

DESTILACIÓN: HISTORIA, INNOVACIONES Y ESTRATEGIAS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA MODERNA

Eduardo Sánchez-Ramírez ^{a,*}, Brenda Huerta-Rosas ^a, Juan José Quiroz –
Ramírez ^b, Juan Gabriel Segovia-Hernández ^a

^a Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Guanajuato 36050. eduardo.sanchez@ugto.mx

^b CONACyT – CIATEC A.C. Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas,
Omega 201, Col. Industrial Delta, 37545 León, Gto. México

Resumen

Este documento presenta una revisión sobre la evolución histórica de la destilación, desde sus primeros usos en civilizaciones antiguas hasta su desarrollo durante la Revolución Científica y su consolidación como una herramienta clave en la industria moderna. La destilación ha sido fundamental en la refinación de petróleo, así como en la producción de bebidas alcohólicas y productos farmacéuticos. A lo largo de los años, la tecnología ha avanzado hacia una mayor eficiencia energética, con innovaciones como la integración térmica, las columnas de pared dividida y la destilación reactiva. A pesar de su alto consumo energético, sigue siendo indispensable en múltiples industrias. Este estudio identifica que las tecnologías de intensificación de procesos, como las columnas HiDiC, los sistemas híbridos con membranas y la destilación en microescala, permiten reducciones de hasta 50 % en el consumo energético. Se destaca además el uso emergente de inteligencia artificial, gemelos digitales y sensores inteligentes para optimizar la operación en tiempo real. Finalmente, se subraya el papel de la destilación en la economía circular mediante la recuperación de solventes y su integración con energías renovables, consolidándola como una plataforma tecnológica estratégica en la transición hacia procesos industriales sostenibles.

Palabras clave: Destilación, Innovación, Eficiencia, Sostenibilidad.

DISTILLATION: HISTORY, INNOVATIONS, AND STRATEGIES FOR ENERGY EFFICIENCY IN THE MODERN INDUSTRY

Abstract

This document presents a review of the historical evolution of distillation, from its earliest uses in ancient civilizations to its development during the Scientific Revolution and its consolidation as a key tool in modern industry. Distillation has been fundamental in petroleum refining, as well as in the production of alcoholic beverages and pharmaceutical products. Over the years, the technology has advanced toward greater energy efficiency, with innovations such as thermal integration, divided-wall columns, and reactive distillation. Despite its high energy consumption, it remains indispensable in multiple industries. This study identifies that process intensification technologies—such as HiDiC columns, hybrid membrane systems, and micro-scale distillation—can achieve up to 50% reductions in energy consumption. The emerging use of artificial intelligence, digital twins, and smart sensors is also highlighted as a means to optimize real-time operation. Finally, the role of distillation in the circular economy is emphasized through solvent recovery and integration with renewable energy sources, consolidating it as a strategic technological platform in the transition toward sustainable industrial processes.

Keywords: Distillation, Innovation, Efficiency, Sustainability.

1. Introducción

1.1. Importancia de la Destilación en la Ingeniería Química y la Sociedad.

La destilación es una operación unitaria fundamental en la ingeniería química, cuya vigencia tecnológica y relevancia estratégica se mantienen desde el siglo XIX hasta la actualidad. A pesar de haber sido conceptualizada tempranamente con base en principios de equilibrio de fases líquido-vapor, sigue siendo la tecnología de separación más empleada a nivel industrial, gracias a su versatilidad, robustez y capacidad para obtener productos de alta pureza (Kister, 1992; Górak & Sorensen, 2014). Su uso es indispensable en procesos como la refinación de petróleo, la síntesis de principios activos farmacéuticos, la producción de biocombustibles, bebidas alcohólicas, recuperación de disolventes y purificación de aguas industriales y residuos peligrosos (Seader & Henley, 2006).

El impacto de la destilación no solo se refleja en el volumen de productos procesados, sino también en su elevada demanda energética: representa entre el 40 % y el 65 % del consumo total en plantas químicas integradas, especialmente aquellas que operan de forma continua y a gran escala (Lutze y col., 2013;

Sholl & Lively, 2016; Kiss, 2014). Esta carga energética, sumada a los compromisos globales para reducir emisiones y mejorar la eficiencia industrial (IEA, 2023), ha convertido a la destilación en un blanco prioritario dentro de las estrategias de intensificación de procesos (Stankiewicz & Moulijn, 2000; Jiménez y col., 2018).

Como respuesta, se han desarrollado configuraciones avanzadas que buscan optimizar su desempeño energético y operacional. Entre ellas destacan las columnas de pared dividida (Dividing Wall Columns, DWC), las columnas térmicamente acopladas, las integradas con recuperación de calor (HIDiC), y los sistemas híbridos que combinan destilación con reacción química o separación por membranas (Kiss & Suszwalak, 2012; Pérez-Cisneros y col., 2017; Zhang y col., 2022). Estas tecnologías permiten reducciones energéticas de hasta un 50 % respecto a columnas convencionales, mejoran la selectividad de separación y reducen tanto la huella física de los equipos como los costos de inversión.

Además, el campo ha sido transformado por herramientas de optimización multiobjetivo, simulación dinámica, gemelos digitales y algoritmos de inteligencia artificial. Estas tecnologías permiten predecir el

comportamiento de mezclas complejas, optimizar esquemas de operación en tiempo real y aplicar mantenimiento predictivo en plantas industriales (Gao y col., 2021; Rangaiah, 2016; IEA, 2023). De forma paralela, el desarrollo de materiales avanzados para empaques estructurados como metales porosos, cerámicas funcionalizadas y polímeros resistentes al calor— ha incrementado la eficiencia interfacial, permitiendo reducir el número de etapas y aumentar el rendimiento global (Jiménez y col., 2021).

La relevancia actual de la destilación no solo se basa en su prevalencia técnica, sino en su capacidad de adaptarse a los nuevos paradigmas de sostenibilidad, circularidad y digitalización. Su reconfiguración mediante tecnologías emergentes la posiciona como una plataforma estratégica para la descarbonización industrial y el diseño de procesos resilientes frente a escenarios energéticos variables y normativas ambientales cada vez más exigentes.

En este contexto, la destilación debe entenderse no como un proceso del pasado, sino como un campo dinámico de innovación. Este artículo presenta una revisión integradora del proceso de destilación, articulando su evolución histórica, los

desafíos actuales y las oportunidades tecnológicas emergentes. A diferencia de trabajos previos, esta revisión adopta una perspectiva transversal que conecta los aspectos técnicos con el contexto estratégico, ilustrando cómo una operación centenaria puede rediseñarse para enfrentar los retos de eficiencia, sostenibilidad e industria 4.0. El análisis se estructura en cinco secciones: desarrollo histórico, aplicaciones modernas, innovaciones tecnológicas, estrategias energéticas y desafíos prospectivos.

