



Campus Guanajuato

División de Ciencias
Naturales y Exactas
Departamento de
Ingeniería Química

Destilación: Historia, Innovaciones y Estrategias para la Eficiencia Energética en la Industria Moderna

Eduardo Sánchez Ramírez
Brenda Huerta Rosas
Juan Gabriel Segovia Hernández
Salvador Hernández Castro



**Comisión de Investigación, Vinculación y Extensión del
Consejo Divisional de Ciencias Naturales y Exactas
Resoluciones de la sesión celebrada el día 18 de octubre de 2024**

RESOLUCIÓN

PRIMERO. La Comisión de Investigación, Vinculación y Extensión del Consejo Divisional de Ciencias Naturales y Exactas es competente para formular la presente resolución.

SEGUNDO. La Comisión de Investigación, Vinculación y Extensión del Consejo Divisional de Ciencias Naturales y Exactas resuelve validez y aprobar por **unanimitad de votos**, el proyecto denominado **"Destilación: historia, innovaciones y estrategias para la eficiencia energética en la industria moderna"** presentado por el Dr. Eduardo Sánchez Ramírez, profesor del Departamento de Ingeniería Química, otorgando el **aval** para el seguimiento de los trámites conducentes.

Doy Fe.

Atentamente
"La Verdad Os Hará Libres"



QFB Alfonso Trujillo Valdivia
Secretario del Consejo Divisional de Ciencias Naturales y Exactas



**Comisión de Investigación, Vinculación y Extensión del
Consejo Divisional de Ciencias Naturales y Exactas
Resoluciones de la sesión celebrada el día 18 de octubre de 2024**

RESOLUCIÓN

PRIMERO. La Comisión de Investigación, Vinculación y Extensión del Consejo Divisional de Ciencias Naturales y Exactas es competente para formular la presente resolución.

SEGUNDO. La Comisión de Investigación, Vinculación y Extensión del Consejo Divisional de Ciencias Naturales y Exactas resuelve validez y aprobar por **unanimidad de votos**, el proyecto denominado **"Destilación: historia, innovaciones y estrategias para la eficiencia energética en la industria moderna"** presentado por el Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández, profesor del Departamento de Ingeniería Química, otorgando el **aval** para el seguimiento de los trámites conducentes.

Doy Fe.

Atentamente
"La Verdad Os Hará Libres"



UNIVERSIDAD
DE GUANAJUATO
CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS
NATURALES Y EXACTAS

QFB Alfonso Trujillo Valdivia
Secretario del Consejo Divisional de Ciencias Naturales y Exactas

**DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
CAMPUS GUANAJUATO**

Col. Noria Alta s/n, C.P. 36050; Guanajuato, Gto., México

Teléfono: 473 732 0006

Extensiones:

8106 Dirección

1437 Secretaría Académica

1438 Coordinación Administrativa

Prefacio

La destilación es un proceso esencial que tiene relevancia significativa dentro de los cursos de Procesos de Separación I (IILI04048), Procesos de Separación II (IILI03025), y Diseño y Simulación de Procesos y Productos (IILI05053) en la Licenciatura en Ingeniería Química en la División de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Guanajuato. Esta monografía aporta una visión profunda y actualizada sobre una de las operaciones unitarias más antiguas, mostrando su evolución y adaptación a las demandas energéticas y ambientales del siglo XXI. Esto es crucial para la formación de los estudiantes, ya que la destilación sigue siendo un pilar fundamental en sectores industriales clave como el petroquímico, farmacéutico y alimentario.

Adicionalmente, esta monografía ofrece una perspectiva histórica y tecnológica que complementa el conocimiento teórico y práctico necesario para que los estudiantes comprendan tanto las bases del proceso como las innovaciones que lo están transformando. La introducción de tecnologías híbridas y el uso de herramientas digitales como la inteligencia artificial, los gemelos digitales y el Internet de las Cosas (IoT), no solo sirven como auxiliares en la optimización de los procesos sino que también fomentan la sostenibilidad y la eficiencia de acuerdo a lo requerido en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Industria 4.0.

El contenido también subraya la importancia de la destilación en la economía circular, mostrando cómo ésta contribuye a la recuperación de disolventes y la reducción de residuos, aspectos vitales en la formación de ingenieros químicos comprometidos con el desarrollo sostenible. El enfoque en la innovación tecnológica y la eficiencia energética es especialmente relevante en el contexto actual, donde la ingeniería química enfrenta retos globales de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

Por lo tanto, esta monografía es de gran importancia para el currículo de los estudiantes, ya que les permite estar al tanto de los avances más recientes en destilación y su aplicabilidad en un mundo en constante cambio, preparándolos para enfrentar los desafíos del futuro en la industria química con herramientas y conocimientos actualizados.

Contenido

Prefacio	2
CAPITULO 1. Importancia de la Destilación en la Ingeniería Química y la Sociedad	5
CAPITULO 2. Desarrollo histórico de la destilación	10
2.1. Los comienzos: civilizaciones antiguas	11
2.1.2. <i>Usos alquímicos en la Edad Media</i>	12
2.2. Desarrollo durante la Revolución Científica	13
2.2.1. <i>Avances en los siglos XVIII y XIX</i>	14
2.3. La destilación en aplicaciones industriales modernas	15
2.3.1. <i>Evolución de la destilación industrial en petroquímica y producción de alcohol</i>	15
2.3.2. <i>Destilación en farmacéuticos y químicos finos</i>	16
CAPITULO 3. Destilación en la Industria Moderna	17
3.1 La importancia industrial de la destilación.....	18
3.1.1 <i>Refinación del petróleo</i>	19
3.1.2 Destilación en la industria de alimentos y bebidas	20
3.1.3 Aplicaciones en el tratamiento ambiental.....	20
3.2. Innovaciones en equipos y diseño de destilación	21
3.2.1. Columnas empaquetadas vs. columnas de bandejas.....	21
3.2.2. Columnas de pared dividida, unidades modulares y destilación cíclica.....	22
CAPITULO 4. Estrategias para el ahorro de energía en la destilación	23
4.1. Desafíos de los procesos de destilación de alto consumo energético	24
4.2. Estrategias para incrementar la eficiencia energética.....	25
4.2.1. Acoplamientos térmicos.....	25
4.2.2. Integración de calor (Heat-Integrated Distillation Columns, HIDIc)	26
4.3. Cambios topológicos en las columnas de destilación	26
4.3.1. Técnicas en intensificación de procesos.....	27
4.3.2. Destilación a baja temperatura y destilación al vacío	27
CAPITULO 5. Procesos de Destilación Híbridos	28
5.1. Combinación de destilación con membranas de separación.....	29
5.2. Sistemas híbridos destilación-adsorción	30
5.3. Beneficios y limitaciones de los sistemas híbridos.....	31
CAPITULO 6. Procesos de Destilación Híbridos	33

6.1. El rol de la destilación en la recuperación de recursos y reciclado	34
6.1.1. Sistemas de recuperación de solventes	35
6.1.2. La destilación en la minimización de desechos.....	35
6.2. Integración de la destilación en sistemas cerrados.....	36
6.3. Perspectivas de futuro: Mejorar la sostenibilidad mediante modelos de economía circular	36
CAPITULO 7. La destilación y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible	38
7.1. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	39
7.1.1. ODS 6: Agua limpia y saneamiento	40
7.1.2. ODS 7: Energía limpia y asequible	40
7.1.3. ODS 12: Consumo y producción sostenibles.....	41
7.2. Casos de estudio: Procesos de destilación sostenible.....	41
7.2.1. Reuso del agua en aplicaciones industriales	41
7.2.2. Química verde y destilación energéticamente eficiente	42
CAPITULO 8. Destilación en la Industria 4.0	43
8.1. Herramientas de la Industria 4.0 aplicadas en columnas de destilación	44
8.4. Integración de destilación en redes de manufactura inteligentes	46
CAPITULO 9. Retos futuros y oportunidades.....	48
CAPITULO 10. Conclusiones	50
Referencias.....	53
Resumen	57

CAPITULO 1. Importancia de la Destilación en la Ingeniería Química y su Impacto en la Sociedad

"La destilación es el arte de separar lo esencial de lo superfluo, un principio que no solo define a la química, sino también a la vida misma." — Antoine Lavoisier

La destilación es, sin duda, uno de los procesos más antiguos y esenciales en el campo de la ingeniería química, ya que ha sido utilizado por siglos para separar y purificar mezclas líquidas aprovechando las diferencias en las volatilidades de sus componentes. Aunque su principio básico es relativamente simple, su impacto en nuestra vida cotidiana y en diversas industrias es profundo y trascendental. Desde la refinación de petróleo hasta la producción de bebidas alcohólicas y productos farmacéuticos, la destilación continúa siendo una herramienta vital para la separación de componentes en las mezclas, garantizando la obtención de productos de alta calidad (Vea Figura 1).

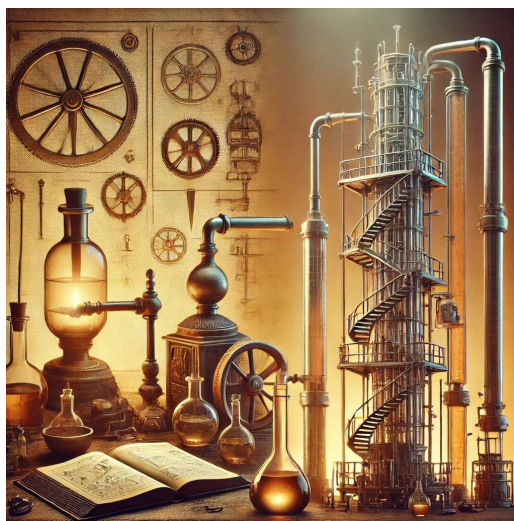


Figura 1. La transformación de las columnas de destilación a través del tiempo

Un claro ejemplo de la relevancia de la destilación se encuentra en la industria petroquímica, particularmente en la refinación del petróleo. El petróleo crudo, mezcla compleja de miles de hidrocarburos, se separa mediante destilación fraccionada en diferentes productos útiles como gasolina, diésel, queroseno y aceites lubricantes, entre otros. Este proceso permite aprovechar los diferentes puntos de ebullición de los compuestos presentes en el crudo, haciendo que cada fracción sea recuperada y utilizada para fines específicos. Sin la destilación, la producción de combustibles y otros derivados del petróleo sería prácticamente imposible, lo que afectaría negativamente a la industria del transporte y otros sectores esenciales para la economía global. En este sentido, la Torre de Destilación Atmosférica es un equipo crucial en las refinerías. Este sistema permite que, al calentar el crudo, sus componentes más ligeros asciendan en la columna y se separen en diferentes bandejas, en donde posteriormente se condensan para luego ser recolectados. Cada producto destilado tiene un rango de aplicaciones definido. Por ejemplo, la gasolina obtenida es clave para los automóviles, mientras que el diésel se utiliza en maquinaria pesada y transporte de mercancías. La importancia de este proceso radica en que la demanda mundial de energía depende en gran medida de estos productos refinados, lo que convierte a la destilación en un eslabón fundamental en la cadena productiva. No obstante, este proceso no está exento de desafíos. La destilación fraccionada en la refinación de petróleo es intensiva en energía, lo que lleva a que las investigaciones actuales se centren en mejorar la eficiencia de las columnas de destilación mediante innovaciones como la integración térmica o el uso de columnas de pared dividida. Estos avances permiten reducir el

consumo de energía y el impacto ambiental, haciéndolo un proceso más sostenible y alineado con los objetivos de eficiencia energética a nivel global (Gorak y Sorensen, 2014).

El impacto de la destilación no se limita a la industria petroquímica. También tiene una profunda influencia en la industria alimentaria, especialmente en la producción de bebidas alcohólicas. Desde tiempos ancestrales, la destilación ha sido utilizada para la producción de licores como el whisky, el vodka, el ron y otros destilados, en los que se busca concentrar el etanol y mejorar el perfil sensorial de la bebida. La destilación, en este contexto, no solo permite aumentar la concentración de alcohol, sino también eliminar impurezas y ajustar los sabores del producto final. Un caso interesante es el uso de alambiques de cobre en la destilación de whisky. El cobre no solo actúa como un excelente conductor de calor, lo que mejora la eficiencia del proceso, sino que también elimina compuestos de azufre que pueden afectar negativamente el sabor de la bebida. Esta capacidad para modificar el perfil organoléptico de las bebidas ha llevado a que los destiladores utilicen el proceso de destilación por lotes, lo que les permite un control preciso sobre las características finales del producto. El uso de alambiques por lotes y otros equipos de destilación especializados permite a los destiladores obtener un control minucioso sobre la calidad del licor. Además, los destiladores pueden ajustar las condiciones del proceso en función de las preferencias del mercado o de la tradición. La destilación en la industria de las bebidas alcohólicas no es solo una técnica industrial, sino que se ha convertido en un arte donde se busca crear productos únicos que destacan por su sabor, aroma y pureza.

