



ECONOMÍA CIRCULAR DEL AGUA EN REFINACIÓN DE PETRÓLEO: REUTILIZACIÓN DE AGUAS AGRIAS CON IMPACTO SOCIOAMBIENTAL

WATER CIRCULAR ECONOMY IN PETROLEUM REFINING: SOUR WATER REUSE WITH SOCIO-ENVIRONMENTAL IMPACT

Gabriel Orlando Lobelles Sardiñas ^{1*}

E-mail: globelles58@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2128-6146>

Omar Gutiérrez Benítez ²

E-mail: ogutierrez@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3644-6245>

Suanet Emilia Brunet Ruiz ²

E-mail: suanetemiliabrunetruiz@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7897-0165>

¹ Centro de Estudios de Energía y Medioambiente. Universidad de Cienfuegos

“Carlos Rafael Rodríguez” Cuba.

² Departamento de Química. Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” Cuba.

*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Lobelles Sardiñas, G.O., Gutiérrez Benítez, O., Brunet Ruiz, S.E. (2026). Economía circular del agua en refinación de petróleo: reutilización de aguas agrias con impacto socioambiental. *Universidad y Sociedad*, 18 (3). e5966.

RESUMEN:

En Cuba es imprescindible desarrollar estrategias que favorezcan la circularidad del agua en la industria de refinación de petróleo. Sin embargo, las limitaciones tecnológicas actuales impiden la reutilización de las aguas agrias generadas en estos procesos. El presente trabajo analiza la gestión de dichas aguas para favorecer su transición hacia la economía circular. El objetivo fue evaluar la incorporación de una torre despojadora tipo SWS como alternativa tecnológica para la recuperación y reutilización de aguas agrias bajo un enfoque de circularidad hídrica. Para ello, se diseñó y aplicó un procedimiento de evaluación basado en principios de economía circular. Se identificaron las causas que limitan la reutilización de las aguas agrias y se formuló una propuesta tecnológica para su aprovechamiento. Asimismo, se evaluó el desempeño técnico, económico, ambiental y social de la alternativa. Mediante los Indicadores de Transición Circular (CTI) y la metodología MET-Inedit se verificó la viabilidad de la circularidad hídrica del sistema estudiado. Los resultados demuestran que la integración de una torre despojadora SWS a la planta de tratamiento de residuales constituye la alternativa más efectiva para incrementar la reutilización del agua y reducir la carga contaminante. Se alcanzaron índices CTI de circularidad hídrica superiores a 1,0, acompañados de reducciones significativas en el consumo de agua fresca y en los volúmenes de descarga. Estos resultados contribuyen al uso sostenible del recurso hídrico,

fortalecen la pertinencia social de la gestión ambiental y favorecen la transición de la refinación hacia un modelo de economía circular con impacto socioambiental positivo.

Palabras clave: Aguas agrias, Despojadora SWS, Circularidad hídrica, Economía circular, Impacto socioambiental, Refinería de petróleo.

ABSTRACT:

In Cuba, it is essential to develop strategies that promote water circularity in the petroleum refining industry. However, current technological limitations prevent the reuse of sour waters generated during these processes. This study analyzes the management of these effluents to facilitate their transition toward a circular economy approach. The objective was to evaluate the incorporation of a Sour Water Stripper (SWS) tower as a technological alternative for the recovery and reuse of sour waters under a water circularity framework. To this end, an evaluation procedure based on circular economy principles was designed and applied. The factors limiting the reuse of sour waters were identified, and a technological proposal for their recovery and utilization was developed. In addition, the technical, economic, environmental, and social performance of the proposed alternative was assessed. The feasibility of water circularity in the studied system was verified using the Circular Transition Indicators (CTI) and the MET-Inedit methodology. The results demonstrate that integrating an

SWS tower into the wastewater treatment plant processes is the most effective alternative for increasing water reuse and reducing pollutant loads. Water circularity CTI values above 1.0 were achieved, accompanied by significant reductions in freshwater consumption and wastewater discharge volumes. These results contribute to the sustainable use of water resources, strengthen the social relevance of environmental management in petroleum refining, and support the refinery's transition toward a circular economy model with positive socio-environmental impacts.

Keywords: Sour water, Sour Water Stripper (SWS), Water circularity, Circular economy, Socio-environmental impact, Petroleum refining.

INTRODUCCIÓN

Las refinerías de petróleo generan múltiples corrientes líquidas contaminadas que requieren tratamiento previo a su descarga o reúso, entre ellas aguas agrias, las aguas sulfurosas alcalinas, aguas oleosas y aguas albañales. Las aguas agrias constituyen una de las corrientes más relevantes debido a su contenido de NH_4^+ , HS^- , fenoles y otros compuestos orgánicos disueltos generados en procesos como el craqueo catalítico, el hidrotratamiento y los sistemas de destilación (Soares et al., 2021). Su tratamiento adecuado resulta indispensable para evitar la inhibición de procesos biológicos, la corrosión acelerada de equipos y las emisiones de compuestos tóxicos y odoríferos.