Diversas revisiones y monografías han consolidado el fundamento y el diseño de la destilación (Kister, 1992; Górak & Sorensen, 2014), así como su potencial de innovación y ahorro energético mediante tecnologías intensificadas como columnas de pared dividida (DWC), destilación reactiva e HiDiC (Kiss, 2014; Kiss y col., 2012; Hernández y col., 2003; Iwakabe y col., 2006; Jiménez y col., 2018). En paralelo, se han documentado panoramas históricos desde la protoquímica hasta la ingeniería moderna (Forbes, 1948; Kockmann, 2014; Karayannis & Mihailides, 2006), y emergen visiones sobre IA, gemelos digitales y control avanzado aplicados a columnas industriales (Rangaiah, 2016; Gao y col., 2021). Adicionalmente, los sistemas híbridos

membrana–destilación y nuevos materiales para empaques amplían el repertorio de soluciones eficientes (Zhang y col., 2022; Jiménez y col., 2021; Zhao y col., 2022).

A diferencia de los trabajos previos, esta revisión: (i) conecta la evolución histórica con tendencias de industria 4.0; (ii) sintetiza comparativamente tecnologías con métricas operativas para decisiones de diseño; (iii) integra intensificación (DWC, HiDiC, reactiva, microdestilación) con economía circular (recuperación de solventes) y renovables. Esta estructura permite pasar de la historia a la implementación práctica de soluciones de alta eficiencia y baja huella.

2. Desarrollo histórico de la destilación

2.1. Primeras prácticas empíricas de separación por destilación en civilizaciones antiguas

La destilación, entendida como un proceso de separación mediante evaporación y condensación, tiene sus raíces en prácticas empíricas desarrolladas por diversas civilizaciones antiguas. Estas aplicaciones iniciales respondieron a necesidades como la obtención de aceites esenciales, perfumes,

bebidas fermentadas y sustancias medicinales.

En Mesopotamia, tabletas cuneiformes registran procedimientos para extraer esencias vegetales y trementina con fines terapéuticos (Levey, 1959). En Egipto, la destilación se utilizaba para elaborar perfumes rituales mediante dispositivos rudimentarios de extracción de aceites aromáticos, considerados bienes de lujo en contextos religiosos y funerarios (Górak & Sorensen, 2014).

En la India, hallazgos arqueológicos indican que se practicaba la destilación para producir extractos y alcoholes desde antes de la era común, posicionando a esta región como un posible origen independiente del proceso (Allchin, 1979). En China, la documentación de Joseph Needham (1980) revela el uso de aparatos relativamente sofisticados para la destilación de licores y preparados medicinales.

En la Grecia helenística, Herón de Alejandría desarrolló diseños tempranos de alambiques, estableciendo bases experimentales de destilación. Alejandría, como nodo de intercambio cultural, permitió la síntesis de saberes griegos y orientales que impulsaron la

evolución de esta técnica (Kockmann, 2014; Karayannis & Mihailides, 2006).



Figura 1. Evolución de la columna de destilación a lo largo del tiempo. Doe, J. (2023).[Fotografía]. Unsplash. <https://unsplash.com>.

Complementando esta visión técnica, la Figura 2 muestra una recreación artística de las aplicaciones empíricas de la destilación en las civilizaciones antiguas, destacando sus usos rituales, medicinales y cosméticos en Egipto, Mesopotamia, India y China.

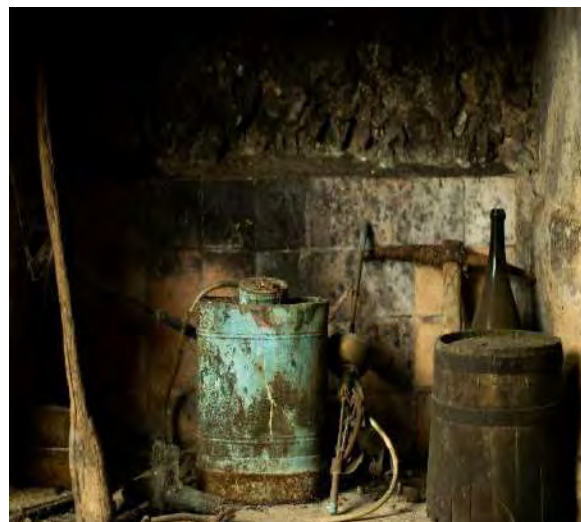


Figura 2. La destilación en la antigüedad. [Fotografía]. Unsplash. <https://unsplash.com>.

2.1.2. Usos alquímicos en la Edad Media

Durante la Edad Media, la destilación avanzó en el marco de la alquimia, una disciplina que combinaba protoquímica, filosofía natural y simbolismo. Alquimistas del mundo islámico y europeo perfeccionaron técnicas de purificación y separación con diversos fines, desde la transmutación metálica hasta la obtención del elixir de la vida (Newman, 2006). La Figura 1 ilustra la evolución general de la columna de destilación a lo largo del tiempo, mientras que la Figura 2 complementa esta visión técnica mediante una representación artística de los usos empíricos de la destilación en las civilizaciones antiguas.

El alambique, compuesto por retorta, cabezal y condensador, fue sistematizado por Jābir ibn Hayyān (Geber) y se convirtió en el dispositivo central de los laboratorios alquímicos (Ullmann, 2004; Holmyard, 1957). Este permitió obtener alcohol, ácidos y esencias vegetales con mayor pureza (Berthelot, 1893).

A pesar de su marco no científico, las observaciones empíricas derivadas de estos experimentos sentaron bases para la química moderna (Principe, 2011). La traducción de tratados árabes al latín difundió estos conocimientos por Europa, estableciendo un puente hacia la ciencia experimental del Renacimiento. Esto se ilustra en la Figura 3, que muestra una representación visual de la destilación en la Edad Media.

2.2. Desarrollo durante la Revolución Científica

El siglo XVII marcó un punto de inflexión: el método científico sustituyó paulatinamente la alquimia. Boyle estudió la relación entre presión y volumen de gases, y Lavoisier estableció la ley de conservación de la masa, sentando bases para la comprensión físico-química de la destilación (Sholl & Lively, 2016).



Figura 3. La destilación en la edad media. St. John, J. (s.f.). [Fotografía]. Unsplash.

El uso de vidrio de laboratorio, termómetros y condensadores mejoró la precisión experimental y permitió escalar estos procesos a la industria. Esta etapa marcó la transición desde la "chymistry" hacia una química moderna basada en control y reproducibilidad (Principe, 2011).

