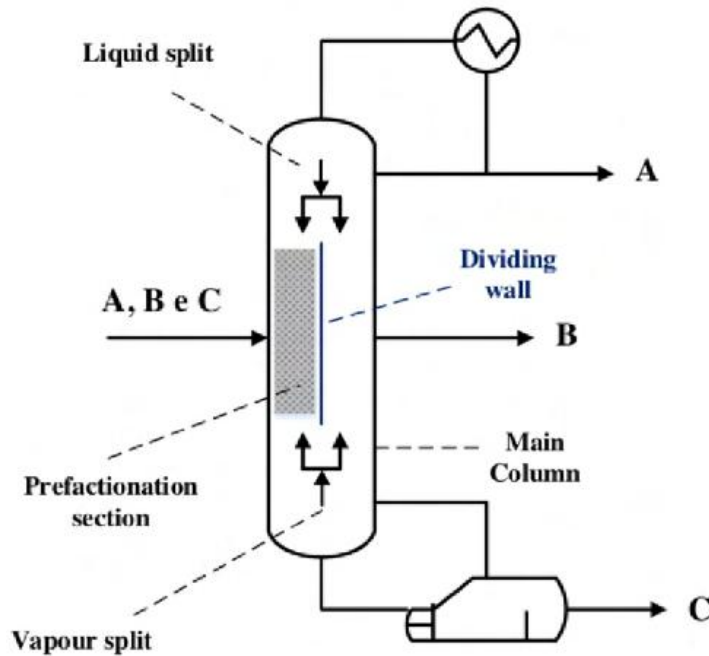
distillation, optimization, process control y sustainable development. Este grupo refleja un interés en tecnologías avanzadas que combinan múltiples operaciones en un solo equipo para aumentar la eficiencia del sistema y reducir su huella ambiental. Por último, el clúster verde agrupa términos como *energy savings, carbon dioxide, co2 emission, heat pumps y cost reduction, cost reduction*, y está asociado con enfoques orientados a la sostenibilidad, mitigación de emisiones y uso de tecnologías energéticamente eficientes. El nodo central *distillation* actúa como el eje articulador de los tres clústeres, lo que evidencia que este proceso sigue siendo el núcleo técnico y conceptual en torno al cual se organizan las estrategias de intensificación, optimización energética y sostenibilidad. Asimismo, términos como *energy utilization y process intensification* conectan distintas áreas temáticas, reflejando la interdependencia entre el rediseño de equipos, el desempeño energético y el impacto ambiental.

3.3 Metodologías de intensificación de procesos en destilación continua

La intensificación de proceso aplicada a la destilación continua ha dado lugar a un conjunto diverso de enfoques innovadores que buscan superar las limitaciones energéticas, económicas y operativas inherentes a las configuraciones convencionales, Jiang & Agrawal, (2019). Estos enfoques abarcan desde la integración funcional de la reacción química y la separación en una sola unidad operativa, hasta la reconfiguración física de las columnas mediante el uso de tecnologías avanzadas. Los ejemplos incluyen las columnas de pared dividida (DWC), las cuales consisten en una columna que posee una pared interna que divide parcialmente el equipo, permitiendo realizar separaciones simultáneas (Figura 6), o el acoplamiento térmico entre diferentes columnas (Bhargava & Sharma, 2019).

Figura 6

Columna de pared dividida (DWC)



Nota. Tomado de (Vazzoler, 2022)

3.3.1 Indicadores Clave para la Intensificación de Procesos en Destilación Continua

Para evaluar la intensificación de los procesos de destilación continua, es fundamental analizar el costo anual total (TAC), las emisiones de CO₂ y la eficiencia energética.; Estos parámetros están estrechamente relacionados con los objetivos centrales de la PI. Se ha demostrado que la PI permite reducir los costos de capital hasta en un 60 % y disminuir el consumo de energía en más del 70 %, y, con ello, bajar considerablemente los costos operativos. Además, mejora la calidad del producto al reducir las impurezas en un 99 % y aumenta la eficiencia del rendimiento hasta alcanzar un 93 % por pasada. Estos beneficios no solo minimizan el impacto ambiental al reducir emisiones y el uso de materiales, sino que también hacen que los sistemas de destilación sean más compactos, rentables y sostenibles. Por lo tanto, la evaluación del TAC, las emisiones de CO₂ y la eficiencia energética es esencial para cuantificar los beneficios de la PI y garantizar el

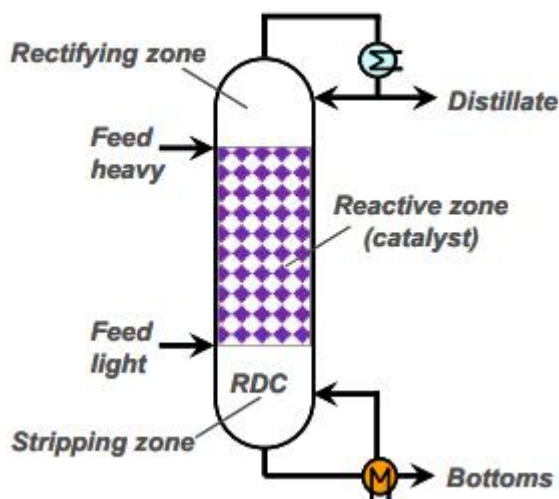
desarrollo de prácticas industriales económicamente viables y ambientalmente (Doble *et al.*, 2010).

3.3.2 Destilación Reactiva

La destilación reactiva (DR) es una tecnología que combina en una sola unidad operativa, como se ve en la Figura 7, la reacción química y la separación por destilación, lo cual permite convertir reactivos y separar simultáneamente los productos en procesos limitados por el equilibrio (Tsatse *et al.*, 2022). Esta integración no solo reduce el número de equipos y etapas intermedias, sino que también mejora el aprovechamiento energético del sistema y favorece la conversión global.

Figura 7

Esquema básico de Destilación Reactiva



Nota. Adaptado de (Kiss, 2019)

La DR se ha posicionado como una de las estrategias más exitosas y ampliamente exploradas en el campo de la intensificación de procesos químicos (Barrientos *et al.*, 2023). A lo largo de la última década, la DR ha evolucionado notablemente desde esquemas básicos hasta

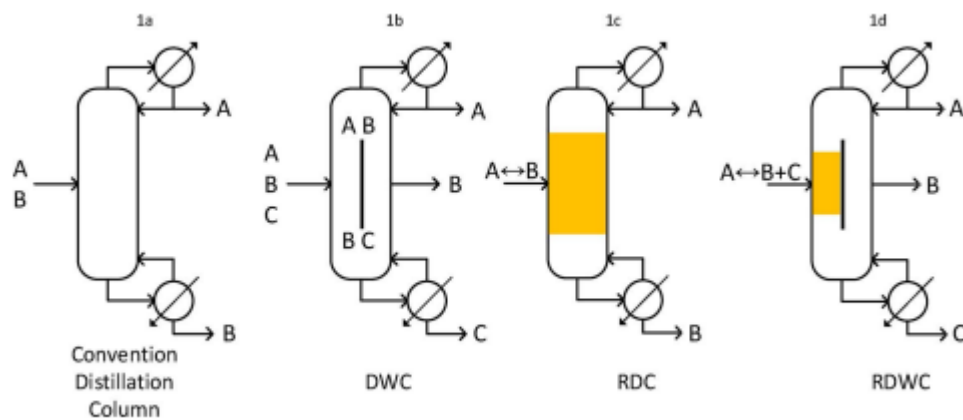
configuraciones altamente integradas; entre las implementaciones más estudiadas y utilizadas se encuentran las columnas de pared dividida (DWC) y los sistemas de destilación reactiva con acoplamiento térmico, (Kiss *et al.*, 2019).

3.3.2.1 Integración de destilación reactiva y columnas de pared divisoria: estrategias de intensificación

La columna de pared divisoria reactiva (RDWC) es un nivel superior de intensificación, al incorporar también una reacción química dentro del mismo equipo, lo que ofrece un enorme potencial para maximizar la eficiencia; sin embargo, a pesar de su demostrada viabilidad en simulaciones, el diseño complejo ha sido el principal obstáculo para su adopción escala comercial (Weinfeld *et al.*, 2018). La Figura 8 se muestra diferentes configuraciones analizadas.

Figura 8

(a) Convencional, (b) con pared divisoria, (c) reactiva y (d) columna de destilación reactiva con pared divisoria, mostradas en orden de creciente integración para procesos de separación y reacción. Los componentes A, B y C son compuestos genéricos ordenados



Nota. Tomado de (Weinfeld y otros, 2018)

El trabajo de Ramadhan & Muthia, (2025) ha comparado tres configuraciones para la producción de ETER dimetílico (DME) a partir de metanol: convencional (reactor seguido de dos

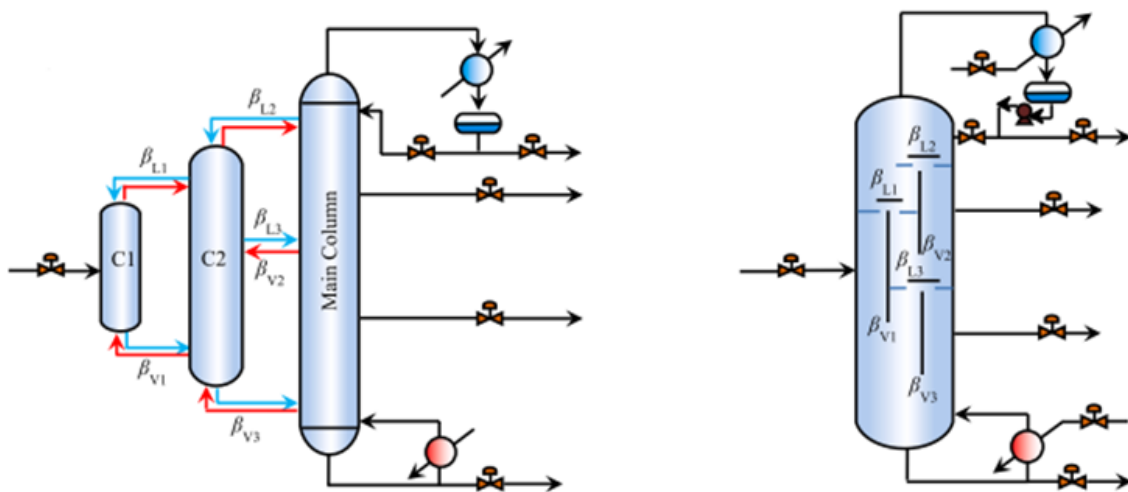
columnas de destilación); columna de DR; y esquema híbrido DR en una columna de pared divisora. Entre las tres configuraciones, la que incorporó una columna DWC fue la más eficiente, debido a que tuvo una reducción del 12.7 % en el TAC, un ahorro energético del 18.8 % y una disminución del 11.1 % en las emisiones del CO₂ respecto al proceso base. En este contexto, Devaraja & Kiss, (2022) estudiaron la síntesis de etanolaminas mediante una columna DR, alcanzando una conversión del 99.4 % del óxido de etileno y una alta selectividad hacia la monoetanolamina; sin embargo la integración posterior de una columna de pared divisora (DWC) permitió reducciones del 23.5 % en el consumo energético, 29.9 % en las emisiones de CO₂ y 31.3 % en el costo anual total (TAC). Así mismo, uno de los enfoques más efectivos para reducir el consumo energético en la producción de acetato de isopropilo fue propuesto por Gao *et al.*, (2022), evaluando tres configuraciones intensificadas de destilación reactiva: convencional (CRD), uno asistido por bomba de calor (RD-HP), y otro que integraba una columna de pared divisoria (RD-DWC). La alternativa más eficiente fue (RD-DWC), que logró una reducción del 21.31 % en el TAC y del 20.17 % en las emisiones del CO₂ frente al caso base. Además de alcanzar la mayor eficiencia termodinámica total del sistema (10.57 %). En este último trabajo, la alternativa con bomba de calor también presentó mejoras, pero su elevado costo de capital redujo su atractivo.