En la Refinería Cienfuegos S.A. existe un elevado consumo de agua para proceso y una importante generación de aguas agrias, que representan más del 45 % del total de las aguas residuales producidas. Esta situación adquiere especial relevancia debido al costo del agua utilizada en el proceso (1,55 USD/m³) y a las previsiones de incremento del consumo asociadas al proyecto de expansión de la instalación. Sin embargo, actualmente no existe una tecnología implementada que permita el tratamiento de estas corrientes con vistas a su reutilización sistemática.

La tecnología más empleada para el tratamiento de aguas agrias es la torre despojadora *Sour Water Stripper* (SWS) (Lobelles-Sardiñas et al., 2021; Taheri et al., 2020). Su funcionamiento se basa en un proceso de equilibrio líquido-vapor mediante el cual el H_2S y el NH_3 son removidos de la corriente líquida y enviados a unidades de recuperación de azufre, mientras el agua tratada puede reincorporarse a otras operaciones industriales. No obstante, las exigencias actuales de sostenibilidad, resiliencia hídrica y eficiencia en el uso de recursos demandan evaluar estas tecnologías desde una perspectiva más amplia que la simple remoción de contaminantes (World Bank, 2024).

En este contexto, la economía circular promueve la reutilización, regeneración y valorización de recursos con el propósito de mantenerlos dentro de los sistemas productivos durante el mayor tiempo posible (Cerdá & Khalilova, 2016). Estos principios también son aplicables a la gestión del agua, donde la circularidad hídrica busca maximizar la recuperación y reutilización interna, reduciendo así la demanda de agua fresca y los volúmenes de descarga (OECD, 2025; Jiménez & Pérez, 2019).

La evaluación de la circularidad del agua requiere herramientas capaces de cuantificar el grado de cierre de ciclo alcanzado por los procesos industriales. Entre las metodologías más utilizadas se encuentran los *Circular Transition Indicators* (CTI) promovidos por el *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2022; 2024), así como enfoques integrados de análisis como MET-Inédit (UN/WWDR, 2023). Estas herramientas permiten evaluar el desempeño circular de sistemas industriales y respaldar la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad (Afghani et al, 2022).

En correspondencia con estos antecedentes, el objetivo del presente estudio es evaluar una propuesta de mejora tecnológica basada en la incorporación de una torre despojadora tipo SWS para el tratamiento, recuperación y reutilización de aguas agrias en la Refinería Cienfuegos S.A., bajo un enfoque de circularidad hídrica que contribuya a disminuir el consumo de agua técnica, reducir impactos ambientales y fortalecer la sostenibilidad del proceso de refinación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedimiento de economía circular para evaluar la propuesta de mejora tecnológica.

• Diagnóstico inicial.

El diagnóstico tuvo como objetivo identificar las causas que limitan el tratamiento y la reutilización de las aguas agrias en la Refinería Cienfuegos S.A. Para ello se empleó el diagrama causa-efecto (Ishikawa), con la participación de especialistas de la refinería. El procedimiento incluyó la definición del problema, la identificación de causas mediante lluvia de ideas, su agrupación en familias de causas y la elaboración del diagrama correspondiente.

• Presentar propuesta de mejora tecnológica

Como alternativa de solución se seleccionó la incorporación de una torre despojadora de aguas agrias tipo SWS, prevista en el Proyecto de Expansión de la refinería. Esta

tecnología fue escogida por estar destinada al tratamiento de la principal corriente residual líquida generada en la instalación.

• **Evaluación técnica, económica-ambiental y social de la propuesta de mejora tecnológica.**

La propuesta fue evaluada de forma integral considerando las dimensiones técnica, económica, ambiental y social de la sostenibilidad.

a. Evaluación técnica. Se realizó mediante la comparación entre los parámetros de diseño suministrados por Technip.S.p.A., (2014) y los resultados de simulación obtenidos con ProMax 2.0.7047 (Lobelles-Sardiñas et al., 2021). Se analizaron los balances de masa y las concentraciones de contaminantes en las corrientes de entrada y salida de la torre SWS.

b. Evaluación económica y ambiental. Los costos de inversión fueron estimados según la metodología propuesta por Peters & Timmershaus (1991). Los costos del equipamiento correspondientes al proyecto original fueron actualizados a valores de 2025 utilizando los índices de Nelson-Farrar (Farrar, 2016 y 2025) mediante la ecuación (1).

$$\text{Costo actual (2025)} = \frac{\text{Índice de costo actual (2025)} \cdot \text{Costo original (2016)}}{\text{Índice de costo original (2016)}} \quad (1)$$

Se calculó la depreciación del equipamiento por la ecuación 2 con una tasa de interés de 12 %.

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{VR}}{\text{Vd}} \quad (2)$$

Donde: VR es el valor residual y Vd es la vida útil del proyecto.

