

DESTILACIÓN EN LA ERA DE LA INDUSTRIA 4.0: INNOVACIÓN, SOSTENIBILIDAD Y OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA

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

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

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

Resumen

Este trabajo explora los avances y desafíos actuales en la destilación, un proceso fundamental en la ingeniería química, conocido por su alto consumo energético y amplia aplicación industrial. El documento analiza las estrategias emergentes que buscan mejorar la eficiencia energética de las columnas de destilación, incluyendo la integración de nuevas tecnologías como los acoplamientos térmicos y las columnas de pared dividida. Asimismo, se evalúan los esquemas híbridos que combinan la destilación con tecnologías complementarias, como membranas y adsorción, para optimizar el rendimiento de separación y reducir el consumo energético. Además, se revisa el papel de la destilación en el contexto de la sostenibilidad, enfatizando su contribución a la economía circular y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Finalmente, se examina cómo la digitalización y la automatización, enmarcadas en la Industria 4.0, están transformando las operaciones de destilación, permitiendo un control más preciso y una mayor eficiencia operativa. Este estudio destaca la importancia de seguir innovando en tecnologías de destilación para lograr un equilibrio entre eficiencia, sostenibilidad y viabilidad económica en las industrias químicas.

Palabras clave: Destilación; Sostenibilidad; Industria 4.0.

DISTILLATION IN THE AGE OF INDUSTRY 4.0: INNOVATION, SUSTAINABILITY AND ENERGY OPTIMIZATION

Abstract

This paper explores current advances and challenges in distillation, a fundamental process in chemical engineering, known for its high energy consumption and wide industrial application. The paper discusses emerging strategies that seek to improve the energy efficiency of distillation columns, including the integration of new technologies such as thermal couplings and split-wall columns. It also evaluates hybrid schemes that combine distillation with complementary technologies, such as membranes and adsorption, to optimize separation performance and reduce energy consumption. Furthermore, the role of distillation in the context of sustainability is reviewed, emphasizing its contribution to the circular economy and its alignment with the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda. Finally, it examines how digitization and automation, framed by Industry 4.0, are transforming distillation operations, enabling more precise control and greater operational efficiency. This study highlights the importance of continuing to innovate in distillation technologies to achieve a balance between efficiency, sustainability and economic viability in the chemical industries.

Keywords: Distillation; Sustainability; Industry 4.0.

1. Introducción

La destilación es uno de los procesos más antiguos y fundamentales dentro de la ingeniería química utilizado para separar componentes de una mezcla líquida a través de sus diferencias en puntos de ebullición. Este proceso ha sido clave en industrias como la petroquímica, la alimentaria y la farmacéutica, donde la pureza de los productos es esencial. A lo largo de los siglos, la destilación ha evolucionado considerablemente, pero su principio básico sigue siendo el mismo: separar y purificar sustancias líquidas. Sin embargo, a pesar de su efectividad, este proceso no está exento de desafíos, especialmente en términos de consumo energético y sostenibilidad (Kong y col. 2022). Si bien el consumo de energía es elevado, la destilación presenta múltiples ventajas como proceso de separación, por ejemplo, su capacidad para manejar grandes volúmenes de producción y su flexibilidad para adaptarse a diferentes escalas, desde laboratorios hasta grandes plantas industriales. Además, es un proceso confiable y probado que puede alcanzar altos niveles de pureza en los productos. Por otro lado, sus desventajas más notables incluyen su elevado consumo energético, que representa una proporción significativa de los costos

operativos en plantas químicas, y la dependencia de la aplicación de calor, lo que genera un impacto ambiental considerable debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (Hernández, 2003).

Para contrarrestar estos inconvenientes, se han desarrollado diversas estrategias para mejorar el desempeño de las columnas de destilación y optimizar su eficiencia energética. Entre las innovaciones más destacadas se encuentran los acoplamientos térmicos, que permiten reutilizar el calor en distintas etapas del proceso, reduciendo el aporte externo de energía. Un esquema de separación con un elevado nivel de acoplamiento térmico es la columna de pared dividida o DWC por sus siglas en inglés. Las columnas de pared dividida (DWC) han demostrado ser una solución eficiente al permitir múltiples separaciones dentro de una misma columna, optimizando el espacio y el consumo de energía. Otras propuestas de separación que han mostrado buen desempeño son los esquemas de separación híbridos. Los esquemas híbridos de destilación, que combinan la destilación con otras tecnologías como membranas o adsorción, han surgido como alternativas prometedoras para mejorar la eficiencia de separación, minimizar las pérdidas

energéticas y reducir el número de equipos requeridos (Kiss, 2014).