También existen variantes del diseño DWC para abordar procesos de separación más complejos. Por ejemplo, Wang *et al.*, (2025) compararon cuatro configuraciones para purificar una mezcla cuaternaria de clorosilanos y valorizar el subproducto diclorosilano (DCS) mediante una reacción de desproporción (una misma especie química se oxida y se reduce simultáneamente). En este caso, dos moléculas de DCS en una de triclorosilano (TCS) y una de silano (SiH₄) lo cual permite cerrar el ciclo del proceso y maximizar la recuperación de productos valiosos. El estudio evaluó un tren de columnas con integración térmica (caso base) y tres diseños de pared divisora

(Kaibel, Agrawal y Sargent). La opción más eficiente fue la columna *Sargent DWC*, que con sus tres divisores internos permite realizar el trabajo de tres columnas en una sola unidad, reduciendo el remezclado y maximizando la eficiencia térmica. Este diseño logró con una reducción del 24.3 % en el TAC y un ahorro energético del 45.26 % frente al proceso base. La Figura 9 ilustra este proceso de desproporción acoplada a una DWC.

Figura 9

DWC de Sargent junto con sus arreglos equivalentes con acoplamiento térmico.



Tomado de , Wang *et al.*, (2025)

Otros trabajos son el de Chen *et al.*, (2023), donde demostraron que una columna RDWC (producción de acetato de etilo y de amilo) permite el acoplamiento térmico directo entre las etapas de reacción y separación, reutilizando el calor generado en la reacción para facilitar la purificación de los productos, eliminando la necesidad de equipos intermedios, lo que reduce tanto los costos de capital como los operativos. Además, exponen que esta configuración reduce las pérdidas por irreversibilidad, mejora la eficiencia energética y contribuye a una disminución significativa en el consumo de energía y en las emisiones asociadas. Sin embargo Gor *et al.*, (2020) exponen que la

DR es superior en la producción de éter dimetílico, debido a la mayor simplicidad constructiva y operativa, ya que la DR consiste en una única columna con una sola zona catalítica, sin necesidad de divisores internos ni múltiples secciones funcionales; además, la columna DR puede operar con un menor diámetro y una carga térmica más baja, logrando la misma conversión (99.9 %) que una RDWC con un menor requerimiento energético. La Tabla 5 resume los casos analizados.

Tabla 5

Síntesis de resultados clave en destilación reactiva con DWC

<i>Proceso químico</i>	<i>Tecnología Específica</i>	<i>TAC [M\$/año]</i>	<i>Ahorro Energético [%]</i>	<i>Reducción de CO₂ [%]</i>	<i>Referencia</i>
Purificación de Silano (TCS)	DWC tipo Sargent	0.821	45.3	No reportado	Wang <i>et al.</i> , (2025)
Producción de Éter Dimetílico (DME)	Reactor convencional + DWC para separación	1.60	18.8	11.1	Ramadhan & Muthia, (2025)
Coproducción de Acetatos	Columna de Pared Divisora Reactiva (RDWC)	0.264	74.5 ⁽¹⁾	42.5	Chen <i>et al.</i> , (2023)
Producción de Etanolaminas	Destilación Reactiva (RD)+Columna de pared Divisoria (DWC)	1426k\$ (-31.3%)	23.5 ⁽²⁾	29.9	Devaraja & Kiss, (2022)
Producción de Acetato de Isopropilo	Columna de Pared Divisoria Reactiva (RD-DWC)	0.788	10.6 ⁽¹⁾	20.2	Gao <i>et al.</i> , (2022)

Nota. (1) El valor reportado corresponde a una mejora en la eficiencia termodinámica o exérgica, no a una reducción directa del consumo de energía del rehervidor. (2) El ahorro energético corresponde únicamente a la sección de separación DWC, no al proceso global.

3.3.2.2 Acoplamiento térmico

La integración térmica aplicada a procesos de RD constituye una de las estrategias más versátiles y adaptables dentro del paradigma de intensificación de procesos. En lugar de diseñar sistemas desde cero, muchos autores parten de configuraciones reactivas ya establecidas y

exploran mecanismos de recuperación energética que permiten reducir el consumo energético y el impacto ambiental, sin comprometer la calidad del producto ni la estabilidad operativa.

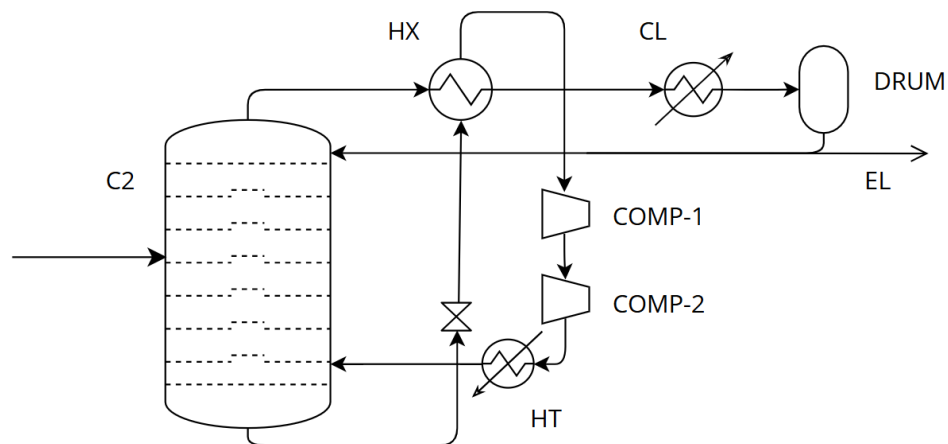
El trabajo de Sánchez-Gómez *et al.*, (2025) propone una columna SSRDS (destilación reactiva con corriente lateral) para la valorización de glicerol, la cual logró reducir en un 65 % la intensidad energética y en un 19.6 % el TAC, al evitar tanto el sobrecalentamiento del producto como su degradación térmica. Así mismo, Teh *et al.*, (2025) plantearon que, en sistemas con integración de calor entre columnas, la estrategia de optimización debe priorizar la reducción del requerimiento de vapor en la columna operada a alta presión en lugar del sistema completo, ya que esto permite una recuperación de calor más efectiva. Este cambio en la filosofía de optimización produjo un ahorro energético del 27.6 %. En el caso de Šulgan *et al.*, (2023), integraron bombas de calor de recompresión mecánica de vapor (MVRHP) en un proceso de DR, logrando eliminar completamente el consumo de vapor y reducir las emisiones de CO₂ en un 85 %, siempre que la fuente de electricidad sea renovable; el mecanismo opera desviando el vapor generado en el tope de la columna (normalmente sería condensado) hacia un compresor para aumentar su temperatura de condensación arriba de la temperatura en el fondo de la columna, siendo luego redirigido al rehervidor, donde transfiere su calor latente para hervir el líquido de fondo condensarse.

Otro recurso explorado ha sido la integración de condensadores intermedios (ICS). Lee *et al.*, (2022) demostraron que el uso de uno o dos ICS no solo mejoran la eficiencia térmica, al permitir el uso de refrigerantes más económicos, sino que también reduce el TAC en más de 40 %. Por otra lado, Mondal *et al.*, (2022) proponen una columna de destilación reactiva térmicamente acoplada (TCRD), donde el calor de una sección reactiva se reutiliza internamente para disminuir la carga del rehervidor, superando el umbral de sostenibilidad energética; este umbral se define mediante indicadores como el ratio de energía neta (NER), que compara la energía a obtener por

producto (biocombustible) con la energía total consumida en su producción. Un NER superior a 1, como el obtenido en el estudio (1.79), indica que el proceso es un generador neto de energía (Collet *et al.*, 2014). De otra parte, Lee *et al.*, (2021) exponen el acoplamiento térmico de dos columnas, eliminando el condensador de la primera, de tipo reactiva, y dirigiendo directamente su vapor hacia la segunda columna; esta técnica aplica el principio de doble efecto: la primera columna opera a una presión más elevada, incrementando la temperatura su tope para ser una fuente térmica adecuada que alimenta el rehervidor de la segunda columna, que trabaja a menor presión.

Figura 10

Esquema conceptual de técnica *Bottom Flash*



Nota. Adaptado de (Shrikhande *et al.*, 2020)

Finalmente, Shrikhande *et al.*, (2020) muestran que la estrategia más efectiva es una combinación de *bottom flash* (BF) aplicada en dos columnas del proceso. La técnica (Figura 10) consiste en desviar una fracción del líquido caliente del fondo de una columna y someterlo a una expansión súbita mediante una válvula de estrangulamiento, lo que genera una vaporización parcial de la corriente por efecto de la caída de presión. La mezcla bifásica resultante puede

utilizarse para precalentar otra corriente del proceso a través de un intercambiador de calor, o bien el vapor generado puede ser recomprimido. Una vez comprimido, este vapor alcanza una presión y temperatura suficiente para ser reinyectado como fuente de calor en la misma columna o en una columna adyacente, disminuyendo así la carga térmica impuesta al rehervidor principal. La Tabla 6 compila los principales resultados reportados.