Para calcular el ingreso real del proyecto (ecuación 3) se consideró el volumen de agua recuperada por su precio de compra, incluyendo los eco-costos evitados para su tratamiento. Entonces:

$$\text{Ingreso real} = \text{agua recuperada m}^3/\text{h} * 24 \text{ h} * 365 \text{ días} * 1,55 \text{ USD/m}^3 + \text{Eco-costos evitados} \quad (3)$$

Los eco-costos evitados se estimaron tomando como referencia la metodología desarrollada por CEPAL-SEMARNAT (2007) para refinerías de petróleo de características comparables. Para ello se consideraron

los siguientes indicadores: Crudo procesado (bbl/año); Emisiones de SO₂ (t/año); Eco costos evitados (USD/año). Se calcularon por las ecuaciones (4), (5) y (6):

$$(\text{Cfgos}) \text{ Emisiones (t/año)} = \frac{(\text{Cfgos}) \text{ Crudo } \left(\frac{\text{bbl}}{\text{año}}\right) * (\text{Tula}) \text{ Emisiones (t/año)}}{(\text{Tula}) \text{ Crudo } \left(\frac{\text{bbl}}{\text{año}}\right)} \quad (4)$$

$$(\text{Cfgos}) \text{ Eco costo evitados (USD/año)} = \frac{(\text{Cfgos}) \text{ Emisiones } \left(\frac{\text{t}}{\text{año}}\right) * (\text{Tula}) \text{ Eco costo evitados (USD/año)}}{(\text{Tula}) \text{ Emisiones } \left(\frac{\text{t}}{\text{año}}\right)} \quad (5)$$

$$(\text{P}) \text{ Eco costo evitados (USD/año)} = \frac{(\text{P}) \text{ Emisiones } \left(\frac{\text{t}}{\text{año}}\right) * (\text{Cfgos}) \text{ Eco costo evitados (USD/año)}}{(\text{Cfgos}) \text{ Emisiones } \left(\frac{\text{t}}{\text{año}}\right)} \quad (6)$$

Con los ingresos generados por el ahorro de agua recuperada y los eco-costos evitados se calcularon los indicadores dinámicos de rentabilidad: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación Descontado (PRD), (Sokolov, 2024), mediante las ecuaciones (7), (8) y (9).

$$VAN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_{Ci}}{(1+D)^i} \quad (7)$$

$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_{Ci}}{(1+TIR)^i} \quad (8)$$

$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^{PRD} \frac{F_{Ci}}{(1+D)^i} \quad (9)$$

donde: K_0 : Inversión inicial; F_{Ci} : Flujo de caja en el año i y D : Tasa de descuento real utilizada.

c) Evaluación de la circularidad hídrica. Indicadores de transición circular (CTI).

La circularidad del agua fue evaluada mediante indicadores inspirados en los *Circular Transition Indicators* (CTI) (WBCSD, 2022; 2024) y en la metodología MET-Inédit (UN/WWDR, 2023). Se emplearon cinco indicadores principales:

- Índice de Circularidad del Agua (WCI).
- Índice de Circularidad del Agua según MET-Inédit.
- Índice de Circularidad del Agua según CTI.
- Porcentaje de circulación in situ.
- Proporción de Agua Reutilizada (PAR).

Los indicadores fueron calculados mediante las ecuaciones (10) a (14).

$$WCI = \frac{Q \text{ Agua recuperada en SWS} + Q \text{ agua reusada en proceso}}{Q \text{ Agua entrada a SWS}} \quad (10)$$

La metodología MET-Inédit (UN/WWDR 2023) es un modelo centrado en:

M (Metabolismo): entradas/salidas de agua y energía; **E** (Estrategias circulares): reducción, eficiencia, regeneración; **T** (Transformación): cambios estructurales del sistema; se calcula por ecuación 11.

$$(MET - Inédit): IC_{agua} = \frac{Q \text{ Agua reusada en proceso}}{Q \text{ Agua descargada} + Q \text{ Agua despojada}} \quad (11)$$

Además, se ofrece un indicador que se centra en la circulación interna en las instalaciones a través de la reutilización y el reciclaje respecto al caudal total de entrada a refinería (ecuación 12):

$$\% \text{ Circulación in situ} = \left(\frac{Q \text{ Agua reusada en refinación} - Q \text{ Agua entrada a Refinería}}{Q \text{ Agua entrada a Refinería}} + 1 \right) \times 100 \quad (12)$$

Fueron calculados por las ecuaciones 13 y 14 otros indicadores de Circular Trans, (IC_agua y PAR).

$$(Circular Trans): IC_{agua} = \frac{\text{Media de salidas circulares}}{\text{Media de entradas circulares}} \times 100 \quad (13)$$

$$PAR = \frac{\text{Vol. total de agua reutilizada}}{\text{Vol. total de agua consumida en proceso de refinación}} \times 100$$

(14)

Nota: Los índices de circularidad generalmente son indicadores adimensionales. No obstante, las ecuaciones de: **% Circulación in situ; (Circular Trans) IC_agua y PAR** se presentan como proporciones de recuperación o reutilización respecto a un total de referencia, entonces se expresan en porcentaje para facilitar su interpretación.

Para el caso base se consideró una alimentación de 77 573 L/h de aguas agrias a la torre SWS, una recuperación de 76 228 L/h y la reutilización interna de al menos el 95 % del agua recuperada. Posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad mediante tres escenarios operacionales (conservador, intermedio y optimizado) para evaluar la estabilidad de los indicadores de circularidad frente a variaciones en la recuperación y el reúso

d)Evaluación de impactos. Huella hídrica corp. y Nivel de circularidad de la planta.