Otra área en la que la destilación juega un papel crucial es en la industria farmacéutica, donde se utiliza para la purificación de ingredientes activos. La destilación permite separar los principios activos de los medicamentos de impurezas que podrían afectar su efectividad o seguridad. Aquí, un tipo particular de destilación es la destilación al vacío, que se usa cuando es necesario separar compuestos a temperaturas relativamente bajas para evitar la degradación de sustancias sensibles al calor. Esta técnica es especialmente importante en la fabricación de fármacos donde la pureza y la estabilidad de los ingredientes son fundamentales. En este sentido, la destilación contribuye directamente a la seguridad de los medicamentos que se consumen a diario. Además, al reducir el uso de temperaturas extremas, la destilación al vacío permite minimizar los riesgos asociados con la pérdida de calidad del producto, lo cual es un aspecto crucial en la industria farmacéutica donde la estabilidad química de los componentes es una prioridad.

A pesar de sus ventajas, uno de los principales desafíos que enfrenta la destilación en la actualidad es su elevado consumo energético. Se estima que entre el 40% y el 50% de la energía total consumida en la industria química se destina a los procesos de destilación, lo que convierte a este método en uno de los más intensivos desde el punto de vista energético (Observe Figura 2). En un mundo cada vez más preocupado por la sostenibilidad, este es un tema de creciente importancia. En respuesta a este desafío, se están desarrollando tecnologías innovadoras para aumentar la eficiencia energética de la destilación. La integración térmica, por ejemplo, permite reutilizar el calor generado en una parte del proceso para alimentar otras etapas, reduciendo así el consumo global de energía. Asimismo, las columnas de destilación reactiva que combinan la reacción química con la separación por destilación están ganando popularidad, ya que permiten reducir el número de equipos necesarios y mejorar la eficiencia del proceso. Estas innovaciones son fundamentales para hacer de la destilación un proceso más sostenible y menos demandante en términos de recursos energéticos (Sholl and Lively, 2016).



Figura 2. El alto consumo de energía en la destilación

Además de los avances tecnológicos, la destilación también juega un papel clave en la transición hacia una economía circular, donde los recursos se reutilizan y reciclan de manera continua. La destilación es fundamental en la recuperación de solventes y otros materiales valiosos que, de otra manera, se perderían en el proceso de producción. En la industria química, por ejemplo, los solventes usados pueden ser recuperados mediante destilación para ser reutilizados, lo que reduce tanto los costos como el impacto ambiental. Por lo tanto, aunque la destilación sigue siendo una herramienta fundamental, existe una necesidad urgente de innovaciones que reduzcan su demanda de energía mediante tecnologías como la integración térmica y la mejora del diseño de columnas. Esta monografía se centra en la destilación, un proceso esencial en la ingeniería química y en numerosos aspectos de nuestra vida cotidiana. El objetivo es ofrecer una visión comprensible y accesible sobre la evolución histórica de la destilación, su estado actual en la industria moderna y los desafíos que enfrenta en términos de eficiencia energética y sostenibilidad. Se explorarán los orígenes antiguos de la destilación, desde sus primeras aplicaciones en civilizaciones antiguas hasta su desarrollo durante la Revolución Científica. Se analiza cómo se utiliza la destilación en la industria moderna, incluyendo su papel en la refinación de petróleo, la producción de bebidas alcohólicas, y la fabricación de productos farmacéuticos y biocompuestos. Asimismo, se discuten los retos asociados con la alta demanda de energía en los procesos de destilación y las estrategias innovadoras para mejorar la eficiencia energética. Esto incluye técnicas como la integración de calor y el uso de nuevos materiales en el diseño de columnas de destilación. Se examinará cómo la destilación se está combinando con otras tecnologías, como la separación por membranas y los sistemas de adsorción, para mejorar la eficiencia y sostenibilidad. También veremos cómo se está integrando en los modelos de economía circular para promover la recuperación de recursos y la minimización de residuos. Finalmente, se abordarán los desafíos y oportunidades futuras para la destilación, incluyendo su papel en la Industria 4.0, con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y los gemelos digitales, y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030.

En resumen, este manuscrito ofrece una revisión integral y actualizada de la destilación, destacando no solo su evolución histórica y aplicaciones actuales, sino también los enfoques innovadores para mejorar la eficiencia energética y sostenibilidad. A diferencia de otros estudios que pueden centrarse exclusivamente en aspectos técnicos o históricos, este documento proporciona una visión holística que integra el pasado, presente y futuro de la destilación. Nuestro enfoque incluye las últimas tendencias tecnológicas y los desafíos ambientales, ofreciendo una perspectiva completa que es relevante tanto para profesionales de la industria como para el público en general.

CAPITULO 2. Desarrollo histórico de la destilación

"La historia de la destilación es la historia del progreso humano, una búsqueda constante por perfeccionar la extracción de lo puro en un mundo de mezclas." — Antoine Lavoisier

La destilación como proceso clave para la separación de mezclas, tiene sus raíces en tiempos remotos. Este proceso se considera uno de los avances tecnológicos más antiguos conocidos por la humanidad. Su evolución ha estado marcada por la curiosidad científica y la necesidad de encontrar soluciones eficientes para la obtención de sustancias puras a partir de mezclas complejas. A lo largo de los siglos, la destilación ha pasado de ser una técnica rudimentaria en las antiguas civilizaciones y utilizada con fines medicinales y espirituales, a convertirse en una herramienta indispensable en la industria moderna. El desarrollo de este proceso ha estado íntimamente ligado al progreso de la química y la física, y sus avances han tenido un impacto directo en la vida diaria y la evolución tecnológica de la humanidad.

2.1. Los comienzos: civilizaciones antiguas

Los primeros indicios de la destilación se remontan a miles de años atrás, cuando civilizaciones como Egipto, Mesopotamia y Grecia comenzaron a experimentar con métodos de evaporación y condensación. Aunque los métodos eran rudimentarios y basados más en la observación empírica que en el conocimiento científico, la destilación era utilizada principalmente con fines medicinales, cosméticos y espirituales. . A pesar de ello, estas civilizaciones hicieron importantes aportes que sentaron las bases para el desarrollo posterior del proceso.

En el Antiguo Egipto, uno de los principales usos de la destilación era la producción de aceites esenciales y perfumes. Los egipcios desarrollaron técnicas para destilar aceites aromáticos a partir de plantas, lo que se consideraba un proceso valioso en la preparación de ungüentos y productos para el embalsamamiento. Estos aceites no solo eran apreciados por sus propiedades cosméticas, sino que también tenían un papel central en los rituales religiosos, donde se usaban para purificar templos y honrar a los dioses. Los perfumes destilados eran considerados lujosos y eran parte integral de la vida diaria en la realeza egipcia. Las evidencias arqueológicas han revelado dispositivos rudimentarios de destilación usados en esa época, los cuales, aunque primitivos, cumplían con el propósito de extraer esencias y aceites de diversas plantas.

Por otro lado, en Mesopotamia se han encontrado pruebas arqueológicas que sugieren que los antiguos mesopotámicos utilizaban una forma primitiva de destilación para extraer esencias vegetales, aunque no se puede decir que en ese momento la tecnología estaba tan avanzada como en otras culturas. En particular, se cree que utilizaban la destilación para extraer productos como la trementina, que era empleada con fines medicinales. Aunque los conocimientos sobre el proceso eran limitados, los mesopotámicos comenzaron a entender los principios de la evaporación y la condensación, estableciendo un precedente para los desarrollos posteriores en destilación.

En la antigua Grecia, los filósofos y científicos comenzaron a estudiar los procesos de transformación de los materiales de manera más profunda. Herón de Alejandría, un ingeniero y matemático del siglo I d.C., es conocido por haber diseñado uno de los primeros alambiques para destilar agua y otros líquidos. Aunque su propósito principal era investigar los fenómenos de la evaporación y la condensación, sus trabajos sentaron las bases para un uso más sofisticado de la destilación en siglos posteriores (Observe Figura 3) . Las innovaciones de Herón en la creación de dispositivos como el alambique primitivo influyeron en el desarrollo de la química experimental y en la ciencia aplicada en general, destacando su interés en comprender y controlar los fenómenos físicos (Kockmann, 2014).



Figura 3. La destilación en la edad antigua

2.1.2. Usos alquímicos en la Edad Media

Durante la Edad Media, la destilación experimentó un desarrollo significativo en el contexto de la alquimia, una disciplina que mezclaba elementos de la filosofía, la química y la magia. Los alquimistas buscaban transformar materiales comunes en sustancias preciosas, como el oro, o alcanzar objetivos místicos, como el "elixir de la vida" que prometía inmortalidad. Aunque estas metas no fueron alcanzadas, el trabajo de los alquimistas permitió el perfeccionamiento de los métodos de destilación y el desarrollo de equipos más sofisticados.

Uno de los dispositivos más importantes de este período fue el alambique, un equipo que permitió mejorar las separaciones y purificaciones de líquidos. Este aparato, compuesto por una retorta y un condensador, permitía calentar una mezcla y condensar el vapor en un recipiente separado. Los alquimistas utilizaron el alambique para una amplia variedad de experimentos, desde la destilación de alcohol hasta la obtención de aceites esenciales. Si bien muchas de sus actividades estaban relacionadas con prácticas místicas y pseudocientíficas, su trabajo contribuyó al desarrollo del conocimiento empírico sobre la destilación, sentando las bases para los avances científicos que vendrían en los siglos siguientes.

En este contexto, Jābir ibn Hayyān, un alquimista árabe del siglo VIII, es considerado uno de los primeros en documentar técnicas avanzadas de destilación. Sus escritos describen métodos para purificar sustancias y destilar productos como el alcohol, además de desarrollar instrumentos más eficientes para el proceso (Figura 4). Aunque los alquimistas no lograron sus objetivos últimos, sus experimentos con la destilación permitieron una mayor comprensión de los procesos químicos, y su influencia se extendió a Europa, donde la destilación se integró en la naciente química experimental (Kockmann, 2014).



Figura 4. La destilación en la edad media

2.2. Avances en los procesos de destilación durante la Revolución Científica

La Revolución Científica del siglo XVII marcó un antes y un después en el desarrollo de la destilación, ya que el enfoque científico comenzó a reemplazar el empirismo y la alquimia como formas principales de investigar los fenómenos naturales. Con la aplicación del método científico y una mayor comprensión de las leyes físicas y químicas, la destilación dejó de ser una práctica basada en la observación empírica para convertirse en un proceso fundamentado en principios científicos sólidos.

Durante este período, figuras prominentes como Robert Boyle y Antoine Lavoisier hicieron contribuciones cruciales al estudio de la destilación. Boyle, uno de los pioneros de la química moderna, investigó los principios de los gases y la presión, lo que ayudó a mejorar la comprensión de los procesos de evaporación y condensación. Por su parte, Lavoisier, conocido como el "padre de la química moderna", aplicó el método científico para analizar la combustión y la transformación de sustancias, lo que permitió sentar las bases de la teoría de la conservación de la masa y su relación con la destilación.

Los avances tecnológicos durante la Revolución Científica también permitieron la invención de equipos más precisos, lo que facilitó la destilación de compuestos más complejos y a mayor escala (Figura 5). Esto tuvo un impacto directo en el desarrollo de la industria química, que comenzó a utilizar la destilación de forma más sistemática para la obtención de productos químicos puros (Kockmann, 2014).

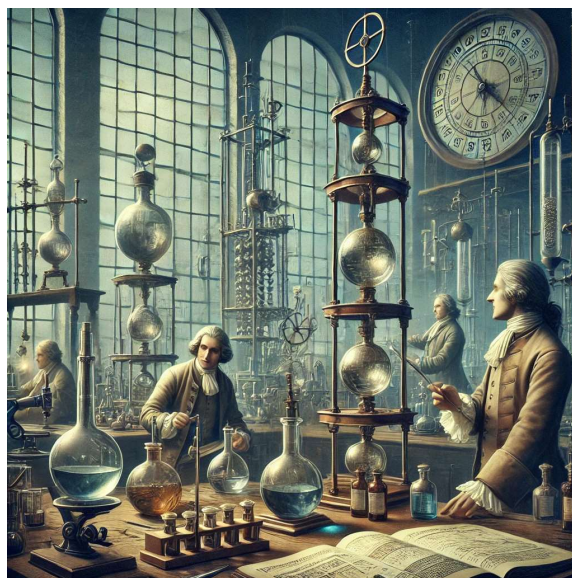


Figura 5. La destilación durante la revolución científica

2.2.1. Avances en los siglos XVIII y XIX

Durante los siglos XVIII y XIX, la destilación experimentó una serie de mejoras tecnológicas que la hicieron más eficiente y aplicable a gran escala en diversas industrias. Uno de los hitos más importantes de este período fue la invención de la columna de destilación continua, patentada por Aeneas Coffey en 1830. Este avance revolucionó el proceso de destilación al permitir la separación ininterrumpida de componentes, lo que incrementó la eficiencia y redujo los costos del proceso.

La columna de Coffey no solo aumentó la velocidad y capacidad de las separaciones, sino que también redujo significativamente el consumo de energía en comparación con los métodos anteriores. Este diseño permitió que la destilación se adoptara en sectores como la refinación de petróleo y la producción de bebidas alcohólicas, industrias que dependían de la destilación a gran escala.