En un contexto de sostenibilidad, la destilación también juega un papel importante en un marco de economía circular, ya que permite la recuperación y reutilización de solventes y otros compuestos valiosos en lugar de desecharlos. Esto no solo reduce los costos operativos, sino que también disminuye el impacto ambiental al fomentar la reutilización de recursos (González-Navarrete y col. 2021). Además, la Agenda 2030 de la ONU ha puesto de manifiesto la necesidad de hacer frente a los retos energéticos y medioambientales mediante el uso de tecnologías más sostenibles, y la destilación, a través de sus innovaciones, se alinea con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Robaina Romero, 2019). En particular, la reducción del consumo energético y la implementación de tecnologías más limpias son fundamentales para cumplir los ODS relacionados con energía asequible y no contaminante (ODS 7), así como con la producción y consumo responsables (ODS 12).

Finalmente, el avance de la Industria 4.0 ha comenzado a transformar el panorama de la destilación. La integración de tecnologías

digitales, como la inteligencia artificial, el internet de las cosas (IoT) y el análisis de datos en tiempo real, permite un control más preciso y eficiente del proceso de destilación, optimizando tanto la producción como el consumo energético. Estas herramientas facilitan la automatización y monitorización avanzada de los equipos, lo que resulta en un aumento de la eficiencia operativa y una reducción de los costos de mantenimiento y energía (Delenogare y col. 2018).

El presente artículo tiene como objetivo explorar la relevancia de la destilación desde estas múltiples perspectivas, evaluando su importancia histórica y su papel actual en la industria. A través de este análisis, se busca comprender cómo la destilación se adapta a los retos actuales de la sostenibilidad y la eficiencia energética, y cómo contribuye al avance hacia un modelo de economía circular, la consecución de los objetivos de la Agenda 2030 y la implementación de los principios de la Industria 4.0. Con ello, se pretende ofrecer una visión integral de las innovaciones y estrategias que están moldeando el futuro de la destilación y su importancia en el desarrollo industrial sostenible.

2. Estrategias de diseño innovadoras para minimizar el consumo de energía en columnas de destilación

La destilación sigue siendo una de las operaciones unitarias más intensivas en cuanto a consumo energético dentro de la industria química. Este proceso requiere una cantidad considerable de calor para evaporar y condensar los componentes de una mezcla, lo que convierte a la destilación en un proceso clave, pero a la vez costoso en términos de energía. En un contexto industrial donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son cada vez más valoradas, es esencial reducir este consumo energético sin sacrificar la efectividad del proceso (El-Agouz y col. 2022). A lo largo de los últimos años, se han desarrollado diversas estrategias innovadoras que buscan minimizar la energía utilizada en las columnas de destilación, reduciendo así los costos operativos y el impacto ambiental. El alto consumo energético es uno de los mayores retos que enfrenta la destilación en la actualidad. Según estudios de Smith (2016) y Lutze y col. (2013), la destilación puede representar hasta el 50% del consumo total de energía en una planta química. Esto se debe al gran aporte de calor necesario para evaporar los componentes más volátiles de la mezcla y luego condensar el vapor generado. El ciclo

de evaporación-condensación consume una cantidad significativa de energía, con pérdidas adicionales debidas a la ineficiencia en el diseño de los sistemas de destilación convencionales. Uno de los problemas más comunes en las columnas de destilación es el fenómeno de remezclado, que ocurre cuando el vapor y el líquido no se separan de manera eficiente dentro de la columna. Este fenómeno causa una pérdida de energía significativa, ya que se requiere un aporte adicional de calor para mantener la separación. De hecho, se ha observado que el remezclado puede reducir la eficiencia de separación hasta en un 20% en columnas de gran tamaño, como las utilizadas en la refinación de petróleo (Seader y Henley 2006).

