

HACIA LA NEUTRALIDAD DE CARBONO: ELECTRIFICACIÓN E INTENSIFICACIÓN DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

Juan Gabriel Segovia-Hernández ^{a,*}

^a Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas,
Departamento de Ingeniería Química, Noria Alta S/N, Guanajuato, Guanajuato, México 36050.
gsegovia@ugto.mx

Resumen

La industria química, responsable de aproximadamente el 10 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, enfrenta el desafío de reducir su huella de carbono mientras mantiene la eficiencia y rentabilidad de sus procesos. La electrificación surge como una estrategia clave para la intensificación de procesos, permitiendo la transición desde sistemas basados en combustibles fósiles hacia tecnologías más sostenibles y eficientes. Este artículo analiza las principales áreas donde la electrificación puede transformar la industria química, incluyendo la intensificación térmica, la ingeniería de reacciones y los procesos de separación.

Palabras clave: Electrificación; Intensificación de Procesos; Industria Química Sostenible; Integración de Energías Verdes.

TOWARDS CARBON NEUTRALITY: ELECTRIFICATION AND PROCESS INTENSIFICATION IN THE CHEMICAL INDUSTRY

Abstract

The chemical industry, which accounts for approximately 10% of global greenhouse gas emissions, faces the challenge of reducing its carbon footprint while maintaining process efficiency and profitability. Electrification emerges as a key strategy for process intensification, enabling the transition from fossil fuel-based systems to more sustainable and efficient technologies. This article examines the main areas where electrification can transform the chemical industry, including thermal intensification, reaction engineering, and separation processes.

Keywords: Electrification; Process Intensification; Sustainable Chemical Industry; Green Energy Integration.

1. Introducción

La industria química es esencial para la economía global, al proveer materiales clave a sectores como la salud, la energía, la agricultura y la construcción. Su capacidad para transformar materias primas en productos de alto valor ha impulsado el desarrollo industrial moderno. Sin embargo, su fuerte dependencia de combustibles fósiles —como fuente de energía y materia prima— la convierte en una de las mayores emisoras de gases de efecto invernadero, con una contribución estimada entre el 8 % y el 10 % de las emisiones globales (Barton, 2020).

Este panorama plantea una necesidad urgente de transformación. Compromisos internacionales como el Acuerdo de París y los objetivos de neutralidad de carbono para mediados de siglo exigen una profunda reconfiguración tecnológica del sector. De acuerdo con el IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático), limitar el calentamiento global a 1.5 °C requiere reducir drásticamente las emisiones industriales, lo que implica intervenir directamente en los procesos químicos intensivos en energía (Eryazici y col, 2021).

En este contexto, la electrificación de procesos emerge como una vía prometedora para descarbonizar la industria química. A diferencia de otras estrategias, permite una integración directa con fuentes de energía renovable, mejora la eficiencia energética y facilita nuevas formas de operación. Sin embargo, su implementación enfrenta barreras técnicas significativas, como la necesidad de operar a temperaturas elevadas, mantener la estabilidad de los procesos y adaptarse a la variabilidad inherente de la oferta eléctrica renovable.

Aquí es donde la estrategia de la intensificación de procesos cobra especial relevancia. La implementación del enfoque de intensificación de procesos, dirigido a optimizar la transferencia de masa, energía y momento, puede conducir a una reducción en el tamaño de los equipos, menores tiempos de residencia y condiciones operativas más suaves. Estas mejoras no solo contribuyen a hacer técnicamente más factible la implementación de estrategias de electrificación, sino que también optimizan su desempeño al reducir las pérdidas energéticas, facilitar el control dinámico y permitir una integración más efectiva con fuentes renovables intermitentes.

Tecnologías como la electrólisis, la

calcinación eléctrica, la síntesis electroquímica y las separaciones asistidas eléctricamente, cuando se integran bajo principios de intensificación de procesos, pueden generar beneficios ambientales y operativos significativos. Entre los beneficios ambientales destacan reducciones de hasta un 90 % en las emisiones directas de CO₂ en comparación con procesos térmicos basados en combustibles fósiles, mejoras en la eficiencia energética superiores al 60 %, y una disminución de hasta un 70 % en la generación de subproductos y residuos industriales, según análisis de ciclo de vida (ACV) (Barton, 2020). Desde el punto de vista operativo, estas tecnologías ofrecen mayor seguridad al eliminar el riesgo asociado al manejo de combustibles fósiles, así como una alta modularidad y flexibilidad que facilitan la adaptación a demandas variables y la descentralización de la producción industrial.

En este contexto, el presente artículo examina el papel de la electrificación y la intensificación de procesos como estrategias complementarias y fundamentales para avanzar hacia una industria química climáticamente neutra. Para ello, se desarrolla una revisión crítica de tecnologías emergentes y sus beneficios técnicos,

energéticos y ambientales (Sección 2); se analizan casos representativos de aplicación en distintos contextos industriales (Sección 3); y se propone un marco estratégico de implementación que articule políticas públicas, capacidades tecnológicas e inversión privada (Sección 4). Esta estructura permite abordar de manera integral los retos y oportunidades asociados a la transición energética del sector, garantizando al mismo tiempo su competitividad y resiliencia frente a escenarios económicos y ambientales cambiantes.