Tabla 6

Síntesis de resultados clave en destilación reactiva con acoplamiento térmico

<i>Proceso químico</i>	<i>Tecnología específica</i>	<i>TAC [%]</i>	<i>Ahorro energético [%]</i>	<i>Referencia</i>
Propilenglicol a partir de glicerol	SSRDS (DR con corriente lateral)	-19.6	-65	Sánchez-Gómez <i>et al.</i> , (2025)
Sistema teórico modelo (LLK → LK+ HHK)	TCRD con integración térmica (HI)	No reportado	-27.6	Teh <i>et al.</i> , (2025)
Esterificación Etanol +Ácido Acético	RDS + MVRHP (1 o 2 bombas de calor)	≈ Sin cambio	-100 (vapor eliminado)	Šulgan <i>et al.</i> , (2023)
Producción de Silano (TCS)	DR con 2 condensadores intermedios	-44	Reducción del refrigerante costoso	Lee <i>et al.</i> , 2022)
Biodiesel a partir de aceite de algas	TRCD con recuperación interna de calor	-3.7	-14	Mondal <i>et al.</i> , 2022)
Producción de difenil carbonato	Híbrido TCD + Doble efecto	No reportado	-34	Lee <i>et al.</i> , 2021)
Levulinato de etilo	DR + Bottom Flash en dos columnas	-35.5	-61.2 (calor)/ -40.9 (frío)	Shrikhande <i>et al.</i> , 2020)

En otro contexto, diversos enfoques metodológicos han sido desarrollados para mejorar el diseño, análisis y optimización de sistemas de destilación reactiva, cada uno abordando un reto específico dentro del proceso. Muthia & Kiss, (2023) proponen una herramienta de evaluación temprana basada en parámetros fisicoquímicos; Saleem *et al.*, (2023) se centran en el rediseño físico de la columna a través del *holdup*; Zhang *et al.*, (2025) comparan configuraciones complejas para minimizar el costo; y Ersingün & Aldemir, (2024) utilizan la estadística para maximizar la producción la producción de un sistema ya definido. Esta diversidad metodológica queda sintetizada en la Tabla 7 y se detalla con mayor profundidad en el *Anexo C*, donde se especifican las variables manipuladas, los indicadores optimizados y el tipo de configuración al que se aplican.

Tabla 7

Comparación de Metodologías de Diseño y optimización en Destilación Reactiva

Referencia	Objetivo Principal de la Metodología	Variables de Diseño (Inputs)	Variables Calculadas
(Muthia & Kiss, 2023)	Desarrollar una herramienta de cribado rápido para evaluar la viabilidad de la DR.	<ul style="list-style-type: none"> • Volatilidad Relativa (α) • Cte. de Equilibrio (K_{eq}) • Número de Damköhler (Da) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relación de Reflujo (RR) • Número de Etapas teóricas (NTS)
(Saleem <i>et al.</i> , 2023)	Rediseñar el dimensionamiento de columnas de DR para reacciones lentas.	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de retención reactiva • Altura del vertedero • Diámetro de columna 	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro de columna • Carga del rehervidor (kW) • Costo de capital (CAPEX)
(Zhang <i>et al.</i> , 2025)	Comparar diferentes configuraciones de DR para reducir el costo de refrigeración	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de configuración (RD-IC, RD-PS, RD-MC) • Parámetros estructurales (NTS, NF) • Parámetros operativos (RR) 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía (kW) • Emisiones de CO2 • Costo de capital (CAPEX) • Costo de Operación (OPEX)
(Ersingün & Aldemir, 2024)	Optimizar las condiciones de operación de una columna de DR existente.	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal de alimentación • Relación de reflujo • Temperatura de alimentación 	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de producto (kmol/h) • Pureza del producto

3.3.2.3 Aplicaciones avanzadas y funcionales de la destilación reactiva

En la frontera actual del diseño de procesos, varios estudios recientes demuestran que la DR puede operar como una herramienta multifuncional, capaz de integrar funcionalidades complementarias — recuperación de solventes, ruptura de azeótropos o reducción de trenes de equipos — dentro de una misma unidad. Esta flexibilidad metodológica ha habilitado estrategias innovadoras particularmente relevantes en el contexto de las biorrefinerías, la ingeniería de productos intermedios, y la economía circular. La Tabla 8 reúne los resultados principales.

Tabla 8

Síntesis de resultados en aplicaciones avanzadas

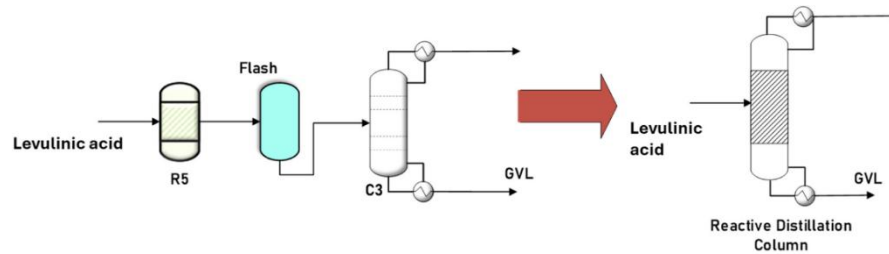
Proceso Químico	Tecnología específica	Reducción del TAC (%)	Ahorro energético (%)	Reducción CO2 (%)	Referencia
Producción de gamma-valerolactona (GVL)	DR intensificada y optimizada multiobjetivo	57	63	55	Huerta-Rosas <i>et al.</i> , (2025)
Purificación de ETBE (aditivo para gasolina)	DR-Extractiva híbrida (RED)	22	32	32	Kong <i>et al.</i> , (2024)
Purificación de Biobutanol (fermentación IBE)	DR para ruptura de azeótropos + control dinámico	26.7	30	≥50 (valor estimado)	Oksal & Kaymak, (2023)

Uno de los enfoques más disruptivos es el que propone la DR como alternativa a trenes convencionales completos de producción y purificación. Huerta-Rosas *et al.*, (2025) muestran que una sola columna intensificada (Figura 11) reemplaza la secuencia tradicional de reactor PFR, separador flash y columna de destilación para la síntesis de gamma-valerolactona (GVL) desde ácido levulínico. Este rediseño reduce el TAC en un 57 % y el consumo energético en un 63 %, al tiempo que incrementa en un 25 % la producción final de GVL. La integración de reacción y

separación se complementa con una optimización multiobjetivo que balancea simultáneamente rendimiento económico y ecológico. El resultado es una configuración que minimiza recursos y reconfigura funcionalmente la operación al maximizar productividad en un solo paso.

Figura 11

Producción de GVL



Nota. Adaptado de (Huerta-Rosas *et al.*, 2025)

Además del caso de GVL, Kong *et al.*, (2024) diseñaron una columna híbrida para la purificación de ETBE, donde la DR genera el solvente extractivo in situ. Además, Oksal & Kaymak, (2023) propusieron una columna reactiva capaz de transformar agua residual en un subproducto útil durante la purificación de biobutanol. Sin embargo, la implementación industrial de configuraciones altamente integradas presenta desafíos que limitan su adopción generalizada: complejidad en el diseño y operación de equipos, difícil control dinámico por su sensibilidad a las perturbaciones, y limitaciones por cinética lenta.

3.3.2.3 Tecnologías Emergentes y Combinaciones Avanzadas

Las tecnologías emergentes y combinaciones avanzadas han transformado la destilación reactiva, incorporando diseños como la destilación oscilante por presión (PSD), las columnas térmicamente acopladas (TCPD), la destilación reactiva con integración interna de calor (R-HIDiC) y los acoplamientos con pervaporación (PV). Estas innovaciones combinan transferencia de calor, separación selectiva y diseño estructural avanzado para superar las limitaciones de

eficiencia de los sistemas convencionales. La Tabla 9 sintetiza los principales resultados obtenidos, facilitando su comparación.

Tabla 9

Síntesis de resultados de tecnologías emergentes y combinaciones avanzadas

Proceso químico	Tecnología específica	TAC (US\$/año)	Ahorro energético	Producción de CO2 (kg/h)	Referencia
Producción de Trioxano	Destilación reactiva (RD)+Destilación por Oscilación de presión	No calculado	18.35%	No calculado	Pei y otros, 2022
Recuperación de Tetrahidrofurano (THF) Y etanol	Destilación Reactiva (RD) + Destilación por Oscilación de Presión (PSD) de alta-baja presión + Integración de Calor (HI)	985.683 (-54.80%)	Eficiencia energética (n):19.25%	1.512,0 (-59.11)	(Yang <i>et al.</i> ,2020)
Producción de 1,3-dioxolano (DOL)	RD + PSD optimizado con MOGA y control avanzado	(-17.3%)	(-16.8%)	No reportado	Pan <i>et al.</i> , (2020)
Producción de TAME (éter tert-amil metílico)	RHIDiC + Pervaporación (PV) en un arreglo serie-paralelo con integración de calor y reciclaje.	\$1.73 millones (-57%)	(+57%)	No Reportado	(Babaie & Nasr Esfahany, 2020)

De los trabajos reportados, el más prometedor es presentado por Babaie & Nasr Esfahany, (2020), quienes rediseñaron el proceso convencional de producción de TAME mediante una configuración híbrida altamente integrada. En lugar de la secuencia tradicional RD-PSD, los autores proponen sustituir la unidad de oscilación de presión por una de pervaporación (PV), basada en membranas selectivas, y transformar la columna reactiva en una R-HIDiC, capaz de transferir calor internamente entre secciones de distinta presión. Esta configuración fue optimizada mediante un arreglo serie-paralelo con recirculación en la PV, y una integración térmica adicional que reutiliza el calor residual de la R-HIDiC para precalentar las corrientes de entrada de los

módulos de membranas. El resultado fue una arquitectura compacta, energéticamente eficiente y económicamente favorable, con mejoras significativas frente al esquema base.

3.3.3 Destilación extractiva

La destilación Extractiva (ED) es una técnica de separación especializada que se utiliza para purificar mezclas cuyos componentes tienen puntos de ebullición muy cercanos o que forman azeótropos, los cuales no pueden ser separados por destilación convencional. El proceso funciona introduciendo un tercer componente, llamado disolvente o agente de arrastre, que es poco volátil y tiene una alta afinidad selectiva por uno de los componentes de la mezcla original. El agente de arrastre altera las volatilidades relativas de los componentes originales, rompiendo el azeótropo y facilitando su separación en una columna de destilación (Rui *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021).

3.3.3.3 Integración de destilación extractiva y columnas de pared divisoria: estrategias de integración.

La integración de la destilación extractiva en una columna de pared divisoria (EDWC) combina la flexibilidad de la destilación extractiva con la alta eficiencia energética de la DWC, permitiendo realizar la separación y la recuperación del disolvente en una sola unidad compacta. La importancia de esta integración radica en su capacidad para lograr reducciones en el TAC, el consumo de energía y las emisiones de CO₂ (A. Yang *et al.*, 2023).

Una de las estrategias más prometedoras lo muestran de He *et al.*, (2022). Los autores no solo comparan la EDWC frente a esquemas tradicionales, sino que, además, proponen su hibridación con una bomba de calor, dando lugar a la configuración HP-EDWC. Este diseño combina las ventajas estructurales de la pared divisoria con la recuperación energética,

consolidándose como una alternativa altamente eficiente y sostenibles frente a otras tecnologías. Otros estudios prometedores son los de Zhang et al., (2021), que incorporan líquidos iónicos en una EDWC para separar mezclas ternarias azeotrópicas; Li et al., (2021), quienes desarrollaron una EDWC que emplea una mezcla de disolventes convencionales y iónicos, destacando el rol de la pared divisoria en la compactación del sistema y la reducción de etapas; Yang et al., (2023), que presentan una EDWC con rehervidor lateral; Mantingh & Kiss, (2021), los cuales proponen reemplazar dos columnas tradicionales de purificación del proceso BASF por una DWC asistida por compresión mecánica de vapor; y Rui et al., (2023), quienes concluyen que, si bien la EDWC aporta ventajas estructurales, su rendimiento depende fuertemente de las características específicas del sistema de separación. La tabla 10 muestra los principales resultados obtenidos y en el *Anexo D* se presenta una exposición detallada de los trabajos mencionados.