Para mitigar el elevado 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 adopción de configuraciones de columna más eficientes, como las columnas de pared dividida (DWC) y los sistemas de destilación con integración térmica (HIDiC) (Figura 1). Las DWC son columnas de destilación avanzadas que integran múltiples separaciones en una sola

unidad mediante una partición vertical interna. Este diseño elimina equipos adicionales y reduce el consumo de energía al optimizar el intercambio térmico y minimizar el remezclado. Las DWC pueden ahorrar hasta un 30% de energía comparado con columnas tradicionales (Tian y col. 2022). Por otro lado, las columnas HIDiC utilizan un diseño en el que las secciones de rectificación y agotamiento operan a diferentes presiones, permitiendo el intercambio de calor entre sus corrientes internas. Este sistema elimina la necesidad de un rehervidor y un condensador, logrando ahorros energéticos de hasta el 50%. El uso de compresores y un diseño adecuado son esenciales para su eficiencia (Tahir y col. 2024). Ambas tecnologías ilustradas en la Figura 1, destacan por su capacidad para reducir significativamente el consumo energético, mejorar la sostenibilidad y disminuir costos operativos en procesos de destilación.

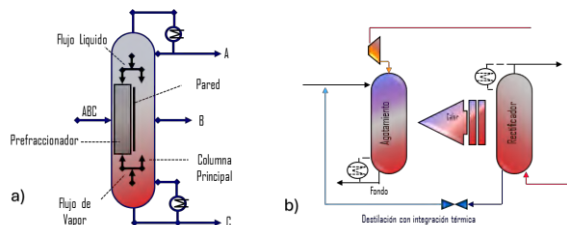


Figura 1. Columna de pared dividida a),
Columna de Destilación con Integración Térmica
b).

2.1 Acoplamientos térmicos

Los acoplamientos térmicos son una de las soluciones más efectivas para reducir el consumo de energía en los sistemas de destilación. Esta técnica conecta varias columnas de destilación de manera que los flujos de calor y vapor pueden ser reutilizados en diferentes etapas del proceso, disminuyendo así la necesidad de energía externa. Hernández y col. (2003) encontraron que el acoplamiento térmico en sistemas de destilación puede reducir el consumo energético hasta en un 30%. En el caso de estudio presentado por Hernández y col. (2003) se supuso un caudal de alimentación de 34,05 kmol/h como líquido saturado. Las fracciones molares deseadas para las principales corrientes de productos se tomaron como 0,987, 0,980 y 0,986 para n-pentano, n-hexano, n-heptano, respectivamente. Para efectos de purificar la mezcla, se consideró partir de una secuencia indirecta convencional. La reducción en el consumo energético reportado, se logró utilizando la secuencia térmicamente acoplada como la que se muestra en la Figura 2 y que se describe en la Tabla 1.

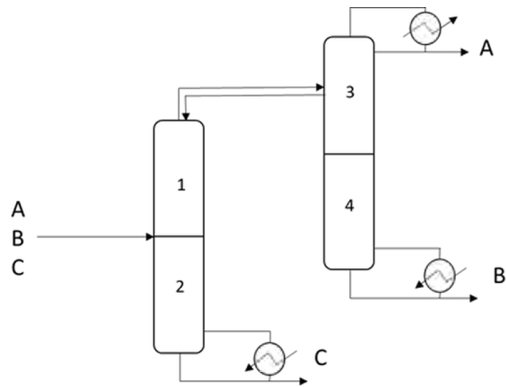


Figura 2. Esquema de separación térmicamente acoplado

Tabla 1. Parámetros de diseño del esquema en la Figura 2.

	Columna 1	Columna 2
Presión de diseño (kPa)	101.3	146.2
Número de etapas	20	17
Etapas de alimentación	11	9
Etapas de reciclo		8
Carga térmica (W)	382820	139298
Relación de reflujo		5.079

En este mismo trabajo, se reportó también la disminución de la demanda energética de la columna de pared dividida (DWC) a pesar de realizar una separación múltiple. Además, como consecuencia de la disminución de

equipos, el uso y costo de espacio en una industria es también observado.

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

La integración de calor es otra estrategia que ha mostrado ser altamente eficaz para disminuir el consumo energético en las columnas de destilación. Esta técnica reutiliza el calor generado en la parte inferior de la columna para alimentar las etapas superiores, lo que minimiza la necesidad de calor externo. Pérez-Cisneros y col. (2017) diseñaron un sistema HIDiC que, comparado con columnas convencionales, redujo el consumo energético en un 50%. Esta reducción se debe, en gran parte, a la capacidad de las columnas HIDiC para minimizar el remezclado y mejorar la eficiencia térmica. Las columnas con integración térmica presentan complejidades inherentes en su diseño, debido a la necesidad de operar a diferentes presiones en las secciones de agotamiento y rectificación. Esto requiere compresores de alta eficiencia, materiales especializados capaces de soportar grandes gradientes de presión y temperaturas, y sistemas avanzados de control para garantizar la estabilidad térmica. Un ejemplo

destacado es el uso de HIDiC en la separación de propileno y propano en la industria petroquímica, como reportó Li y col. (2024), donde se logró una reducción del consumo energético del 45%. Sin embargo, el costo inicial elevado de los compresores y la complejidad del diseño pueden limitar su adopción, especialmente en instalaciones más pequeñas.

