

## Transformación de la industria de refinación petrolífera por la descarbonización: Impacto e influencia de tecnologías emergentes

**Transformation of the oil refining industry through decarbonization:  
Impact and influence of emerging technologies**

**Transformação da indústria de refinação de petróleo pela descarbonização:  
impacto e influência das tecnologias emergentes**

**Peña Murillo Sandra  
Baquerizo Julio Huamán Manuel  
Moreira Martina Piguave Roberto**

---

### Abstract

Nowadays, environmental requirements are common within industry, which is why oil refining has also been adapted to these requirements by implementing the decarbonization process with the aim of reducing the greenhouse gases produced in the extraction of crude oil and its refining. The objective of this article is to evaluate and compare the current technologies used to reduce the environmental impact in oil refineries. The methodology used in this article is qualitative and comparative, based on the review of bibliography of renowned and specialized journal articles on which technologies have established a significant change in industry. The comparative approach allows identifying similarities and differences between conventional practices and the new decarbonization technologies implemented. Within the decarbonization of the industry, it is highlighted that the electrification of processes, the integration of renewable energies and the implementation of carbon capture, utilization and storage (CCUS) and CO<sub>2</sub> systems have allowed optimizing the efficiency of processes and significantly reducing GHG emissions in refineries, and have also shown that the use of advanced monitoring and digital control equipment allows timely intervention in the event of potential excess emissions, while international research indicates that the use of biofuels derived from biomass not only contributes to mitigating the carbon footprint, but also promotes a circular economy based on the use of by-products. After evaluating and comparing the results obtained, it is concluded that, while CO<sub>2</sub> capture and storage technology is aimed at

#### How to cite:

Peña, S.; Baquerizo, J.; Huamán, T.; Moreira, M. y Piguave, R. (2026). Transformación de la industria de refinación petrolífera por la descarbonización: Impacto e influencia de tecnologías emergentes. *Revista Iberoamericana de la Educación*, 10 (1).

Received: Diciembre 2026  
Approved: Enero 2026

<http://www.revista-iberoamericana.org/index.php/es>

Universidad de Guayaquil.  
Guayaquil-Ecuador  
sandra.penam@ug.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-7848-8021>

Universidad de Guayaquil.  
Guayaquil-Ecuador  
jbaquerizof@ug.edu.ec  
<http://orcid.org/0000-0003-2594-7623>

Magister  
mthuaman.4@hotmail.com  
<http://orcid.org/0009-0008-2832-8063>

Martina Moreira Quimi  
leslie.martineq@ug.edu.ec  
Universidad de Guayaquil.  
Guayaquil-Ecuador

Roberto Piguave Olivares  
roberto.piguaveo@ug.edu.ec  
Universidad de Guayaquil.  
Guayaquil-Ecuador

improving existing processes, the combined use of specialized equipment and biofuels represents a strategic alternative to achieve effective decarbonization. Therefore, the strategic integration of these technologies not only complies with current environmental regulations but also promotes the resilience and future viability of the sector in the face of the challenges of climate change and global regulatory pressure, in addition to confirming that technological innovation is key to achieving effective decarbonization and environmentally responsible refining.

**Keywords:** Decarbonization, Technology, Environment, Greenhouse gases, Impact, Carbon, Pollutants, Pollutants.

### **Resumen**

En la actualidad, las exigencias ambientales son comunes dentro de la industria, es por ello por lo que la refinación petrolífera también se ha ido adaptando a estos requerimientos implementando el proceso de descarbonización con el afán de reducir los gases de efecto invernadero producidos en la extracción de crudo como de su refinación. El objetivo de este artículo es evaluar y comparar las tecnologías actuales empleadas para reducir el impacto ambiental en las refinerías de petróleo. La metodología empleada en el presente artículo es de tipo cualitativa y comparativa, esto en base a la revisión de bibliografía de artículos revistas de renombre y especializados sobre cuáles son las tecnologías que establecieron un cambio significativo en la industria, el enfoque comparativo permite identificar similitudes y diferencias de las prácticas convencionales con las nuevas tecnologías de descarbonización implementadas. Dentro de la descarbonización de la industria se resalta que la electrificación de procesos, la integración de energías renovables y la implementación de sistemas de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) y CO<sub>2</sub> han permitido optimizar la eficiencia de los procesos y reducir significativamente las emisiones de GEI en las refinerías, además han demostrado que el uso de equipos de monitoreo avanzado y control digital posibilita la intervención oportuna ante potenciales excesos de emisiones, mientras que investigaciones internacionales apuntan que el aprovechamiento de biocombustibles derivados de la biomasa no solo contribuye a mitigar la huella de carbono, sino que además fomenta la economía circular a partir del aprovechamiento de subproductos. Posterior a evaluar y comparar los resultados obtenidos, se concluye que, mientras la tecnología de captura y