2.2.1. Avances en los siglos XVIII y XIX

Aeneas Coffey patentó la columna de destilación continua, permitiendo separaciones más eficientes con menor consumo energético. Su adopción en la industria de bebidas alcohólicas y posteriormente en la petroquímica consolidó el proceso como tecnología industrial clave. Este avance se visualiza en la Figura 4, mientras que una síntesis cronológica de los

principales hitos históricos se presenta en la Figura 5, la cual muestra una línea del tiempo detallada desde la antigüedad hasta la industrialización. Adicionalmente, la Figura 7 representa visualmente la evolución de los sistemas de destilación entre los siglos XVII y XIX.



Figura 4. La destilación durante la revolución científica. Prouzet, E. (2024, 12 de agosto).
[Fotografía]. Unsplash.



Figura 5. Línea del tiempo del desarrollo histórico de la destilación: desde sus orígenes antiguos hasta su industrialización moderna.



Figura 6. La destilación en los siglos XVII y XIX. Imagen generada mediante ChatGPT (OpenAI, modelo DALL·E 3). Prompt: "19th century industrial distillation, continuous distillation columns, petroleum refining, educational cutaway." Generada en abril de 2024. Uso bajo términos de servicio de OpenAI

2.3. Avances Tecnológicos y Aplicaciones Actuales de la Destilación

En la actualidad, la destilación incorpora columnas de bandejas, empaques estructurados y sistemas híbridos que integran reacciones, membranas o intensificación de procesos. Estas mejoras han optimizado la eficiencia, reducido el consumo energético y elevado la calidad del producto (Górak & Sorensen, 2014; Kiss, 2014).

Sistemas como la destilación reactiva, extractiva o con membranas abordan retos como los azeótropos o compuestos térmicamente sensibles. Además, la aplicación de herramientas de modelado, control avanzado y optimización ha permitido reducir el consumo de energía hasta en un 30% (Jiménez y col., 2018).

2.3.1. Evolución de la destilación industrial en petroquímica y producción de alcohol

En refinación de petróleo, las columnas fraccionadas y DWC han permitido realizar separaciones múltiples en una sola unidad, disminuyendo el uso de energía y la huella de carbono (Kiss y col., 2012). En bioenergía, el etanol se purifica mediante destilación extractiva y materiales adsorbentes funcionales.

2.3.2. Destilación en farmacéuticos y químicos finos

En la industria farmacéutica, la destilación al vacío permite separar principios activos termo-sensibles. En la producción de químicos finos y fragancias, técnicas como la destilación por arrastre de vapor, microdestilación y control avanzado garantizan pureza y trazabilidad (Smith, 2010).

En conjunto, la destilación ha evolucionado desde una práctica empírica hasta convertirse en una tecnología sofisticada, adaptable y esencial para afrontar los retos energéticos y ambientales contemporáneos.

3. Destilación en la Industria Moderna

La destilación permanece como una de las operaciones unitarias más relevantes en la industria moderna, constituyendo una tecnología núcleo en la separación de mezclas líquidas multicomponente. Aunque el principio termodinámico subyacente —la diferencia en volatilidad permanece inmutable, los avances recientes han transformado su eficiencia, sostenibilidad e integración con otras tecnologías. En esta sección, se analiza su evolución en sectores industriales estratégicos, destacando configuraciones innovadoras como columnas de pared dividida (DWC), columnas de transferencia de calor interna (HIDiC), y módulos intensificados adaptables a escalas variables (Kiss, 2014; Stankiewicz & Moulijn, 2000; Rangaiah y col., 2015)

3.1 La importancia industrial de la destilación

La destilación sigue siendo una de las operaciones unitarias más empleadas en la industria moderna. Aunque su principio básico la separación basada en volatilidad permanece inmutable, los avances tecnológicos han transformado radicalmente su eficiencia, sostenibilidad e integración con otras operaciones. En sectores como la petroquímica, alimentos, bebidas, farmacéutica y tratamiento ambiental, continúa siendo la tecnología de referencia cuando se requiere alta pureza y capacidad de procesamiento. La Figura 7 ilustra visualmente esta relevancia actual de la destilación en diversas industrias modernas.



Figura 7. La destilación en la actualidad.
[Fotografía]. Unsplash. <https://unsplash.com>.

A pesar del desarrollo de tecnologías alternativas de separación, como la ósmosis inversa y las membranas de alta eficiencia, la

destilación sigue siendo la opción preferida cuando se requiere una separación de alta precisión basada en las diferencias de puntos de ebullición, lo que garantiza la pureza del producto final (Górak & Sorensen, 2014).

3.1.1 Refinación del petróleo

Uno de los mayores desafíos de la destilación es su alto consumo energético, especialmente en procesos fraccionados. Tecnologías como las columnas de pared dividida (DWC) permiten realizar separaciones ternarias en una sola unidad, reduciendo hasta un 40% la energía consumida y los costos asociados al uso de múltiples columnas (Kiss & Suszwalak, 2012; Dejanović y col., 2010).

En la refinación de petróleo, estas tecnologías ya han sido implementadas a gran escala. Por ejemplo, el Sistema Nacional de Refinación de México opera más de 60 columnas, y se ha propuesto la incorporación progresiva de DWC e integración térmica HIDiC para optimizar procesos complejos como la separación de aromáticos (PEMEX, 2023; Yildirim y col., 2012).

3.1.2 Destilación en la industria de alimentos y bebidas

. En la industria alimentaria y de bebidas, la destilación cumple funciones clave no solo en

la separación de etanol, sino también en el ajuste del perfil sensorial. Los alambiques de cobre, por ejemplo, eliminan compuestos indeseables como los azufrados, mejorando la calidad del destilado (Reverchon & De Marco, 2006). Sistemas modernos de destilación pueden recuperar más del 90% del etanol con purezas superiores al 95% vol. (Arrieta, 2021).

La industria del tequila en México, con más de 650 millones de litros producidos en 2023, depende casi exclusivamente de destilación doble en columna, un estándar regulado por el Consejo Regulador del Tequila (CRT, 2023). En la producción de aceites esenciales, el arrastre con vapor es la técnica dominante, con rendimientos de entre 0.2 y 2.5% dependiendo del tipo de planta.

3.1.3 Aplicaciones en el tratamiento ambiental

La destilación al vacío permite la separación eficiente de mezclas térmicamente sensibles, alcanzando recuperaciones del 85–98 % con temperaturas reducidas (50–100 °C) y presiones por debajo de 20 mbar. Esta técnica se emplea tanto en industrias farmacéuticas como en la recuperación de solventes en la industria de pinturas. En el tratamiento de efluentes y recuperación de solventes, la

destilación al vacío permite la separación de mezclas sensibles térmicamente con puntos de ebullición entre 150–350 °C a presiones por debajo de 20 mbar, alcanzando recuperaciones del 85–95 % (EPA, 2020). Es común en industrias farmacéuticas y de pinturas.