3. Procesos de destilación híbridos

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.

3.1. Procesos de separación híbridos destilación – membrana

La integración de la destilación con membranas de separación ha surgido como una solución innovadora para mejorar la eficiencia de los procesos de separación (Observe Figura 3). 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 y col. (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 Thi y col. (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. El caso de estudio presentado por Thi y col. (2020) consideró una corriente de alimentación de 1000 kg/h y una composición en masa de 98% de agua y 2% de etanol. Se consideró una columna de destilación convencional (concentradora) para llegar a la mezcla etanol al punto azeotrópico, y posteriormente alimentó a una etapa de pervaporación. La membrana utilizada consideró su diseño bajo los parámetros de la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de diseño para el módulo de pervaporación

Unidad de pervaporación	Valor	Unidad
Presión de permeado	0.008	bar
Caída de presión	0.1	bar
Permeabilidad	10^{-8}	kmol/m ² h bar
Coefficiente de transporte agua	0.00246	kmol/m ² h
Coefficiente de transporte metanol	0.0458	kmol/m ² h

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.

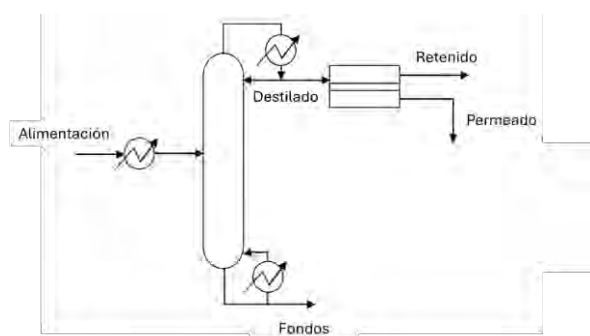


Figura 3. Procesos de separación híbridos destilación-membrana

La integración de membranas en procesos de destilación requiere materiales con alta selectividad, resistencia térmica y estabilidad química para soportar condiciones industriales. Además, el ensuciamiento y la degradación de las membranas representan barreras significativas para su operación a

largo plazo. En la industria de biocombustibles, la separación de etanol y agua utilizando sistemas híbridos ha demostrado ser eficaz, como lo reportaron Karimí y col. (2021), quienes lograron un ahorro energético del 40% comparado con destilación convencional. Sin embargo, los costos asociados al mantenimiento y reemplazo de membranas son un desafío crítico que limita su adopción en ciertas industrias.

3.2. 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 y col. (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 y col. (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.

Los sistemas que combinan destilación y adsorción enfrentan desafíos relacionados con el desarrollo de materiales adsorbentes que ofrezcan alta selectividad, estabilidad térmica y capacidad de regeneración. Además, la sincronización operativa entre las etapas de destilación y adsorción requiere

control avanzado para evitar interrupciones en el proceso. En la refinación de hidrocarburos, Chevron utilizó adsorbentes personalizados que mejoraron la pureza del producto en un 20% y redujeron el consumo energético (Li y col., 2016). A pesar de estos logros, el ensuciamiento de los adsorbentes y los costos de regeneración siguen siendo retos importantes.

3.3. Otros esquemas híbridos de separación.

La integración de destilación con extracción líquido- líquido es útil para separar mezclas con componentes que presentan interacciones químicas o azeótropos difíciles de romper. Este sistema combina las ventajas de la destilación para separaciones iniciales con la capacidad de la extracción de solventes para mejorar la selectividad. Por ejemplo, recientemente se reportó la ventaja de utilizar columnas de extracción líquido-líquido en conjunto con columnas destilación para separar efluentes provenientes de la fermentación ABE (Errico y col. 2017, Sánchez-Ramírez 2015). La ventaja sustancial que mostró esta topología fue poder romper los azeótropos homogéneo y heterogéneo entre el etanol-agua, y butanol-

agua, respectivamente, mediante el uso de n-hexil acetato como solvente.