almacenamiento de CO<sub>2</sub> se orienta a mejorar procesos existentes, el uso combinado de equipos especializados y biocombustibles representa una alternativa estratégica para alcanzar una descarbonización efectiva, por lo que la integración estratégica de estas tecnologías no solo cumple con las normativas ambientales vigentes, sino que impulsa la resiliencia y viabilidad futura del sector frente a los desafíos del cambio climático y la presión regulatoria global, además de confirmar que la innovación tecnológica es clave para lograr una descarbonización efectiva y una refinación ambientalmente responsable.

**Palabras Clave:** Descarbonización, Tecnología, Medio ambiente, Gases de efecto invernadero, Impacto, Carbono, Contaminantes.

### **Resumo**

Atualmente, as exigências ambientais são comuns no setor, razão pela qual o refino de petróleo também vem se adaptando a essas exigências, implementando o processo de descarbonização com o objetivo de reduzir os gases de efeito estufa produzidos na extração do petróleo bruto e em seu refino. O objetivo deste artigo é avaliar e comparar as tecnologias atuais usadas para reduzir o impacto ambiental das refinarias de petróleo. A metodologia usada neste artigo é qualitativa e comparativa, com base em uma revisão da literatura de artigos de periódicos renomados e especializados sobre quais tecnologias estabeleceram uma mudança significativa no setor. A abordagem comparativa permite identificar semelhanças e diferenças das práticas convencionais com as novas tecnologias de descarbonização implementadas. No âmbito da descarbonização do setor, destaca-se que a eletrificação dos processos, a integração de energias renováveis e a implementação de sistemas de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) e CO<sub>2</sub> possibilitaram a otimização da eficiência dos processos e a redução significativa das emissões de GEE nas refinarias, além de demonstrar que o uso de equipamentos avançados de monitoramento e controle digital permite intervir em tempo hábil no caso de possíveis emissões excessivas, enquanto pesquisas internacionais mostram que o uso de biocombustíveis derivados de biomassa não só contribui para a redução da pegada de carbono, mas também promove uma economia circular baseada no uso de subprodutos. Após avaliar e comparar os resultados obtidos, conclui-se que, embora a tecnologia de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> tenha como objetivo melhorar os processos existentes, o uso combinado de equipamentos especializados e

biocombustíveis representa uma alternativa estratégica para alcançar a descarbonização efetiva, de modo que a integração estratégica dessas tecnologias não apenas cumpre as normas ambientais vigentes, mas também aumenta a resiliência e a viabilidade futura do setor diante dos desafios das mudanças climáticas e da pressão regulatória global, além de confirmar que a inovação tecnológica é fundamental para alcançar a descarbonização efetiva e o refino ambientalmente responsável.

**Palavras-chave:** Descarbonização, Tecnologia, Ambiente, Gases com efeito de estufa, Impacto, Carbono, Poluentes.

## INTRODUCCIÓN

La industria de refinación de petróleo enfrenta una transformación tecnológica fundamental para reducir su impacto ambiental, con una gran cantidad de alternativas tecnológicas que, la mayoría, se encuentran en estado de prueba. Según Benchaita (2013), las refinarias emiten entre 200 y 350 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de crudo procesado, lo que ha impulsado la adopción de múltiples estrategias complementarias. Entre las tecnologías más destacadas se encuentran los sistemas de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS), la electrificación de procesos con energías renovables, y la producción de hidrógeno bajo en carbono (Popoola et al., 2025). Estas soluciones, junto con mejoras en eficiencia energética mediante recuperación de calor residual y sistemas ORC (Younis Ahmed et al., 2023), y recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos (Peña et al., 2020), conforman un conjunto integral de alternativas para abordar el desafío climático.