Durante el siglo XIX, la destilación también se integró plenamente en la naciente industria petroquímica, donde se convirtió en una herramienta clave para la refinación de petróleo. El crecimiento de la industria petrolera y el aumento de la demanda de combustibles hicieron que la destilación se volviera indispensable para separar los componentes del crudo y obtener productos como gasolina, diésel y queroseno (Figura 6). Al mismo tiempo, las mejoras en la precisión de los alambiques y la introducción de columnas de destilación fraccionada permitieron un control mucho más riguroso sobre los productos destilados, lo que a su vez posibilitó la producción de líquidos más puros y específicos (Kockmann, 2014).



Figura 6. Planta química en operación durante los siglos XVII y XIX

2.3. La destilación en aplicaciones industriales modernas

En la actualidad, la destilación ha pasado de ser una técnica empírica a una herramienta sofisticada y esencial en una amplia variedad de industrias. Desde la petroquímica hasta la producción de biocombustibles, la destilación es utilizada para separar y purificar mezclas complejas. Aunque el proceso básico sigue siendo el mismo, las innovaciones en el diseño de los equipos, así como la integración de tecnologías avanzadas, han optimizado su eficiencia haciéndola más adaptable a las necesidades del mundo moderno.

Hoy en día, la destilación utiliza equipos especializados como columnas de bandejas o columnas empaquetadas, que están diseñadas para maximizar la eficiencia de la separación. Además, la incorporación de tecnologías híbridas, como la destilación reactiva o el uso de membranas, ha permitido mejorar aún más el rendimiento del proceso, reduciendo costos y aumentando la pureza de los productos obtenidos. Estas innovaciones han permitido que la destilación continúe siendo una tecnología relevante en industrias donde la eficiencia y la sostenibilidad son esenciales.

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

La destilación ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la industria petroquímica desde el siglo XX. En las refinerías, el petróleo crudo se separa mediante destilación fraccionada en componentes como gasolina, diésel y otros productos químicos esenciales. Este proceso es vital para satisfacer la creciente demanda de energía en el mundo y ha evolucionado continuamente para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental.

En la producción de alcohol, la destilación también ha sido clave para obtener bebidas alcohólicas de alta calidad, como whisky, vodka y ron. La precisión en el control del proceso permite a los

productores ajustar el sabor y la pureza de las bebidas, mejorando la experiencia del consumidor. Además, la destilación se ha aplicado en la producción de etanol como biocombustible, lo que subraya su relevancia en la búsqueda de fuentes de energía más sostenibles.

2.3.2. Destilación en la obtención de productos farmacéuticos y químicos finos

En la industria farmacéutica, la destilación se utiliza en la producción de medicamentos principalmente para purificar ingredientes activos y eliminar impurezas. La destilación al vacío, por ejemplo, permite separar compuestos a temperaturas relativamente bajas, preservando la integridad de sustancias sensibles al calor. Tal es el caso de ciertos principios activos de los medicamentos. Esta técnica es esencial para garantizar que los productos farmacéuticos cumplan con los estándares de pureza y eficacia.

La producción de productos químicos finos utilizados en sectores como la perfumería y los cosméticos, también depende en gran medida de la destilación. En este campo, se utilizan técnicas especializadas como la destilación por arrastre de vapor, que permite la extracción de aceites esenciales y compuestos aromáticos a partir de plantas y flores, asegurando la calidad de los productos finales.

CAPITULO 3. Destilación en la Industria Moderna

"El éxito de la industria moderna se mide no solo por lo que produce, sino por la eficiencia con la que separa lo útil de lo inútil." — Michael Faraday

La destilación sigue siendo una de las operaciones unitarias más importantes en la industria moderna, manteniendo su relevancia en numerosos sectores debido a su versatilidad y eficacia para separar componentes de mezclas líquidas complejas. Aunque el principio básico de la destilación no ha cambiado desde sus primeros desarrollos, las demandas energéticas, la sostenibilidad y la innovación tecnológica han impulsado mejoras significativas en su aplicación industrial. La capacidad de adaptarse a diferentes tipos de industrias, desde la petroquímica hasta la farmacéutica y alimentaria, ha hecho que la destilación sea insustituible en la producción industrial contemporánea.

En esta sección, se analizará cómo la destilación ha evolucionado para mantenerse en la vanguardia de los procesos industriales, particularmente en sectores clave como la refinación de petróleo, la producción de alimentos y bebidas, y las aplicaciones medioambientales. Además, se abordarán las innovaciones tecnológicas que han permitido mejorar la eficiencia de las columnas de destilación, desde los diseños más avanzados de columnas empaquetadas hasta la implementación de columnas de pared dividida, que optimizan el uso de energía y espacio en las plantas industriales.

3.1 La importancia industrial de la destilación

La destilación, a pesar de los avances en otras tecnologías de separación como la filtración por membranas o la adsorción, sigue siendo el método preferido en muchas industrias debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de producción y mezclas complejas. Su capacidad para realizar separaciones profundas, donde se requiere una alta pureza de los productos obtenidos, la convierte en una herramienta fundamental (Figura 7). En particular, su flexibilidad la hace ideal para una amplia gama de aplicaciones, lo que le permite satisfacer las necesidades industriales más exigentes.

Por otro lado, la destilación tiene la ventaja de ser un proceso altamente escalable. Desde pequeñas operaciones de laboratorio hasta grandes instalaciones industriales, las columnas de destilación pueden adaptarse a diferentes escalas sin comprometer su eficacia. Esto hace que sea una opción preferida en plantas que requieren procesar grandes volúmenes de mezcla, como es el caso en la industria petroquímica o en la producción de bebidas alcohólicas.

A pesar de los avances en tecnologías de separación, como la ósmosis inversa o las membranas de alta eficiencia, la destilación sigue siendo el método preferido en aplicaciones donde es necesario realizar separaciones complejas. Esto se debe a su capacidad para realizar separaciones precisas basadas en las diferencias de puntos de ebullición, lo que garantiza la pureza del producto final (Górak, y Sorensen, 2014).



Figura 7. Planta química actual con una columna de destilación operando

3.1.1 Refinación del petróleo

Una de las aplicaciones más emblemáticas de la destilación es su papel central en la refinación del petróleo, un proceso fundamental para la industria energética moderna. En las refinerías, la destilación fraccionada permite separar el petróleo crudo en sus diferentes componentes, como la gasolina, el diésel, el queroseno y los gases ligeros. Este proceso se basa en la destilación atmosférica y al vacío, que aprovecha las diferencias de puntos de ebullición de los hidrocarburos para obtener fracciones útiles. Cada uno de estos productos se destina a diferentes aplicaciones, siendo la gasolina uno de los más valorados por su uso en el transporte.

El diseño de la torre de destilación atmosférica, que es el corazón de las refinerías, es un ejemplo clásico de cómo la destilación puede manejar mezclas sumamente complejas. El crudo se calienta a temperaturas extremas, donde sus componentes se evaporan y ascienden por la columna. Cada fracción se condensa en diferentes bandejas de la torre, separándose en función de su temperatura de ebullición. Este proceso es crítico para maximizar la eficiencia de la refinería y garantizar que se obtengan las mayores cantidades posibles de productos valiosos a partir de una cantidad determinada de crudo.

Además de la destilación atmosférica, muchas refinerías utilizan destilación al vacío para separar fracciones más pesadas del crudo que no pueden evaporarse a temperaturas atmosféricas sin descomponerse. Esta técnica permite la recuperación de productos como aceites lubricantes y otros compuestos pesados que tienen un alto valor comercial.

A pesar de la gran eficiencia de la destilación en la refinación del petróleo, su alto consumo energético sigue siendo un desafío. Las investigaciones actuales buscan integrar tecnologías que

permitan reducir el uso de energía, como la integración térmica, que reutiliza el calor generado en una parte del proceso para reducir el consumo global de energía (Górak, & Sorensen, 2014).

3.1.2 Destilación en la industria de alimentos y bebidas

La destilación también es un proceso fundamental en la industria alimentaria, especialmente en la producción de bebidas alcohólicas como el whisky, el vodka, el ron y otras bebidas destiladas. En este contexto, la destilación permite no solo separar y concentrar el etanol de la fermentación, sino también eliminar impurezas no deseadas, ajustando el perfil sensorial de las bebidas para mejorar su sabor, aroma y pureza.

Además de su uso en la producción de bebidas alcohólicas, la destilación es esencial para la obtención de aceites esenciales y esencias utilizadas en la industria alimentaria y cosmética. Un ejemplo de esto es la destilación por arrastre de vapor, una técnica utilizada para extraer compuestos aromáticos de plantas y flores. Este proceso es fundamental para obtener aceites esenciales de alta pureza sin someter los materiales a temperaturas excesivas, lo que preserva la calidad del producto final (Figura 8). Estos aceites esenciales se emplean en la elaboración de perfumes, cosméticos y saborizantes para alimentos, destacando la importancia de la destilación en la creación de productos de alta calidad (Górak, & Sorensen, 2014).



Figura 8. Columna de destilación utilizada en la producción de extractos y esencias

3.1.3 Aplicaciones en el tratamiento ambiental

En las aplicaciones medioambientales, la destilación juega un papel clave en procesos como la purificación de agua y el tratamiento de residuos peligrosos. En áreas donde el acceso a agua potable es limitado, la destilación solar se utiliza para desalinizar el agua de mar y hacerla apta para el consumo humano. Este método, aunque lento, es altamente eficaz en regiones áridas y costeras donde las fuentes de agua dulce son escasas. Además, el uso de energías renovables en el proceso, como la energía solar, lo convierte en una alternativa sostenible para la purificación de agua.

En el tratamiento de residuos, la destilación también es fundamental para recuperar solventes y otros productos químicos valiosos a partir de corrientes de desechos industriales. Por ejemplo, la destilación al vacío se emplea para recuperar solventes usados en procesos de fabricación, lo que no solo reduce la cantidad de residuos peligrosos, sino que también permite a las empresas reutilizar estos materiales, disminuyendo costos operativos y el impacto ambiental. Esta técnica es ampliamente utilizada en industrias químicas y farmacéuticas, donde el uso intensivo de solventes hace que su recuperación sea económica y ecológicamente beneficiosa (Górak, & Sorensen, 2014).

3.2. Innovaciones en equipos y diseño de destilación

A medida que las demandas industriales han crecido y la preocupación por la sostenibilidad ha aumentado, las innovaciones en el diseño y los equipos de destilación han sido fundamentales para mantener la competitividad y reducir el impacto ambiental de este proceso intensivo en energía. Tradicionalmente, las columnas de bandejas han sido el estándar en la destilación, pero en las últimas décadas, se han desarrollado configuraciones más eficientes, como las columnas empaquetadas y las columnas de pared dividida.

3.2.1. Columnas empaquetadas vs. columnas de bandejas

Las columnas empaquetadas han ganado popularidad en muchas aplicaciones industriales debido a sus ventajas en eficiencia y capacidad para manejar mezclas difíciles de separar. A diferencia de las columnas de bandejas, que cuentan con placas o bandejas en las que el vapor y el líquido interactúan en fases sucesivas, las columnas empaquetadas están llenas de materiales de empaque que proporcionan una mayor superficie de contacto entre el vapor y el líquido. Esto aumenta la transferencia de masa y calor, mejorando la eficiencia del proceso de separación.

El uso de materiales de empaque estructurados, como anillos de Raschig o rellenos corrugados, permite que las columnas empaquetadas sean especialmente útiles en procesos donde se necesita una alta eficiencia de separación, como la destilación de mezclas azeotrópicas o de componentes con puntos de ebullición muy cercanos (Figura 9). Además, estas columnas tienen la ventaja de presentar una menor caída de presión en comparación con las columnas de bandejas, lo que reduce el consumo de energía y, por lo tanto, los costos operativos.

Por otro lado, las columnas de bandejas siguen siendo una opción preferida en muchos casos debido a su robustez y facilidad de control. Estas columnas permiten un mayor control sobre el flujo de vapor y líquido, lo que es útil en procesos donde las condiciones operativas pueden fluctuar. Sin embargo, a pesar de su simplicidad y confiabilidad, las columnas de bandejas tienden a ser menos eficientes energéticamente en comparación con las columnas empaquetadas (Górak, & Sorensen, 2014).



Figura 9. Columna de destilación empacada

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

Las columnas de pared dividida (DWC) y las unidades modulares son innovaciones importantes que han permitido mejorar significativamente la eficiencia en las operaciones de destilación industrial. Las columnas de pared dividida permiten realizar múltiples separaciones dentro de una única estructura, lo que ahorra espacio y reduce el consumo energético. Estas columnas están divididas internamente, lo que permite procesar diferentes corrientes dentro de la misma unidad, eliminando la necesidad de columnas adicionales.

Por su parte, las unidades modulares son estructuras flexibles y escalables que pueden ajustarse según las necesidades de producción. Este tipo de diseño es especialmente útil en industrias con demandas variables, como la producción de biocombustibles o productos químicos finos, donde la capacidad de adaptarse a cambios rápidos es esencial.