La huella hídrica corporativa se evaluó antes y después de implementar la propuesta tecnológica, considerando los componentes azul y gris definidos por Hoekstra et al., (2011). El componente verde no fue considerado debido a la ausencia de agua de lluvia en el proceso estudiado. La huella hídrica corporativa total se calculó mediante la ecuación (15).

Aguas azules (m³/\$) = AZi/Pac; Aguas grises (m³/\$) = AGi/Pac y Aguas verdes = 0

Donde: Pac: Precio del m³ agua.

d.1) Huella hídrica corp. (m³/MW.h) = (Aguas verdes + Aguas azules + Aguas grises).

(15)

d.2) Nivel de circularidad de la planta posterior a la implementación de la propuesta de mejora.

El nivel de circularidad se determinó utilizando la metodología Inédit (Ineditinnova, 2025), que clasifica el desempeño circular en tres categorías: baja (<30 %), media (30–75 %) y alta (>75 %). La evaluación se realizó para determinar el efecto de la propuesta tecnológica sobre el proceso estudiado.

e)Evaluación social.

La dimensión social se evaluó considerando los enfoques recientes sobre transición hacia la economía circular (Al Haj Eid et al., 2025; Lofrida et al., 2024) y los requisitos establecidos en el Decreto 327 del Reglamento del Proceso Inversionista y la Resolución 224/2014 del CITMA. El análisis permitió valorar la pertinencia social de la propuesta, su compatibilidad con el contexto institucional y su contribución potencial a la sostenibilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

• Diagnóstico de la planta.

Durante el diagnóstico se analizaron los balances de masa correspondientes al Proyecto de Expansión de la refinería (Technip S.p.A., 2014). La Tabla 1 muestra las principales corrientes de procesos generadoras de aguas agrias y las concentraciones de contaminantes asociados a cada proceso.

Con la participación de especialistas de la refinería se identificaron 22 causas relacionadas con el elevado consumo de agua técnica y las limitaciones para la reutilización de aguas agrias. Los resultados del análisis se presentan en la Figura 1.

Tabla 1. Emisión de aguas agrias y los respectivos contaminantes por procesos de hidrodesulfurización.

Procesos	Aguas (% w)	pH	RS ⁻ ; RSH (mg/L)	CL ⁻ (mg/L)	CN ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	Fenol (mg/L)	HC mg/L
Desalación del crudo	5-6	5-8	---	---	---	---	---	---
Destilación atmosférica	2,5-3,5	6-7	20-200	5-100	---	10-60	10-30	30-60
Destilación a vacío	3-4	6-7	10-50	5-50	---	5-30	5-10	5-20
Craqueo catalítico	6-12	8-9,5	500-3000	10-50	5-200	300-3000	80-300	5-60



Recuperación de azufre	6-8	5-6	2500-4000	---	---	---	---	100-150
Hidrotratamiento nafta	3-6	5-6	1500-3000	10-30	5-10	1000-2000	10-20	5-20
Hidrocrackeo catalítico	6-12	8-9,5	500-2000	10-30	5-100	100-2000	50-200	5-20
Hidrotratamiento diesel	5-6	5-6	3000-5000	10-30	5-10	1500-3000	10-20	5-20
Craqueo con vapor	15-35	6-8,5	10-20	10-30	---	Trazas	20-30	30-50

Fuente: Elaboración propia en base a Technip.S.p.A (2014)

Con la colaboración de los especialistas de la refinería, durante el diagnóstico se identificaron en total 22 causas que provocan el mal tratamiento y el elevado consumo del agua técnica de proceso. Los resultados se muestran en la figura 1.

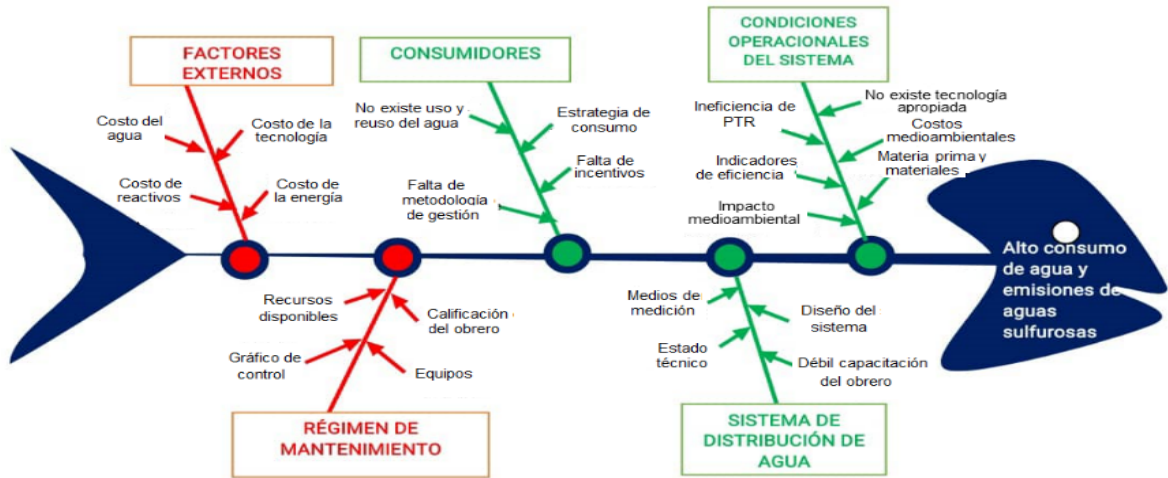


Fig 1. Diagrama causa-efecto (Ishikawa) del consumo de agua técnica.