Por otro lado, los sistemas híbridos de destilación y absorción combinan la capacidad de la destilación para separar componentes volátiles con la habilidad de la absorción para capturar componentes específicos de la corriente gaseosa. Este enfoque se utiliza frecuentemente en procesos donde se requiere la recuperación de componentes valiosos o la captura de contaminantes. Un ejemplo interesante fue el desarrollado por Martínez-Lomovskoi y col. (2023), quien, mediante un proceso conformado por una columna de absorción reactiva y una columna de destilación convencional, pudo realizar la captura de CO₂ utilizando solventes novedosos (solventes eutécticos profundos) en la columna de adsorción, y efectuando los procesos de recuperación de solvente en una columna de destilación.

3.4. 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 y col. (2018) y Park y col. (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 y col. (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 y col. (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.

4. Destilación en un marco de economía circular

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 4).



Figura 4. Destilación e industria en un marco de 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 desechos, y cómo estos procesos están ayudando a reducir el impacto ambiental de las industrias modernas.

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

La destilación, al permitir la recuperación de solventes y otros compuestos, 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 solventes a través de la destilación son críticos para mejorar la sostenibilidad y reducir los costos operativos.

4.1.1. Sistemas de recuperación de solventes

Uno de los aspectos más importantes de la destilación en la economía circular es su

capacidad para recuperar solventes que pueden ser reutilizados en los mismos procesos o en otros, lo que reduce la dependencia de materias primas vírgenes. La recuperación de solventes es especialmente relevante en industrias como la farmacéutica y la de productos químicos finos, donde los solventes 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 solventes es el trabajo de Vane (2019), quien investigó la destilación por arrastre de vapor como una estrategia para recuperar solventes 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 solventes utilizados, lo que no solo redujo significativamente el consumo de nuevos solventes, 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 desechos.

De manera similar, el estudio de Smallwood (2002) sobre la recuperación de solventes orgánicos volátiles en la industria de pinturas mostró cómo la implementación de sistemas de destilación permitió la reutilización de solventes, 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.

4.1.2. La destilación en la minimización de desechos

La minimización de desechos 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 desechos en productos útiles, mejorando la rentabilidad y sostenibilidad de los procesos industriales.

Un ejemplo significativo de la destilación aplicada a la minimización de desechos es el trabajo de Muscetta y col. (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.

4.2. 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 solventes 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 optimizó el uso de recursos, sino que también mejoró 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 y col. (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 solventes, 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 y col. (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.

4.3. Perspectivas a 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 y col. (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 y col. (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.

5. La destilación y la agenda 2030 para el desarrollo sostenible

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 (ONU, 2020). 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 (Figura 5).

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 5. Destilación y los objetivos de desarrollo sostenible

5.1. 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.

5.1.1. 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 y col. (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 y col. (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.

Un ejemplo notable es el estudio de Kharraz y col. (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 y col. (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.

5.1.2. 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 y col. (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 y col. (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.

5.1.3. 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 solventes 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 y col. (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.

La incorporación de energías renovables en los procesos de destilación ha demostrado ser efectiva para reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. Un ejemplo de ello es el desarrollo de destiladores solares combinados que utilizan energía solar concentrada y fotovoltaica para la producción de esencias naturales de cítricos. Este método sostenible no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también optimiza la eficiencia energética del proceso (González-Villanueva y col. 2024).

La destilación es una técnica clave para la recuperación de solventes orgánicos utilizados en diversos procesos industriales. Mediante la destilación por lotes, es posible

separar y purificar solventes de mezclas residuales, permitiendo su reutilización y reduciendo la necesidad de materias primas vírgenes. Este enfoque no solo disminuye los costos operativos, sino que también minimiza la generación de desechos peligrosos, contribuyendo a una producción más limpia y sostenible (Figuroa P. y col. 2016).

6. Destilación en la Industria 4.0

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 (Ennis y col. 2018) (Observe Figura 5).

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 (Choi y col. 2023).

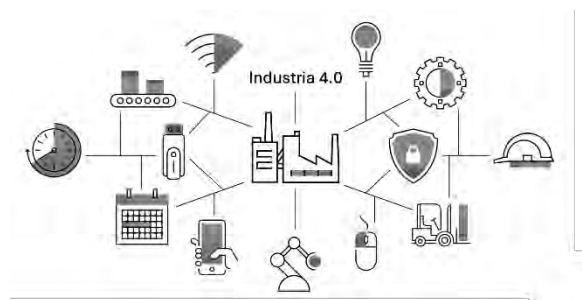


Figura 5. Destilación y la industria 4.0

6.1. 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.