El espectro tecnológico incluye además innovaciones en equipos específicos como electrolizadores PEM para hidrógeno verde, unidades de hidrotreatmento adaptadas a los equipos (López-Basto et al., 2024), y sistemas avanzados de combustión con ajuste de parámetros aire-combustible (PETROECUADOR, 2022). Paralelamente, procesos termoquímicos como pirólisis y gasificación de residuos (Aguiar et al., 2022), junto con la integración de biocombustibles avanzados (Delgado Alvarado et al., 2023), están ganando relevancia como alternativas circulares. Como señala el Instituto Mexicano del Petróleo (2025), esta diversidad tecnológica permite abordar diferentes fuentes de emisiones dentro del complejo proceso de refinación.

La digitalización emerge como habilitador transversal para estas tecnologías, con implementación de sensores inteligentes,

plataformas de control avanzado y sistemas de inteligencia artificial (Petro Punto, 2024). Estos desarrollos permiten optimizar el desempeño de equipos como compresores especializados para CCUS (Nazerifard et al., 2022) y unidades de tratamiento de gases (Singh & Stéphenne, 2014).

Se denotan casos como la planta de hidrógeno verde en Castellón (Castellón R., 2025) y las mejoras en la Refinería de Cartagena (Ecopetrol, 2024), que ilustran aplicaciones exitosas de estas tecnologías y demuestran cómo la combinación de electrificación, CCUS y optimización digital puede generar reducciones significativas de emisiones (Ingersoll E. & Batra C., 2024), aunque poseen sus limitaciones.

En este contexto, la presente investigación se propone evaluar y comparar como las nuevas tecnologías de descarbonización en la industria de refinación del petróleo impacta en el medio ambiente.

## **METODOLOGÍA**

El enfoque metodológico del presente artículo es de carácter cualitativo y documental ya que la investigación se basa en una revisión bibliográfica de fuentes especializadas orientadas a analizar la tecnologías emergentes para la descarbonización de la industria de refinación petrolera en el contexto de impacto ambiental.

El análisis toma en cuenta los avances tecnológicos internacionales y las políticas implementadas en Ecuador.

Para ello, se aplicó una revisión sistemática de literatura científica, reportes técnicos y regulaciones ambientales relevantes, seleccionando fuentes confiables como Energy Research and Social Science, Redalyc y otras bibliotecas digitales especializadas.

### **Importancia de la descarbonización en la refinación petrolera.**

La investigación parte del reconocimiento de que la refinación de petróleo es una de las actividades industriales con mayor intensidad de carbono, responsable de cerca del 25 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> en el sector energético (Batra & Ingersoll, 2024). Por ello, se revisaron estudios que describen el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la salud humana y los ecosistemas, así como los compromisos internacionales adquiridos en el Acuerdo de París y las recomendaciones del IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Esta revisión permitió establecer el fundamento teórico que justifica la necesidad de implementar procesos de descarbonización en las refinerías.

Asimismo, se analizaron informes de organismos nacionales, como el Ministerio de Energía y Minas de Ecuador (2023), para comprender los lineamientos regulatorios y las metas de reducción de emisiones que guían la transformación del sector. Este análisis bibliográfico busca contextualizar la relevancia de la descarbonización, no sólo como respuesta a exigencias ambientales, sino también como palanca para la competitividad y la resiliencia de la industria petrolera.

### **Transformación global de la industria de refinación.**

Para capturar la diversidad de enfoques tecnológicos a nivel internacional, se consultaron casos de reformas en refinerías de Brasil, Estados Unidos y la Unión Europea. En Brasil, la colaboración Petrobras–Kureha y sus programas de captura de carbono en plataformas marinas ofrecen una referencia relevante; en Estados Unidos, la reconversión de unidades para producción de combustible de aviación sostenible destaca la electrificación de procesos; mientras que, en Europa, proyectos como la planta de hidrógeno verde en Castellón demuestran la integración de energías renovables (García Donet & Alonso Álvarez, 2024). Estas fuentes proporcionan ejemplos sólidos de distintas rutas para reducir la huella de carbono y muestran las condiciones que facilitan o limitan su adopción.