La destilación solar para desalinización, especialmente en regiones áridas de México (Sonora, Baja California), ofrece tasas de producción de 2–5 L/m²/día usando estructuras de polímeros absorbentes y cubiertas de vidrio (UNAM, 2022). Aunque limitadas en escala, estas tecnologías se consideran viables para comunidades aisladas. La Figura 8 ilustra aplicaciones modernas de la destilación en la industria alimentaria y de bebidas, destacando su relevancia sensorial y técnica.

Además, en regiones áridas, la destilación solar ha sido adaptada para la desalinización de agua, logrando rendimientos de 3–5 L/m²/día mediante sistemas pasivos con estructuras de vidrio y materiales absorbentes térmicos. Estas soluciones, aunque de baja escala, son clave para comunidades remotas en México (UNAM, 2022; Zhang y col., 2020).



Figura 8. La destilación en alimentos y bebidas.

Imagen generada mediante ChatGPT (OpenAI, modelo DALL·E 3). Prompt: "Distillation in food and beverage industry, whisky stills, copper alembics, sensory enhancement illustration."

Generada en abril de 2024. Uso bajo términos de servicio de OpenAI.

3.2. *Innovaciones en equipos y diseño de destilación*

El diseño de columnas también ha evolucionado. Las columnas empacadas con rellenos estructurados (Mellapak, Flexipak) permiten mayor eficiencia y menor pérdida de presión, con ahorros energéticos de hasta 25% en sistemas con alta carga de vapor (Olujic y col., 2004).

Por su parte, los sistemas modulares de destilación, especialmente en bioenergía o producción de químicos en zonas rurales, permiten escalar la producción entre 5 y 100 L/h. Estos sistemas pueden incorporar

controladores tipo PID o estrategias más avanzadas como lógica difusa (Rangaiah, 2009).

3.2.1. Columnas empaquetadas vs. columnas de bandejas

Las columnas de bandejas (tipo Sieve, Valve o Bubble-cap) han sido tradicionalmente utilizadas en procesos de gran escala debido a su robustez mecánica y facilidad de mantenimiento (Kister, 1992). No obstante, las columnas empaquetadas con rellenos estructurados (tipo Mellapak o Flexipak) han demostrado una mayor eficiencia volumétrica y menores caídas de presión, resultando en ahorros energéticos de hasta 25 % en sistemas con elevada carga de vapor (Górak & Sorensen, 2014; Olujić y col., 2004).

Recientes desarrollos incluyen el uso de empaques avanzados basados en estructuras metal-orgánicas (MOFs), que mejoran la superficie interfacial y la selectividad de separación en columnas intensificadas (Zhao y col., 2022). La Figura 9 muestra una representación de una columna de destilación empaquetada, ejemplificando visualmente este tipo de configuración tecnológica.



Figura 9. Columna de destilación empaquetada.
[Fotografía]. Unsplash. <https://unsplash.com>.

3.2.2. Columnas de pared dividida, unidades modulares y destilación cíclica

digitalización ha permitido incorporar modelos predictivos, redes neuronales y gemelos digitales para el control de columnas en tiempo real. Estas herramientas permiten optimizar la operación, prever fallos, reducir variabilidad y aplicar mantenimiento predictivo (Gao y col., 2021).

Por otro lado, la integración de energías renovables, la minimización de la huella de carbono y el acoplamiento con tecnologías de captura de CO₂ son nuevas fronteras que vinculan la destilación con los compromisos

globales de sostenibilidad y transición energética.

En conjunto, la destilación ha dejado de ser una operación tradicional para convertirse en una plataforma tecnológica versátil, en constante evolución, capaz de responder a las demandas de eficiencia, sostenibilidad y adaptabilidad de la industria del siglo XXI.

4. Estrategias para el ahorro de energía en la destilación

4.1. Desafíos de los procesos de destilación de alto consumo energético

La destilación continúa siendo la operación unitaria más intensiva en consumo energético dentro de las industrias químicas y de proceso. Dependiendo del tipo de mezcla, configuración de columna y escala industrial, se estima que representa entre el 40 % y el 65 % del consumo energético total en plantas integradas (Lutze y col., 2013; Górak & Sorensen, 2014). Esta situación ha colocado a la destilación en el centro del debate sobre eficiencia energética, sostenibilidad industrial y reducción de emisiones (Sholl & Lively, 2016). Estudios más recientes han ampliado esta visión, destacando la importancia de la transición energética y la

integración de estrategias de intensificación de procesos para reducir la demanda global de energía en operaciones de separación (Skiborowski y col., 2023; Tahir y col., 2024).

Además del desafío energético, la operación de columnas de destilación enfrenta obstáculos económicos, logísticos y tecnológicos. Por ejemplo, en regiones con tarifas eléctricas elevadas o en plantas con restricciones de espacio, las columnas convencionales resultan económicamente inviables. Asimismo, las regulaciones ambientales más estrictas han obligado a rediseñar columnas y esquemas de operación para disminuir la huella de carbono asociada a los procesos de separación (IEA, 2023). La Figura 10 muestra una refinería convencional con múltiples columnas de destilación en operación, ilustrando visualmente el elevado consumo energético característico de este proceso y destacando la necesidad de implementar soluciones más eficientes.



Figura 10. Refinería convencional representando columnas de destilación que representan un alto consumo energético en la destilación. [Fotografía]. Unsplash.
<https://unsplash.com>.

4.2. Estrategias para incrementar la eficiencia energética

Con el propósito de mitigar el elevado consumo energético asociado a la destilación, se han desarrollado diversas estrategias tecnológicas que buscan optimizar la transferencia térmica y mejorar el desempeño del proceso. Entre las soluciones más relevantes se encuentran los acoplamientos térmicos, la integración de calor y el uso de configuraciones avanzadas de columnas, como las columnas de pared dividida (DWC) y los sistemas HIDiC. Estas innovaciones han demostrado su efectividad en la reducción de

costos operativos y del impacto ambiental asociado a la destilación industrial (Kiss, 2014). Más recientemente, se han documentado aplicaciones industriales y simulaciones a gran escala que confirman la viabilidad de estas configuraciones, con reportes de mejoras energéticas en petroquímica y biocombustibles (Dejanović y col., 2019; Skiborowski y col., 2023).