Otra innovación reciente es la destilación cíclica, que alterna entre ciclos de alimentación y separación sin flujo continuo. Durante la fase de alimentación se introduce la mezcla en la columna, mientras que, en la fase de destilación, los componentes se separan sin una entrada constante de material. Esta técnica optimiza las condiciones de equilibrio dentro de la columna, mejorando la eficiencia energética y la pureza del producto final. Esta técnica ha mostrado ser particularmente eficaz en procesos donde la energía es un factor limitante o donde se manejan mezclas altamente complejas (Górak, & Sorensen, 2014).

CAPITULO 4. Estrategias para el ahorro de energía en la destilación

"La energía que ahorramos hoy es el cimiento de la sostenibilidad del mañana." — Amory Lovins

La destilación sigue siendo una de las operaciones unitarias más intensivas en términos de consumo energético dentro de la industria química. Esto se debe a que requiere una gran cantidad de calor para la evaporación y posterior condensación de los componentes de una mezcla. En un mundo donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son cada vez más importantes, es crucial encontrar formas de reducir este consumo de energía sin sacrificar la eficacia del proceso. A lo largo de los últimos años, se han desarrollado diversas estrategias innovadoras que buscan minimizar el uso de energía en las columnas de destilación, reduciendo tanto los costos operativos como el impacto ambiental. Esta sección examina los desafíos energéticos de la destilación y las principales estrategias que se han implementado para superarlos, con ejemplos de estudios científicos que han sido pioneros en estas mejoras.

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

El alto consumo energético es uno de los mayores retos que enfrenta la destilación en la actualidad. De hecho, estudios realizados por Smith et al. (2010) y Lutze et al. (2013) señalan que este proceso puede representar hasta el 50% del consumo total de energía en una planta química. Esto se debe a que la destilación requiere un gran aporte de calor para evaporar los componentes más volátiles de la mezcla y luego condensar el vapor generado. Este ciclo constante de evaporación y condensación es intensivo en energía, y las pérdidas durante el proceso pueden ser significativas.

Uno de los problemas principales en las columnas de destilación convencionales es el remezclado, un fenómeno que ocurre cuando el vapor y el líquido interactúan de manera ineficiente dentro de la columna. En lugar de separarse de manera efectiva, parte del calor se pierde debido a este intercambio no deseado de energía entre ambas fases. Como resultado, se requiere mayor cantidad de calor para mantener el proceso de separación, lo que incrementa el consumo energético global. Este fenómeno es especialmente problemático en columnas de gran tamaño, como las que se utilizan en la refinación de petróleo, donde se ha observado que puede reducir la eficiencia de separación hasta en un 15-20%, según investigaciones de Seader y Henley (2006).

Un estudio destacado sobre este desafío es el de Kiss y Suszwalak (2012), quienes analizaron el consumo energético en procesos de separación dentro de la industria química, concluyendo que la destilación es el principal consumidor de energía (Figura 10). En su investigación, propusieron soluciones para mitigar este impacto, enfocándose en el diseño y operación de columnas más eficientes. Otro estudio relevante es el de Górak y Stankiewicz (2011), que investigó cómo el diseño de columnas puede influir directamente en la eficiencia energética, subrayando la importancia de controlar el remezclado para mejorar el rendimiento energético.

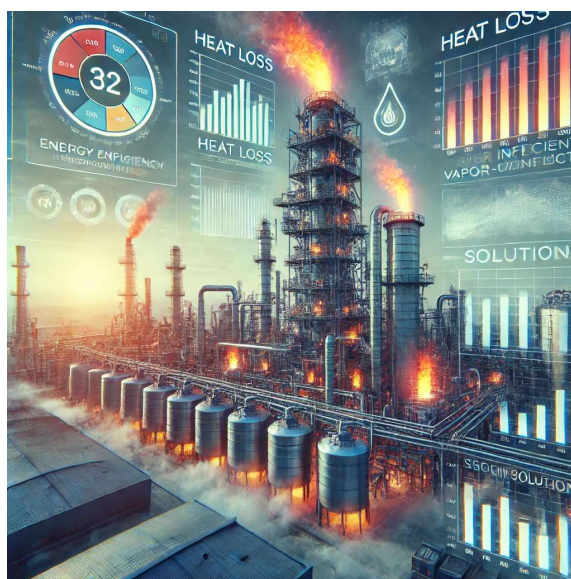


Figura 10. Columna de destilación operando con un alto consumo energético

4.2. Estrategias para incrementar la eficiencia energética

Con el fin de reducir el consumo energético en las columnas de destilación, se han implementado diversas estrategias tecnológicas. Entre las más importantes se encuentran los acoplamientos térmicos, la integración de calor y la implementación de nuevas configuraciones de columnas, como lo son las columnas de pared dividida (DWC) y los sistemas HIDiC. Estas soluciones no solo mejoran la eficiencia del proceso, sino que también permiten reducir los costos operativos y el impacto medioambiental (Figura 11).

4.2.1. Acoplamientos térmicos

Los acoplamientos térmicos son una de las soluciones más efectivas para disminuir el consumo de energía en los sistemas de destilación. Esta técnica consiste en conectar varias columnas de destilación de manera que los flujos de calor y vapor puedan ser reutilizados en diferentes etapas del proceso. De esta forma, se reduce la necesidad de suministrar energía externa adicional. Según el estudio de Hernández et al. (2003), el acoplamiento térmico en sistemas industriales de destilación puede reducir el consumo energético hasta en un 30% en comparación con los sistemas de destilación convencionales.

Una aplicación exitosa de esta estrategia es el uso de columnas de pared dividida (DWC), en las que se pueden llevar a cabo múltiples separaciones dentro de una misma columna, eliminando la necesidad de utilizar columnas secundarias para realizar estas separaciones adicionales. Esta configuración no solo ahorra espacio en las plantas industriales, sino que también reduce significativamente el consumo energético, ya que se aprovecha el calor generado en la columna principal. Un estudio realizado por Kiss (2014) revisa de manera exhaustiva el funcionamiento de las columnas de pared dividida, demostrando que esta tecnología puede reducir el remezclado y mejorar la eficiencia térmica de manera drástica.

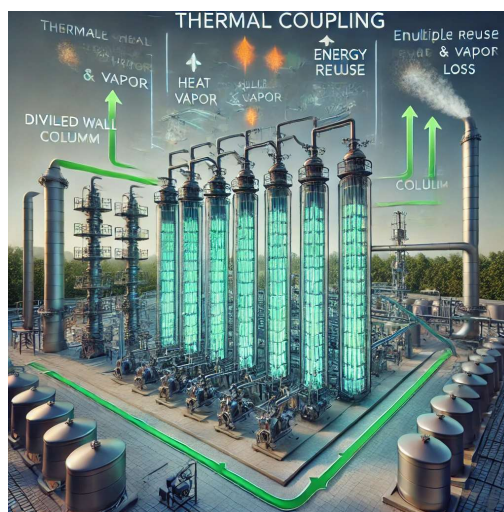


Figura 11. Columnas de destilación con acoplamientos térmicos

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

La integración de calor es otra estrategia que ha demostrado ser altamente eficaz para reducir el consumo energético en las columnas de destilación. Esta técnica se basa en reutilizar el calor disponible dentro de la planta para minimizar las pérdidas de energía. En particular, las columnas de destilación con integración térmica (HIDiC) aprovechan el calor generado en la parte inferior de la columna para alimentar las etapas superiores, reduciendo así la necesidad de calor externo.

Un estudio pionero en este campo fue el realizado por Pérez-Cisneros et al. (2017), quienes diseñaron sistemas HIDiC para la separación de mezclas complejas a gran escala. Su investigación demostró que cuando se utilizan las columnas HIDiC, es posible reducir el consumo energético en un 50% en comparación con las columnas convencionales. Esta reducción se debe, en gran medida, a la capacidad del sistema HIDiC para minimizar el impacto del remezclado y mejorar el rendimiento de la columna, lo que resulta en productos de mayor pureza y una disminución significativa de residuos.

Otro estudio relevante es el de Iwakabe et al. (2006), que se centró en la optimización del diseño de las columnas HIDiC para su uso en procesos petroquímicos. Sus hallazgos sentaron las bases para la adopción de esta tecnología en refinerías, demostrando que las HIDiC no solo son viables desde el punto de vista técnico, sino también económicamente rentables en aplicaciones a gran escala.

4.3. Cambios topológicos en las columnas de destilación

Además de las mejoras tecnológicas en el acoplamiento térmico y la integración de calor, se han desarrollado cambios físicos en el diseño de las columnas de destilación para mejorar su eficiencia energética. Entre estos cambios se encuentran las técnicas de intensificación de procesos y el uso de columnas operadas a baja temperatura o al vacío, que permiten reducir el requerimiento energético general del proceso.

4.3.1. Técnicas en intensificación de procesos

La intensificación de procesos es un campo de investigación que busca mejorar la eficiencia de los procesos industriales al reducir los tamaños, costos y consumo de energía. En el contexto de la destilación, esto incluye la miniaturización de las columnas y el uso de tecnologías híbridas como la destilación reactiva, donde la reacción química y la separación por destilación ocurren simultáneamente en una única unidad.

Un ejemplo destacado de esta técnica es el estudio de Stankiewicz y Moulijn (2000), quienes introdujeron el concepto de destilación reactiva. Este enfoque no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también reduce significativamente el consumo de energía, al eliminar la necesidad de utilizar equipos separados para las etapas de reacción y separación. Además, el estudio de Kiss et al. (2012) demostró que la intensificación de la destilación mediante el uso de microcanales puede reducir el consumo de energía en un 35%, lo que subraya el potencial de esta tecnología para mejorar la sostenibilidad de los procesos de destilación.

4.3.2. Destilación a baja temperatura y destilación al vacío

La destilación a baja temperatura y la destilación al vacío son otras estrategias efectivas para reducir el consumo energético. Al disminuir la presión dentro de la columna, es posible reducir el punto de ebullición de los componentes, lo que significa que se requiere menos energía para evaporarlos y condensarlos. Estas técnicas son especialmente útiles en la industria farmacéutica y en la producción de biocompuestos, donde los productos a menudo son sensibles al calor.

Un estudio realizado por Biegler et al. (2011) investigó el uso de la destilación al vacío para la separación de compuestos bioactivos, demostrando que el consumo energético puede reducirse en un 25% en comparación con las técnicas de destilación convencionales. De manera similar, el trabajo de Al-Arfaj y Luyben (2002) demostró que la destilación al vacío es una solución eficaz para mejorar la eficiencia energética en la separación de mezclas sensibles al calor en la industria alimentaria y de bebidas, destacando su importancia en la preservación de la calidad del producto.

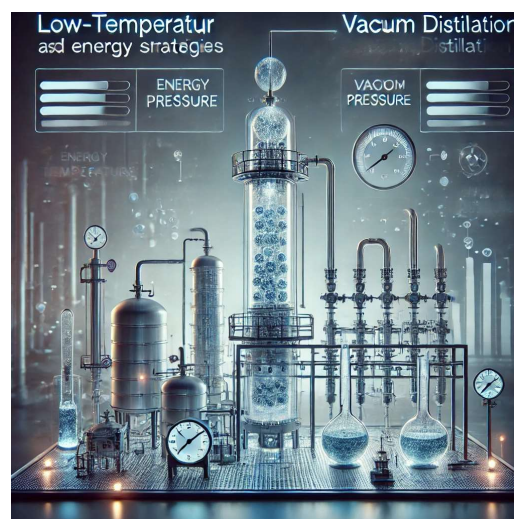


Figura 11. Columnas de destilación a bajas temperaturas o vacío

CAPITULO 5. Procesos de Destilación Híbridos

"La innovación surge cuando combinamos lo mejor de dos mundos en busca de soluciones más eficientes y sostenibles." — Arthur C. Clarke

Los procesos híbridos de destilación combinan técnicas tradicionales de destilación con otras tecnologías de separación para mejorar tanto la eficiencia energética como la operativa. Estas soluciones híbridas se han vuelto cada vez más populares en la industria química debido a su capacidad para superar algunas de las limitaciones de la destilación convencional, tales como el alto consumo de energía y la dificultad para separar ciertos tipos de mezclas, como los azeótropos o aquellas con componentes de volatilidades similares. Este enfoque innovador permite reducir costos, minimizar el uso de energía y mejorar la calidad de los productos finales. En esta sección, analizaremos las combinaciones más comunes en los sistemas híbridos, como la destilación con membranas y los sistemas de adsorción, explorando sus beneficios, limitaciones y ejemplos de estudios científicos clave que han demostrado su eficacia (Figura 12).

5.1. Combinación de destilación con membranas de separación

La integración de la destilación con membranas de separación ha surgido como una solución innovadora para mejorar la eficiencia de los procesos de separación. La destilación es altamente efectiva para separar componentes con grandes diferencias en sus puntos de ebullición, pero cuando se trata de mezclas en las que los componentes tienen volatilidades similares, el proceso se vuelve ineficiente y consume grandes cantidades de energía. En estos casos, la integración de membranas puede complementar el proceso, ofreciendo una separación más fina y precisa, lo que reduce la cantidad de energía requerida y aumenta la pureza del producto final.