2. Electrificación como Estrategia de Descarbonización

La neutralidad de carbono, o emisiones netas cero, se refiere al estado en el cual la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera es equilibrada por la cantidad que se elimina o compensa, ya sea mediante tecnologías de captura de carbono, estrategias de compensación (como la reforestación), o por medio de una transformación estructural en los sectores productivos para evitar emisiones desde el origen. Este concepto se ha convertido en un pilar fundamental de la política climática global, en particular a raíz del Acuerdo de

París y los compromisos asumidos por numerosos países para alcanzar la neutralidad de carbono hacia mediados del siglo XXI. Para el sector industrial, y en particular para la industria química —uno de los mayores emisores de GEI—, este objetivo exige una transformación profunda en sus fundamentos tecnológicos, energéticos y operativos (Van Geem y Weckhuysen, 2021).

Dentro de este contexto, la adopción de enfoques basados en la electrificación de procesos industriales se reconoce como una estrategia con alto potencial para contribuir a dicha transformación. Electrificar un proceso no consiste únicamente en sustituir una fuente de energía térmica convencional por electricidad. Esto implica modificar la dependencia del carbón a la electrificación: un cambio de paradigma en la industria química. Tal y como se intenta ilustrar simbólicamente en la Figura 1. Esto cobra especial relevancia cuando la electricidad proviene de fuentes renovables —como la solar, eólica, hidroeléctrica o geotérmica—; esto permite desvincular las emisiones del desempeño productivo y transitar hacia un modelo de producción climáticamente neutro. La electrificación aporta una serie de ventajas técnicas que pueden facilitar la transición energética de la industria química.

Entre ellas destacan una mayor eficiencia en la conversión energética, un control más preciso de los parámetros operativos (como temperatura y presión), una reducción en las emisiones directas de CO₂ y la posibilidad de integrar tecnologías innovadoras (reactores electroquímicos, calentamiento por microondas o resistencias eléctricas, separaciones con membranas electroasistidas, y la electrólisis) para la generación in situ de reactivos clave como el hidrógeno verde. En este contexto, si bien la electrólisis renovable representa una vía técnicamente viable y ambientalmente atractiva, su implementación debe acompañarse de una evaluación integral que considere la disponibilidad hídrica local, el uso de fuentes no convencionales de agua y los impactos derivados de su despliegue a gran escala. Solo bajo este enfoque será posible asegurar que el hidrógeno verde contribuya efectivamente a una transición energética sostenible, sin comprometer recursos hídricos esenciales para el bienestar humano y los ecosistemas.

Además, el uso de electricidad permite modular rápidamente la intensidad del proceso. Situación que lo hace compatible con la naturaleza intermitente de las energías renovables y facilita la integración con redes

eléctricas inteligentes y estrategias de gestión de la demanda (Luderer y col., 2022).



Figura 1. Cambio de paradigma en la industria química: carbón hacia electrificación (generada con Chatgpt).

No obstante, la electrificación por sí sola no es suficiente para garantizar una transición eficiente, segura y escalable. Su implementación requiere superar importantes barreras técnicas, como la adaptación de procesos tradicionales al uso de nuevas fuentes energéticas, la compatibilidad con los materiales existentes, la necesidad de almacenamiento energético, y los retos de control y estabilidad operacional. Es en este punto donde cobra especial relevancia la Intensificación de Procesos (PI), una filosofía de diseño y rediseño de operaciones químicas

orientadas a mejorar la eficiencia global del sistema, reducir el tamaño de las instalaciones, disminuir los tiempos de residencia y minimizar la generación de residuos.

La articulación entre estrategias de electrificación y enfoques de intensificación de procesos resulta fundamental para aprovechar plenamente el potencial transformador que ofrece su implementación conjunta. Diversas tecnologías asociadas a la electrificación muestran un rendimiento optimizado cuando se integran en configuraciones intensificadas, como microreactores, unidades modulares compactas o sistemas de flujo continuo con transferencia mejorada de calor y masa. Estas configuraciones contribuyen a reducir el consumo energético y facilitan una mayor capacidad de adaptación frente a la variabilidad en la disponibilidad de energía, lo cual es particularmente relevante en esquemas basados en fuentes renovables intermitentes. Además, la intensificación facilita una integración más estrecha entre etapas del proceso, eliminando cuellos de botella y reduciendo la necesidad de unidades auxiliares.

Desde una perspectiva estratégica, esta combinación permite transformar la

arquitectura convencional de las plantas químicas —basadas en grandes unidades centralizadas y flujos lineales— hacia sistemas más descentralizados, flexibles, modulares y adaptables, capaces de integrarse en cadenas de suministro sostenibles y resilientes. Esto no solo mejora la eficiencia energética y reduce las emisiones, sino que también fortalece la competitividad y capacidad de innovación del sector, al facilitar la adopción de nuevas tecnologías y acelerar los ciclos de diseño y escalado.