4.2.1. Acoplamientos térmicos

Los acoplamientos térmicos representan una solución efectiva para reducir la demanda energética. Al permitir el intercambio interno de calor entre secciones de diferentes columnas, se minimiza la necesidad de calor externo, mejorando el rendimiento térmico global. Configuraciones como las columnas de pared dividida (DWC) pueden reducir hasta un 30 % del consumo energético comparado con columnas convencionales (Kiss, 2014). Estudios recientes han corroborado estos ahorros, mostrando además que las DWC pueden integrarse con esquemas de control avanzado para garantizar estabilidad operativa en procesos multicomponente (Gao y col., 2021; Tahir y col., 2024). Estas estrategias han sido especialmente útiles en la industria de refinación y en procesos multicomponente,

como se ilustra esquemáticamente en la Figura 11.



Figura 11. Columnas de destilación con acoplamientos térmicos. [Fotografía]. Unsplash.
<https://unsplash.com>.

4.2.2. Integración de calor (*Heat-Integrated Distillation Columns, HIDIc*)

Las columnas con integración térmica interna (HIDIc) han ganado tracción como estrategia para reutilizar el calor generado en la base de la columna, transfiriéndolo hacia la sección de alimentación o enriquecimiento. Esta configuración permite alcanzar eficiencias superiores sin necesidad de generar calor adicional. Estudios como los de Pérez-Cisneros y col. (2017) y Rangaiah (2016) han

documentado ahorros energéticos de hasta el 50 % con esta tecnología.

4.3. Cambios topológicos en las columnas de destilación

Además de los avances tecnológicos en el acoplamiento térmico y la integración de calor, se han implementado modificaciones estructurales en el diseño de las columnas de destilación con el propósito de mejorar la eficiencia energética. Entre estas innovaciones se incluyen las estrategias de intensificación de procesos y la utilización de columnas operadas a baja temperatura o al vacío, que han demostrado ser eficaces para reducir el consumo energético en el proceso de separación (Górak & Sorensen, 2014). En años recientes, los desarrollos en empaques estructurados de nueva generación y materiales avanzados han mostrado reducciones adicionales en pérdidas energéticas, consolidando su relevancia en escenarios de transición energética (Jiménez y col., 2021; Zhao y col., 2022; Skiborowski y col., 2023).

4.3.1. Técnicas en intensificación de procesos

La intensificación de procesos ofrece un marco de rediseño para reducir tamaño de equipos, minimizar pérdidas de energía y acoplar varias funciones (reacción,

separación) en un solo equipo. Ejemplos destacados incluyen la destilación reactiva, microdestilación, y el uso de microcanales, con ahorros energéticos reportados de hasta 35 % (Kiss y col., 2012; Stankiewicz & Moulijn, 2000). Trabajos recientes han extendido estas técnicas hacia aplicaciones híbridas (destilación–membranas y destilación–absorción), reportando incrementos en eficiencia global de hasta un 40 % en casos industriales (Zhang y col., 2022; Tahir y col., 2024). Estas técnicas representan un paso hacia la modularidad y la miniaturización industrial.

4.3.2. Destilación a baja temperatura y destilación al vacío

La destilación al vacío o a baja presión ha permitido extender la viabilidad del proceso a mezclas termolábiles o energéticamente demandantes. Al disminuir la presión, se reduce el punto de ebullición y, por tanto, el requerimiento energético. Esta técnica es ampliamente usada en la industria farmacéutica y de bioproductos, así como en aplicaciones de alta pureza. Estudios recientes (Biegler y col., 2011; Liu y col., 2020) han reportado reducciones del 25 % al 30 % en consumo energético. De manera complementaria, nuevas simulaciones de optimización multiobjetivo han mostrado que

estas configuraciones, combinadas con integración de calor, pueden alcanzar reducciones de hasta un 40 % en escenarios de gran escala (Skiborowski y col., 2023). como puede observarse de forma ilustrativa en la Figura 12.



Figura 12. Columnas de destilación a bajas temperaturas o vacío. [Fotografía]. Unsplash.
<https://unsplash.com>.

4.4. Tendencias emergentes: digitalización, sostenibilidad e inteligencia artificial

Además de las estrategias técnicas, la transformación digital ha abierto nuevas oportunidades. La implementación de gemelos digitales, sensores inteligentes, y plataformas de aprendizaje automático ha permitido realizar simulaciones dinámicas,

diagnósticos predictivos, y optimizaciones en tiempo real. En la industria de la destilación, los gemelos digitales se han aplicado para predecir fallos en columnas fraccionadas y mejorar la eficiencia energética mediante ajustes dinámicos de presión y temperatura (Sun y col., 2022). Asimismo, sensores inteligentes basados en IoT han sido empleados para monitorear parámetros de operación en tiempo real, aumentando la trazabilidad y reduciendo pérdidas energéticas (Lee y col., 2021). Finalmente, plataformas de aprendizaje dinámico y redes neuronales profundas han mostrado mejoras significativas en el control de columnas complejas bajo condiciones variables de alimentación (Tahir y col., 2024). Estas tecnologías reducen el tiempo de inactividad, mejoran la seguridad operativa y ajustan el consumo energético según condiciones cambiantes de operación (Gao y col., 2021).

La convergencia entre la intensificación de procesos, la digitalización, y las políticas de descarbonización global posiciona a la destilación como un campo crítico para la innovación y adaptación futura. En conjunto, estas tendencias están reconfigurando el papel de la destilación como una plataforma resiliente, eficiente y estratégicamente

alineada con los objetivos de sostenibilidad e Industria 4.0.

5. Ventajas, retos y oportunidades en el uso de la destilación

El desarrollo de la destilación ha estado marcado por la búsqueda constante de mayor eficiencia y sostenibilidad. Desde su origen en civilizaciones antiguas hasta su consolidación como una de las operaciones unitarias más relevantes en la industria moderna, la destilación ha evolucionado mediante innovaciones tecnológicas y estrategias dirigidas a reducir su alto consumo energético. Estas transformaciones han impulsado el rediseño de columnas, la incorporación de nuevas fuentes de energía y el uso de herramientas digitales avanzadas, consolidando su papel en la industria contemporánea.

5.1 Aplicación de inteligencia artificial y herramientas digitales

Uno de los avances más prometedores en este campo es la aplicación de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático en la optimización de procesos. Estas tecnologías permiten modelar, simular y controlar dinámicamente las operaciones, ajustando en

tiempo real los parámetros clave (presión, temperatura, flujo) para minimizar el consumo energético sin afectar la pureza del producto (Gao y col., 2021). Por ejemplo, redes neuronales profundas se han utilizado para predecir el comportamiento de mezclas multicomponente en columnas de destilación complejas, logrando reducir hasta un 15 % el tiempo de simulación en comparación con modelos termodinámicos convencionales (Sun y col., 2020). Asimismo, algoritmos de optimización multiobjetivo basados en IA han permitido diseñar secuencias de destilación con menores costos energéticos en plantas petroquímicas (Li y col., 2021). Por otra parte, plataformas de aprendizaje dinámico se han aplicado en el control predictivo de columnas de destilación, anticipando perturbaciones operativas y reduciendo variabilidad en el producto final (Zhou y col., 2022). Particularmente, los gemelos digitales han sido empleados para diseñar esquemas de control predictivo en destilación multicomponente, logrando reducciones del 15–25 % en el consumo energético (Sun y col., 2022). De igual forma, el uso de sensores inteligentes basados en IoT y analítica de datos ha permitido implementar estrategias de mantenimiento predictivo en tiempo real, mientras que el aprendizaje dinámico ha potenciado el control autónomo

en columnas intensificadas (Lee y col., 2021; Tahir y col., 2024). Además, la integración de sensores inteligentes e IoT permite el monitoreo continuo de columnas, aumentando la trazabilidad y la capacidad de respuesta frente a perturbaciones. La fusión entre control avanzado y digitalización convierte a la destilación en un proceso cada vez más autónomo, adaptativo y energéticamente eficiente.