Las membranas son tecnologías que permiten la separación de componentes basándose en diferencias en el tamaño molecular, la presión o en las afinidades químicas de los componentes con los materiales de la membrana. En un sistema híbrido destilación-membrana, la destilación se utiliza para realizar una separación gruesa de la mezcla, mientras que las membranas se encargan de la separación más fina o final, capturando aquellos componentes que no pudieron ser separados completamente en la columna. Esto resulta en una reducción considerable de etapas adicionales de destilación, optimizando el uso de energía.

Un ejemplo relevante de esta combinación es el estudio de Vooradi et al. (2018), quienes investigaron la integración de destilación con membranas para la separación de mezclas azeotrópicas, conocidas por su dificultad para ser separadas mediante destilación tradicional. Los resultados del estudio mostraron una mejora significativa en la eficiencia de la separación, logrando reducir el consumo de energía en un 30% en comparación con el uso exclusivo de destilación. Este hallazgo subraya el potencial de los sistemas híbridos para aplicaciones en las que las soluciones convencionales no resultan viables desde el punto de vista energético.

Otro ejemplo destacado es el trabajo de Do Thi et al. (2020), donde la destilación y las membranas se emplearon para la separación de mezclas etanol-agua, un desafío común en la producción de biocombustibles. En este caso, la integración de membranas permitió reducir la cantidad de vapor necesario en el proceso de destilación, lo que no solo redujo el consumo energético, sino que también mejoró la sostenibilidad del proceso. La separación híbrida permitió alcanzar una pureza del etanol superior al 99.5%, lo que normalmente requeriría un gran número de etapas de rectificación adicionales.

Un enfoque aún más innovador fue introducido por Li y Kiss (2021), quienes desarrollaron el concepto de membrana-pervaporación acoplada con destilación para la separación de mezclas de etanol y agua. En este sistema, la destilación elimina los componentes más fáciles de separar, mientras que la pervaporación, un proceso en el que la mezcla pasa a través de una membrana y se evapora selectivamente, actúa sobre las fracciones más difíciles. Este sistema híbrido demostró una mejora energética del 40%, convirtiéndose en una de las soluciones más prometedoras para procesos industriales de gran escala.

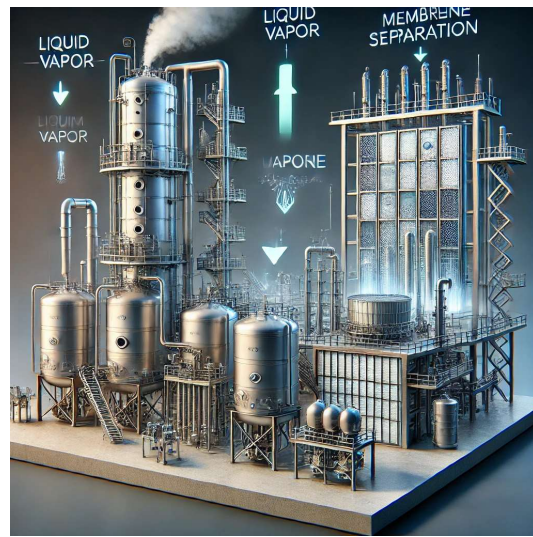


Figura 12. Planta química que incluye un proceso de separación híbrido destilación- membrana

5.2. Sistemas híbridos destilación-adsorción

Otro enfoque clave en la destilación híbrida es la combinación de adsorción con destilación. La adsorción es una técnica en la que ciertos compuestos de una mezcla se adhieren a la superficie de un material adsorbente, lo que permite separar componentes difíciles de distinguir mediante métodos convencionales de destilación. Este método es especialmente útil cuando se enfrentan mezclas cuyos componentes tienen propiedades físicas y químicas similares, lo que hace que su separación sea complicada y costosa.

En un sistema híbrido destilación-adsorción, la destilación se encarga de realizar la separación principal de la mezcla, mientras que la adsorción complementa el proceso eliminando impurezas residuales o separando aquellos compuestos que no se pueden distinguir completamente en la columna de destilación. Esta integración no solo mejora la pureza del producto final, sino que también reduce el consumo de energía al disminuir el número de etapas de separación necesarias.

Un ejemplo importante de la aplicación de esta estrategia es el trabajo de Park et al. (2017), quienes integraron adsorción en un proceso de destilación para la separación de mezclas de hidrocarburos. Este enfoque permitió reducir significativamente el remezclado dentro de la columna, mejorando la pureza del producto en un 20% y disminuyendo la cantidad de energía requerida para alcanzar esa pureza. Este tipo de integración es especialmente útil en la refinación de petróleo y en la producción

de compuestos químicos finos, donde la demanda de productos de alta pureza es crucial para mantener la competitividad.

Otra aplicación exitosa de esta tecnología es la adsorción en ciclo térmico, donde la columna de destilación está acoplada con un adsorbente que captura los componentes más difíciles de separar durante el ciclo de destilación. Esto permite eliminar la necesidad de varias etapas adicionales de separación. El estudio de Sharma y Wankat (2013) demostró que este tipo de integración puede reducir el consumo energético en hasta un 35%, al mejorar la selectividad en la separación de compuestos como butanos y pentanos. Esta tecnología ha demostrado ser eficaz en la industria petroquímica, donde la separación de isómeros y compuestos similares es un reto constante.

Un tercer ejemplo de gran relevancia es el trabajo de Szanyi et al. (2004), quienes implementaron un sistema híbrido destilación-adsorción para la separación de mezclas azeotrópicas de compuestos orgánicos. En este caso, los investigadores utilizaron adsorbentes modificados para mejorar la eficiencia de separación sin la necesidad de aplicar presiones o temperaturas extremas. Este enfoque resultó en una reducción significativa en el consumo energético, lo que demuestra el potencial de los sistemas híbridos para ser implementados en la industria de manera más generalizada.

5.3. Beneficios y limitaciones de los sistemas híbridos

Los sistemas híbridos de destilación ofrecen una amplia gama de beneficios que los hacen muy atractivos para la industria, especialmente en términos de eficiencia energética y la mejora de la calidad del producto. Sin embargo, como cualquier tecnología, también presentan ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta antes de su implementación a gran escala. A continuación, se detallan los principales beneficios y limitaciones de estos sistemas.

Beneficios:

- **Ahorro de energía:** Uno de los mayores beneficios de los sistemas híbridos es la reducción en el consumo de energía. Como se destacó en los estudios de Vooradi et al. (2018) y Park et al. (2017), los sistemas híbridos pueden reducir el consumo energético entre un 20% y un 40%, dependiendo del tipo de mezcla y de la configuración del sistema. Esto es especialmente útil en procesos donde se trabaja con mezclas de componentes de volatilidades similares o azeótropos, que requieren una gran cantidad de energía para separarse por métodos convencionales.
- **Mejora en la pureza del producto:** Los procesos híbridos permiten alcanzar niveles de pureza que serían difíciles de lograr utilizando únicamente la destilación. El estudio de Do Thi et al. (2020) sobre la separación de etanol y agua demostró que es posible obtener una pureza superior al 99.5% sin necesidad de recurrir a operaciones adicionales de rectificación, lo que simplifica el proceso y reduce costos operativos.
- **Reducción del número de etapas:** El uso de tecnologías híbridas como la adsorción o las membranas después de la destilación elimina la necesidad de varias etapas adicionales de separación, lo que simplifica el diseño del equipo, reduce el tamaño de las columnas y disminuye la complejidad operativa. Esto también se traduce en una disminución de los

costos de mantenimiento y operación, lo que hace que estos sistemas sean más atractivos desde un punto de vista económico.

Limitaciones:

- Costos iniciales de inversión: A pesar de sus beneficios, los sistemas híbridos suelen requerir una inversión inicial más alta. La integración de tecnologías avanzadas como membranas o sistemas de adsorción puede incrementar los costos de capital en hasta un 30%, según Kiss (2014). Esto puede ser una barrera significativa para las empresas más pequeñas que buscan implementar estas soluciones en sus procesos.
- Mantenimiento más complejo: Los sistemas híbridos tienden a ser más complejos desde el punto de vista del mantenimiento, especialmente cuando se utilizan membranas o adsorbentes especializados. Estos materiales requieren un mantenimiento regular y, en caso de fallas, pueden implicar costos operativos adicionales y tiempos de inactividad prolongados, lo que reduce la rentabilidad general del sistema.
- Sensibilidad a las condiciones de operación: Algunos sistemas híbridos, como aquellos que combinan membranas y destilación, son particularmente sensibles a las variaciones en las condiciones de operación, como la presión y la temperatura. Esto puede afectar su eficiencia si no se controlan de manera adecuada. El estudio de Szanyi et al. (2004) destacó que la efectividad de estos sistemas puede verse comprometida si no se mantienen condiciones operativas estables, lo que requiere un control más preciso y ajustes durante la operación.

CAPITULO 6. Destilación en un marco de economía circular

"En la naturaleza, nada se pierde, todo se transforma; en la industria, debemos aprender la misma lección." — Antoine Lavoisier

La economía circular es un enfoque que busca maximizar el uso de los recursos, minimizando el desperdicio y promoviendo la reutilización, el reciclaje y la recuperación de materiales. En este contexto, la destilación juega un papel fundamental al ser una herramienta clave para la recuperación de recursos y la reducción de desechos en diversos procesos industriales. La destilación permite recuperar solventes y otros compuestos valiosos que, de otro modo, serían desechados, lo que contribuye a mejorar la sostenibilidad de las operaciones industriales. Este enfoque es particularmente relevante en industrias como la química, la farmacéutica y la alimentaria, donde la optimización del uso de recursos y la minimización de residuos son prioridades fundamentales para lograr una producción más limpia y eficiente (Figura 13).



Figura 13. La destilación es elemento clave en la economía circular

En esta sección, examinaremos cómo la destilación se integra en el marco de la economía circular, destacando los avances científicos que han impulsado su papel en la recuperación de recursos y en la minimización de residuos, y cómo estos procesos están ayudando a reducir el impacto ambiental de las industrias modernas.

6.1. El rol de la destilación en la recuperación de recursos y reciclado

La destilación, al permitir la recuperación de disolventes y otros componentes, se ha convertido en un proceso esencial para el reciclaje de materiales valiosos en diferentes sectores industriales. La capacidad de recuperar y reutilizar solventes y productos químicos no solo reduce la necesidad de nuevas materias primas, sino que también disminuye significativamente el impacto ambiental asociado con la producción de residuos peligrosos. En industrias que generan grandes volúmenes de residuos líquidos, como la petroquímica y la farmacéutica, los sistemas de recuperación de disolventes a través de la destilación son críticos para mejorar la sostenibilidad y reducir los costos operativos.

6.1.1. Sistemas de recuperación de disolventes

Uno de los aspectos más importantes de la destilación en la economía circular es su capacidad para recuperar disolventes que pueden ser reutilizados en los mismos procesos o en otros, lo que reduce la dependencia de materias primas vírgenes. La recuperación de disolventes es especialmente relevante en industrias como la farmacéutica y la de productos químicos finos, donde los disolventes no solo son costosos, sino que también están sujetos a estrictas regulaciones ambientales debido a su potencial peligro para el medio ambiente.

Un ejemplo destacado de la aplicación de la destilación para la recuperación de disolventes es el trabajo de Vane (2019), quien investigó la destilación por arrastre de vapor como una estrategia para recuperar disolventes en la producción farmacéutica. En este estudio, se demostró que el proceso de arrastre de vapor logró una eficiencia de recuperación de hasta el 95% de los disolventes utilizados, lo que no solo redujo significativamente el consumo de nuevos disolventes, sino que también minimizó la cantidad de residuos generados durante el proceso de producción. Esta eficiencia en la recuperación es esencial en la economía circular, ya que permite mantener los recursos en uso durante más tiempo y reduce la necesidad de gestionar grandes volúmenes de residuos.

De manera similar, el estudio de Smallwood (2002) sobre la recuperación de disolventes orgánicos volátiles en la industria de pinturas mostró cómo la implementación de sistemas de destilación permitió la reutilización de disolventes, logrando ahorros operativos de hasta un 40%. Además de los beneficios económicos, esta estrategia redujo de manera significativa el impacto ambiental del proceso, ya que disminuyó la liberación de compuestos volátiles al medio ambiente y los costos asociados con el tratamiento de residuos peligrosos. Estos ejemplos resaltan la importancia de la destilación como herramienta para promover la sostenibilidad y la eficiencia en los procesos industriales, manteniendo el enfoque de la economía circular.

6.1.2. La destilación en la minimización de residuos

La minimización de residuos es otro de los aspectos clave de la economía circular, y la destilación desempeña un papel crucial en este proceso al permitir la separación y purificación de componentes que pueden ser reutilizados en lugar de ser desechados. Esta capacidad para recuperar materiales valiosos a partir de corrientes de desechos no solo reduce la cantidad de residuos que deben ser tratados o eliminados, sino que también transforma estos componentes en productos útiles, mejorando la rentabilidad y sostenibilidad de los procesos industriales.