En síntesis, la electrificación, cuando se articula con los principios de Intensificación de Procesos, ofrece una vía robusta y transformadora hacia la descarbonización profunda de la industria química. Esta convergencia tecnológica permite no solo reemplazar las fuentes de energía, sino también reconfigurar integralmente los procesos, avanzar en la adopción de soluciones más sostenibles y dar pasos concretos hacia el cumplimiento de los objetivos de neutralidad de carbono. Todo ello sin comprometer la viabilidad económica ni la seguridad operativa de las instalaciones industriales.

3. Beneficios de la Electrificación en la Industria Química

La electrificación ofrece múltiples ventajas en el contexto de la Intensificación de Procesos.

3.1. Incorporación de Tecnologías Innovadoras

La electrificación permite la implementación de tecnologías de frontera como los reactores electroquímicos, sistemas de calentamiento por microondas y tecnologías de plasma no térmico. Estas soluciones permiten realizar transformaciones químicas con mayores eficiencias, selectividades mejoradas y tiempos de residencia más cortos. Por ejemplo, en la síntesis de amoníaco mediante rutas electroquímicas o plasma-asistidas, se han registrado mejoras del 30–50 % en la eficiencia energética en comparación con el proceso Haber-Bosch convencional. Además, estas tecnologías tienen un potencial significativo para ser intensificadas modularmente, lo que facilita su integración descentralizada en procesos industriales (Segovia-Hernández y col., 2023).

3.2. Optimización del Consumo Energético

Los procesos electrificados permiten operar en condiciones más nobles (baja presión y temperatura), lo que reduce significativamente la energía requerida para alcanzar los estados de reacción deseados. En ciertos casos, como en la electrólisis o la oxidación selectiva asistida eléctricamente, se han alcanzado eficiencias superiores al 80 %. Esta reducción del consumo energético no solo implica menores costes operativos, sino también una menor generación de calor residual (disminuyendo así la necesidad de sistemas de refrigeración adicionales). La mejora en la eficiencia energética también tiene implicancias directas en la reducción de las emisiones indirectas asociadas a la generación de electricidad (Luderer y col., 2022).

3.3. Flexibilidad en el Uso de Energía

Uno de los beneficios clave de la electrificación es su capacidad para adaptarse a la variabilidad de las fuentes renovables. A través del uso de tecnologías de control inteligente, los sistemas electrificados pueden operar de manera intermitente o ajustarse a la disponibilidad de electricidad verde, lo que permite un aprovechamiento más eficiente de

la energía solar o eólica. Esta flexibilidad permite, por ejemplo, realizar producción de hidrógeno en horarios de excedente energético, almacenarlo y utilizarlo posteriormente. Con ello generando sinergias con sistemas de almacenamiento térmico o químico (Barton, 2020). Asimismo, esta capacidad para responder a señales del mercado energético posiciona a los procesos electrificados como elementos clave en la industria del futuro descentralizada y digitalizada.

3.4. Reducción de Emisiones y Seguridad Operativa

Sustituir equipos térmicos alimentados por combustibles fósiles por alternativas eléctricas elimina las emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI), como CO₂, NO_x y SO₂. En procesos industriales como la calcinación, la electrificación ha demostrado reducciones de emisiones de hasta 70–90 % (especialmente cuando se utiliza electricidad de origen renovable). Además, al eliminar el manejo y almacenamiento de combustibles fósiles en planta, se reducen riesgos asociados a incendios, explosiones y exposición a compuestos tóxicos. Con todo ello mejorando

la seguridad laboral y ambiental. Esta mejora en la seguridad también puede traducirse en menores costos de aseguramiento y cumplimiento regulatorio (Chen y col., 2019).

3.5. Análisis de Ciclo de Vida (ACV):

El análisis de ciclo de vida de tecnologías electrificadas revela que su desempeño ambiental a lo largo del tiempo puede ser significativamente superior al de sus contrapartes convencionales, especialmente cuando se considera el uso de electricidad verde. Por ejemplo, el ACV de un proceso de electrólisis alimentado con energía eólica puede tener un potencial de calentamiento global (GWP) inferior a 1 kg CO₂-eq/kg H₂, frente a 9–12 kg CO₂-eq/kg H₂ en procesos convencionales basados en gas natural. Esta ventaja no solo se limita al cambio climático, sino que también se extiende a otras categorías de impacto, como la acidificación, la eutrofización y el agotamiento de recursos fósiles (Giannikopoulos y col., 2024). Además, la modularidad y escalabilidad de las tecnologías electrificadas permite una menor intensidad material en la fase de construcción y un mayor potencial de

reciclaje al final de su vida útil (Wei y col., 2019).

3.6. Procedencia de la Electricidad Verde:

La reducción del impacto ambiental de los procesos electrificados depende críticamente del tipo de electricidad utilizada. Si bien la electrificación elimina emisiones en el punto de uso, el beneficio neto solo se alcanza si la electricidad proviene de fuentes renovables. Por ejemplo, la electricidad generada a partir de energía eólica o solar puede tener una huella de carbono inferior a 50 g CO₂-eq/kWh, en comparación con los 800–900 g CO₂-eq/kWh del carbón o 400–500 g CO₂-eq/kWh del gas natural (Masuku y col., 2024). En regiones con alta penetración de renovables, como los países nórdicos o partes de América Latina, esto permite implementar procesos prácticamente libres de emisiones. Además, se pueden establecer estrategias de trazabilidad energética mediante certificados de origen o sistemas de monitoreo de emisiones en tiempo real, garantizando la sostenibilidad de la electricidad utilizada.