5.2 Innovaciones estructurales en equipos de separación

El diseño de equipos también ha sido revolucionado por la implementación de columnas de pared dividida (DWC) y destilación reactiva. Estas configuraciones han logrado reducir el número de etapas necesarias, mejorar el aprovechamiento del calor interno y disminuir el remezclado térmico, optimizando así el desempeño global del proceso (Stankiewicz & Moulijn, 2000).

Asimismo, la destilación en microescala, mediante microcanales y empaques optimizados, ha permitido una transferencia de masa y calor más eficiente en procesos de pequeña escala, reduciendo las pérdidas energéticas y el tamaño de planta requerido (Bianchi y col., 2020). Estas innovaciones

son particularmente útiles en la industria farmacéutica, biotecnológica y de alimentos.

5.3 Integración de energías renovables

Otro aspecto clave en la evolución de la destilación es la incorporación de fuentes de energía renovable en los sistemas de separación. La destilación solar, por ejemplo, ha surgido como una alternativa viable en procesos de desalinización, utilizando energía térmica captada del sol para generar vapor y efectuar la separación sin requerir combustibles fósiles (Liu y col., 2020). Estudios como el de Muñoz-Muñoz y col. (2020) han demostrado que sistemas de destilación solar de bajo costo pueden ser implementados eficientemente en comunidades rurales, logrando tasas de recuperación aceptables con bajo impacto ambiental.

Adicionalmente, se han desarrollado sistemas híbridos que combinan la destilación con tecnologías de membranas, mejorando la selectividad y reduciendo la energía requerida en la purificación de biocombustibles, solventes verdes y productos farmacéuticos (Zhang y col., 2022).

5.4 Eficiencia energética y recuperación de calor

Desde una perspectiva de eficiencia energética, la intensificación de procesos se ha convertido en una prioridad. Tecnologías como los acoplamientos térmicos e integración de calor en columnas HIDiC permiten reutilizar el calor generado en distintas etapas, minimizando pérdidas y reduciendo los requerimientos externos de energía (Pérez-Cisneros y col., 2017). Estas soluciones se traducen en menores costos operativos, menor huella de carbono y mayor sostenibilidad a largo plazo.

Desde una perspectiva de análisis de ciclo de vida, investigaciones recientes han demostrado que la elección del tipo de columna puede reducir hasta un 40 % el impacto ambiental total, considerando emisiones, insumos y operación (Jiménez-González y col., 2021). Para facilitar una comparación técnica entre tecnologías, se presenta en la Tabla 1 una síntesis de sus rangos estimados de consumo energético y costos de operación típicos, con base en estudios de referencia sobre diseño de columnas y análisis de eficiencia energética (Kister, 1992; Kiss y col., 2012; Iwakabe y col., 2006; Jiménez y col., 2018; Liu y col., 2020; Zhang y col., 2022; Zhao y col., 2022).

Asimismo, la Tabla 2 resume sus ventajas ambientales relativas y su contribución potencial a la sostenibilidad industrial.

Tabla 1. Comparación de tecnologías de destilación: consumo energético y costo estimado.

Tecnología	Energía (kWh/m ³)	Costo (USD/m ³ ·día)	Referencias
Columna convencional	120–150	800–1200	Kister, 1992; Lutze y col., 2013
Columna empaquetada	90–120	1000–1400	Górák & Sorensen, 2014; Jiménez y col., 2021
Pared dividida (DWC)	70–90	1200–1600	Kiss y col., 2012; Dejanović y col., 2019
Térmicamente integrada (HIDiC)	60–80	1400–2000	Iwakabe y col., 2006; Hernández y col., 2003
Destilación al vacío	80–100	900–1300	Liu y col., 2020
Destilación reactiva	60–100	1600–2200	Kiss & Suszwala, 2012; Pérez-Cisneros y col., 2017
Híbrida con membranas	40–70	1800–2500	Zhang y col., 2022
Destilación solar	0–10	300–800	Muñoz-Muñoz y col., 2020

Tabla 2. Ventajas ambientales y sostenibilidad de tecnologías de destilación.

Tecnología	Ventajas Ambientales / Sostenibilidad
Columna convencional	Alta energía, sin recuperación de calor.
Columna empaquetada	Menor presión, mejor eficiencia energética.
Pared dividida (DWC)	Menos equipos auxiliares, menor huella.
Térmicamente integrada (HIDiC)	Reaprovechamiento interno de calor.
Destilación al vacío	Menor degradación, útil para termolábiles.
Destilación reactiva	Ahorro de etapas, reduce residuos.
Híbrida con membranas	Alta eficiencia, menos emisiones.
Destilación solar	Energía renovable, sin emisiones directas.

*Los valores son estimaciones referenciales sujetas a condiciones de operación, escala y ubicación geográfica.

*El costo de implementación está normalizado a capacidad de operación típica y puede variar ampliamente según la región.

*La sostenibilidad se evalúa cualitativamente en términos de energía renovable, reducción de emisiones y minimización de residuos.

5.5 Economía circular y recuperación de solventes

En el contexto de la economía circular, la destilación desempeña un papel estratégico en la recuperación y reutilización de

solventes industriales. La destilación al vacío y la destilación fraccionada han sido ampliamente implementadas para recuperar compuestos de alto valor, reduciendo residuos peligrosos y promoviendo el cierre de ciclos materiales (Górak & Sorensen, 2014). Recientemente, diversos estudios han demostrado que la recuperación de solventes mediante destilación puede reducir hasta un 60 % la demanda de solventes vírgenes, con impactos positivos tanto en costos como en emisiones asociadas (Chen y col., 2021; Patel y col., 2022). Además, la combinación de destilación con tecnologías híbridas, como membranas o adsorbentes funcionalizados, ha permitido aumentar la selectividad y eficiencia en la purificación de mezclas complejas, especialmente en la industria farmacéutica y de recubrimientos (Zhang y col., 2022; Bhatia y col., 2023).