Un ejemplo significativo de la destilación aplicada a la minimización de residuos es el trabajo de Muscetta et al. (2024), quienes investigaron la integración de la destilación en procesos de tratamiento de residuos industriales. En este estudio, lograron reducir el volumen de residuos peligrosos en un 30% mediante la recuperación de compuestos químicos que fueron reutilizados como materias primas en otros procesos. Este enfoque no solo minimizó la generación de residuos, sino que también mejoró la rentabilidad del proceso al convertir lo que antes se consideraba un desecho en un recurso valioso.

Otro estudio relevante es el de Mondal y Jana (2022), quienes implementaron sistemas híbridos de destilación para la recuperación de subproductos en la producción de biocombustibles. Mediante la

destilación, lograron recuperar etanol y otros compuestos útiles a partir de las corrientes de desechos, reduciendo la cantidad de residuos finales y mejorando la sostenibilidad general del proceso. Este enfoque es especialmente importante en la industria de los biocombustibles, donde la eficiencia en la utilización de los recursos y la reducción de residuos son factores clave para lograr un proceso más sostenible.

6.2. Integración de la destilación en sistemas cerrados

En el marco de la economía circular, los sistemas cerrados son esenciales para garantizar que los recursos se mantengan en uso continuo, minimizando al máximo la generación de residuos. En estos sistemas, la destilación es una herramienta clave para purificar y recuperar recursos de manera constante, permitiendo que los materiales sean reutilizados en el mismo proceso o en otros dentro de la misma planta industrial.

Un ejemplo notable de la integración de la destilación en sistemas cerrados es el trabajo de Schirmeister y Mülhaupt (2022), quienes desarrollaron un sistema de destilación acoplado a un proceso de producción de bioplásticos. En este caso, la destilación permitió reciclar y reutilizar disolventes y subproductos generados durante la producción de bioplásticos, cerrando el ciclo de materiales y reduciendo el consumo de recursos vírgenes en un 25%. Este enfoque no solo permitió optimizar el uso de recursos, sino que también mejorar la sostenibilidad de la producción de bioplásticos, una industria que busca alternativas más ecológicas a los plásticos convencionales.

Otro caso relevante es el estudio de Moreira et al. (2022), quienes implementaron un sistema de destilación en una planta de producción de químicos finos, donde el uso de destilación permitió cerrar el ciclo de agua y solventes utilizados, minimizando las descargas y residuos generados. Este sistema de circuito cerrado no solo redujo el consumo de agua y disolventes, sino que también disminuyó los costos operativos asociados con la adquisición de nuevas materias primas y el tratamiento de efluentes. En la industria química, este tipo de integración es fundamental para mejorar la sostenibilidad de los procesos y cumplir con las regulaciones medioambientales más estrictas.

En la industria petroquímica, el estudio de Li et al. (2020) mostró cómo la destilación puede integrarse en un ciclo cerrado para la recuperación de subproductos de los procesos de refinación. Este enfoque permitió reducir los residuos en un 35% y reutilizar los compuestos de hidrocarburos en otros procesos, demostrando que la destilación es una tecnología versátil que puede ser aplicada en diferentes etapas de los procesos petroquímicos para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad. Este tipo de integración es fundamental para cumplir con los objetivos de la economía circular en la industria pesada, donde la gestión de residuos representa un desafío considerable.

6.3. Perspectivas de futuro: Mejorar la sostenibilidad mediante modelos de economía circular

A medida que la economía circular se afianza como un modelo de producción más sostenible y eficiente, la destilación seguirá desempeñando un papel central en la recuperación de recursos, la minimización de residuos y la recirculación de materiales. Sin embargo, para lograr una integración más efectiva de la destilación en este marco, es necesario continuar desarrollando tecnologías que

no solo mejoren la eficiencia energética de los procesos, sino que también hagan más accesible y rentable su implementación a gran escala.

El estudio de Ramírez-Márquez et al. (2023) subraya la necesidad de seguir innovando en el diseño de columnas de destilación de baja energía que puedan integrarse fácilmente en sistemas de circuito cerrado. Este tipo de avances tecnológicos es crucial para reducir el consumo energético y facilitar la adopción de la destilación en plantas industriales que buscan minimizar su huella ambiental. La reducción del tamaño de las columnas, junto con la implementación de tecnologías más eficientes, será clave para optimizar los sistemas de destilación en el futuro.

Por otro lado, Kooijman y Sorensen (2022) sugieren que las investigaciones futuras deben centrarse en el desarrollo de procesos híbridos de destilación que combinen técnicas como la destilación reactiva o la destilación con membranas, con el fin de maximizar la recuperación de recursos y minimizar el impacto ambiental. Estos procesos híbridos no solo permiten mejorar la eficiencia energética, sino que también ofrecen la flexibilidad necesaria para adaptarse a diferentes tipos de procesos y mezclas, lo que los convierte en una solución prometedora para una amplia gama de industrias.

Finalmente, el estudio de Rekha-Panda et al. (2024) aboga por la implementación de tecnologías de destilación intensificada, que reduzcan tanto el tamaño de los equipos como el consumo energético. Esta intensificación de los procesos facilitaría su adopción en plantas industriales que buscan reducir su impacto ambiental, al mismo tiempo que optimiza la recuperación de recursos. Estas investigaciones son esenciales para garantizar que la destilación siga siendo una herramienta viable y competitiva dentro del marco de la economía circular en las próximas décadas, y para ayudar a las industrias a cumplir con los objetivos de sostenibilidad globales.

CAPITULO 7. La destilación y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible

"El verdadero progreso ocurre cuando la tecnología y la sostenibilidad avanzan de la mano." — Ban Ki-moon"

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, impulsada por las Naciones Unidas, establece un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) destinados a abordar desafíos globales como la pobreza, el acceso al agua, la energía limpia, y la gestión sostenible de los recursos. En este contexto, la destilación tiene un papel clave para ayudar a cumplir con varios de estos objetivos, especialmente en lo que respecta a la gestión de agua, la eficiencia energética y la producción sostenible. A pesar de que la destilación es un proceso intensivo en energía, las innovaciones tecnológicas están transformando esta operación, alineándola con los objetivos de sostenibilidad y haciendo posible una transición hacia prácticas más responsables y eficientes.

Esta sección explora cómo la destilación contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, con ejemplos de procesos sostenibles y estudios de casos que demuestran su potencial para promover un futuro más limpio y eficiente (Figura 14).



Figura 14. Destilación y los objetivos de desarrollo sostenible

7.1. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Con la adopción de nuevas tecnologías y la optimización de procesos, la destilación moderna tiene el potencial de contribuir significativamente a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular aquellos que promueven el acceso a agua limpia (ODS 6), energía asequible y sostenible (ODS 7) y patrones de consumo y producción responsables (ODS 12). A continuación, se detallan los aportes específicos de la destilación a cada uno de estos objetivos, destacando estudios y avances científicos que han sido fundamentales en esta transformación.

7.1.1. ODS 6: Agua limpia y saneamiento

El ODS 6 tiene como meta garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos, y la destilación desempeña un rol fundamental en este objetivo, especialmente en la purificación de agua en áreas donde los recursos hídricos son limitados o donde es necesario desalinizar el agua de mar. La destilación, al ser capaz de separar impurezas y contaminantes, se utiliza ampliamente para garantizar el acceso a agua potable en regiones áridas o insulares.

Un ejemplo clave de la contribución de la destilación al ODS 6 es el uso de destilación solar para la desalinización de agua. Esta tecnología ha sido aplicada con éxito en regiones áridas y en comunidades rurales donde los recursos de agua dulce son limitados. En el estudio de Alkaisi et al. (2017), se demostró que los sistemas de destilación solar pueden proporcionar agua potable a comunidades aisladas, con una eficiencia de conversión de hasta el 60% en comparación con métodos de desalinización convencionales. Al aprovechar la energía solar, este enfoque no solo proporciona agua limpia, sino que también reduce la necesidad de utilizar combustibles fósiles, lo que contribuye a la sostenibilidad del proceso.

Otro caso importante es el uso de destilación al vacío en plantas industriales para el tratamiento de aguas residuales. El estudio de Mukherje et al. (2021) mostró que la destilación al vacío puede reducir el contenido de contaminantes orgánicos en aguas residuales industriales en más de un 90%, mejorando la calidad del agua reutilizada. Este proceso es clave en la gestión sostenible del agua, ya que permite que las industrias traten y reutilicen el agua en lugar de verterla al medio ambiente, lo que reduce la presión sobre los recursos hídricos y contribuye directamente a las metas del ODS 6.

7.1.2. ODS 7: Energía limpia y asequible

El ODS 7 promueve el acceso a energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos. Aunque la destilación históricamente ha sido un proceso que demanda grandes cantidades de energía, las innovaciones tecnológicas están permitiendo que este proceso sea mucho más eficiente y sostenible, contribuyendo al acceso a energía limpia y asequible.

Un ejemplo de estas innovaciones es el uso de columnas de destilación con integración térmica (HIDiC), que aprovechan el calor generado en una parte del proceso para alimentar otras etapas, reduciendo así el consumo energético global. El estudio de Iwakabe et al. (2006) mostró que las columnas HIDiC pueden reducir el consumo energético hasta en un 50% en comparación con las columnas de destilación convencionales. Esta reducción en el uso de energía es fundamental para cumplir con los objetivos del ODS 7, ya que permite optimizar los procesos industriales, disminuir el uso de combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, la combinación de destilación con energías renovables es una tendencia emergente que también contribuye a los objetivos del ODS 7. El estudio de Mollahosseini et al. (2019) implementó un sistema híbrido de destilación alimentado por energía solar para la producción de biocombustibles. El uso de energía solar permitió reducir el consumo de energía fósil en un 70%, demostrando cómo la integración de energías renovables en procesos industriales puede hacer que la destilación sea más sostenible y asequible, alineándose con los objetivos de energía limpia.

7.1.3. ODS 12: Consumo y producción sostenibles

El ODS 12 busca promover patrones de consumo y producción sostenibles, y la destilación puede ayudar a lograr este objetivo al facilitar la recuperación de disolventes y subproductos en diversas industrias, como la química, farmacéutica y petroquímica. La capacidad de recuperar y reutilizar estos compuestos reduce la necesidad de materias primas vírgenes, disminuye los residuos y promueve una producción más responsable.

Un ejemplo clave es el estudio de Segovia-Hernández et al. (2023), que investigó el uso de procesos de destilación intensificados en la industria química para reducir la generación de residuos y promover la reutilización de materiales. Este enfoque permitió reducir en un 40% el volumen de residuos generados, mejorando significativamente la sostenibilidad del proceso. Además, el uso de procesos intensificados también mejoró la eficiencia operativa, lo que contribuyó a una producción más sostenible y responsable.

Otro estudio relevante es el de Skiborowski y Górak (2022), que exploró el uso de sistemas híbridos de destilación con integración de membranas para la recuperación de solventes en la industria farmacéutica. El sistema híbrido desarrollado por estos investigadores permitió reducir el consumo de nuevos solventes en un 30%, lo que no solo redujo los desechos peligrosos generados por el proceso, sino que también mejoró la eficiencia y sostenibilidad del sistema de producción, alineándose con los principios del ODS 12.

7.2. Casos de estudio: Procesos de destilación sostenible

Para ilustrar el impacto de la destilación en el avance hacia un desarrollo más sostenible, se pueden analizar diversos casos de estudio que demuestran cómo la destilación se ha utilizado con éxito para promover la eficiencia energética, el reuso de recursos y el consumo responsable en diferentes sectores industriales.

7.2.1. Reuso del agua en aplicaciones industriales

El reuso del agua en aplicaciones industriales es esencial para reducir el consumo de agua fresca y minimizar la descarga de efluentes contaminantes. La destilación, como método de purificación, juega un papel central en este proceso, permitiendo que el agua residual sea tratada y reutilizada en otros procesos dentro de la misma planta.

Un ejemplo notable es el estudio de Kharraz et al. (2022), quienes desarrollaron un sistema de reutilización de agua en una planta de producción química utilizando destilación para purificar aguas residuales. Este sistema permitió reducir en un 40% la cantidad de agua fresca utilizada, lo que no solo disminuyó los costos operativos, sino que también redujo significativamente el impacto ambiental de la planta al reducir las descargas de efluentes contaminantes. Este tipo de implementación es clave para cumplir con las metas del ODS 6, que busca garantizar el acceso y la gestión sostenible del agua.

Otro ejemplo relevante es el estudio de Abejón et al. (2024), que implementó un sistema híbrido de destilación y filtración por membranas para la reutilización de aguas residuales en la industria alimentaria. Este sistema logró eliminar hasta un 95% de los sólidos suspendidos y otros

contaminantes presentes en el agua residual, permitiendo que el agua tratada fuera reutilizada en otros procesos dentro de la planta. Este enfoque no solo alineó el proceso con los objetivos del ODS 6 (agua limpia) y el ODS 12 (consumo sostenible), sino que también redujo la huella hídrica de la industria alimentaria, promoviendo una producción más responsable.

7.2.2. Química verde y destilación energéticamente eficiente

La química verde busca minimizar el uso de sustancias peligrosas y reducir el impacto ambiental de los procesos químicos, y la destilación, cuando se optimiza para ser más eficiente en términos energéticos, puede contribuir significativamente a este objetivo.