3.7. Aplicaciones de la Electrificación en la Industria Química

En la transición hacia una industria química más sostenible, diversas aplicaciones de la electrificación se perfilan como alternativas viables y ambientalmente superiores frente a tecnologías basadas en combustibles fósiles. Sin embargo, para que este potencial se traduzca en resultados concretos, es fundamental evaluar no solo los beneficios energéticos y ambientales inmediatos, sino también sus impactos en términos de ciclo de vida. A continuación, se presenta una comparación estructurada de cinco áreas clave de aplicación de la electrificación en procesos químicos, incluyendo sus respectivos beneficios y desempeño ambiental integral (Schiffer y Manthiram, 2017; Wei y col., 2019). A continuación, se presenta una comparación estructurada de cinco áreas clave de aplicación de la electrificación en procesos químicos, incluyendo sus respectivos beneficios y desempeño ambiental integral Tabla 1.

4. Desafíos para la Implementación de la Electrificación

Pese a su potencial, la adopción de soluciones basadas en la electrificación dentro de la

industria química está sujeta a múltiples desafíos técnicos y económicos que requieren atención específica (Banco de Desarrollo de América Latina, 2023):

Altos Costos de Inversión: La implementación de tecnologías electrificadas requiere una inversión inicial significativa, lo que puede representar un obstáculo para pequeñas y medianas empresas del sector.

Adaptación de Infraestructura: La transición a sistemas electrificados puede requerir modificaciones importantes en la infraestructura existente, lo que podría generar interrupciones operativas durante el proceso de cambio.

Capacitación de Personal: La adopción de nuevas tecnologías exige programas de formación y capacitación para garantizar que la fuerza laboral pueda operar eficientemente los nuevos procesos electrificados.

Disponibilidad y Estabilidad de Energía Renovable: La viabilidad de la electrificación depende en gran medida de la accesibilidad y confiabilidad de fuentes de energía renovable. Es fundamental desarrollar redes eléctricas resilientes y estrategias de almacenamiento energético para garantizar un suministro estable (Tang y Zhang, 2023).

Tabla 1. Aplicaciones de la Electrificación en la Industria Química

Aplicación o tipo de proceso	Beneficio energético	Beneficio ambiental	Resultado según ACV
Generación de calor a alta temperatura (Trinh y Chung, 2023)	Eficiencia térmica de 90–95 % frente al 40–60 % de sistemas por combustión.	Reducción de emisiones directas de CO ₂ de hasta 80–90 % al sustituir gas natural por electricidad renovable.	Disminución del GWP >70 % en procesos como calcinación, fusión o secado industrial.
Producción de hidrógeno mediante electrólisis (Sovacool et al., 2023)	Eficiencia de 65–75 %, especialmente viable si se aprovecha electricidad renovable en horas valle.	Reducción de emisiones de 9–12 kg CO ₂ -eq/kg H ₂ (vía SMR) a <1 kg CO ₂ -eq/kg H ₂ , e incluso <0.5 kg en condiciones óptimas.	Reducción de hasta 90 % del GWP, eliminación casi total de NO _x y SO ₂ en comparación con producción convencional.
Procesos de síntesis electroquímica (O'Regan y Nyhan, 2023)	Operación a temperatura ambiente y presión atmosférica, con reducción de 40–60 % en consumo energético frente a procesos térmicos.	Alta selectividad que reduce subproductos y etapas de purificación, disminuyendo residuos y uso de solventes.	Reducción de más de 60 % en la huella ambiental total para productos como H ₂ O ₂ o ácido adípico, especialmente con electricidad renovable.
Separaciones energéticamente eficientes (Barton, 2020)	Disminución del consumo energético de 30–60 %, dependiendo del tipo de mezcla y tecnología utilizada.	Menores emisiones indirectas por menor demanda energética, y reducción en el uso de refrigerantes y solventes.	Reducción de 40–70 % del GWP en sistemas de separación electrificados, con mejoras adicionales en consumo de agua y materiales.
Valorización de residuos mediante electrificación (Tang y Zhang, 2023)	Mejora de eficiencia global mediante integración con fuentes renovables y recuperación de calor, a pesar de ser procesos intensivos en energía.	Reducción de residuos sólidos en 80–90 %, evitando emisiones de metano y lixiviados en vertederos.	Disminución del GWP en 50–85 %, especialmente cuando se evita la incineración convencional o el uso de combustibles fósiles como materia prima.