Si bien protocolos convencionales como OPC-UA y Ethernet permiten la transmisión de datos en tiempo real dentro de plantas industriales, la integración del Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube amplía significativamente estas capacidades. El IoT facilita la interconexión de dispositivos y sistemas, recolectando y

procesando datos de forma más eficiente, mientras que la computación en la nube ofrece escalabilidad y acceso remoto, reduciendo costos y permitiendo análisis avanzados en tiempo real. Aunque OPC-UA es una herramienta clave en la Industria 4.0, su combinación con IoT y la computación en la nube potencia la integración y análisis de datos, permitiendo una toma de decisiones más ágil y precisa en entornos industriales. Esta sinergia mejora la eficiencia, la flexibilidad y la sostenibilidad de las operaciones industriales, superando las capacidades de los sistemas tradicionales (Ladegourdie, M., y Kua, J. 2022)

Un gemelo digital es una representación virtual precisa de un objeto, proceso o sistema físico, que se actualiza en tiempo real mediante datos obtenidos de su contraparte física. Esta tecnología permite simular, analizar y optimizar el rendimiento de sistemas complejos, facilitando la toma de decisiones informadas y la mejora continua de procesos industriales. En el caso de aplicaciones relacionadas con procesos químicos y columnas de destilación, los gemelos digitales están constituidos por varios elementos clave que trabajan de manera integrada para garantizar su funcionalidad (Zhou y col. 2023).

La sensorización y la adquisición de datos son fundamentales, ya que se instalan sensores en el sistema físico para recopilar información en tiempo real sobre variables críticas como temperatura, presión, flujo y composición química. Estos datos se emplean para reflejar de manera precisa el estado operativo del proceso en el modelo digital. Utilizando esta información, se desarrolla un modelo computacional que replica el comportamiento del sistema físico. Este modelo se basa en principios de ingeniería, química y física, y se ajusta continuamente para mantener su precisión frente a las condiciones cambiantes del proceso (Wang y col. 2023). Además, los gemelos digitales integran tecnologías avanzadas como la simulación, el aprendizaje automático y el análisis de datos. Estas herramientas permiten predecir el comportamiento futuro del sistema, identificar posibles fallos y optimizar las operaciones, anticipándose a problemas y mejorando la eficiencia. Un componente adicional crucial es la interfaz de visualización y control, que proporciona a los operadores una plataforma interactiva para monitorear el estado del proceso en tiempo real, realizar simulaciones y aplicar ajustes operativos basados en los análisis del modelo. Esto facilita la toma de decisiones rápidas y basadas en datos precisos. En el contexto

específico de las columnas de destilación, los gemelos digitales permiten monitorear continuamente las variables operativas para asegurar condiciones óptimas, simular escenarios para evaluar cambios sin riesgos, optimizar el consumo de energía ajustando parámetros del proceso y prever fallos potenciales para realizar mantenimiento preventivo, minimizando así tiempos de inactividad no planificados (Riwanti y col. 2024).

En el estudio realizado por Kender y col. (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 y col. (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 Diez-Olivan y col. (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.

6.1 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.

La llegada de la Industria 4.0 ha permitido la transformación de las operaciones industriales a través de la digitalización, la automatización avanzada y la interconexión de sistemas. Este fenómeno ha impactado significativamente a procesos industriales clave, como la destilación, un proceso fundamental en la ingeniería química utilizado para separar componentes de una mezcla líquida. En la actualidad, la optimización de la destilación, especialmente en lo que respecta al uso de materias primas y energía, es crucial para reducir costos y mejorar la sostenibilidad de las operaciones. Aquí es donde la integración de la destilación en redes de manufactura inteligentes cobra una relevancia especial, ya que la capacidad de compartir datos en tiempo real permite una gestión más eficiente de los recursos.

Por ejemplo, mediante el uso de sensores avanzados y algoritmos de control, los sistemas pueden detectar variaciones en la calidad de las materias primas, como cambios en la concentración de los componentes de la mezcla a separar. Si los datos de la columna de destilación indican una menor concentración de uno de los componentes, los

sistemas automatizados pueden ajustar las condiciones operativas (como la temperatura o el flujo de vapor) para asegurar que la eficiencia de separación no se vea afectada. Este tipo de ajustes en tiempo real no solo mejora el rendimiento del proceso, sino que también reduce el desperdicio de materias primas, minimizando las pérdidas y maximizando la rentabilidad del proceso de separación (Maldonado y col. 2023).