El análisis mediante el diagrama causa-efecto (Ishikawa) permitió identificar que las mayores oportunidades de mejora se concentran en la insuficiente capacidad tecnológica para recuperar y reutilizar aguas agrias, así como en la ausencia de una metodología de gestión orientada a la circularidad hídrica. Estos resultados justifican la incorporación de una torre despojadora tipo SWS como alternativa tecnológica para incrementar el aprovechamiento interno del agua y reducir el consumo de recursos frescos.

• **Propuesta tecnológica de la despojadora (Sour Water Stripper- SWS).**

La torre despojadora propuesta, diseñada por Technip S.p.A. (2014), fue concebida para tratar 77 573 L/h de aguas agrias e incorpora un sobrediseño del 20 %, lo que permite admitir corrientes adicionales de agua contaminada. El sistema está constituido por una columna de platos equipada con rehervidor de fondo y condensador de tope, destinada a maximizar la remoción de H₂S y NH₃ y producir un agua apta para su integración con etapas posteriores de tratamiento y reutilización.

Bajo las condiciones operacionales simuladas por Lobelles-Sardiñas et al. (2021), la unidad recupera 76 228 L/h de agua, equivalente al 98,27 % de la alimentación. La diferencia corresponde fundamentalmente a la corriente gaseosa enviada a la unidad Claus para la recuperación de azufre. (Taheri et al., 2020). Estos resultados evidencian el potencial de la tecnología para favorecer el cierre del ciclo hídrico y reducir simultáneamente la carga contaminante asociada al proceso.

• **Evaluación técnica, económica, ambiental y social de la propuesta de mejora.**

a. Evaluación técnica. Análisis de parámetros técnicos.

La evaluación técnica se realizó mediante la comparación entre los parámetros de diseño y los resultados obtenidos por simulación para las corrientes de entrada y salida de la torre (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis comparativo para los flujos de entrada y salida en la torre despojadora de aguas agrias.

Corriente	Agua agria			Agua despojada			Vapor despojado		
Composición	Diseño (kg/h)	Simulado (kg/h)	% Error	Diseño (kg/h)	Simulado (kg/h)	% Error	Diseño (kg/h)	Simulado (kg/h)	% Error
H ₂ O	76 503	76 505	0,002	76 210	76 221	0,02	293,7	284	3,30
H ₂ S	720,5	720,5	0	0	0	0	720,5	720,5	0
NH ₃	311,5	311,5	0	0,70	0,75	0,14	310,8	310,7	0,016
CO ₂	18,4	18,4	0	0	0	0	18,4	18,4	0
C ₆ H ₆ O	17,3	17,3	0	17,20	17,10	0,58	0,1	0,20	2
HCN	2,1	2,1	0	0	0	0	2,1	2,1	0
Total (kg/h)	77 573	77 574	0,001	76 228	76 238	0,014	1 346	1 336	0,75

Fuente: Elaboración propia en base a Lobelles et al.(2021)

Los errores relativos obtenidos para todos los componentes analizados fueron inferiores al 10 %, lo que confirma la consistencia del modelo de simulación y su capacidad para representar adecuadamente el comportamiento del sistema. Asimismo, la elevada recuperación de agua (98,27 %) y la remoción efectiva de H₂S y NH₃ demuestran la viabilidad técnica de la propuesta y su compatibilidad con las condiciones operacionales previstas.

Estos resultados validan la utilización de la tecnología SWS como alternativa para incrementar la reutilización de aguas agrias en la refinería, garantizando simultáneamente la reducción de contaminantes y la disponibilidad de agua tratada para su reincorporación a diferentes procesos industriales. Por tanto, la evaluación técnica no debe interpretarse únicamente como una validación del modelo, sino como la demostración de que el reúso del agua tratada puede sostenerse bajo condiciones operacionales realistas.

b. Evaluación económica-ambiental.

Eco-costos evitados, ahorro económico e indicadores dinámicos de rentabilidad.

La evaluación económico-ambiental se realizó a partir de los eco-costos evitados por la reducción de emisiones de SO₂ asociadas a la recuperación de azufre y del ahorro generado por la reutilización del agua recuperada (Tabla 3). Los resultados muestran que la incorporación de la torre SWS genera beneficios económicos directos e indirectos. El ingreso real anual, complementado con los eco-costos evitados, permite alcanzar un VAN de 6 228 082,20 USD, una TIR de 43 % y un período de recuperación de tres años, evidenciando la factibilidad económica de la inversión.