La comparación de estos casos se apoyó en informes de organismos internacionales (IEA, Comisión Europea) y en artículos indexados en *ScienceDirect* y *Scopus*, lo que garantizó la validez de los datos. Este contraste global sirvió para identificar tendencias comunes, por ejemplo, el aumento de la electrificación y el hidrógeno de baja huella, y para comprender cómo varían las estrategias según el contexto económico y regulatorio.

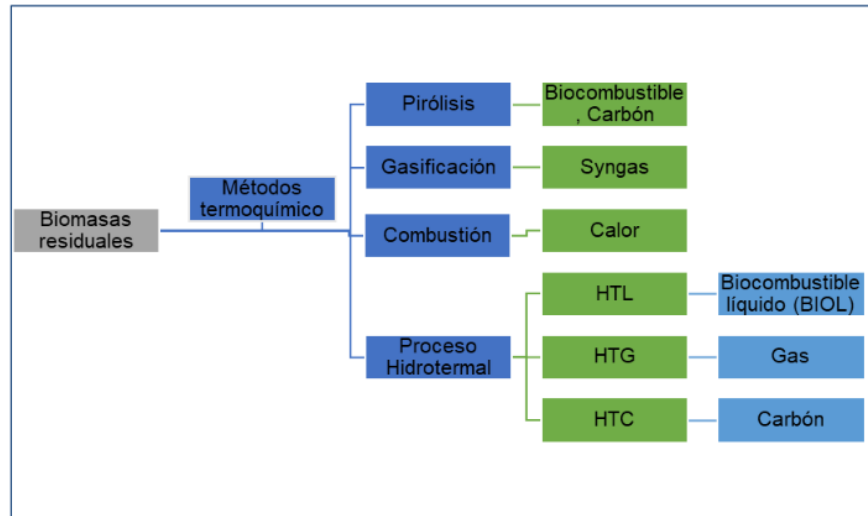
### **Tecnologías clave para la descarbonización de refinerías.**

Se examinaron cuatro grupos principales de tecnologías: captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS); electrificación de procesos; generación de hidrógeno verde; y aprovechamiento de biocombustibles. Para cada grupo, se realizó una síntesis de la literatura técnica, describiendo principios de funcionamiento, grados de madurez tecnológica y resultados de implementaciones reales. Por ejemplo, el sistema CANSOLV CO<sub>2</sub> de Shell exhibe una eficiencia de captura superior al 90 % en plantas comerciales (Singh & Stéphane, 2014).

La **Ilustración 1** ejemplifica las rutas de pirólisis, gasificación y combustión utilizadas en la producción de biocombustibles a partir de residuos agroindustriales (Aguiar et al., 2022).

**Ilustración 1.**

Procesos termoquímicos para el tratamiento de biomásas.

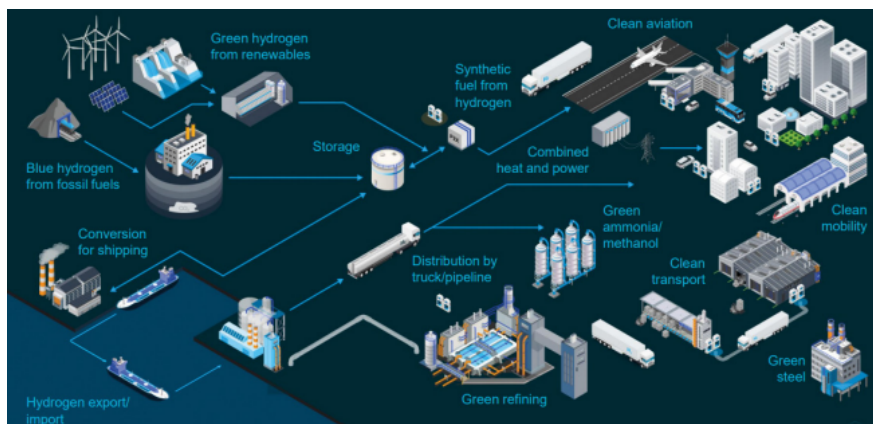


*Fuente: (Delgado Alvarado et al., 2023)*

Asimismo, al abordar el hidrógeno como vector energético, la **Ilustración 2** nos proporciona diversas aplicaciones de utilidad en diversos sectores siendo utilizado principalmente como combustible en calderas, hornos y reformadores.