En un estudio realizado por van den Kiss y Smith (2020), se implementó un sistema de destilación reactiva para la producción de productos químicos de base biológica. Este sistema permitió realizar la reacción química y la separación en una sola columna, lo que redujo el consumo de energía en un 35% en comparación con los procesos tradicionales. Además, minimizó la generación de subproductos peligrosos, lo que contribuyó a una producción más limpia y eficiente, alineada con los principios de la química verde.

Otro ejemplo relevante es el trabajo de Lucia et al. (2006), quienes investigaron el uso de un sistema híbrido de destilación con adsorción para reducir el consumo energético en la separación de mezclas complejas. Este enfoque permitió una reducción del 30% en el consumo de energía en comparación con los métodos tradicionales, demostrando el potencial de estas tecnologías para promover prácticas más sostenibles en la industria química y farmacéutica.

CAPITULO 8. Destilación en la Industria 4.0

"La cuarta revolución industrial no trata solo de máquinas más inteligentes, sino de procesos más inteligentes." — Klaus Schwab

La Industria 4.0 está transformando el panorama industrial a través de la digitalización, la automatización avanzada y la integración de tecnologías de vanguardia como la inteligencia artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT), los gemelos digitales y la automatización inteligente. Estos avances no solo están revolucionando las líneas de producción, sino que también están optimizando procesos unitarios clave como la destilación, lo que mejora significativamente su eficiencia, control y sostenibilidad.

La destilación, un pilar fundamental en muchas industrias como la química, petroquímica, farmacéutica y de alimentos, se ha beneficiado enormemente de esta transformación digital. Las tecnologías de la Industria 4.0 permiten un control más preciso de las variables operativas, la predicción de fallos, la simulación de escenarios y la optimización energética en tiempo real. Esto no solo reduce los costos operativos, sino que también aumenta la productividad y minimiza el impacto ambiental. En esta sección, se explora cómo la transformación digital está revolucionando los procesos de destilación y cómo estas innovaciones están optimizando el rendimiento en un marco de producción más inteligente, eficiente y adaptable (Figura 15).

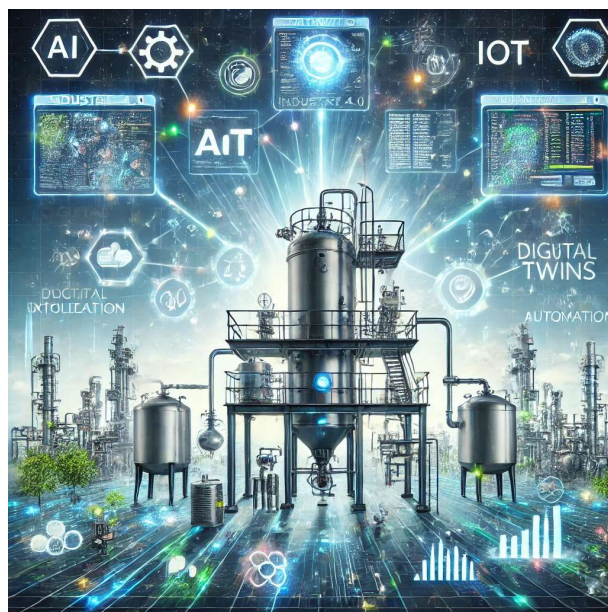


Figura 15. Destilación y la industria 4.0

8.1. Herramientas de la Industria 4.0 aplicadas en columnas de destilación

Las herramientas de la Industria 4.0 han abierto nuevas oportunidades para mejorar los procesos de destilación, particularmente mediante el uso de sensores inteligentes, el IoT y los gemelos digitales.

Estas tecnologías permiten la recolección de datos en tiempo real desde diferentes puntos de una columna de destilación, lo que ofrece una visibilidad sin precedentes del proceso. Estos avances permiten a los operadores monitorear continuamente las variables clave, como la presión, la temperatura y la composición del vapor y del líquido, lo que facilita la toma de decisiones informadas para mantener una operación óptima y eficiente.

Los sensores inteligentes, conectados a través del IoT, son capaces de detectar variaciones sutiles en las condiciones de operación, lo que permite una respuesta inmediata a estos cambios. Según Attaran (2017), se espera que más del 90% de las plataformas de IoT cuenten con capacidades de gemelo digital para el año 2027, lo que significa que no solo se podrá monitorear el rendimiento de las columnas de destilación en tiempo real, sino que también se podrán simular y optimizar diferentes escenarios operativos. Esta capacidad predictiva permite a las empresas no solo reaccionar a los problemas, sino anticiparlos y mitigarlos antes de que ocurran.

En el estudio realizado por Kender et al. (2020), se implementó un gemelo digital para monitorear en tiempo real una planta de destilación, logrando una reducción del consumo energético del 15% y mejorando la estabilidad del proceso. Este ejemplo subraya el potencial de los gemelos digitales para optimizar las operaciones industriales y reducir costos, al tiempo que mejora la eficiencia energética.

Otro aspecto clave de la Industria 4.0 en la destilación es el control automático de las variables operativas. Gracias al big data y a la inteligencia artificial (IA), es posible analizar grandes cantidades de datos generados por los sensores instalados en las columnas de destilación. Estos sistemas de IA pueden identificar patrones y correlaciones que serían difíciles de detectar para los operadores humanos, permitiendo la optimización del proceso en tiempo real. Según Davenport (2018), la aplicación de IA y big data en la destilación no solo permite predecir fallos, sino también ajustar automáticamente las condiciones operativas para evitar paradas no planificadas y optimizar el consumo de energía.

Un estudio realizado por Diez-Olivan et al. (2019) destacó que el uso de IA para la predicción de fallos y la optimización del rendimiento ha permitido reducir en un 25% los costos operativos en plantas industriales que utilizan destilación. Este ahorro significativo es el resultado de la capacidad de la IA para ajustar automáticamente las variables del proceso, lo que garantiza que la destilación se realice de manera eficiente en todo momento.

Los gemelos digitales son uno de los pilares más importantes de la Industria 4.0, especialmente en la optimización de procesos industriales complejos como la destilación. Un gemelo digital es una réplica virtual de un sistema físico que permite simular, monitorear y optimizar el proceso en tiempo real. En el contexto de la destilación, los gemelos digitales son herramientas valiosas que ayudan a los ingenieros a predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas, lo que facilita la experimentación virtual antes de realizar cambios en el mundo real.

Un ejemplo notable de esta tecnología es el estudio de Wang et al. (2023), en el cual los gemelos digitales se utilizaron para simular múltiples escenarios operativos en una planta de destilación. Los resultados del estudio mostraron que el uso de gemelos digitales permitió optimizar la eficiencia energética en un 20% en comparación con las plantas que no utilizan esta tecnología. Esta mejora se debe a la capacidad de los gemelos digitales para ajustar de manera precisa las condiciones de

operación en función de las necesidades del proceso, reduciendo así el consumo de energía y mejorando la calidad del producto final.

Además, los gemelos digitales permiten realizar pruebas de nuevas configuraciones y ajustes operativos sin interrumpir el proceso físico. Esto es especialmente útil en plantas industriales donde cualquier parada no planificada puede ser costosa. Los gemelos digitales también pueden simular el impacto de variaciones en las condiciones de operación, como cambios en la temperatura, la presión o la composición de la mezcla, lo que ayuda a identificar las configuraciones más eficientes para cada situación. Esto resulta en una mayor flexibilidad operativa y una mejora continua del proceso.

La inteligencia artificial (IA) está desempeñando un papel cada vez más importante en la automatización de los procesos de destilación. A medida que las plantas industriales se vuelven más inteligentes y conectadas, los sistemas de IA son capaces de analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, identificar patrones y hacer recomendaciones para optimizar el rendimiento de las columnas de destilación. Estos sistemas no solo ayudan a mejorar la eficiencia operativa, sino que también permiten reducir el consumo energético y minimizar el riesgo de fallos.

Los sistemas de IA pueden predecir cuándo es probable que ocurra una falla en el proceso de destilación, lo que permite a los operadores intervenir antes de que se produzca un problema grave. Esto se conoce como mantenimiento predictivo, una de las aplicaciones más valiosas de la IA en la Industria 4.0. Según Díez-Oliván et al. (2019), el uso de la IA para la predicción de fallos en plantas de destilación ha permitido reducir los costos asociados con las reparaciones no planificadas y las interrupciones del proceso en un 25%, lo que mejora significativamente la productividad y la disponibilidad operativa de las plantas.

La automatización inteligente en la destilación, impulsada por la IA, también permite realizar ajustes en tiempo real a las variables operativas, como el flujo de vapor, la presión o la temperatura. Esto asegura que las columnas de destilación operen de manera eficiente bajo cualquier condición, maximizando la calidad del producto y minimizando el consumo de energía. La capacidad de la IA para analizar continuamente datos y ajustar el proceso ha demostrado ser una herramienta poderosa para mejorar la sostenibilidad y reducir los costos operativos en la destilación.

8.2. Integración de destilación en redes de manufactura inteligentes

Otro aspecto clave de la Industria 4.0 es la integración de la destilación en redes de manufactura inteligentes. A través del Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube, los datos generados por las columnas de destilación se pueden compartir en tiempo real con otros sistemas dentro de la planta industrial. Esta integración permite que los equipos de la planta trabajen de manera conjunta para optimizar la producción y ajustarse rápidamente a las variaciones en la demanda o en la disponibilidad de materias primas.

En el estudio de Kenett et al. (2020), se implementó un sistema de destilación en una red de manufactura inteligente, lo que permitió mejorar la productividad en un 10-15%. Esta mejora se logró gracias a la capacidad del sistema para ajustar automáticamente las operaciones en función de las necesidades de producción, lo que permitió responder rápidamente a los cambios en las condiciones del mercado y optimizar el uso de los recursos. La integración de destilación en redes

inteligentes no solo mejora la eficiencia, sino que también ayuda a las plantas industriales a ser más flexibles y adaptables a las condiciones cambiantes de la producción.

Este enfoque colaborativo entre los diferentes sistemas de la planta no solo aumenta la eficiencia, sino que también permite una gestión más sostenible de los recursos. La capacidad de ajustar las operaciones en tiempo real reduce los desperdicios y optimiza el uso de la energía, lo que contribuye directamente a la sostenibilidad y a la reducción de la huella de carbono en las operaciones industriales.

CAPITULO 9. Retos futuros y oportunidades

"El futuro pertenece a aquellos que creen en la belleza de sus sueños y se atreven a convertirlos en realidad." — Eleanor Roosevelt

El futuro de la destilación presenta un conjunto de desafíos y oportunidades a medida que la industria avanza hacia sectores emergentes y un modelo más sostenible. Aunque la destilación ha sido una operación unitaria fundamental en la industria química, la creciente demanda de eficiencia energética, la sostenibilidad y la innovación tecnológica están impulsando cambios significativos en el diseño y operación de los sistemas de destilación. Estos retos y oportunidades se dividen en varios aspectos clave: la escalabilidad de las tecnologías, la intensidad energética y la necesidad de investigación y desarrollo continuo.

Uno de los mayores desafíos será escalar las tecnologías de destilación para satisfacer las necesidades de sectores emergentes, como la producción de biocombustibles, los productos farmacéuticos avanzados y la captura de carbono. Los sectores emergentes requieren tecnologías flexibles, eficientes y capaces de manejar mezclas más complejas y productos de alta pureza. Según estudios recientes, como el de van den Broek et al. (2020), la destilación reactiva y la destilación con integración de membranas han demostrado ser prometedoras para el procesamiento de productos de base biológica. Estas tecnologías ofrecen un equilibrio entre eficiencia y flexibilidad, permitiendo una transición más fluida hacia nuevos mercados, pero requieren una mayor inversión en investigación y optimización para poder escalarse de manera eficiente.

Otro reto importante es abordar la intensidad energética de la destilación. A pesar de los avances en el desarrollo de tecnologías como las columnas con integración térmica (HIDiC) y las columnas de pared dividida (DWC), la destilación sigue siendo uno de los procesos más intensivos en términos de consumo energético. Según Lutze et al. (2014), se estima que las tecnologías avanzadas de destilación pueden reducir hasta un 50% el consumo de energía en comparación con los métodos tradicionales, pero aún es necesario realizar mejoras para alcanzar los niveles de sostenibilidad exigidos por las políticas energéticas actuales. La investigación en destilación al vacío y bajas temperaturas también ha mostrado un potencial significativo para reducir la cantidad de energía utilizada en procesos industriales clave, como el tratamiento de aguas residuales y la producción de biocombustibles.

Por otro lado, la investigación y la innovación en tecnologías de destilación están avanzando rápidamente. Las herramientas de inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático se están integrando en el diseño y optimización de las operaciones de destilación, lo que permite una optimización predictiva de los parámetros operativos. Estas tecnologías permiten anticipar problemas antes de que ocurran, optimizar el rendimiento energético y reducir los costos operativos. El uso de gemelos digitales es otra área en crecimiento que permite realizar simulaciones en tiempo real de los procesos de destilación, lo que ayuda a mejorar el diseño y la operación de las columnas. Estas innovaciones, como se destacó en el estudio de Huang et al. (2021), son fundamentales para mantener la competitividad y mejorar la sostenibilidad a largo plazo.