Tabla 10

Síntesis de resultados clave en destilación extractiva con DWC

<i>Proceso químico</i>	<i>Tecnología Específica</i>	<i>TAC</i>	<i>Ahorro Energético</i>	<i>Emisiones CO₂</i>	<i>Referencia</i>
Separación de MeOH/TMS	Columna de Pared Divisoria Extractiva asistida por Bomba de Calor (HP-EDWC)	0.903 M\$/año (-8.3)	+88.8%	501.07 kg/h (-26.85%)	He et al., (2022)
Separación de MeOH/MEK/TBA	Columna de Pared Divisoria Extractiva con Líquido Iónico (EDWC + [BMIM][NTF ₂])	1.6269 M\$/año (-22.19%)	No dice	2106.13 kg/h (-7.7%)	Zhang et al., (2021)
Separación de MeOH/EtOH/Agua	Columna de Pared Divisoria Extractiva con disolvente mixto (70% EG + 30% [EMIM][DCA]) (EDWC-TED)	1.558 M\$/año (-7.81%)	+82.86% (eficiencia termodinámica)	1585.21 kg/h (-4.52%)	Li et al. (2021)

Extracción de 1,3-butadieno	Columna de Pared Divisoria asistida por Bomba de Calor (DWC-MVR)	1.303 M\$/año (-29.9%)	-54.8%	No reportado (-17%)	Mantingh y Kiss, (2021)
Recuperación de EtAc/MeOH desde aguas residuales	Columna Doble de Pared Divisoria con Rehervidor Lateral (DEDWC-SR)	0.474 M\$/año (-20.20%)	+54.71%	0.368 t/h (-33.81%)	Yang <i>et al.</i> , (2023)
Separación de IPA/1,4-Dioxano/Agua	Columna de Pared Divisoria Extractiva basada en Destilación Indirecta con integración EDC+ERC (IED-DWC)	1.147 M\$/año (-0.45%)	+ 9.89%,	898.3 kg/h (-1.73%)	Rui <i>et al.</i> , (2023)

3.3.3.4 Destilación extractiva con acoplamiento térmico

Entre las herramientas más eficaces para el acoplamiento térmico destaca el uso de bombas de calor (HP), cuya implementación ha demostrado reducciones superiores al 20 % en el TAC y hasta un 50 % en la demanda energética externa. En los estudios de Shi *et al.*, (2022) y Jian *et al.*, (2022), esta tecnología permite reutilizar el calor de la condensación en el rehervidor, cerrando el ciclo térmico de forma autónoma. Una evolución de este principio se encuentra en el acoplamiento vapor-líquido (VLC), propuesto por Duan & Li, (2021), donde el vapor del tope de una columna se canaliza directamente para vaporizar el fondo de otra, lo que elimina la necesidad de equipos de intercambio térmico y eleva la eficiencia global. Así mismo, Rui *et al.*, (2023) reportan reducciones conjuntas de TAC y generación de entropía (en un 28.8%) al acoplar adecuadamente las corrientes de alimentación y fondo. En este mismo enfoque, Li *et al.*, (2021) integran rehervidores intermedios (IR) que permiten suministrar calor de manera distribuida y a temperaturas más bajas, mejorando la eficiencia exegética hasta en un 70%.

Por otra parte, Kong *et al.*, (2022) advierten algunas limitaciones: identificaron escenarios donde configuraciones intensificadas incrementan el consumo energético hasta en un 55 % respecto al proceso base, debido a flujos de interconexión mal gestionados y elevados caudales internos, que anulan los beneficios esperados de la intensificación. La Tabla 11 resume los resultados cuantitativos y cualitativos más relevantes, destacando la tecnología aplicada, los impactos obtenidos y las métricas empleadas para su evaluación.

Tabla 11

Síntesis de resultados de acoplamiento térmico en destilación extractiva

Proceso Químico	Tecnología de intensificación aplicada	TAC [%]	Ahorro energético [%]	Mejora Ambiental / Termodinámica	Referencia
Separación EA/Etanol	Acoplamiento Vapor-Líquido + Compresor (VLC-C)	55.2	60.2	↓66.1% CO ₂	(Duan & Li, 2021)
Separación ACN/IPA/Agua	Integración de Calor + Rehervidores Intermedios (PHI-IHI2)	36.2	48.5	↑ 70.7% Eficiencia Exergía	(Li <i>et al.</i> , 2021)
Separación EAC/IPOH/Agua	Columna Combinada + Bomba de Calor (HP-CTE)	37.8	55.4	↓54.5% Emisiones de SO ₂	(Jian <i>et al.</i> , 2022)
Separación EtOH/EtPA	Bomba de calor entre columnas (HCED-D)	21.1	<i>No reportado</i>	↓48.3% CO ₂ / ↑80.3% Eficiencia Energética	(Shi <i>et al.</i> , 2022)
Separación EA/EtOH/Agua	Ciclo orgánico de Rankine (ORC)	27.5	<i>No aplicable, genera energía</i>	ANP >10 ⁵ \$/año (Beneficio Neto)	(J. Liu <i>et al.</i> , 2022)
Separación Heptanol/Hexanol/Agua	Integración de Calor + Bomba de Calor (IPED)	10.5	49	↓49% Emisiones CO ₂	(Cheng <i>et al.</i> , 2024)

Separación de dioxano/Agua	IPA/1,4-	Integración de Calor (IED-HI)	15.4	27.4	↓28.8% Generación de Entropía	(Rui <i>et al.</i> , 2023)
Análisis de sistemas	de varios	Acoplamiento térmico / Pared divisoria (TCED/EDWC)	-15 a -19 (Aumento de Costo)	-6 a -7 (Aumento de energía)	(Análisis crítico, no de mejora)	(Kong <i>et al.</i> , 2022)

3.3.3.5 Híbridos de Destilación Reactiva-Extractiva (RED) y sus Intensificaciones

El creciente interés por integrar funciones de reacción y separación en una sola plataforma ha dado lugar al desarrollo de configuraciones híbridas de destilación reactiva-extractiva (RED. Una de las configuraciones base más eficaces es la DCRED (doble columna reactiva-extractiva), cuya superioridad frente a sistemas convencionales ha sido demostrada. Du *et al.*, (2023) reportan una reducción de casi el 60 % en el TAC y más del 60 % en emisiones de CO₂ al reemplazar una secuencia convencional de tres columnas por esta estructura. No obstante, al intentar intensificar este diseño mediante su conversión en una única columna de pared divisoria reactiva-extractiva (REDWC), los beneficios esperados no siempre se materializan: incrementos en los costos y nuevas complejidades de diseño y operación (Du *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2022).

Tabla 12

Síntesis de resultados de tecnologías híbridas

Proceso Químico	Tecnología de Intensificación Aplicada	TAC [%]	Ahorro Energético [%]	Referencia
Producción de Lactato de Etilo	RDWC + EDWC (2 columnas combinadas)	≈25 (aumento de beneficio)	77	(Tusso-Pinzón <i>et al.</i> , 2020)
Separación THF/Metanol/Agua	DCRED (Doble columna reactiva)	59.4	No reportado	(Du <i>et al.</i> , 2023)
Producción de Acetato Isopropilo	REDPV (Red + Pervaporación)	≈51 (RD) 14.5 (RED)	No aplicable	(Zhao <i>et al.</i> , 2022)

Análisis de varios sistemas RED	Acoplamiento térmico / Pared Divisoria (TC-RED/DW-RED)	Aumento de costo	-0.4 a -26.8 (Aumento de energía)	(Teh <i>et al.</i> , 2024)
Separación ternarios azeotrópicos	de RED con optimización MINLP	3.5 – 25.1	<i>No reportado</i>	(C. Liu <i>et al.</i> , 2025)
Separación EA/EtOH/Agua	REDWC + Ciclo orgánico de Rankine (ORC)	27.5	<i>No aplicable</i>	(J. Liu <i>et al.</i> , 2022)

Otros reportes abordan estrategias complementarias para el diseño y evaluación de sistemas RED, desde metodologías de síntesis estructural (Tusso-Pinzón *et al.*, 2020) hasta el acoplamiento con tecnologías emergentes como pervaporación (Zhao *et al.*, 2022) y ciclos orgánicos de Rankine (J. Liu *et al.*, 2022). La Tabla 12 resume estos hallazgos y en el *Anexo E* se exponen con mayor detalle.

4. Análisis TRL y desafíos de implementación

Como parte del análisis comparativo de las tecnologías evaluadas en esta revisión sistemática, se aplicó la metodología de niveles de madurez tecnológica (*Technology Readiness Levels*, TRL), con el propósito de estimar el grado de desarrollo alcanzado por cada configuración y su proximidad a una posible aplicación industrial (Salazar, 2022). El análisis evidenció que la mayoría de las propuestas tecnológicas se ubican en el nivel TRL 4, lo cual implica que las configuraciones han sido completamente diseñadas, optimizadas y validadas en entornos computacionales, generalmente mediante simulaciones rigurosas, estrategias de optimización multiobjetivo y, en varios casos, modelado dinámico de control. Estos resultados demuestran la viabilidad teórica y energética de los sistemas, aunque también reflejan su carácter predominantemente académico, al

no haber sido sometidos aún a pruebas experimentales o pilotos funcionales. En Tabla 13 se muestra la clasificación obtenida y la escala utilizada se encuentra en el *Anexo B*.