La implementación de sistemas avanzados de control y de inteligencia artificial permite a las plantas monitorear constantemente el consumo de energía y ajustar los parámetros del proceso para minimizar el uso de energía. Por ejemplo, en una red inteligente, los datos de las columnas de destilación pueden ser compartidos con sistemas de gestión energética que ajusten las condiciones de operación de manera que se maximicen los intercambios térmicos dentro de la planta. De esta forma, se puede reducir el consumo de vapor y el uso de fuentes de energía externas, como gas o electricidad. Además, la implementación de algoritmos de inteligencia artificial y análisis de datos puede predecir y ajustar las necesidades energéticas de la destilación, minimizando el consumo y reduciendo costos operativos (Al Jlibawi y col. 2021)

En el estudio de Kenett y col. (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.

La incorporación de modelos de machine learning (ML) en el control de procesos químicos, como las columnas de destilación, se ha vuelto esencial para enfrentar desafíos

operativos complejos y mejorar la eficiencia. Tradicionalmente, el control de estos procesos dependía de modelos matemáticos basados en principios físicos y químicos. Sin embargo, la creciente complejidad de los sistemas y la necesidad de adaptabilidad han evidenciado las limitaciones de estos enfoques convencionales. Los modelos de ML ofrecen la capacidad de manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real, permitiendo la identificación de patrones y relaciones no lineales que son difíciles de capturar con modelos tradicionales. Esta capacidad es particularmente útil en el control de columnas de destilación, donde las dinámicas pueden ser altamente no lineales y sujetas a perturbaciones externas. Por ejemplo, Himmel y col. (2023) destacan que la integración de algoritmos de ML en el control de procesos químicos permite una adaptación automática a cambios y mejoras en la eficiencia operativa (Himmel y col. 2023).

Además, el ML facilita el desarrollo de sensores virtuales o "soft sensors" que estiman variables de proceso difíciles de medir directamente, mejorando la capacidad de monitoreo y control. Un estudio de Rožanec y col. (2021) implementó modelos de ML para predecir la concentración de

componentes clave en una columna de destilación, logrando una precisión superior al 95%, lo que permitió un control más preciso del proceso. La adaptabilidad de los modelos de ML también es crucial para el mantenimiento predictivo. Al analizar datos históricos y en tiempo real, estos modelos pueden predecir fallos potenciales y optimizar las estrategias de mantenimiento, reduciendo tiempos de inactividad y costos operativos.

Además de la optimización de recursos, la integración de la destilación en redes inteligentes ofrece otros beneficios significativos, como:

Mantenimiento Predictivo: Los sistemas inteligentes no solo permiten optimizar el uso de recursos, sino que también mejoran la confiabilidad de los procesos. Gracias a la recopilación y análisis de datos en tiempo real, los sistemas pueden identificar patrones y predecir fallas antes de que ocurran. Esto permite planificar el mantenimiento preventivo de las columnas de destilación y otros equipos asociados, lo que reduce los tiempos de inactividad no programados y mejora la eficiencia general de la planta.

Flexibilidad Operativa: Al integrar la destilación dentro de una red inteligente, los

procesos se vuelven más flexibles y adaptables. La capacidad de ajustar dinámicamente las condiciones operativas en respuesta a cambios en la demanda de producción o en las propiedades de las materias primas mejora la agilidad de la planta. Esto es particularmente importante en sectores como el de los biocombustibles, donde las variaciones en las materias primas pueden ser significativas.

Sostenibilidad: La optimización en el uso de materias primas y energía no solo reduce los costos operativos, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental de la planta. La integración de la destilación en una red inteligente permite a las plantas cumplir con regulaciones ambientales más estrictas al reducir el consumo de recursos y las emisiones de gases de efecto invernadero.

7. Retos futuros y oportunidades

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, 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 y col. (2013), 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 Hernández-Vargas y col. (2023), son fundamentales para mantener la competitividad y mejorar la sostenibilidad a largo plazo. Particularmente, el trabajo presentado por Hernández-Vargas y col. (2023) desarrolló una red de redes neuronales para la predicción del comportamiento dinámico de una columna de pared dividida para la purificación de butanol. La alimentación a la columna consistía en una corriente con las siguientes composiciones, 0.3018, 0.1695, 0.0073, y 0.5214 wt%, para butanol acetona, etanol y agua respectivamente. El proceso consistía en una columna de extracción líquido-líquido seguida de una columna destilación, y finalmente una columna de pared dividida, siendo esta última la responsable de efectuar el último tramo en la purificación de un efluente ABE (acetona -butanol-etano) Los parámetros de diseño de la columna se pueden observar en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de diseño del proceso de separación utilizado en Hernández-Vargas et al. (2023)