Tabla 3. Evaluación económica – ambiental.

Cálculo de los Eco-costos evitados			
	Refinería Tula	Refinería Cienfuegos S. A	Torre Despojadora
Crudo procesado (bbl/año)	142 926 971,62	23 400 000	23 400 000
Emisiones de SO ₂ (t/año)	150 700	24 672,6	183,17
Eco-costo evitados (USD/año)	868 400 000	142 174 424	1 055 506
Evaluación económica con los eco-costos incluidos			
Ingreso Real (Ingreso total + Eco-Costos evit)	CTP (USD/año)	Gastos generales (USD/año)	Costo Total Inversión (USD/año)
2 090 665,56	341 849,46	6 836,99	2 999 825,06
Indicadores económicos	VAN	TIR	PRD
	6 228 082,20 USD	43 %	3 años

Además de reducir las emisiones y el consumo de agua fresca, la propuesta transforma una corriente residual en un recurso aprovechable, integrando beneficios económicos y ambientales en un mismo esquema de gestión. Estos resultados demuestran que el incremento de la circularidad hídrica puede alcanzarse sin comprometer la rentabilidad de la operación industrial.

c. Evaluación de la circularidad hídrica. Sensibilidad de los indicadores de transición circular (CTI).



El objetivo central del trabajo fue cuantificar la circularidad hídrica asociada a la recuperación y reutilización de las aguas agrias tratadas en la torre SWS. Para ello, se consideraron los siguientes caudales de referencia:

- Q Agua entrada total a SWS = 77 573 L/h = 679 539 m³/año
- Q Agua recuperada en SWS = 76 228 L/h = 667 757 m³/año
- Q Agua reusada en proceso de refinación = 72 417 L/h = 634 373 m³/año.
- Q Agua a PTR = 3 811 L/h
- Q Agua despojada = 1 345 L/h
- Q agua total entrada a refinería = 1 302 130 m³/año
- Q agua total usada en proceso de refinación = 1 200 880 m³/año

A partir de estos valores se calcularon los indicadores de circularidad definidos en la metodología:

$$WCI = \frac{76\,228\text{ L/h} + 72\,417\text{ L/h}}{77\,573\text{ L/h}} = 1,92$$

$$(MET - Inédit): (IC_{agua}) = \frac{72\,417\text{ L/h}}{3\,811\text{ L/h} + 1\,345\text{ L/h}} = 14,04$$

$$\% \text{ Circularización in Situ} = \left(\frac{634\,373\text{ m}^3/\text{año} - 1\,302\,130\text{ m}^3/\text{año}}{1\,302\,130\text{ m}^3/\text{año}} + 1 \right) \times 100 = 48,71\%$$

$$(Circular Trans): IC_{agua} = \frac{12\,704,67}{12\,928,83} \times 100 = 98,27\%$$

Analizando los volúmenes de agua reutilizada respecto a la generación total de aguas agrias, entonces:

$$(Circular Trans): IC_{agua} = \frac{72\,417\text{ L/h}}{77\,573\text{ L/h}} \times 100 = 93,35\%$$

$$Proporción de agua reutilizada = PAR = \frac{634\,373\text{ m}^3/\text{año}}{1\,200\,880\text{ m}^3/\text{año}} \times 100 = 52,83\%$$

Los resultados evidencian un elevado nivel de cierre del ciclo hídrico dentro de los límites funcionales del sistema analizado. La recuperación del 98,27 % del agua alimentada y la reutilización de aproximadamente el 95 % del agua recuperada permiten sustituir una parte significativa del consumo de agua fresca y reducir los volúmenes de descarga. Esto indica que la propuesta supera el enfoque lineal convencional de uso-tratamiento-vertimiento y avanza hacia un esquema de recuperación y reutilización sostenida del recurso hídrico.

El valor de WCI confirma una circularidad muy alta en el proceso estudiado, mientras que los indicadores ICagua y PAR muestran que la estrategia tiene efectos apreciables sobre el balance hídrico general de la refinería. En este contexto, el resultado demuestra una mejora sustancial del 48,71 %, dada la recirculación actual. No obstante, estos resultados corresponden al proceso auxiliar evaluado y no representan la circularidad global de toda la instalación. En consecuencia, futuras acciones deberían incorporar otras corrientes residuales, particularmente las aguas sulfurosas alcalinas, aprovechando el margen de capacidad disponible en la unidad SWS.

Análisis de sensibilidad de los indicadores de transición circular (CTI).

Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en la Tabla 4. La evaluación de los escenarios conservador, intermedio y optimizado muestra que todos los indicadores mantienen valores elevados de circularidad, aun bajo variaciones en la eficiencia de recuperación y en la proporción de agua reutilizada. Los valores de WCI oscilaron entre 1,81 y 1,96, mientras que el indicador ICagua (Circular Trans) se mantuvo entre 95 % y 99 %.