5. Áreas para la Intensificación de Procesos en la Electrificación de la Industria Química

La transición hacia una industria química más sostenible se consolida como una estrategia esencial para mitigar las emisiones globales de carbono. Contribuyendo aproximadamente al 10 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, el sector químico requiere con urgencia la adopción de tecnologías innovadoras y prácticas más eficientes. En este contexto, la electrificación se perfila como un enfoque transformador que, además de potenciar la intensificación de procesos, permite abordar los retos ambientales asociados. Al reemplazar los sistemas convencionales basados en combustibles fósiles por procesos electrificados, la industria puede reducir su huella de carbono, mejorar su eficiencia energética y alinearse con los objetivos de sostenibilidad global, como los establecidos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (Chen et al., 2019).

5.1 Intensificación de Procesos Térmicos

Uno de los ámbitos más prometedores para la intensificación de procesos (PI) es la sustitución de fuentes de calor tradicionales

como el vapor o la combustión de gas por tecnologías de calentamiento eléctrico. Estos métodos convencionales no solo implican un alto consumo energético, sino que generan importantes emisiones de gases de efecto invernadero. La transición hacia calentamiento electrificado constituye una estrategia clave para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de los procesos químicos (Segovia-Hernández et al., 2023).

Los hornos eléctricos destacan por su capacidad para ofrecer un control preciso de la temperatura y de las tasas de calentamiento, optimizando así las condiciones de reacción y mejorando la calidad de los productos. Esta precisión, junto con una mayor eficiencia térmica y una reducción significativa de las pérdidas de calor, convierte a los hornos eléctricos en una alternativa más sostenible frente a los combustibles fósiles. Además, su operación con menores emisiones facilita el cumplimiento de normativas ambientales cada vez más exigentes (Rightor et al., 2020).

Otra tecnología con alto potencial es la calefacción por inducción, que genera calor directamente en el material tratado mediante campos electromagnéticos. Este método ofrece un calentamiento rápido, con menores pérdidas al entorno y mayor eficiencia

térmica, lo que lo hace especialmente útil en procesos de altas temperaturas, como el procesamiento de metales y reacciones catalíticas. Su capacidad para optimizar la cinética de reacción contribuye a reducir tanto el consumo energético como los tiempos de operación (Sovacool et al., 2023).

También destaca el calentamiento asistido por microondas, que utiliza radiación electromagnética para calentar selectivamente los materiales. Esta técnica permite tasas de calentamiento extremadamente rápidas, particularmente en sistemas heterogéneos, donde los distintos componentes responden de forma diferente a la radiación. Al reducir el tiempo y la energía requeridos, esta tecnología favorece el diseño de reactores más compactos y eficientes, una ventaja clave para el desarrollo de plantas modulares de menor inversión de capital.

Además de los beneficios directos en eficiencia y reducción de emisiones, la implementación a gran escala de estas tecnologías puede generar ventajas económicas y ambientales adicionales, especialmente en regiones donde la electricidad proviene de fuentes renovables. Esta integración fortalece la transición hacia una economía baja en carbono y disminuye

los costos operativos de forma significativa (Van Rooij et al., 2017).

5.2 *Electrificación en la Ingeniería de Reacciones*

En el ámbito de la ingeniería de reacciones, la electrificación a través de procesos electroquímicos ofrece un potencial disruptivo. Estas tecnologías aprovechan la electricidad para impulsar reacciones químicas, mejorando la eficiencia energética y ambiental de diversas aplicaciones industriales. A diferencia de los procesos térmicos tradicionales, los métodos electroquímicos operan en condiciones más suaves, permiten mayor control, mejoran la selectividad y reducen la formación de subproductos indeseados (Van Rooij et al., 2017).

Una aplicación destacada es la síntesis electroquímica de compuestos valiosos como ácidos orgánicos, alcoholes y productos químicos finos. Estos procesos logran altas tasas de conversión con menor demanda energética, especialmente cuando se utilizan electrocatalizadores, que incrementan significativamente la selectividad. Esta optimización reduce el uso de recursos y disminuye la generación de desechos,

minimizando así el impacto ambiental (Giannikopoulos et al., 2024).

La capacidad de ajustar con precisión los parámetros de operación también permite adaptar estos procesos a distintas materias primas y productos finales, lo cual resulta ventajoso en sectores como el farmacéutico o el agroquímico, donde los estándares de calidad y composición pueden variar.

Además, la integración de fuentes de electricidad renovable (solar, eólica o hidroeléctrica) refuerza los principios de la química verde, al permitir la producción de productos químicos esenciales con una huella de carbono sustancialmente menor. Esta sinergia contribuye a mitigar el cambio climático y consolida el papel de la industria química en una economía circular, basada en la optimización de recursos y la minimización de residuos.

5.3 Electrificación en Procesos de Separación

Los procesos de separación son algunas de las operaciones más intensivas en energía dentro de la industria química, por lo que su electrificación representa una oportunidad clave para mejorar su sostenibilidad

(Kochenburger et al., 2023). Métodos convencionales como la destilación o la absorción térmica implican altos costos energéticos y elevadas emisiones de gases de efecto invernadero. Tecnologías eléctricas, como sistemas de membranas y separaciones asistidas eléctricamente, pueden ofrecer mejoras sustanciales en eficiencia y sostenibilidad (Barton, 2020).