Finalmente, las oportunidades futuras para la destilación incluyen la integración de estas tecnologías en redes de manufactura inteligente bajo el paraguas de la Industria 4.0. Esto permitirá una mayor eficiencia operativa y la capacidad de responder rápidamente a las demandas cambiantes del

mercado. La combinación de destilación con procesos híbridos, como la separación por membranas o la adsorción, continuará siendo una tendencia clave para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos de separación en los próximos años.

CAPITULO 10. Conclusiones

"El conocimiento no se mide por lo que hemos aprendido, sino por cómo lo aplicamos para transformar el futuro." — Anónimo

La destilación, una operación unitaria esencial en la ingeniería química, ha evolucionado significativamente para afrontar los desafíos contemporáneos de eficiencia energética y sostenibilidad. A lo largo del desarrollo de este artículo, hemos visto cómo los avances tecnológicos están impulsando una transformación en los procesos de destilación, desde su papel en la economía circular hasta su integración con las tecnologías emergentes de la Industria 4.0. Las innovaciones en áreas como la recuperación de solventes, el reuso de agua, y los procesos híbridos han permitido que la destilación se convierta en un pilar fundamental para la sostenibilidad industrial.

Uno de los mayores retos que enfrenta la destilación es su alta demanda energética. Las tecnologías tradicionales de destilación son intensivas en energía, pero las soluciones como las columnas de pared dividida (DWC) y la destilación con integración térmica (HIDiC) han demostrado su capacidad para reducir significativamente el consumo energético. Estas innovaciones son críticas para cumplir con los objetivos de sostenibilidad de la Agenda 2030, específicamente en los ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), y ODS 12 (Producción y consumo responsables).

En el marco de la Industria 4.0, la destilación está siendo transformada por la digitalización y la automatización inteligente. La inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático y los gemelos digitales están permitiendo una optimización predictiva y en tiempo real de los sistemas de destilación. Estas tecnologías mejoran el rendimiento operativo, reducen el consumo de energía y permiten la integración de la destilación en redes de manufactura inteligentes, lo que aumenta la eficiencia y flexibilidad en la producción química.

En el ámbito de la ingeniería química, las direcciones futuras para la destilación se podrían centrar en varios puntos clave:

- **Innovación en Tecnologías Híbridas:** La combinación de destilación con otras tecnologías de separación, como las membranas o la adsorción, continuará creciendo. Estas tecnologías híbridas ofrecen ventajas en términos de eficiencia energética y la capacidad para manejar mezclas complejas que la destilación convencional no puede separar de manera eficiente.
- **Integración con Energías Renovables:** Un área de investigación emergente es el uso de energías renovables, como la solar, para alimentar procesos de destilación, especialmente en aplicaciones como la desalinización. Esto contribuirá a reducir la dependencia de combustibles fósiles y a mejorar la sostenibilidad de los procesos.
- **Optimización con Inteligencia Artificial y Machine Learning:** La integración de IA y aprendizaje automático para predecir y optimizar las condiciones de operación en las columnas de destilación seguirá desarrollándose. Esto permitirá una mayor flexibilidad en los procesos y una reducción del consumo de recursos.
- **Escalabilidad para Nuevas Industrias:** Las industrias emergentes, como la producción de biocombustibles y los productos de base biológica, requerirán destilación a gran escala, pero

con tecnologías más flexibles y menos intensivas en energía. Las columnas reactivas y la destilación integrada en procesos circulares jugarán un papel clave aquí.

- **Sostenibilidad y Economía Circular:** La destilación será cada vez más importante para la recuperación de recursos y el reciclaje de disolventes, contribuyendo a una economía más circular y reduciendo la generación de residuos peligrosos.

En conclusión, la destilación está en un punto crítico de evolución tecnológica. Los avances en eficiencia energética, sostenibilidad y digitalización están posicionando a esta operación unitaria como una pieza clave para enfrentar los desafíos de la industria química del futuro, con un enfoque cada vez mayor en la sostenibilidad y la eficiencia operativa.

Referencias

- Abejón, R., Romero, J., & Quijada-Maldonado, E. (2024). Potential of membrane distillation for water recovery and reuse in water stress scenarios: Perspective from a bibliometric analysis. *Desalination*, 117989.
- 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>
- Alkaisi, A., Mossad, R., & Sharifian-Barforoush, A. (2017). A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 110, 268-274.
- Attaran, M. (2020, July). Digital technology enablers and their implications for supply chain management. In *Supply Chain Forum: An International Journal* (Vol. 21, No. 3, pp. 158-172). Taylor & Francis.
- Biegler, L. T., Grossmann, I. E., & Westerberg, A. W. (2011). *Systematic Methods of Chemical Process Design*. Prentice Hall PTR.
- Davenport, T. H. (2018). From analytics to artificial intelligence. *Journal of Business Analytics*, 1(2), 73-80.
- Diez-Olivan, A., Del Ser, J., Galar, D., & Sierra, B. (2019). Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. *Information Fusion*, 50, 92-111. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.10.005>
- Do Thi, H. T., Mizsey, P., & Toth, A. J. (2020). Separation of alcohol-water mixtures by a combination of distillation, hydrophilic and organophilic pervaporation processes. *Membranes*, 10(11), 345.
- 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.
- 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.
- Iwakabe, K., Nakaiwa, M., Huang, K., Nakanishi, T., Røsjorde, A., Ohmori, T., ... & Yamamoto, T. (2006). Energy saving in multicomponent separation using an internally heat-integrated distillation column (HIDiC). *Applied thermal engineering*, 26(13), 1362-1368.
- Iwakabe, K., Nakaiwa, M., Huang, K., Nakanishi, T., Røsjorde, A., Ohmori, T., ... & Yamamoto, T. (2006). Energy saving in multicomponent separation using an internally heat-integrated distillation column (HIDiC). *Applied thermal engineering*, 26(13), 1362-1368.

- Kender, R., Rößler, F., Wunderlich, B., Pottmann, M., Golubev, D., Rehfeldt, S., & Klein, H. (2022). Development of control strategies for an air separation unit with a divided wall column using a pressure-driven digital twin. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 176, 108893.
- Kenett, R. S., Zacks, S., & Finkelstein, M. (2020). *Modern industrial statistics: With applications in R, MINITAB, and JMP*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119640985>
- Kharraz, J. A., Khanzada, N. K., Farid, M. U., Kim, J., Jeong, S., & An, A. K. (2022). Membrane distillation bioreactor (MDBR) for wastewater treatment, water reuse, and resource recovery: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102687.
- 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. (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., & Smith, R. (2020). Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry. *Energy*, 203, 117788.
- 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.
- Kiss, A., & Suszwalak, D. P. (2012). Enhanced dimethyl ether synthesis by reactive distillation in a dividing-wall column. *Procedia Engineering*, 42, 581-587.
- Kockmann, N. (2014). History of distillation. In *Distillation* (pp. 1-43). Academic Press.
- Kooijman, H. A., & Sorensen, E. (2022). Recent advances and future perspectives on more sustainable and energy efficient distillation processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 188, 473-482.
- Li, Q., & Kiss, A. A. (2021). Novel pervaporation-assisted pressure swing reactive distillation process for intensified synthesis of dimethyl carbonate. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 162, 108358.
- Li, X., Zhai, J., Li, H., & Gao, X. (2020). An integration recycling process for cascade utilization of waste engine oil by distillation and microwave-assisted pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 199, 106245.
- Lucia, A., Amale, A., & Taylor, R. (2006). Energy efficient hybrid separation processes. *Industrial & engineering chemistry research*, 45(25), 8319-8328.
- 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.
- Mollahosseini, A., Abdelrasoul, A., Sheibany, S., Amini, M., & Salestan, S. K. (2019). Renewable energy-driven desalination opportunities—A case study. *Journal of environmental management*, 239, 187-197.

- Mondal, B., & Jana, A. K. (2022). Optimal reflux splitting reactive distillation for algal biodiesel Production: Waste heat recovery through vapor recompression and organic Rankine cycle. *Separation and Purification Technology*, 292, 121007.
- Moreira, V. R., Lebron, Y. A. R., Gontijo, D., & Amaral, M. C. S. (2022). Membrane distillation and dispersive solvent extraction in a closed-loop process for water, sulfuric acid and copper recycling from gold mining wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 435, 133874.
- Mukherjee, A., Satish, A., Mullick, A., Rapolu, J., Moulik, S., Roy, A., & Ghosh, A. K. (2021). Paradigm shift toward developing a zero liquid discharge strategy for dye-contaminated water streams: a green and sustainable approach using hydrodynamic cavitation and vacuum membrane distillation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(19), 6707-6719.
- Muscetta, M. (2024). Process intensification in metal recovery from solid waste: challenges, opportunities and recent advances. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 109937.
- Park, J., Kim, K., Shin, J. W., Tak, K., & Park, Y. K. (2017). Performance Study of multistage membrane and hybrid distillation processes for propylene/propane separation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(12), 2390-2397.
- Perez-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.
- Ramírez-Márquez, C., Al-Thubaiti, M. M., Martín, M., El-Halwagi, M. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2023). Processes intensification for sustainability: prospects and opportunities. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(6), 2428-2443.
- Rekha Panda, S. R., Asthana, S., Madalgi, A., Kumar, A., Sinha, R., Kishor, K., & Ismail, A. (2024). Process Intensification in the fields to separate, recycle and reuse wastes through Membrane Technology. *Environmental Science: Water Research & Technology*.
- Schirmeister, C. G., & Mülhaupt, R. (2022). Closing the carbon loop in the circular plastics economy. *Macromolecular rapid communications*, 43(13), 2200247.
- Seader, J. D., & Henley, E. J. (2006). *Separation Process Principles* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Cossío-Vargas, E., & Sánchez-Ramírez, E. (2023). Challenges and opportunities in process intensification to achieve the UN's 2030 agenda: goals 6, 7, 9, 12 and 13. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 109507.
- Sharma, P. K., & Wankat, P. C. (2013). Distillation-adsorption hybrid processes to separate binary liquid mixtures with homogeneous azeotrope. *Separation Science and Technology*, 48(1), 1-14.
- Skiborowski, M., & Górak, A. (2022). *Hybrid separation processes*. De Gruyter: Berlin, Germany.
- Smallwood, I. M. (2002). *Solvent recovery handbook*. CRC Press.
- Smith, R. (2010). *Chemical Process Design and Integration*. Wiley.

Sholl, D. S., & Lively, R. P. (2016). Seven chemical separations to change the world. *Nature*, 532(7600), 435-437.

Stankiewicz, A., & Moulijn, J. A. (2000). Process intensification: Transforming chemical engineering. *Chemical Engineering Progress*, 96(1), 22-34.

Szanyi, A., Mizsey, P., & Fonyo, Z. (2004). Novel hybrid separation processes for solvent recovery based on positioning the extractive heterogeneous-azeotropic distillation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(3), 327-338.

Vane, L. M. (2019). Membrane materials for the removal of water from industrial solvents by pervaporation and vapor permeation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94(2), 343-365.

Vooradi, R., Patnaikuni, V. S., Tula, A. K., Anne, S. B., Eden, M. R., & Gani, R. (2018). Hybrid Separation Scheme for Azeotropic Mixtures—Sustainable Design Methodology. *Chem Eng Trans*, 69, 637.

Wang, X., Cheng, N., Ma, L., Sun, R., Chai, R., & Lu, N. (2023). Digital twin-assisted knowledge distillation framework for heterogeneous federated learning. *China Communications*, 20(2), 61-78.

Resumen

La destilación, una de las operaciones unitarias más antiguas y esenciales en la industria química, ha experimentado una evolución notable desde sus primeros usos en civilizaciones antiguas hasta convertirse en un proceso clave para la separación de mezclas en sectores como el petroquímico, farmacéutico y alimentario. Este documento realiza un recorrido histórico de la destilación, destacando los avances tecnológicos que han permitido su adaptación a las exigencias energéticas y ambientales del siglo XXI. Además, se exploran las innovaciones en el diseño de columnas, la integración de tecnologías híbridas y el impacto de la destilación en la economía circular, subrayando su papel en la recuperación de disolventes y la reducción de residuos.

El futuro de la destilación está marcado por la transformación digital, donde herramientas como la inteligencia artificial, los gemelos digitales y el Internet de las Cosas (IoT) están optimizando los procesos, haciéndolos más eficientes y sostenibles. El artículo también analiza los desafíos y oportunidades que enfrenta la destilación en el contexto de la Industria 4.0 y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, como el acceso a agua limpia, energía asequible y producción responsable.

Finalmente, se presentan casos de estudio que ilustran cómo la destilación está siendo transformada por estos avances, con un enfoque en la sostenibilidad, la eficiencia energética y la innovación tecnológica. En conjunto, esta monografía ofrece una visión integral de la destilación en el contexto moderno, subrayando su papel esencial en la industria química y las oportunidades para su desarrollo futuro.

Eduardo Sánchez Ramírez^a

Brenda Huerta Rosas^a

Juan Gabriel Segovia Hernández^a

Salvador Hernández Castro^a

^a Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Guanajuato 36050, México.