**Ilustración 2.**

Usos sectoriales del hidrógeno.



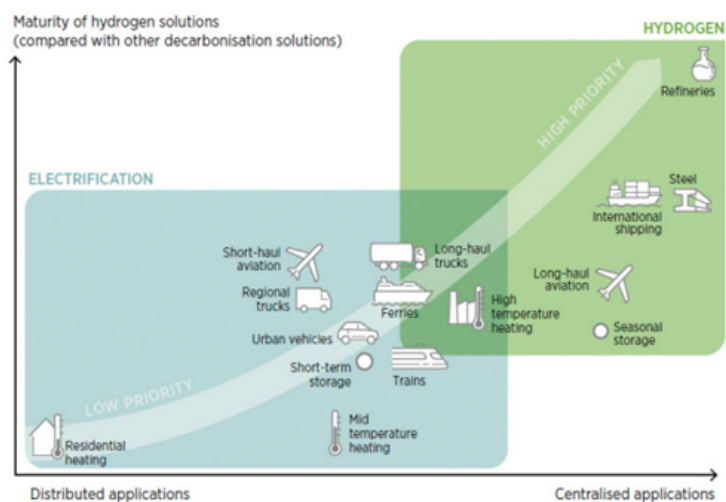
*Fuente: (Merino et al., 2023)*

### Casos comparativos: Ecuador y otras refineries

Para conectar el marco global con la realidad local, se seleccionaron estudios de la Refinería de Esmeraldas (Petroecuador EP, 2020) y de la Refinería de Cartagena (Ecopetrol, 2024). Se describieron las medidas de modernización implementadas, tales como optimización de la combustión y tratamiento de gases residuales, y sus resultados en términos de reducción de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> tal como se observa en la **Ilustración 3**, que sintetiza cómo los sensores y sistemas de control avanzados permiten el monitoreo en tiempo real de emisiones.

#### **Ilustración 3.**

Potencialidad del uso del hidrógeno verde.



*Fuente: (Merino Carlos et al., 2022)*

Otros artículos se~alan como m3todos para reducir el impacto ambiental recuperando suelos contaminados con hidrocarburos donde utilizan m3todos como la vermirremediaci3n para remediarlos (Pe~na et al., 2020).

El an3lisis comparativo revela diferencias significativas en los enfoques adoptados. Mientras la Refinería de Cartagena logr3 una reducci3n de 164,377 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente mediante la modernizaci3n de sistemas de iluminaci3n y optimizaci3n del consumo energ3tico (Ecopetrol, 2024), la Refinería de Esmeraldas se ha enfocado principalmente en el tratamiento de gases combustibles y ajustes en los par3metros de combusti3n de hornos, con resultados medibles en la reducci3n de emisiones de SO<sub>x</sub> (PETROECUADOR,

2020). Esta divergencia refleja no solo diferencias en las prioridades tecnológicas, sino también en las capacidades de inversión y los contextos regulatorios de cada país.

La comparación multicriterio contempló variables como costo de inversión, tiempo de amortización, barreras regulatorias y beneficios ambientales reportados. Esta aproximación comparativa evidenció la brecha existente entre países con marcos regulatorios sólidos y altos niveles de financiamiento, frente a aquellos en vías de desarrollo con limitaciones estructurales.

### **Criterios de evaluación y análisis.**

Finalmente, se definieron cinco criterios de evaluación para las tecnologías y casos estudiados:

1. **Reducción efectiva de GEI** (medida en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente)
2. **Eficiencia operativa** (porcentaje de mejora en consumo energético)
3. **Viabilidad económica** (costos de instalación y operación)
4. **Madurez tecnológica** (nivel TRL)
5. **Compatibilidad infraestructural** (capacidad de integración con plantas existentes)

Cada tecnología y caso de estudio fue valorado según estos criterios, utilizando datos cuantitativos y cualitativos extraídos de la literatura. Este análisis multicriterio permitió priorizar soluciones de mayor potencial de impacto e identificar necesidades de investigación o ajuste normativo para optimizar la adopción de tecnologías en refinerías de diferentes regiones.