Entre estas técnicas, la electrofiltración utiliza un campo eléctrico aplicado sobre una membrana para facilitar el transporte selectivo de partículas cargadas, optimizando así la separación sin requerir complejos pretratamientos (Masuku et al., 2024). De forma similar, la electrodiálisis emplea membranas selectivas para iones y un campo eléctrico para lograr una separación eficiente de sales y compuestos iónicos, con aplicaciones clave en la desalinización del agua y el tratamiento de efluentes industriales.

La destilación asistida eléctricamente es otra innovación notable. Mediante la aplicación de energía eléctrica, se mejora la interacción entre fases líquida y vapor, lo que reduce la carga energética habitual de la destilación térmica. Esta técnica es especialmente eficaz en la separación de mezclas azeotrópicas o de componentes con puntos de ebullición muy

cercanos, que suelen representar retos para los métodos convencionales (Schultz et al., 2023).

Aunque la electrificación de los procesos de separación aún enfrenta desafíos relacionados con la escalabilidad, los costos de inversión y la reducción efectiva de emisiones como se ilustra en la Figura 2, su implementación puede acelerarse mediante políticas públicas que promuevan el desarrollo de materiales avanzados y ofrezcan incentivos para tecnologías limpias (Centi y Perathoner, 2023).

6. Limitaciones del Enfoque Actual y Propuesta de Fortalecimiento desde una Perspectiva Latinoamericana

Aunque el presente trabajo expone los beneficios de la electrificación en la industria química, es fundamental reconocer que dichos avances no pueden analizarse de forma aislada respecto al contexto socioeconómico en el que se busca su implementación. La sola adopción de tecnologías electrificadas, por deseable que sea desde el punto de vista ambiental y de eficiencia, no garantiza su viabilidad práctica en regiones con estructuras económicas y políticas dispares, como ocurre en gran parte

de América Latina. A partir de esta reflexión, se propone como hipótesis que la electrificación solo puede consolidarse como una estrategia sostenible y efectiva si se articula con políticas industriales integradoras, inversiones públicas en infraestructura energética renovable y mecanismos de financiamiento accesibles para todos los actores del sector.



Figura 2. Reducción de las emisiones de CO₂

Todo ello en especial para pequeñas y medianas empresas químicas que tradicionalmente enfrentan mayores barreras de entrada tecnológica (Banco de Desarrollo de América Latina, 2023). Uno de los desafíos más significativos en la región es la disparidad en el desarrollo de infraestructura eléctrica y la limitada disponibilidad de fuentes renovables estables. Si bien países como México, Brasil y Argentina poseen un alto potencial para la generación eólica y solar, persisten deficiencias importantes en

marcos regulatorios, redes de transmisión y mecanismos de almacenamiento energético.

La ausencia de políticas públicas robustas y de instrumentos de apoyo financiero puede acentuar las brechas existentes entre grandes corporaciones con acceso a capital tecnológico y empresas de menor escala. Todo esto representa una parte sustancial del entramado industrial latinoamericano (Banco de Desarrollo de América Latina, 2023).

En el caso específico de México, el potencial de electrificación industrial debe analizarse considerando la intensidad de emisiones de su matriz eléctrica actual. Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en México, el factor de emisión promedio del sistema eléctrico mexicano ronda los 430 gCO₂/kWh, una cifra intermedia que refleja la participación todavía significativa de combustibles fósiles, principalmente gas natural, en la generación eléctrica. Aunque en los últimos años se ha observado un crecimiento sostenido en la capacidad instalada de fuentes renovables en particular energía eólica y solar, estas todavía no superan el 30 % de la generación total anual.

En contraste, países como Francia o Noruega presentan factores de emisión mucho más

bajos, de aproximadamente 50 gCO₂/kWh y 10 gCO₂/kWh respectivamente, gracias a sus matrices dominadas por energía nuclear o hidroeléctrica. Por otro lado, países altamente dependientes del carbón, como India o Sudáfrica, presentan factores de emisión superiores a los 700 gCO₂/kWh. En este contexto, México se ubica en una posición intermedia, lo cual implica que la electrificación de procesos industriales solo será ambientalmente beneficiosa si se acompaña de una transición paralela hacia una matriz eléctrica más limpia.

Este análisis pone de relieve que, si bien la electrificación ofrece oportunidades significativas para descarbonizar la industria química mexicana, sus impactos reales dependerán de la velocidad con que el país logre desfosilizar su sistema eléctrico. En otras palabras, electrificar procesos industriales sin garantizar un suministro eléctrico de bajo carbono podría trasladar las emisiones en lugar de eliminarlas, lo cual desvirtuaría los beneficios esperados desde el punto de vista del análisis de ciclo de vida.

Asimismo, resulta imprescindible adoptar una postura crítica frente a la dependencia tecnológica que se tiene en América Latina con los países altamente industrializados. Muchas de las soluciones propuestas para la

electrificación de la industria química fueron desarrolladas en contextos con condiciones muy distintas en cuanto a recursos, gobernanza y capacidades industriales. Por esta razón, es necesario complementar el análisis técnico con estudios de caso específicos que consideren las particularidades del entorno latinoamericano.