Tabla 13

Nivel TRL según tecnología

Tipo de tecnología	Rango TRL	Tecnología más avanzada
Destilación Reactiva (RD)	3-8	Zhang et al., (2025): Validación con datos industriales
Columnas de Pared Divisoria (DWC)	4-6	Ramadhan & Muthia, (2025): Enfoque industrial con simulación optimizada
Configuraciones Híbridas (RD-DWC, EDWC, RED)	4	Yang et al., (2025): EDWC con optimización multiobjetivo
Acoplamientos térmicos	4	Gao et al., (2022): Integración térmica en RD-HP
Híbridos avanzados (R-HIDiC, RED-PV, etc)	4	Babaie & Nasr Esfahany, (2020): Configuración híbrida con pervaporación

Las configuraciones basadas en destilación reactiva comprenden niveles de madurez que varían entre TRL 3 y 8. Aunque algunas propuestas se apoyan en datos experimentales o referencias industriales, la mayoría permanece en un estado de validación teórica con escasa proyección hacia la práctica. Las columnas de pared divisoria se posicionan de forma consistente en TRL 4. Las configuraciones híbridas, que incluyen combinaciones de todas las técnicas mencionadas, representan un grupo con una TRL de 4, con desarrollo robusto en términos de diseño computacional, aunque sin avances experimentales. Así mismo, dos propuestas altamente integradas (R-HIDiC-PV y RED-PV) fueron clasificadas en TRL 4, destacándose por su innovación, pero limitadas por pruebas experimentales o prototipos funcionales. Es a resaltar que tres estudios que alcanzan niveles superiores de madurez tecnológica. El trabajo de Huerta-Rosas et al., (2025) se sitúa en TRL 5 al incorporar datos cinéticos obtenidos en laboratorio, mientras que el diseño Ramadhan & Muthia, (2025) presenta un TRL entre 5 y 6 al basar su propuesta de

columnas DWC con antecedentes de uso industrial. El estudio de Q. Zhang et al., (2025) destaca por alcanzar un TRL 8 gracias a la validación directa mediante comparación con datos reales de una planta de producción de silano.

A pesar del rendimiento técnico favorable reportado mediante simulaciones rigurosas, se destaca la falta generalizada de validación experimental, que impide verificar el comportamiento de los sistemas bajo condiciones operativas reales. Además, muchas de las propuestas presentan una elevada complejidad operativa y de control, lo que exige esquemas avanzados de automatización. En tecnologías como la destilación reactiva, el manejo de catalizadores representa un desafío aún no resuelto, sumado a la sensibilidad de algunas propiedades termodinámicas que limitan su aplicabilidad. Finalmente, la ausencia de estudios sobre escalado, integración en plantas reales y análisis del ciclo de vida, reduce la viabilidad inmediata de muchas de las propuestas analizadas.

5. Conclusiones

La aplicación del protocolo PRISMA permitió definir con claridad los criterios de inclusión y exclusión, lo que facilitó la selección, organización y análisis riguroso de la información relevante sobre intensificación de procesos en destilación continua. Este enfoque metodológico favoreció la recopilación sistemática de datos relacionados con aspectos clave como la eficiencia energética de las tecnologías, los costos operativos, las emisiones de CO₂, así como las configuraciones emergentes y las innovaciones tecnológicas.

Se observó una tendencia creciente de investigaciones en china, representando un 49.35% del total de las publicaciones incluidas en este estudio. Además, se destaca que la editorial que

albergó la mayor cantidad de investigaciones fue Elsevier, con un total del 76.62 % de los artículos publicados. Es relevante mencionar que *Separation and Purification Technology* y *chemical Engineering and Processing- Process Intensification* fueron las revistas más destacadas en cuanto a número de publicaciones y citas, donde ambas se posicionan en los primeros cuartiles de impacto y abordan temáticas clave como eficiencia energética, diseño de procesos y sostenibilidad. Por otro lado, países como México y Malasia también tuvieron una participación significativa, lo que sugiere un creciente interés y colaboración internacional en el campo de la intensificación de procesos aplicados a la destilación continua.

Se identificó que las tecnologías de destilación, si bien han alcanzado un alto grado de sofisticación a nivel de diseño computacional, aún se encuentran en una etapa intermedia de desarrollo con escasa transición hacia etapas validación experimental. Esta situación se debe a la complejidad operativa asociada a configuraciones multifuncionales, la sensibilidad de los sistemas a perturbaciones, así como la falta de estrategias robustas de control dinámico. A esto se suman limitaciones logísticas y técnicas relacionadas con el manejo de catalizadores en procesos acoplados de reacción y separación, así como la dependencia de propiedades termodinámicas específicas que restringen la aplicabilidad de algunas soluciones. En consecuencia, se concluye que el futuro desarrollo de estas tecnologías requerirá no solo el perfeccionamiento de sus diseños actuales, sino también una mayor integración con la ingeniería aplicada, incluyendo la caracterización experimental, la evaluación de sostenibilidad y el diseño de estrategias de control que permitan viabilizar su implementación a nivel industrial.

Referencias

- Babaie, O., & Nasr Esfahany, M. (2020). Optimization and heat integration of hybrid R–HIDiC–PV process with the series–parallel arrangement of PV modules and recycle streams for TAME production. *Separation and Purification Technology*, 242, 116786.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116786>
- Barrientos, D. A., Fernandez, B., Morante, R., Rivera, H. R., Simeon, K., & Lopez, E. C. R. (2023). Recent Advances in Reactive Distillation. *ASEC 2023*, 99.
<https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15278>
- Becerra Castro, D. C., & Grijalba Ramírez, A. J. (2024). *Producción de proteína a partir de insectos para el consumo humano: Revisión sistemática del estado del arte*.
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42586>
- Becht, S., Franke, R., Geißelmann, A., & Hahn, H. (2009). An industrial view of process intensification. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(1), 329-332. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.04.012>
- Bhargava, M., & Sharma, A. P. (2019, febrero 28). *Introduction to Dividing-Wall Columns*.
<https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2019/march/introduction-dividing-wall-columns>
- Boodhoo, K., & Harvey, A. (2013). Process Intensification: An Overview of Principles and Practice. En *Process Intensification for Green Chemistry* (pp. 1-31). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118498521.ch1>
- Boraey, M. A. (2018). A Hydro-Kinematic approach for the design of compact corrugated plate interceptors for the de-oiling of produced water. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 130, 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.06.006>

Bornmann, L., & Leydesdorff, L. (2014). Scientometrics in a changing research landscape.

EMBO reports, 15(12), 1228-1232. <https://doi.org/10.15252/embr.201439608>

CETP Annual Report 2022. (2022). *Annual Report*.

Chen, Y., Zhang, Q., Liu, K., Zhang, S., Zhang, X., & Liu, H. (2023). Simulation, optimization and intensification of the process for co-production of ethyl acetate and amyl acetate by reactive distillation. *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 607-618.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.057>

Cheng, H., Wang, Y., Yang, L., Zhao, W., Zhang, Y., Li, G., Zhu, Z., Wang, Y., & Cui, P. (2024).

Mechanism analysis and performance evaluation of clean and efficient recovery of N-heptanol/N-hexanol from wastewater via extractive distillation with green mixed entrainer. *Journal of Cleaner Production*, 464, 142711.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142711>

Collet, P., Spinelli, D., Lardon, L., Hélias, A., Steyer, J.-P., & Bernard, O. (2014). Chapter 13— Life-Cycle Assessment of Microalgal-Based Biofuels. En A. Pandey, D.-J. Lee, Y. Chisti, & C. R. Soccol (Eds.), *Biofuels from Algae* (pp. 287-312). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59558-4.00013-9>

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). (2023). *Plan Nacional para la Innovación mandado en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. Gobierno de México / CONAHCYT.

Demirel, S. E., Li, J., & Hasan, M. M. F. (2017). Systematic process intensification using building blocks. *Computers & Chemical Engineering*, 105, 2-38.

<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.01.044>

- Devaraja, D., & Kiss, A. A. (2022). Novel intensified process for ethanolamines production using reactive distillation and dividing-wall column technologies. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 179, 109073. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109073>
- Doble, M., Rollins, K., & Kumar, A. (2010). *Green Chemistry and Engineering*. Academic Press.
- Du, L., Jin, S., Yang, Z., Sun, S., Yang, A., & Shen, W. (2023). An efficient multi-criteria decision making for assessing the optimization of reactive extractive distillation in terms of economy, environment and safety. *Chemical Engineering Research and Design*, 197, 838-850. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.08.033>
- Duan, C., & Li, C. (2021). Novel energy-saving methods to improve the three-column extractive distillation process for separating ethyl acetate and ethanol using furfural. *Separation and Purification Technology*, 272, 118887. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118887>
- Ersingün, D., & Aldemir, A. (2024). Design and two step process optimization of a reactive distillation column for improving production amount of ethyl acetate and water. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100117. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100117>
- Esmeria Giselle Joy C., Aviso Kathleen B., & Promentilla Michael Angelo B. (2023). Planning Models in Designing Wastewater Management Systems: A Systematic Review. *Chemical Engineering Transactions*, 103, 601-606. <https://doi.org/10.3303/CET23103101>
- Gao, X., Yang, Y., Chen, M., Cheng, Q., & Lu, K. (2022). Novel heat pump reactive distillation and dividing-wall column reactive distillation processes for synthesizing isopropyl acetate to save TAC and reduce CO₂ emissions. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 171, 108746. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108746>

- Gezae, A. (2012). Simulation of Reactive Distillation: Comparison of Equilibrium and Nonequilibrium Stage Models. *International Journal of Chemical Engineering*, 6, 1231-1239.
- Gor, N. K., Mali, N. A., & Joshi, S. S. (2020). Intensified reactive distillation configurations for production of dimethyl ether. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 149, 107824. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107824>
- He, Q., Li, Q., Tan, Y., Dong, L., & Feng, Z. (2022). Multi-objective optimization of sustainable extractive dividing-wall column process for separating methanol and trimethoxysilane azeotrope mixture. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 181, 109141. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109141>
- Hernández, M. A. P. (2024). *Revisión sistemática del estado del arte sobre los bioplásticos basados en almidón como material alternativo para la elaboración de empaques.*
- Huerta-Rosas, B., Coronel-Muñoz, M., Quiroz-Ramírez, J. J., Cáceres-Barrera, C. R., Contreras-Zarazúa, G., Segovia-Hernández, J. G., & Sánchez-Ramírez, E. (2025). Intensified alternative for sustainable gamma-valerolactone production from levulinic acid. *Chemical Engineering Research and Design*, 217, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.03.023>
- Jian, X., Li, J., Ye, Q., Yan, L., Li, X., Xie, L., & Zhang, J. (2022). Intensification and analysis of extractive distillation processes with preconcentration for separating ethyl acetate, isopropanol and water azeotropic mixtures. *Separation and Purification Technology*, 287, 120499. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120499>

- Jiang, Z., & Agrawal, R. (2019). Process intensification in multicomponent distillation: A review of recent advancements. *Chemical Engineering Research and Design*, *147*, 122-145.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.04.023>
- Kiss, A. A., Jobson, M., & Gao, X. (2019). Reactive Distillation: Stepping Up to the Next Level of Process Intensification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *58*(15), 5909-5918. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05450>
- Kong, Z. Y., Segovia-Hernández, J. G., Lee, H.-Y., & Sunarso, J. (2022). Are process-intensified extractive distillation always energetically more efficient? *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *181*, 109131.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109131>
- Kong, Z. Y., Sun, S., Ang, T., Yang, A., Ong, H. C., & Sunarso, J. (2024). A new strategy to design the purification process of ethyl tertiary butyl ether gasoline additive via hybrid extractive-reactive distillation. *Process Safety and Environmental Protection*, *192*, 643-648. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.10.058>
- Lee, H.-Y., Chen, Y.-Y., Eiamsuttitum, P., & Alcántara-Avila, J. R. (2022). Comparison of optimization methods for the design and control of reactive distillation with inter condensers. *Computers & Chemical Engineering*, *164*, 107871.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107871>
- Lee, H.-Y., Novita, F. J., & Weng, K.-C. (2021). Hybrid heat-integrated design and control for a diphenyl carbonate reactive distillation process. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *162*, 108344. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108344>
- Li, Y., Ye, Q., Wang, N., Chen, L., Zhang, H., & Xu, Y. (2021). Energy-efficient extractive distillation combined with heat-integrated and intermediate reboilers for separating