## **RESULTADOS**

La industria de refinación de petróleo se encuentra en un proceso de transformación fundamental impulsado por la necesidad global de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Diversos estudios muestran perspectivas contrastantes sobre las estrategias más efectivas para abordar este desafío, por ejemplo, Rodríguez (2023) indican que las mejoras en eficiencia energética ofrecen reducciones limitadas de entre el 5% y 10%, mientras que Popoola et al. (2025) destacan el potencial de tecnologías innovadoras como los sistemas de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) y el hidrógeno verde para lograr reducciones más significativas, además de la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos (Peña et al., 2020).

La implementación de nuevas tecnologías muestra resultados diferenciados según las características de cada refinería. Proyectos como la planta de hidrógeno verde en Castellón, España, han demostrado la posibilidad de reducir hasta 23,000 toneladas anuales de emisiones de CO<sub>2</sub> (Castellón R., 2025). De igual forma, sistemas especializados como CANSOLV CO<sub>2</sub> han alcanzado tasas de captura de hasta el 95% en corrientes concentradas de gases (Singh & Stéphenne, 2014). No obstante, como señalan López-Basto et al. (2024) y de Maigret et al. (2022), estas soluciones presentan limitaciones importantes en términos de costos y requerimientos de infraestructura, particularmente en instalaciones de menor capacidad o con equipos menos modernos.

El análisis comparativo entre regiones revela diferencias significativas en la capacidad de implementación de estas tecnologías. Por un lado, casos como el de la Refinería de Cartagena en Colombia muestran reducciones considerables de CO<sub>2</sub> equivalente (Ecopetrol, 2024), mientras que otras instalaciones como la Refinería de Esmeraldas en Ecuador enfrentan mayores dificultades debido a limitaciones tecnológicas y de infraestructura (PETROECUADOR, 2020). Investigaciones como las del Instituto Mexicano del Petróleo (2025) sugieren que tecnologías intermedias, particularmente los procesos SEWGS para producción de hidrógeno azul, podrían representar alternativas viables para contextos con mayores restricciones tecnológicas y económicas.

Los beneficios potenciales de esta transición son múltiples, incluyendo mejoras en la calidad del aire y generación de nuevos empleos en sectores emergentes (Reyes Yolanda, 2024). Sin embargo, persisten desafíos importantes que requieren atención, como los costos elevados asociados al hidrógeno verde, la disponibilidad limitada de materias primas para biocombustibles avanzados (Aguiar et al., 2022), y la necesidad de optimizar procesos como la pirólisis (Vogt & Weckhuysen, 2024). Experiencias como la del estado de Washington en Estados Unidos, donde la combinación de políticas públicas y avances tecnológicos podría reducir emisiones en 2.36 millones de toneladas anuales para 2030 (Ingersoll E. & Batra C., 2024), destacan la importancia de desarrollar marcos regulatorios integrales que consideren tanto los aspectos ambientales como los económicos, especialmente en sectores con mayores dificultades para la descarbonización como el transporte marítimo y la aviación (Merino Carlos et al., 2022).

## CONCLUSIONES

La descarbonización de la industria de refinación petrolera representa no solo un imperativo ambiental urgente, sino también una oportunidad estratégica para reconfigurar un sector tradicionalmente vinculado a altos niveles de emisiones. El uso de las tecnologías actuales empleadas en la mitigación del impacto ambiental, como la captura, utilización y almacenamiento de carbono, la electrificación de procesos, el uso de hidrógeno verde, la integración de energías renovables, la digitalización industrial y el aprovechamiento de bioenergía, revela avances significativos en materia de reducción de emisiones, eficiencia energética y sostenibilidad operacional. Estas soluciones, al implementarse de manera integral y contextualizada, facilitan la transición hacia una industria energética más limpia, resiliente y competitiva.