Un ejemplo relevante es el proyecto piloto de reactores de plasma en el sector petroquímico del estado de Veracruz, México, donde se busca valorizar residuos industriales utilizando energía eléctrica proveniente de parques eólicos regionales (Gobierno Federal de México, 2012). Este tipo de iniciativa permite evaluar la electrificación no solo como una posibilidad tecnológica, sino como una estrategia viable dentro de un marco local con sus propios retos regulatorios, sociales y económicos. La integración de experiencias regionales como esta puede fortalecer la aplicabilidad del enfoque propuesto y ofrecer insumos concretos para el diseño de políticas públicas y planes de transición energética adaptados a las realidades latinoamericanas.

7. Propuestas Estratégicas

La electrificación industrial debe asumirse como un vector estructurante para redefinir el

modelo de producción de la industria química en torno a la sostenibilidad, la eficiencia energética y la descarbonización profunda. Para que esta transformación sea efectiva, viable y escalable, se requiere una serie de propuestas estratégicas articuladas en distintas dimensiones:

7.1 Políticas públicas y marcos regulatorios habilitantes

Es indispensable establecer tarifas eléctricas industriales diferenciadas que premien el uso de electricidad de origen renovable, junto con incentivos fiscales que promuevan la electrificación de procesos intensivos en carbono. Además, se deben implementar esquemas robustos de trazabilidad del origen renovable de la electricidad y normas técnicas que validen tecnologías emergentes en contextos industriales reales.

7.2 Inversión en infraestructura eléctrica inteligente y flexible

La transición hacia procesos electrificados exige una modernización significativa de la infraestructura energética, que incluya redes inteligentes, sistemas de almacenamiento energético eficientes, digitalización de

operaciones y plataformas de monitoreo avanzado. Estas inversiones son esenciales para garantizar estabilidad operativa, resiliencia ante variaciones de carga y eficiencia en el uso de recursos.

7.3 Impulso a la I+D tecnológica aplicada

Se deben priorizar líneas de investigación y desarrollo que optimicen la eficiencia de tecnologías como la electrólisis y la electrosíntesis, al tiempo que se exploran rutas innovadoras como tecnologías de separación eléctricamente asistidas y nuevos materiales funcionales para reactores electrificados. La investigación debe articularse con las necesidades de la industria y contemplar el análisis de ciclo de vida (ACV) como criterio transversal.

7.4 Integración de modelos de negocio circulares

La electrificación puede facilitar la valorización energética y química de residuos, permitiendo su transformación en vectores energéticos y productos sostenibles. Se propone avanzar en el diseño de ecosistemas industriales donde la simbiosis entre sectores como la industria química,

agroindustria y gestión de residuos se traduzca en modelos de producción más circulares, resilientes y localizados.

7.5 Formación de talento humano especializado

Es fundamental incorporar en la educación técnica y universitaria contenidos actualizados sobre electrificación de procesos, automatización, modelado digital y sostenibilidad industrial. Asimismo, se deben fomentar programas de capacitación continua para profesionales en ejercicio y establecer alianzas entre academia, industria y gobierno para desarrollar competencias alineadas con los desafíos de la transición energética.

7.6 Coordinación multisectorial y pilotos demostrativos

Los gobiernos deben asumir un rol proactivo en la formulación de políticas y financiamiento de proyectos piloto. La industria, por su parte, debe adoptar una visión estratégica a largo plazo que incorpore el ACV como herramienta de toma de decisiones. La academia y los centros de innovación deben liderar el desarrollo de soluciones adaptadas al contexto regional.

Finalmente, los consumidores industriales pueden catalizar esta transformación mediante la demanda de productos con menor huella de carbono.

7.8 Digitalización avanzada y Power-to-X

Se propone acelerar el desarrollo de sistemas inteligentes de control, como gemelos digitales y algoritmos de operación flexible, que maximicen la eficiencia en procesos electrificados. Además, es crucial integrar esquemas Power-to-X para valorizar excedentes de energía renovable y capturar CO₂, cerrando el ciclo de carbono en procesos químicos sintéticos.

7.9 Evaluación comparativa de cadenas de valor

Finalmente, se sugiere realizar evaluaciones integradas de cadenas de valor térmicas frente a electrificadas, considerando no solo su rendimiento energético, sino también su adaptabilidad a contextos volátiles, su impacto ambiental y su potencial para crear sinergias sectoriales.

8. Conclusiones

La electrificación industrial no debe entenderse únicamente como una opción técnica de sustitución energética, sino como una vía transformadora hacia un nuevo paradigma industrial centrado en la neutralidad climática, la eficiencia operativa y la sostenibilidad estructural.

Los beneficios comprobados de esta transición como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en hasta un 90 %, la mejora de la eficiencia energética y la optimización de los balances térmicos y operativos demuestran su potencial como piedra angular en la construcción de una industria química alineada con los desafíos del siglo XXI. Asimismo, al eliminar la combustión directa de combustibles fósiles, se mejoran las condiciones de seguridad operativa y se reducen riesgos ambientales y laborales.