	Extractor	C₁	DWC
Etapas de equilibrio	5	23	48
Etapas de la pared	---	---	18
Etapas de alimentación	---	12	31
Etapas de salida lateral	---	---	33
Relación de reflujo	---	0.894	20.314
Flujo de destilado [kg h⁻¹]	---	21.685	7.697
Flujo de salida lateral [kg h⁻¹]	---	---	0.327
Flujo líquido de interconexión [kg h⁻¹]	---	---	2.183
Flujo vapor de interconexión [kg h⁻¹]	---	---	9.821
Flujo de solvente [kg h⁻¹]	733.873	---	---
Diámetro [m]	0.335	0.288	0.302
Presión [kPa]	101.3	101.3	101.3
Carga del reboiler [kW]	---	66.218	23.818

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.

8. Conclusiones

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 reúso 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 solventes, 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 bibliográficas

- Abejón, R., Romero, J., y Quijada-Maldonado, E. (2024). Potential of membrane distillation for water recovery and reuse in water stress scenarios: Perspective from a bibliometric analysis. *Desalination*, 591, 117989. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117989>
- Alkaisi, A., Mossad, R., y Sharifian-Barforoush, A. (2017). A Review of the Water Desalination Systems Integrated with

Renewable Energy. *Energy Procedia*, 110, 268-274.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138>

Al Jlibawi, A. H. H., Othman, M. L., Ishak, A., Noor, B. S. M., y Al Huseiny, M. (2021). Optimization of distribution control system in oil refinery by applying hybrid machine learning techniques. *IEEE access*, 10, 3890-3903.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3134931>

Attaran, M. (2020). Digital technology enablers and their implications for supply chain management. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 21 (3), 158-172.

<https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1751568>

Biegler, L. T., Grossmann, I. E., y Westerberg, A. W. (1997). *Systematic methods for chemical process design*.

<https://www.osti.gov/biblio/293030>

Choi, Y., Bhadriaju, B., Cho, H., Lim, J., Han, I. S., Moon, I., ... y Kim, J. (2023). Data-driven modeling of multimode chemical process: Validation with a real-world distillation column. *Chemical Engineering Journal*, 457, 141025.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141025>

Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., y Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal Of Production Economics*, 204, 383-394.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>

Diez-Olivan, A., Del Ser, J., Galar, D., y Sierra, B. (2018). 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>

Sánchez-Ramírez, E., Quiroz-Ramírez, J. J., Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., y Bonilla-Petriciolet, A. (2015). Process Alternatives for Biobutanol Purification: Design and Optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(1), 351-358. <https://doi.org/10.1021/ie503975g>

El-Agouz, S. A., Zayed, M. E., Ghazala, A. M. A., Abd Elbar, A. R., Shahin, M., Zakaria, M. Y., y Ismaeil, K. K. (2022). Solar thermal feed preheating techniques integrated with membrane distillation for seawater desalination applications: Recent advances, retrofitting performance improvement strategies, and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 164,

595-612.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.044>

Ennis, C., Barnett, N., De Cesare, S., y Lander, R. (2018). A conceptual framework for servitization in Industry 4.0: Distilling directions for future research. En A. Bigdeli, T. Frandsen, J. Raja y T. Baines (Eds.). *Proceedings of the Spring Servitization Conference: Driving Competitiveness through Servitization* (pp. 1-8). Copenhagen Business School.

Errico, M., Sanchez-Ramirez, E., Quiroz-Ramírez, J. J., Segovia-Hernandez, J. G., y Rong, B. G. (2016). Synthesis and design of new hybrid configurations for biobutanol purification. *Computers & Chemical Engineering*, 84, 482-492.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.10.009>

Maldonado, J. L. B., Alfaro, J. F. O., Sinche, D. V. D., y Guillén, C. R. N. (2023). Manual de la industria 4.0 y su contexto en la industria automotriz, minera y de petróleo. Editorial Tinta & Pluma.

Zhang, F., Wang, Y., Shan, B., Cui, P., Wang, Y., Zhu, Z., y Xu, Q. (2024). Design and optimization for the separation of xylene isomers with a novel double extractants-

based extractive distillation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 139, 502-513.

<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.05.027>

Zhou, X., Zheng, X., Cui, X., Shi, J., Liang, W., Yan, Z., ... y Wang, K. (2023). Digital twin enhanced federated reinforcement learning with lightweight knowledge distillation in mobile networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 41(10), 3191-3211.

<https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3310046>