Sin embargo, este proceso enfrenta obstáculos técnicos, económicos y estructurales, especialmente en países con capacidades limitadas para modernizar sus infraestructuras industriales. En este contexto, resulta fundamental la colaboración coordinada entre el sector público, la industria y la sociedad civil. La implementación de marcos regulatorios adecuados, el establecimiento de incentivos financieros y fiscales, junto con el fortalecimiento de capacidades técnicas locales, constituyen factores determinantes para asegurar una transición energética justa y efectiva.

Los casos de estudio analizados demuestran que el éxito de estas tecnologías no depende exclusivamente de su viabilidad técnica, sino de su adaptabilidad a las condiciones específicas de cada región, considerando sus recursos, normativas y capacidades institucionales. La descarbonización de las refinerías no debe abordarse como un mero proceso técnico, sino como una transformación estructural del modelo energético, que requiere una visión integral que combine sostenibilidad, innovación y justicia climática. En última instancia, avanzar hacia una refinación petrolera de baja huella de carbono exige redefinir la relación entre producción y sostenibilidad, así como asumir un compromiso colectivo para transformar el presente energético y garantizar un futuro más viable.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, S., Enríquez Estrella, M., & Uvidia Cabadiana, H. (2022a). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *AXIOMA*, 1(27), 5–11. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>

- Aguiar, S., Enríquez Estrella, M., & Uvidia Cabadiana, H. (2022b). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *AXIOMA*, 1, 5–11. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>
- Batra, C., & Ingersoll, E. (2024). The Energy Transition and Industrial Decarbonization. *IAEA Bulletin: Net Zero Needs Nuclear*, 65(3), 10–11. <https://www.iaea.org/sites/default/files/netzeroneedsnuclear.pdf>
- Benchaita, T. (2013). *Greenhouse Gas Emissions from New Petrochemical Plants Background Information Paper for the Elaboration of Technical Notes and Guidelines for IDB Projects*. <https://doi.org/10.18235/0009123>
- Castellón R. (2025). *Inicio de un proyecto mil millonario en Castellón: bp e Iberdrola empiezan los trabajos de construcción de la mayor planta de hidrógeno verde de España*. <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2025/02/07/la-empresa-conjunta-entre-bp-e-iberdrola-inicia-los-trabajos-de-construccion-de-la-mayor-planta-de-hidrogeno-verde-de-espana-en-castellon-radio-castellon/Cadena-SER+1>
- de Maigret, J., Viesi, D., Mahbub, M. S., Testi, M., Cuonzo, M., Thellufsen, J. Z., Østergaard, P. A., Lund, H., Baratieri, M., & Crema, L. (2022). A multi-objective optimization approach in defining the decarbonization strategy of a refinery. *Smart Energy*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100076>
- Delgado Alvarado, S. J., Zambrano Maldonado, G. J., Burgos Briones, G. A., & Moreira-Mendoza, C. A. (2023a). Evaluación de los residuos agroindustriales con potencial para biocombustibles. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 10(2), 53–73. <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v10n2.a4140>
- Delgado Alvarado, S. J., Zambrano Maldonado, G. J., Burgos Briones, G. A., & Moreira-Mendoza, C. A. (2023b). Evaluación de los residuos agroindustriales con potencial para biocombustibles. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 10, 53–73. <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v10n2.a4140>
- Ecopetrol. (2024a). *Reducciones de emisiones de carbono en la Refinería de Cartagena*. <https://www.portafolio.co/energia/reducciones-de-emisiones->