En el sector químico y cosmético, la recuperación de solventes como acetona, etanol y tolueno se ha convertido en una práctica estándar para reducir costos de operación y cumplir con regulaciones ambientales más estrictas (Jiménez-González y col., 2021). De igual manera, la integración de energías renovables en sistemas de destilación para recuperación de solventes se ha explorado como estrategia adicional para

disminuir la huella de carbono (Muñoz-Muñoz y col., 2020). No obstante, la implementación de la economía circular en destilación también enfrenta limitaciones y desafíos relevantes. Entre ellos destacan los altos costos iniciales de inversión para instalar sistemas de recuperación de solventes y equipos de destilación especializados, así como la necesidad de adaptar las configuraciones a la gran diversidad de mezclas industriales (Patel y col., 2022). Además, en algunos casos, los solventes recuperados no alcanzan la pureza requerida para aplicaciones de alto valor, lo que limita su reinserción directa en los procesos (Chen y col., 2021).

Otros obstáculos incluyen la complejidad regulatoria en el manejo y transporte de solventes recuperados, la falta de estandarización en métricas de circularidad y el reto de integrar energías renovables de manera estable en procesos intermitentes (Bhatia y col., 2023; Skiborowski y col., 2023). Estos factores muestran que, aunque la economía circular aplicada a la destilación es una estrategia prometedora, todavía requiere avances tecnológicos, regulatorios y de mercado para desplegar su máximo potencial.

Este enfoque es cada vez más común en industrias intensivas en solventes, donde la

sostenibilidad del proceso y la reducción del impacto ambiental se han transformado en diferenciadores competitivos.

5.6 Proyecciones futuras y sinergias academia-industria

A futuro, la destilación continuará evolucionando mediante la convergencia entre automatización, digitalización, nuevos materiales y energías limpias. Se anticipa que las columnas inteligentes, equipadas con sensores adaptativos y control autónomo, serán estándar en las plantas industriales. Del mismo modo, el desarrollo de materiales avanzados para empaques y estructuras internas mejorará aún más la eficiencia de separación y reducirá la presión de operación.

La colaboración entre el sector académico e industrial será crucial para impulsar estas innovaciones, asegurar la formación de recursos humanos calificados y acelerar la adopción de tecnologías sostenibles en entornos reales. La destilación del siglo XXI se perfila así no solo como un proceso maduro, sino como una plataforma tecnológica en transformación constante, alineada con los principios de sostenibilidad y transición energética.

6. Conclusiones

La destilación ha sido una operación central en la ingeniería química desde sus inicios, evolucionando de un procedimiento empírico a una tecnología sofisticada que ocupa un lugar destacado en la industria moderna. Su aplicación en la refinación de petróleo, la producción de bebidas alcohólicas y la síntesis de productos farmacéuticos reafirma su vigencia como proceso indispensable para la transformación de materias primas en productos de alto valor añadido.

No obstante, su elevado consumo energético continúa representando uno de los principales desafíos técnicos, especialmente en industrias de gran escala como la petroquímica. Para enfrentar esta limitación, se han desarrollado estrategias como la integración térmica, las columnas de pared dividida (DWC) y la destilación reactiva, que han demostrado ser eficaces para reducir significativamente los requerimientos energéticos y optimizar la separación de compuestos.

Las innovaciones recientes apuntan hacia una destilación más inteligente, miniaturizada y automatizada. La incorporación de tecnologías como la destilación en microescala, los empaques estructurados de nueva generación, y el uso de algoritmos de

optimización y aprendizaje automático ha permitido una mayor precisión en el control de procesos, reduciendo simultáneamente el impacto ambiental y los costos operativos. Esta transformación ha abierto oportunidades para integrar energías renovables, como la destilación solar, así como desarrollar procesos híbridos como la destilación con membranas.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la destilación también se ha posicionado como una herramienta clave en la economía circular. Tecnologías como la destilación al vacío han sido fundamentales para la recuperación de solventes industriales, permitiendo la reutilización de compuestos valiosos y disminuyendo la generación de residuos peligrosos.

A futuro, el progreso de esta operación unitaria dependerá de su capacidad para adaptarse a los nuevos paradigmas de eficiencia energética, automatización y descarbonización. La convergencia entre materiales avanzados, digitalización industrial y fuentes alternativas de energía fortalecerá su papel en una industria más resiliente y sostenible. En este contexto, la colaboración entre instituciones académicas, centros de investigación y la industria será esencial para impulsar el desarrollo de

tecnologías de destilación más limpias, eficientes y competitivas. En términos prácticos, las estrategias descritas tienen implicaciones directas en la reducción de costos energéticos, el diseño compacto de plantas y el cumplimiento de regulaciones ambientales más estrictas. Tecnologías como las columnas HIDiC, la destilación híbrida y la aplicación de inteligencia artificial ya se encuentran en etapas piloto o de adopción temprana en la industria petroquímica y farmacéutica, lo que demuestra su factibilidad en entornos reales.

De cara al futuro, los avances se orientan hacia la integración de destilación con energías renovables, el despliegue de gemelos digitales para control autónomo y la incorporación de materiales avanzados que permitan mayor eficiencia interfacial. Estos desarrollos configuran una visión de la destilación no solo como una operación madura, sino como una plataforma estratégica para la transición energética y la economía circular. La colaboración academia-industria será clave para traducir estas innovaciones en soluciones escalables y sostenibles en la próxima década.

Referencias bibliográficas

- Al-Arfaj, M., & Luyben, W. L. (2002). Comparative control study of ideal and nonideal distillation columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(20), 4919–4930.
<https://doi.org/10.1021/ie0202068>
- Bhatia, S., Kumar, A., & Sharma, R. (2023). Hybrid membrane–distillation systems for efficient solvent recovery: A review. *Separation and Purification Technology*, 308, 123645.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.123645>
- Biegler, L. T., Grossmann, I. E., & Westerberg, A. W. (2011). *Systematic methods of chemical process design*. Prentice Hall PTR.
- Bianchi, G., White, A. J., & Sayma, A. I. (2020). Advances in microdistillation for process intensification in separation technologies. *Chemical Engineering Journal*, 384, 123281.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123281>
- Chen, L., Zhao, W., & Xu, J. (2021). Solvent recovery in pharmaceutical manufacturing: Circular economy perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126389.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126389>
- Dejanović, I., Matijašević, L., & Olujić, Ž. (2019). Dividing wall column – A breakthrough towards sustainable distilling. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 140, 107619.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107619>
- Forbes, R. J. (1948). *A short history of the art of distillation: From the beginnings up to the death of Cellier Blumenthal*. E. J. Brill.
- Forbes, R. J. (1970). *A history of science and technology*. Penguin Books.
- Gao, W., Zhang, J., & Wang, T. (2021). Application of artificial intelligence in the optimization of industrial distillation processes. *AIChE Journal*, 67(3), e17192.
<https://doi.org/10.1002/aic.17192>
- Górak, A., & Sorensen, E. (Eds.). (2014). *Distillation: Fundamentals and principles*. Academic Press.
- Gorak, A., & Stankiewicz, A. (2011). Intensified reaction and separation systems. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2(1), 431–451.
<https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114153>