Sin embargo, el despliegue exitoso de esta transformación requiere acción concertada y compromiso multisectorial. La electrificación plantea retos técnicos, económicos y normativos que deben abordarse de manera sistémica. Solo a través de una articulación efectiva entre políticas ambiciosas, innovación tecnológica, inversión estratégica,

fortalecimiento institucional y desarrollo de capacidades humanas será posible consolidar su papel como eje estructural de una industria más limpia, resiliente e inclusiva.

En definitiva, la electrificación industrial es más que una meta: es una estrategia transversal para reimaginar la producción química en clave de sostenibilidad, abriendo un camino tangible hacia la neutralidad climática y una economía industrial más preparada para el futuro.

Referencias bibliográficas

Agencia Internacional de Energía (2025). <https://www.iea.org/>

Banco de Desarrollo de América Latina (2023). *Transición energética y descarbonización en América Latina y el Caribe en industrias de alto consumo energético.*

https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/2261/Policy%20Paper%20N%C2%B027_Transici%C3%B3n%20energ%C3%A9tica%20y%20descarbonizaci%C3%B3n%20en%20ALC%20en%20industrias%20de%20difícil%20descarbonizacion.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Barton, J. L. (2020). Electrification of the chemical industry. *Science*, 368(6496), 1181-1182.

Centi, G., y Perathoner, S. (2023). Catalysis for an electrified chemical production. *Catalysis Today*, 423, 113935.

Chen, C., Lu, Y., y Banares-Alcantara, R. (2019). Direct and indirect electrification of chemical industry using methanol production as a case study. *Applied Energy*, 243, 71-90.

Comisión Federal de Electricidad, (2025). México.

<https://www.cfe.gob.mx/Pages/default.aspx>

Eryazici, I., Ramesh, N., y Villa, C. (2021). Electrification of the chemical industry materials innovations for a lower carbon future. *MRS Bulletin*, 46(12), 1197-1204.

Giannikopoulos, I., Skouteris, A., Allen, D. T., Baldea, M., y Stadtherr, M. A. (2024). Thermal Electrification of Chemical Processes Using Renewable Energy: Economic and Decarbonization Impacts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(27), 12064-12082.

Gobierno Federal de México (2012). Prospectiva del Sector Eléctrico 2012-2026. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachmen>

[t/file/62958/Prospectiva del Sector Elctrico_2012-2026.pdf](t/file/62958/Prospectiva_del_Sector_Elctrico_2012-2026.pdf)

Kochenburger, T., Liesche, G., Brinkmann, J., Gagalick, K., y Förtsch, D. (2023). Fine chemicals production in a carbon-neutral economy: the role of electrification. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 40, 100904.

Luderer, G., Madeddu, S., Merfort, L., Ueckerdt, F., Pehl, M., Pietzcker, R., y Kriegler, E. (2022). Impact of declining renewable energy costs on electrification in low-emission scenarios. *Nature Energy*, 7(1), 32-42.

Masuku, C. M., Caulkins, R. S., y Siirola, J. J. (2024). Process decarbonization through electrification. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 44, 101011.

O'Regan, A. C., y Nyhan, M. M. (2023). Towards sustainable and net-zero cities: A review of environmental modelling and monitoring tools for optimizing emissions reduction strategies for improved air quality in urban areas. *Environmental Research*, 231, 116242.

Rightor, E., Whitlock, A., y Elliott, R. N. (2020, July). Beneficial electrification in industry. In American Council for an Energy

Efficient Economy.
<https://www.aceee.org/research-report/ie2002>

Schiffer, Z. J., y Manthiram, K. (2017). Electrification and decarbonization of the chemical industry. *Joule*, 1(1), 10-14.

Schultz, T., Nagel, M., Engenhorst, T., Nymand-Andersen, A., Kunze, E., Stenner, P., y Lang, J. E. (2023). Electrifying chemistry: a company strategy perspective. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 40, 100916.

Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Cossío-Vargas, E., y 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.

Sovacool, B. K., Bazilian, M. D., Kim, J., y Griffiths, S. (2023). Six bold steps towards net-zero industry. *Energy Research & Social Science*, 99, 103067.

Tang, C., y Zhang, Q. (2023). Green electrification of the chemical industry toward carbon neutrality. *Engineering*, 29, 22-26.

Trinh, V. L., y Chung, C. K. (2023). Renewable energy for SDG-7 and sustainable electrical production, integration, industrial application, and globalization. *Cleaner Engineering and technology*, 15, 100657.

Van Geem, K. M., y Weckhuysen, B. M. (2021). Toward an e-chemistree: Materials for electrification of the chemical industry. *MRS bulletin*, 46(12), 1187-1196.

Van Rooij, G. J., Akse, H. N., Bongers, W. A., y Van De Sanden, M. C. M. (2017). Plasma for electrification of chemical industry: a case study on CO₂ reduction. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 60(1), 014019.

Wei, M., McMillan, C. A., y de la Rue du Can, S. (2019). Electrification of industry: Potential, challenges and outlook. *Current*

Sustainable/Renewable Energy Reports, 6, 140-148.