- acetonitrile/isopropanol/water mixture. *Separation and Purification Technology*, 262, 118343. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118343>
- Liu, C., Karagoz, A., Alqusair, O., Ma, Y., Xiao, X., & Li, J. (2025). Design of hybrid reactive-extractive distillation for separation of azeotropic ternary mixture using a systematic optimization framework. *Separation and Purification Technology*, 369, 132805. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132805>
- Liu, J., Yan, J., Liu, W., Kong, J., Wu, Y., Li, X., & Sun, L. (2022). Design and multi-objective optimization of reactive-extractive dividing wall column with organic Rankine cycles considering safety. *Separation and Purification Technology*, 287, 120512. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120512>
- Liu, Y., Zhai, J., Li, L., Sun, L., & Zhai, C. (2015). Heat pump assisted reactive and azeotropic distillations in dividing wall columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 95, 289-301. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.07.001>
- López, A. C. C., Marín, A. A. L., & Pérez, M. Á. de las H. (2024). Indagación, modelización y pensamiento computacional: Un análisis bibliométrico con el uso de Bibliometrix a través de Biblioshiny. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 21(1), 110201.
- Maleta, V. N., Kiss, A. A., Taran, V. M., & Maleta, B. V. (2011). Understanding process intensification in cyclic distillation systems. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 50(7), 655-664. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.04.002>
- Mantingh, J., & Kiss, A. A. (2021). Enhanced process for energy efficient extraction of 1,3-butadiene from a crude C4 cut. *Separation and Purification Technology*, 267, 118656. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118656>

- Mondal, B., Rangaiah, G. P., & Jana, A. K. (2022). Optimizing algal biodiesel production from a novel reactive distillation based unit: Reducing CO₂ emission and cost. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 176, 108948. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108948>
- Muthia, R., & Kiss, A. A. (2023). A mapping method for quick assessment of reactive distillation applicability to ternary reaction systems. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 193, 109529. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109529>
- Niño, A. M. R. (2022). *Revisión sistemática del estado del arte sobre la presencia de contaminantes emergentes en los cuerpos de agua por el uso de productos cosméticos.*
- Oksal, I. N., & Kaymak, D. B. (2023). Design and control of an energy-efficient intensified process for biobutanol purification from isopropanol-butanol-ethanol (IBE) fermentation broth. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 193, 109542. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109542>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Ramadhan, M. F., & Muthia, R. (2025). Advanced Distillation Technologies for Dimethyl Ether Production: A Comprehensive Techno-economic Evaluation. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 42(3), 505-527. <https://doi.org/10.1007/s11814-025-00387-3>

R&D spending growth slows in OECD, surges in China; government support for energy and defence R&D rises sharply. (2025, marzo 31).

<https://www.oecd.org/en/data/insights/statistical-releases/2025/03/rd-spending-growth-slows-in-oecd-surges-in-china-government-support-for-energy-and-defence-rd-rises-sharply.html>

Rui, Q., Ding, Y., Ye, Q., Li, J., Wang, Y., & Yu, A. (2023). Insights on the sustainable design of extractive distillation processes for separating the isopropanol/1,4-dioxane/water mixture considering economic and entropy generation indicators. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 193, 109561.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109561>

Salazar, Ó. (2022, septiembre 16). ¿Qué es la escala de madurez tecnológica (TRL)? *Euro*

Funding. <https://euro-funding.com/es/blog/que-es-la-escala-de-madurez-tecnologica-trl/>

Saleem, A., Farooq, U., Riaz, A., Ahmed, F., Hussain, A., & Lee, M. (2023). Understanding the impact of reactive holdup on process intensification in the design of reactive distillation column. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 191, 109440.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109440>

Sánchez-Gómez, J. A., Espinoza-Vázquez, Y. M., Hernández, S., & Gómez-Castro, F. I. (2025). Design and optimization of intensified processes to produce renewable propylene glycol. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 214, 110355.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110355>

Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Sánchez-Ramírez, E., & 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>
- Shi, T., Liu, Y., Yu, H., Yang, A., Sun, S., Shen, W., Lee, C. K. M., & Ren, J. (2022). Improved design of heat-pump extractive distillation based on the process optimization and multi-criteria sustainability analysis. *Computers & Chemical Engineering*, 156, 107552. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107552>
- Shrikhande, S., Babu, G. U. B., Z., A., & Patle, D. S. (2020). Intensification and analysis of ethyl levulinate production process having a reactive distillation through vapor recompression and bottom flash techniques. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 156, 108081. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108081>
- SJR - International Science Ranking*. (s. f.). Recuperado 27 de junio de 2025, de <https://www.scimagojr.com/countryrank.php>
- Stankiewicz, A. I., & Moulijn, J. A. (s. f.). *PROCESS DESIGN TRENDS*.
- Šulgan, B., Furda, P., & Labovská, Z. (2023). Economic and environmental assessment of heat pump integration in thermally coupled hybrid separation. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144298. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144298>
- Teh, I. A. X., Lee, H.-Y., Kong, Z. Y., Putranto, A., Zheng, J., & Sunarso, J. (2024). Unfavorable process intensification of double column reactive extractive distillation system. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 196, 109657. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109657>
- Teh, I. A. X., Lee, H.-Y., Kong, Z. Y., Putranto, A., Zheng, J., & Sunarso, J. (2025). A new approach to design heat-integrated reactive distillation process: Part 2. Role of additional

variable in excess design. *Separation and Purification Technology*, 361, 131330.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131330>

Tsatse, A., Oudenhoven, S. R. G., ten Kate, A. J. B., & Sorensen, E. (2022). A systematic methodology for the optimisation, control and consideration of uncertainty of reactive distillation. En Y. Yamashita & M. Kano (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 49, pp. 667-672). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85159-6.50111-1>

Tusso-Pinzón, R. A., Castillo-Landero, A., Matallana-Pérez, L. G., & Jiménez-Gutiérrez, A. (2020). Intensified synthesis for ethyl lactate production including economic, sustainability and inherent safety criteria. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 154, 108041. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108041>

Vazzoler, A. (2022). An introduction to Dividing wall columns, design and modelling (DWC). *Journal of Engineering Research*, 2, 1. <https://doi.org/10.22533/at.ed.317222230014>

Wang, X., Ge, X., Liu, B., & Yuan, X. (2025). Optimal design and control of trichlorosilane purification process integrated with production of silane through dichlorosilane disproportionation. *Separation and Purification Technology*, 372, 133446. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133446>

Yang, A., Kong, Z. Y., Sun, S., Sunarso, J., Ren, J., & Shen, W. (2023). Design and Multiobjective Optimization of a Novel Double Extractive Dividing Wall Column with a Side Reboiler Scheme for the Recovery of Ethyl Acetate and Methanol from Wastewater. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(44), 18591-18602. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02191>

Yang, Q., Shan, R., Xu, H., Wang, W., Wang, Y., Li, X., Wang, Y., Zhong, L., Yang, J., & Wang, S. (2025). Reactive extractive distillation based on vapor waste heat saving for the

esterification of isoamyl propionate. *Separation and Purification Technology*, 371, 133305. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133305>

Zhang, Q., Geng, Q., & Huang, G. (2025). Investigation into economically viable reactive distillation assisted trichlorosilane disproportionation to produces silane. *Separation and Purification Technology*, 368, 132983. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132983>

Zhang, Z., Zhao, X., Zhu, X., Li, M., Ma, Z., & Gao, J. (2021). Energy-saving exploration and optimization of methyl alcohol – Methyl ethyl ketone – Tertbutyl alcohol separation by extractive dividing-wall distillation with ionic liquid as extractant. *Separation and Purification Technology*, 272, 118886. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118886>

Zhao, Q., Chu, X., Li, Y., Yan, M., Wang, X., Zhu, Z., Cui, P., Wang, Y., & Wang, C. (2022). Economic, environmental, exergy (3E) analysis and multi-objective genetic algorithm optimization of isopropyl acetate production with hybrid reactive-extractive distillation. *Separation and Purification Technology*, 301, 121973. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121973>

Apéndices

Apéndice A. Ítems metodología PRISMA

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
TÍTULO		
Título	1	Identificar la publicación como una revisión sistemática.
RESUMEN		
Resumen estructurado	2	Ver la lista de verificación para resúmenes estructurados de la declaración PRISMA 2020.
INTRODUCCIÓN		
Justificación	3	Describir la justificación de la revisión en el contexto del conocimiento existente,
Objetivos	4	Proporcionar una declaración explícita de los objetivos o las preguntas que aborda la revisión.
MÉTODOS		
Criterios de elegibilidad	5	Especificar los criterios de inclusión y exclusión de la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis.
Fuentes de información	6	Enumerar y detallar todas las fuentes de búsqueda utilizadas. Incluyendo bases de datos, registros, sitios web y organizaciones, junto con la última fecha de consulta.
Estrategia de búsqueda	7	Mostrar las estrategias de búsqueda detalladas para todas las fuentes, incluyendo filtros y restricciones aplicados.
Proceso de selección de los estudios	8	Describir cómo se evaluaron los estudios para determinar si cumplen con los criterios de inclusión, incluyendo el número de revisores, su independencia y cualquier uso de herramientas de automatización.
Proceso de extracción de los datos	9	Describir cómo se obtuvieron los datos de los informes o publicaciones, incluyendo el número de revisores, su independencia, la validación de los datos por parte de los investigadores del estudio y el uso de herramientas de automatización, si las hubo.
Lista de los datos	10a	Enumerar y explicar todos los resultados buscados, especificando si se incluyeron todos los relacionados con cada aspecto del resultado. En caso de no ser así, explicar el proceso de selección de resultados.
	10b	Enumerar y definir otras variables de interés, como características de participantes e intervención, así como fuentes de financiamiento. Explicitar cualquier suposición realizada sobre datos faltantes o inciertos
Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales	11	Describir los métodos de evaluación del sesgo en los estudios incluidos, incluyendo herramientas, el número de revisores, su independencia y, si corresponde, detalles sobre la automatización.