Hernández, S., Pereira-Pech, S., Jiménez, A., & Rico-Ramírez, V. (2003). Energy efficiency of an indirect thermally coupled distillation sequence. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 81(5), 1087–1091. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450810524>

Iwakabe, K., Nakanishi, H., Nakaiwa, M., Huang, K., Endo, A., Ohmori, T., Takamatsu, T., & Sorensen, E. (2006). Energy saving in multicomponent separation using an internally heat-integrated distillation column (HIDiC). *Applied Thermal Engineering*, 26(13), 1362–1368. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.005>

Jiménez, A., Rico-Ramírez, V., & Hernández, S. (2018). Recent advances in distillation column design for energy savings. *Chemical Engineering Transactions*, 69, 25–30. <https://doi.org/10.3303/CET1869005>

Jiménez, A., Rico-Ramírez, V., & Hernández, S. (2021). Structured packings in intensified distillation: A review of recent developments. *Separation and Purification Technology*, 275, 119272. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119272>

Karayannis, M. I., & Mihailides, A. (2006). From alchemy to chemistry: The transition

that shaped modern science. *Ambix*, 53(3), 259–278.

<https://doi.org/10.1179/000269806X152832>

Kiss, A. A. (2014). Distillation technology—Still young and full of breakthrough opportunities. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 89(4), 479–498. <https://doi.org/10.1002/jctb.4361>

Kiss, A. A., Landaeta, S. J. F., & Ferreira, C. A. I. (2012). Towards energy efficient distillation technologies – Making the right choice. *Energy*, 47(1), 531–542. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.038>

Kiss, A. A., & Suszwalak, D. P. (2012). Enhanced dimethyl ether synthesis by reactive distillation in a dividing-wall column. *Procedia Engineering*, 42, 581–587. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.447>

Kister, H. Z. (1992). *Distillation design*. McGraw-Hill.

Kockmann, N. (2014). History of distillation. In A. Górak & E. Sorensen (Eds.), *Distillation: Fundamentals and principles* (pp. 1–43). Academic Press.

Lee, J., Park, Y., & Kim, H. (2021). Smart sensors and IoT integration for real-time monitoring of industrial distillation processes. *Journal of Process Control*, 103,

45–58.

<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.07.005>

Levey, M. (1959). Chemical technology in the ancient Near East. *Isis*, 50(3), 312–325. <https://doi.org/10.1086/348777>

Li, Z., Wang, J., & Chen, B. (2021). Artificial intelligence-based multi-objective optimization of distillation systems for energy savings. *Computers & Chemical Engineering*, 147, 107254. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107254>

Liu, Z., Zhang, H., & Li, W. (2020). Advances in cryogenic distillation for industrial gas separations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(17), 7723–7735. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b07345>

Lutze, P., Babi, D. K., Woodley, J. M., & Gani, R. (2013). Phenomena-based methodology for process synthesis incorporating process intensification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(22), 7127–7144. <https://doi.org/10.1021/ie400396b>

Muñoz-Muñoz, C., García-Medina, B., & Rincón-Mejía, E. (2020). Solar distillation for

water desalination: Recent advances and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110275. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275>

Needham, J. (1980). Science and civilization in China: Vol. 5. Chemistry and chemical technology. Part IV: Spagyrical discovery and invention: Apparatus, theories and gifts. Cambridge University Press.

Newman, W. R. (2006). Atoms and alchemy: Chymistry and the experimental origins of the scientific revolution. University of Chicago Press.

Patel, P., Singh, R., & Mohan, D. (2022). Advances in solvent recovery technologies for sustainable chemical industries. *Chemical Engineering Journal*, 446, 137105. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137105>

Pérez-Cisneros, E. S., Sales-Cruz, M., Lobo-Oehmichen, R., & Viveros-García, T. (2017). A reactive distillation process for co-hydrotreating of non-edible vegetable oils and petro-diesel blends to produce green diesel fuel. *Computers & Chemical Engineering*, 105, 105–122. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.020>

Principe, L. M. (2011). The secrets of alchemy. University of Chicago Press.

Rangaiah, G. P. (2016). Optimization in chemical engineering. Wiley.

Reay, D., Ramshaw, C., & Harvey, A. (2013). Process intensification: Engineering for efficiency, sustainability and flexibility. Butterworth-Heinemann.

Seader, J. D., & Henley, E. J. (2006). Separation process principles (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Sholl, D. S., & Lively, R. P. (2016). Seven chemical separations to change the world. *Nature*, 532(7600), 435–437. <https://doi.org/10.1038/532435a>

Skiborowski, M., Repke, J. U., & Górak, A. (2023). Process intensification and energy transition: Advances in distillation technologies. *Chemical Engineering Research and Design*, 191, 350–368. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.015>

Smith, R. (2010). Chemical process design and integration. Wiley.

Stankiewicz, A., & Moulijn, J. A. (2000). Process intensification: Transforming

chemical engineering. *Chemical Engineering Progress*, 96(1), 22–34.

Sun, L., Zhang, X., & Yang, C. (2020). Deep learning models for prediction and optimization of distillation column performance. *Chemical Engineering Science*, 223, 115768. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115768>

Sun, Z., Li, Y., & Chen, G. (2022). Digital twins for energy-efficient control and fault prediction in distillation columns. *Computers & Chemical Engineering*, 163, 107837. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107837>

Tahir, M., Hussain, M., & Lee, M. (2024). Energy-efficient distillation technologies in the context of sustainable chemical processes: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139564>

Ullmann, M. (2004). Islamic alchemy: An introduction to the science of the sages. Brill.

Zhang, Y., Chen, X., & Wang, L. (2022). Hybrid membrane–distillation processes for sustainable bioseparations. *Journal of Membrane Science*, 658, 120717. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120717>

Zhao, D., Xie, H., & Zhang, X. (2022). Metal–organic frameworks for energy-efficient distillation: Advances and perspectives. *Chemical Society Reviews*, 51(3), 951–983. <https://doi.org/10.1039/D1CS00825A>

Zhou, H., Liu, Y., & Zhang, J. (2022). Machine learning-based predictive control for distillation columns under dynamic conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(12), 4378–4389.