Tabla 4. Resultados del análisis de sensibilidad de indicadores CTI

Indicadores	Caso base	Conservador	Intermedio	Optimizado
Recuperación en SWS	98,27 %	95 %	97 %	99 %
Reúso del agua recuperada	95 %	90 %	95 %	98 %
Agua recuperada	76 228 L/h	73 694 L/h	75 246 L/h	76 797 L/h
Agua reutilizada	72 417 L/h	66 325 L/h	71 484 L/h	75 261 L/h
WCI	1,92	1,81	1,89	1,96
IC_agua (MET- Inédit)	14,04	5,90	11,74	32,55
% Circulación in situ	48,71 %	44,62 %	48,09 %	50,63 %
IC agua (Circular Trans)	98,27 %	95 %	97 %	99 %
PAR	52,83 %	48,38 %	52,14 %	54,90 %

Asimismo, la proporción de agua reutilizada (PAR) permaneció entre 48,38 % y 54,90 %, confirmando la estabilidad del esquema propuesto. Estos resultados evidencian que la alternativa tecnológica presenta un comportamiento robusto frente a variaciones operacionales razonables, manteniendo su viabilidad técnica y sus beneficios asociados a la circularidad hídrica.Principio del formularioFinal del formulario

d) Evaluación de impactos. Huella hídrica corp. y Nivel de circularidad de la planta.

d.1) Huella hídrica Corp. Se consideró el impacto para el equivalente a 1 m³ por tipo de agua residual por el precio de 1,55 USD/m³. Los resultados de la evaluación de la huella hídrica corporativa antes y después de la implementación de la propuesta se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Consumo aguas técnicas (aguas residuales). Huella Hídrica corporativa

Casos	Huella Hídrica Aguas Azules	%	Huella Hídrica Aguas Grises Tipo A	%	Huella Hídrica Aguas Grises Tipo B	%	Huella Hídrica corp. total
Caso A	0,165346	25,53	0,140064	21,63	0,342273	52,85	0,647683
Caso B	0,165346	54,14	0,140064	45,86	0	0	0,305410

La incorporación de la torre SWS permite reducir la extracción de agua fresca mediante la reutilización interna de aguas agrias tratadas, generando una disminución de la huella hídrica corporativa de 0,64768 a 0,30541, lo que representa una reducción de 47,15 %. Este resultado evidencia una mejora en la eficiencia del uso del agua y una menor presión sobre las fuentes hídricas utilizadas por la refinería.

La reducción observada confirma que la recuperación y reutilización del agua constituyen mecanismos efectivos para avanzar hacia modelos de gestión más sostenibles, al disminuir simultáneamente el consumo de recursos y los volúmenes de descarga asociados al proceso. Desde la perspectiva de la economía circular, este comportamiento confirma el cumplimiento del segundo principio. Asimismo, la recuperación del residual gaseoso y su reincorporación a proceso, refuerza también la lógica de aprovechamiento interno y el cumplimiento del tercer principio de la economía circular.

d.2) Nivel de circularidad.

La evaluación mediante la metodología Inédit permitió determinar el nivel de circularidad alcanzado (≥ 75 %) (Figura 2), por el sistema analizado después de implementar la propuesta tecnológica.

Los resultados muestran un incremento significativo de la circularidad, pasando de una condición inicial caracterizada por un aprovechamiento limitado de los recursos hídricos a un escenario de alta circularidad basado en la recuperación y reutilización interna del agua tratada, de acuerdo con los criterios de clasificación de la metodología. La coincidencia entre el resultado (97/100) y los indicadores calculados mediante CTI (98,27 %) refuerza la consistencia de la evaluación.

Nombre empresa: Proceso auxiliar de refinación. Refinería Cienfuegos S.A
Fecha de evaluación: 2026-01-21 15:04:47
Índice de circularidad: 97/100

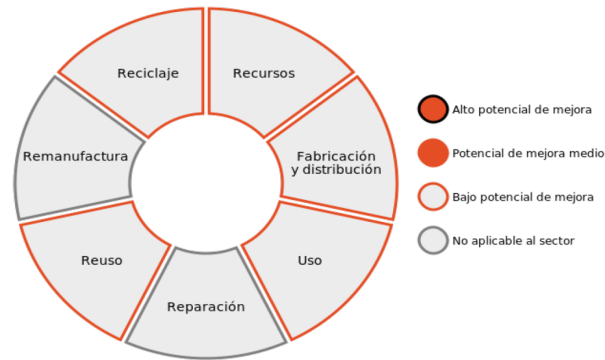


Fig 2. Nivel de circularidad del proceso auxiliar estudiado según Inédit, después de implementar la alternativa tecnológica.

Estos resultados confirman que la incorporación de la torre SWS no solo mejora el desempeño operacional del tratamiento de aguas agrias, sino que contribuyen de manera directa al cierre del ciclo hídrico dentro de los límites del sistema evaluado. A su vez, muestran que la propuesta tecnológica no solo mejora el cumplimiento normativo, sino que también contribuye de forma directa a los objetivos de sostenibilidad y resiliencia hídrica de la refinería, alineándose con las recomendaciones de marcos internacionales para la gestión circular del agua en la industria (World Bank, 2024).

e) Evaluación social.