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
Medidas del efecto	12	Indicar las medidas de efecto (por ejemplo, razón de riesgos, diferencia de medias) utilizadas para cada resultado en la síntesis de los resultados.
Métodos de síntesis	13a	Explicar cómo se seleccionaron los estudios elegibles para la síntesis, como comparar las características de los estudios en los grupos previstos para cada síntesis.
	13b	Describir cualquier método necesario para preparar los datos, como el tratamiento de datos faltantes o conversiones, antes de su presentación o síntesis.
	13c	Describir los métodos utilizados para tabular o presentar visualmente los resultados de los estudios individuales y su síntesis.
	13d	Describir los métodos de síntesis de resultados, justificando las elecciones. En caso de haber metaanálisis, explicar los modelos, la evaluación de la heterogeneidad y las herramientas informáticas utilizadas.
	13e	Describir los métodos utilizados para explorar las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios (por ejemplo, análisis de subgrupos, meta-regresión).
	13f	Describir los análisis de sensibilidad que se hayan realizado para evaluar la robustez de los resultados de la síntesis.
Evaluación del sesgo en la publicación	14	Describir los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo debido a resultados faltantes en una síntesis (derivados de los sesgos en las publicaciones).
Evaluación de la certeza de la evidencia	15	Describir los métodos utilizados para evaluar la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace.
RESULTADOS		
Selección de los estudios	16a	Describir los resultados de los procesos de búsqueda y selección desde el número de registros identificados en la búsqueda hasta el número de estudios incluidos en la revisión, idealmente utilizando un diagrama de flujo.
	16b	Citar los estudios que aparentemente cumplían los criterios de inclusión, pero que fueron excluidos, y explique por qué fueron excluidos.
Características de los estudios	17	Citar cada estudio incluido y presente sus características.
Riesgo de sesgo de los estudios individuales	18	Presentar las evaluaciones del riesgo de sesgo para cada uno de los estudios incluidos.
Resultados de los estudios individuales	19	Presentar para todos los desenlaces y para cada estudio: a) los estadísticos de resumen para cada grupo (si procede) y b) la estimación del efecto y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza). Idealmente utilizando tablas estructuradas o gráficos.

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
Resultados de la síntesis	20a	Para cada síntesis, resumir brevemente las características y el riesgo de sesgo entre los estudios contribuyentes.
	20b	Mostrar los resultados del metaanálisis, incluyendo el estimado de resumen, su precisión (como intervalos de credibilidad o de confianza) y las medidas de heterogeneidad estadística. Si se comparan grupos, describir la dirección del efecto.
	20c	Presente los resultados de todas las investigaciones sobre las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios.
	20d	Presente los resultados de todos los análisis de sensibilidad realizados para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.
Sesgos en la publicación	21	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo debido a resultados faltantes (derivados de los sesgos en las publicaciones) para cada síntesis evaluada.
Certeza de la evidencia	22	Presente las evaluaciones de la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace evaluado.
DISCUSIÓN		
Discusión	23a	Proporcionar una interpretación general de los resultados en el contexto de otras evidencias.
	23b	Argumentar las limitaciones de la evidencia incluidas en la revisión.
	23c	Argumentar las limitaciones de los procesos de revisión utilizados.
	23d	Argumentar las implicaciones de los resultados para la práctica, las políticas y las futuras investigaciones.
OTRA INFORMACIÓN		
Registro y protocolo	24a	Proporcionar la información del registro de la revisión, incluyendo el nombre y el número de registro, o declarar que la revisión no ha sido registrada.
	24b	Indicar donde se puede acceder al protocolo, o declarar que no se ha redactado ningún protocolo.
	24c	Describir y explicar cualquier enmienda a la información proporcionada en el registro o en el protocolo.
Financiación	25	Describir las fuentes de apoyo financiero o no financiero para la revisión y el papel de los financiadores o patrocinadores en la revisión.
Conflicto de intereses	26	Declarar los conflictos de intereses de los autores de la revisión.
Disponibilidad de datos, códigos y otros materiales	27	Indicar qué elementos de los siguientes está públicamente disponibles y dónde encontrarlos: plantillas de extracción de datos, datos extraídos de estudios incluidos, datos para análisis, código de análisis y otros materiales utilizados en la revisión.

Apéndice B. Niveles de maduración tecnológica TRL.

Nivel TRL	Descripción
1	Se encuentran los estudios donde muestran la tecnología como una idea o concepto y no hay evidencia experimental o teórica de la misma
2	En este nivel la tecnología se ha formulado de manera precisa y se han identificado los principios científicos que hacen posible la viabilidad de la tecnología
3	En el presente nivel, la tecnología se ha probado a escala laboratorio comprobando su prototipo funcionalidad en condiciones controladas
4	Se ha construido un prototipo funcional, se ha probado en condiciones controladas
5	En este nivel la tecnología se ha probado que funciona en condiciones reales
6	En este nivel el sistema se ha construido y probado en un entorno relevante (entorno cerrado)
7	El sistema se ha probado en un entorno operativo, donde se evidencia que puede ser utilizado por usuarios finales
8	Aquí el sistema se ha fabricado demostrando su viabilidad para ser aplicado en un entorno operativo, donde dicha tecnología puede ser aplicada de manera rentable
9	En este último nivel el sistema ya opera de manera industrial, es económicamente viable y está siendo usado por los usuarios finales en el mercado

Apéndice C. Diseño y optimización en RD: estrategias de configuración y modelado

El desarrollo de nuevas metodologías para el diseño, evaluación y optimización de columnas de destilación reactiva ha evolucionado de manera significativa en la última década. Este avance ha sido impulsado por la necesidad de superar limitaciones clásicas del diseño heurístico, especialmente frente a reacciones lentas, configuraciones no convencionales o contextos industriales donde la RD aún no ha sido ampliamente adoptada. Uno de los aportes más importantes proviene del estudio de Muthia & Kiss, (2023), quienes introducen una herramienta de mapeo de aplicabilidad. Este método permite evaluar la viabilidad de la destilación reactiva en sistemas ternarios mediante un conjunto de gráficos genéricos precalculados. Una de las principales ventajas de esta metodología de diseño conceptual es que elimina la necesidad de realizar simulaciones rigurosas durante las etapas iniciales del desarrollo del proceso. En lugar de depender de modelos detallados y herramientas de simulación completas, el enfoque permite que el ingeniero diseñe una columna reactiva utilizando únicamente un conjunto reducido de parámetros clave que caracterizan el comportamiento del sistema real. Estos parámetros incluyen la volatilidad relativa (α), que determina la facilidad con que se separan los componentes mediante destilación; la constante de equilibrio (K_{eq}), que establece el límite termodinámico de conversión de la reacción; y el número de Damköhler (Da), que compara la velocidad de la reacción con la velocidad del transporte de masa en la columna, siendo relevante en reacción con la velocidad del transporte de masa en la columna, siendo relevante en sistemas de control cinético. A partir de estos valores, es posible seleccionar un gráfico de mapeo preestablecido y determinar la región factible de operación, es decir, las combinaciones de reflujo y número de etapas que garantizan el cumplimiento de los objetivos del proceso. Esta estrategia logra una precisión notable, con desviaciones menores al 11 % respecto a simulaciones detalladas, lo que la convierte en una herramienta accesible y de bajo costo computacional para apoyar decisiones tempranas de diseño.

Complementando la visión anterior de diseño conceptual, Saleem *et al.*, (2023) enfocaron su trabajo en el rediseño del dimensionamiento de columnas de DR para procesos con cinética lenta. A través del análisis de tres casos industriales, los autores demuestran que el volumen de retención reactiva — volumen total de catalizador presente en los platos de la columna — es una variable de diseño crítica que a menudo se ignora. La metodología convencional dimensiona la columna basándose principalmente en la carga de vapor, lo que puede resultar en un volumen de catalizador insuficiente para alcanzar la conversión deseada en reacciones lentas. Los autores proponen tratar el volumen de retención reactiva como un parámetro activo de optimización; al hacerlo, demostraron que es posible encontrar un punto óptimo que balancea el incremento en el costo de capital (asociado a un mayor diámetro de columna para alojar más catalizador) con la reducción en los costos operativos (resultado de una mayor conversión y menor consumo energético). Este análisis traza una curva clara del balance económico entre CAPEX y OPEX, cuestionando las prácticas de diseño convencionales.

En una perspectiva distinta, Zhang *et al.*, (2025) profundizan en la comparación estructural de distintas configuraciones de DR intensificada para la producción de silano. Su metodología consiste en evaluar tres mejoras sobre una columna de destilación reactiva base:

1. *DR con Condensador Intermedio (RD-IC)*: se añade un condensador en una etapa intermedia de la columna para utilizar un refrigerante más económico.
2. *DR con Oscilación de Presión (RD-PS)*: se utiliza un sistema de dos columnas operando a diferentes presiones para elevar la temperatura de condensación del producto.
3. *DR con Condensación Multietapa (RD-MC)*: configuración híbrida y novedosa que combina los principios de las dos anteriores (RD-IC y RD-PS) para maximizar los beneficios económicos.

El estudio revela que la última opción es la más rentable, con una reducción del TAC del 64 %. Sin embargo, es también la menos eficiente energéticamente, debido al incremento en el consumo eléctrico de los compresores. Este fenómeno se explica por el principio de sustitución de la calidad de la energía. La producción de silano requiere condensación a temperaturas criogénicas (-80 °C o inferiores), lo que implica el uso de refrigerantes extremadamente caros. La configuración RD-MC utiliza compresores (que consumen electricidad) para elevar la presión y, por ende, la temperatura de las corrientes. Esto permite que la condensación se realice con servicios de enfriamiento mucho más económicos, como agua industrial. Aunque el consumo total de energía aumenta debido al trabajo del compresor, el costo operativo total disminuye drásticamente porque se está reemplazando una utilidad de alto costo por una de costo menor. Este hallazgo refuerza la noción de que las métricas de optimización no deben asumirse como convergentes: la opción económicamente óptima no siempre representa la solución más sostenible o eficiente desde el punto de vista energético.

Por último, el trabajo de Ersingün & Aldemir, (2024) introduce un enfoque estadístico para la optimización operativa de columnas de DR mediante la aplicación de la metodología de superficie de respuesta (RSM). Este enfoque no elimina la necesidad de simulaciones rigurosas, pero sí las utiliza de forma más eficiente y racional. El procedimiento inicia con un diseño de experimentos, como el diseño de Plackett-Burman o el diseño central compuesto, que permite definir un conjunto limitado pero representativo de combinaciones de variables de operación, tales como caudales, temperaturas y relaciones de reflujo. Para cada uno de estos puntos, se ejecutan simulaciones detalladas (en este caso, con el simulador CHEMCAD), generando los datos de salida del proceso como la producción de acetato de etilo. A partir de estos datos, se construye un modelo estadístico de regresión que define una superficie de respuesta capaz de interpolar el

comportamiento del sistema en el espacio de diseño. La principal ventaja de este método es que, una vez establecida la superficie, las condiciones óptimas se pueden identificar analíticamente, sin necesidad de realizar múltiples simulaciones adicionales. Esta combinación de simulación y modelado estadístico ofrece una alternativa práctica y computacionalmente eficiente para la mejora operativa de procesos reactivos ya existentes.