- de-carbono-en-la-refineria-de-cartagena-ecopetrol-607496Portafolio+1Ecopetrol | Energía y Sostenibilidad@+1
- Ecopetrol. (2024b). *Refinería de Cartagena redujo emisiones de CO<sub>2</sub>e que equivalen a 21 días sin carro en Bogotá*. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/refineria-cartagena-redujo-emisiones-co2>
- Ecopetrol. (2024c). *Refinería de Cartagena redujo emisiones de CO<sub>2</sub>e que equivalen a 21 días sin carro en Bogotá*. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/refineria-cartagena-redujo-emisiones-co2>
- García Donet, F., & Alonso Álvarez, B. (2024). Presente y futuro de la gestión del carbono en España. *LLYC Ideas*. <https://lyc.global/wp-content/uploads/2024/06/La-gestion-del-carbono-en-Espana.pdf>
- Ingersoll E., & Batra C. (2024). The energy transition and industrial decarbonization. *IAEA BULLETIN: NET ZERO NEEDS NUCLEAR*, 65(3), 10–11. <https://www.iaea.org/sites/default/files/netzeroneedsnuclear.pdf>
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2025, March 14). *El IMP y el desarrollo de tecnologías para la producción de hidrógeno*. <https://www.gob.mx/imp/articulos/el-imp-y-el-desarrollo-de-tecnologias-para-la-produccion-de-hidrogeno>
- López-Basto, E., Korevaar, G., Tanzer, S. E., & Ramírez, A. R. (2024). Assessing the impacts of low-carbon intensity hydrogen integration in oil refineries. *Cleaner Energy Systems*, 9, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100161>
- Merino, C., Ruiz de Pascual, J., & Nieto, E. (2023). Uso y costes del hidrógeno en transporte. *Revista Digital Del Cedex*, 202, 29–40. <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieriacivil/article/view/2477>
- Merino Carlos, Pascual Jesús, & Nieto Emilio. (2022). Uso y costes del hidrógeno en transporte. *Revista Ingeniería Civiñ*, 207, 51–60. <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieriacivil/article/view/2477/2086>
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Factor de emisión de CO<sub>2</sub>*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2023.pdf>
- Nazerifard, R., Mohammadpourfard, M., & Heris, S. Z. (2022). Optimization of the integrated ORC and carbon capture units

- coupled to the refinery furnace with the RSM-BBD method. *Journal of CO2 Utilization*, 66, 102289. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102289>
- Peña, S., Zambrano, E., Baquerizo, J., Loor, Á., & Solorzano, K. (2020). Nuevos sistemas de tratamientos de suelo contaminado por hidrocarburos. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 21, 226–236.
- Petro Punto. (2024, January 9). *Tecnologías Emergentes en el Refinado de Petróleo*. <https://petropunto.com/tecnologias-emergentes-en-el-refinado-de-petroleo/>
- PETROECUADOR. (2020). *INFORME ESTADÍSTICO ANUAL*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2024/06/INFORME-ESTADISTICO-ANUAL-2020.pdf>
- PETROECUADOR. (2022). *INFORME ESTADÍSTICO ANUAL*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2024/06/INFORME-ESTADISTICO-ANUAL-2022.pdf>
- Petroecuador EP. (2020). *etroecuador implementa acciones para disminuir emisiones en la refinería de Esmeraldas*. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/petroecuador-implementa-acciones-disminuir-emisiones-refineria-esmeraldas/El+Universo+2Primicias+2La+República+EC+2>
- Popoola, L. T., Nwogbu, C. C., Taura, U., Asmara, Y. P., Nwobodo, L. O., & Agbo, A. O. (2025). Future prospects towards attaining zero-emission of greenhouse gases from crude oil refinery plants. *Cleaner Waste Systems*, 11, 100290. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100290>
- Reyes Yolanda. (2024, June 19). *Eficaz integración de energías renovables en las refinerías: Impacto en la Huella de carbono*. <https://inspenet.com/articulo/energias-renovables-en-las-refinerias/>
- Rodríguez M. (2023, November 17). *Reducción de emisiones en procesos de refinación del petróleo: Estrategias y tecnologías*. <https://inspenet.com/articulo/reduccion-emisiones-refinacion-del-petroleo/>
- Singh, A., & Stéphenne, K. (2014a). Shell Cansolv CO2 capture technology: Achievement from First. *Energy Procedia*, 63, 1678–1685.
- Singh, A., & Stéphenne, K. (2014b). Shell Cansolv CO2 capture technology: Achievement from First Commercial Plant. *Energy*

- Procedia*, 63, 1678–1685.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.177>
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... Y. Park, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Vogt, E. T. C., & Weckhuysen, B. M. (2024). The refinery of the future. *Nature*, 629(8011), 295–306.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07322-2>
- Younis Ahmed, Lap Tjerk, Yáñez Edgar, Suarez Bermudez Lorena, Benders René, & Faaij André. (2023). Exploring the spatiotemporal evolution of bioenergy with carbon capture and storage and decarbonization of oil refineries with a national energy system model of Colombia. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101232. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101232>