Apéndice D. Integración de destilación extractiva y columnas de pared divisoria: estrategias de integración

He *et al.*, (2022) quisieron optimizar y mejorar un proceso de separación de la mezcla azeotrópica de metanol y trimetoxilano. Para ello comenzaron comparando tres tecnologías tradicionales (PSD,ED Y EDWC), concluyendo que la columna extractiva de pared divisoria era la mejor opción debido a su menor costo total anualizado (TAC) y mayor eficiencia, sin embargo, para intensificar aún más el proceso, incorporaron una bomba de calor, la cual reutilizar el calor comprimido utilizando optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos (NSGA-II) logrando que HP-EDWC obtuviera resultados de ; 90.30×10^4 \$/año, una eficiencia del sistema total 26.02 % y emisiones de CO₂ de 501.07 kg/h, lo que implica una mejora del 88 % en eficiencia termodinámica y reducciones del 8.3% en TAC Y 26.85% EN CO₂.

Los líquidos iónicos (ILS) son sales orgánicas que se mantienen en estado líquido a temperaturas relativamente bajas y presentan propiedades como baja volatilidad, alta estabilidad térmica y elevada selectividad. Estas características los convierten en excelentes alternativas a los disolventes convencionales en procesos de destilación extractiva, especialmente para la separación de mezclas azeotrópicas complejas. Uno de los ILs más utilizados es el [BMIM] [NTF₂] (*1-butil-3-metilimidazolio bis(trifluorometilsulfonil)imida*) En condiciones convencionales, este tipo de separación se realiza mediante configuraciones tipo CED, empleando disolventes orgánicos, no

obstantes en un estudio reciente Zhang *et al.*, (2021) se evaluaron seis configuraciones para la separación ternaria del metanol, metil etil cetona y terc-butanol; La configuración más eficiente fue la columna de destilación extractiva de pared divisoria con el ILs (EDWC-[BMIM] [NTF₂]), que logró una reducción del 22.19% en el (TAC) y 7.7% en las emisiones de CO₂ respecto al proceso base (CED), demostrando así el gran potencial de los líquidos iónicos como herramienta para la intensificación de procesos sostenibles.

Además de utilizar disolventes iónicos puros, también se pueden emplear disolventes mixtos como estrategias para mejorar el rendimiento de los procesos de destilación extractiva. En este contexto Li *et al.* (2021) se enfocaron en intensificar la separación de una mezcla ternaria azeotrópica de metanol, etanol y agua, la cual es relevante en la producción de bioetanol. La configuración base convencional utilizada fue un sistema de destilación ternaria convencional (CTED) con etilenglicol (EG) como disolvente, estructurado en tres columnas. Sin embargo, al introducir una columna de pared divisoria (DWC) y reemplazar el disolvente convencional por una mezcla optimizada compuesta por 70% de EG y 30% del líquido iónico [EMIM][DCA], desarrollando la configuración intensificada denominada EDWC-TED. Esta combinación sinérgica permitió reducir el TAC en un 7.81% disminuir las emisiones de CO₂ en un 4.52%, y lograr un notable incremento del 82% en la eficiencia termodinámica.

Por otro lado, Mantingh y Kiss (2021) Evaluaron estrategias de intensificación aplicadas al proceso convencional de extracción de 1,3-butadieno a partir de una corriente C4 cruda, caracterizado por un alto consumo (especialmente él es quema convencional de BASF). Con el objetivo de mejorar su eficiencia los autores propusieron dos intervenciones diferenciadas. Por un lado, la incorporación de un rehervido intermedio (IR) en la sección extractiva, para aprovechar calor residual y reducir la demanda de vapor de alta presión. por otro lado, el reemplazo de las dos

columnas de purificación por una columna de pared divisoria asistida por bomba de calor (DWC-MVVR), que integra separación y recuperación energética mediante recompresión de vapor. Esta última fue la opción ganadora ya que logró una reducción del 29.9% en el costo anual total (TAC), una disminución del 68,4% en los costos operativos, y una reducción del 54.8% en el consumo energético respecto al proceso base.

Por otro lado, en el estudio de Yang *et al.* (2023) se abordó la intensificación del proceso de recuperación de acetato de etilo (EtAc) y metanol (MeOH) desde aguas residuales, tradicionalmente realizado mediante un esquema de cuatro columnas (FCED), limitado en eficiencia energética y sostenibilidad. Para mejorarlo, se propusieron dos configuraciones: EDWC-SR, que reduce el sistema a dos unidades combinando una columna extractiva de pared divisoria y otra con rehervidor lateral; y DEDWC-SR, una super columna que integra todas las funciones del proceso en una sola carcasa con divisiones internas y rehervidor lateral. Siendo esta última la más eficiente, con reducciones del 20.20% en TAC, 33.81% en emisiones de CO₂ y 54.71% en consumo energético frente al proceso base. Aunque su desempeño en seguridad fue levemente inferior al de EDWC-SR, superó al diseño convencional, demostrando el potencial de combinar tecnologías como paredes divisoras y rehervidores laterales para lograr procesos más sostenibles y compactos.

Sin embargo, en el estudio de Rui *et al.* (2023) Se evidenció que la integración de calor puede superar en eficiencia a la intensificación estructural basada en columnas de pared divisoria (DWC) en la separación de la mezcla azeotrópica isopropanol/1,4-dioxano/agua mediante destilación extractiva con DMSO como disolvente. La configuración ganadora fue la destilación extractiva indirecta con integración de calor (IED-HI), que logró reducir el costo del TAC en un 15.36%, la generación de entropía en un 28.84%, el consumo energético en un 27.36% y las

emisiones de CO₂ en un 22.33%, frente al esquema base. Por otro lado. La opción con columna de pared divisora (IED-DWC), aunque no fue la más eficiente, también mostró mejoras frente al proceso base: una leve reducción del TAC de -0.45%, una disminución en las emisiones de CO₂ del -1.73%, pero un aumento en la generación de entropía de + 9.89%, lo que refleja una penalización en eficiencia termodinámica. Estos resultados subrayan que, si bien la DWC puede reducir costos y equipos, su desempeño depende fuertemente del proceso de separación.

Apéndice E. Híbridos de Destilación Reactiva-Extractiva (RED) y sus Intensificaciones

La destilación reactiva-extractiva (RED) permite integrar reacciones químicas de formación de productos como acetato de isopropilo o lactato de etilo con etapas de separación azeotrópica en unidades altamente compactas, aprovechando productos o subproductos como solventes extractivos in situ. Esta sinergia funcional se traduce en una reducción sustancial del número de equipos, del consumo energético y del costo total anualizado (TAC), consolidando a la RED como una estrategia versátil frente a procesos convencionales de reacción y separación secuenciales (Du *et al.*, 2023; Tusso-Pinzón *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2022).

Una de las configuraciones base más eficaces es la DCRED (doble columna reactiva.extractiva), cuya superioridad frente a sistemas convencionales ha sido ampliamente demostrada. Du *et al.*, (2023) reportan una reducción de casi el 60% en el TAC y más del 60% en emisiones de CO₂ al reemplazar una secuencia convencional de tres columnas por esta estructura. No obstante, al intentar intensificar este diseño mediante su conversión en una única columna de pared divisoria reactiva-extractiva (REDWC), los beneficios esperados no siempre se materializan. A pesar de sus atractivo desde el punto de vista de la reducción del número de equipos y del espacio requerido, algunos estudios han reportado incrementos en los costos puede introducir nuevas

complejidades de diseño y operación que contrarrestan sus ventajas teóricas (Du *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2022).

La flexibilidad de la RED ha permitido también su integración con tecnologías no destilativas para ampliar el rango de intensificación. En el trabajo de Zhao *et al.*, (2022), proponen la configuración REDPV, en el cual un módulo de pervaporación sustituye la columna de recuperación de solvente, logrando menores valores de TAC y emisiones contaminantes, aunque con una eficiencia exergética inferior debido a las irreversibilidades asociadas al transporte de masa en la membrana. Por su parte, Liu *et al.*, (2022) integran un ciclo orgánico de Rankine (ORC) con una REDWC, permitiendo recuperar el calor residual del sistema y convertirlo en electricidad, lo que transforma un pasivo térmico en una fuente adicional de valor económico y sostenibilidad.

Más allá del diseño estructural, la madurez de esta línea de investigación se refleja en la atención creciente a los casos donde la intensificación no ofrece los resultados esperados. Teh *et al.*, (2024) explican por qué configuraciones como la TC-RED (acoplada térmicamente) o la DW-RED (con pared divisoria) pueden incluso aumentar el consumo energético en ciertos sistemas. Las causas identificadas incluyen una reacción altamente exotérmica (que ya aporta calor internamente), un efecto de remezcla insignificante en el proceso base, y flujos de interconexión elevados que introducen nuevas ineficiencias. Estas observaciones subrayan que el éxito de una intensificación depende críticamente de las características del sistema y no puede garantizarse de forma universal.

A nivel metodológico, se ha observado una transición desde enfoques centrados únicamente en la reducción del TAC hacia marcos de diseño más completos. Tusso-Pinzón *et al.*, (2020) ejemplifican el proceso de síntesis conceptual progresiva, partiendo de un esquema de cinco unidades independientes hasta alcanzar un sistema altamente integrado de dos columnas (RDWC

+ EDWC). Posteriormente, C. Liu *et al.*, (2025) proponen un marco de optimización matemática robusto mediante programación entera mixta no lineal (MINLP) orientada a ecuaciones, que permite abordar simultáneamente variables estructurales —como el número y el tipo de columnas, secuencia de separación, presencia de reactores acoplados o módulos de membrana— y variables operativas como caudales, relaciones de reflujo, ubicaciones de alimentación y condiciones de operación, superando las limitaciones de los enfoque modulares tradicionales, especialmente en sistemas altamente no lineales y con reciclajes internos complejos.

La evaluación holística se ha consolidado como un enfoque clave en el diseño de sistemas RED, permitiendo integrar múltiples criterios de desempeño en la toma de decisiones. A través de análisis multiobjetivo y métodos de decisión multicriterio (MCDM), se abordan simultáneamente aspectos económicos (TAC), ambientales (emisiones de CO₂) y de seguridad inherente (índice PRI), relevando con frecuencia el llamado “trilema de la sostenibilidad”. Este concepto alude al conflicto entre maximizar beneficios económicos y ambientales sin comprometer la seguridad operativa del sistema (Du *et al.*, 2023; J. Liu *et al.*, 2022). Para gestionar esta complejidad, se han adoptado herramientas formales como el Análisis Relacional Gris (GRA), el Proceso Analítico Jerárquico difuso (AHP difuso) y el método de peso por entropía, las cuales permiten asignar ponderaciones objetivas a cada criterio y seleccionar alternativas que logren un compromiso óptimo entre múltiples objetivos en competencia.