Desde la dimensión social, la propuesta contribuye al uso más eficiente de los recursos hídricos y se encuentra alineada con los principios de sostenibilidad promovidos por la legislación ambiental cubana, en particular con el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social (PNDES) hasta 2030 y por los enfoques contemporáneos de economía circular. Este resultado corrobora la pertinencia social de la propuesta tecnológica y su aporte al fortalecimiento de la responsabilidad social empresarial. Asimismo, fortalece la gestión ambiental de la refinería y favorece condiciones para una mayor resiliencia frente a posibles restricciones futuras en la disponibilidad de agua para proceso.

Los beneficios derivados de la reducción del consumo de agua fresca, el aprovechamiento de corrientes residuales y la disminución de impactos ambientales aportan valor social al proyecto, al favorecer una gestión más responsable de los recursos naturales estratégicos.

DISCUSIÓN

La principal contribución de este estudio no radica únicamente en demostrar la viabilidad técnica y económica de la propuesta de mejora, sino en evidenciar que esta incrementa la circularidad del agua en un proceso auxiliar de refinería. Este resultado es coherente con los principios de la economía circular, que promueven la permanencia de los recursos dentro de los sistemas productivos mediante estrategias de recuperación, reutilización y recirculación (Cerdá & Khalilova, 2016; Jiménez & Pérez, 2019). Asimismo, coincide con lo planteado por Afghani et al. (2022), quienes destacan la necesidad de cuantificar y verificar el cierre efectivo de los ciclos del agua en los procesos industriales.

Desde el punto de vista técnico, la baja desviación entre los valores de diseño y los valores simulados confirma la confiabilidad del modelo empleado y respalda la viabilidad operativa de la alternativa propuesta. Este resultado es consistente con investigaciones desarrolladas en sistemas de tratamiento de aguas agrias, donde la simulación de procesos constituye una herramienta eficaz para optimizar la recuperación de agua y mejorar el desempeño de las unidades Sour Water Stripper (Soares et al., 2021; Taheri et al., 2020). Además, complementa los resultados obtenidos por Lobelles-Sardiñas et al. (2021), quienes demostraron la posibilidad de recuperar aguas sulfurosas mediante la optimización de la torre despojadora. En el presente estudio, la recuperación del 98,27 % del agua alimentada y la reincorporación de una elevada fracción del caudal tratado evidencian que la circularidad alcanzada es operacionalmente sostenible.

En el ámbito económico, la propuesta integra beneficios ambientales y financieros, aspecto particularmente relevante para la industria de refinación. El período de recuperación de tres años y los valores obtenidos de VAN y TIR indican que las acciones dirigidas a incrementar la circularidad pueden generar retornos económicos favorables. Estos resultados coinciden con los criterios expuestos por Sokolov (2024), quien señala la utilidad de dichos indicadores para evaluar inversiones vinculadas con mejoras tecnológicas y sostenibilidad industrial.

La evaluación ambiental refuerza esta interpretación. La reducción de la huella hídrica corporativa y el aprovechamiento del residual gaseoso demuestran que la propuesta no solo mejora el balance interno de agua, sino que también disminuye la presión sobre las fuentes hídricas y reduce impactos ambientales asociados al proceso. Este resultado concuerda con Hoekstra et al. (2011), quienes identifican la reducción de la extracción de agua fresca como uno de los mecanismos más efectivos para disminuir

la huella hídrica industrial. De igual forma, coincide con los enfoques promovidos por el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (UN/WWDR, 2023), el Banco Mundial (2024) y la OECD (2025), que reconocen la reutilización y recirculación del agua como elementos clave para avanzar hacia sistemas productivos más resilientes.

No obstante, el aporte más relevante del estudio consiste en transformar estas mejoras técnicas, económicas y ambientales en una medición explícita de circularidad. Diversos autores han señalado que uno de los principales desafíos de la economía circular es la disponibilidad de métricas que permitan cuantificar objetivamente el nivel de circularidad alcanzado por los sistemas productivos (Afghani et al., 2022; WBCSD, 2022). En este contexto, la aplicación de los indicadores CTI y su comparación con la herramienta Inédit permitieron evaluar cuantitativamente la transición del sistema desde un esquema predominantemente lineal hacia otro con elevada recirculación interna. Este resultado coincide con las recomendaciones metodológicas del WBCSD (2022, 2024), que promueven el uso de indicadores normalizados para respaldar la toma de decisiones orientadas a la circularidad.

Sin embargo, los resultados deben interpretarse dentro de los límites del sistema analizado. La circularidad obtenida corresponde exclusivamente al proceso auxiliar estudiado y no representa el desempeño global de toda la refinería. Esta limitación coincide con lo señalado por Afghani et al. (2022), quienes advierten sobre la necesidad de considerar cuidadosamente los límites funcionales del sistema para evitar extrapolaciones indebidas. En consecuencia, futuras investigaciones deberían incorporar otras corrientes residuales con el propósito de ampliar el cierre de ciclo a escala de planta.

En síntesis, los resultados demuestran que la propuesta evaluada optimiza el tratamiento de aguas agrias y lo convierte en un mecanismo efectivo de cierre del ciclo hídrico. Además de ser técnicamente viable, económicamente factible y ambientalmente favorable, la alternativa confirma que la circularidad del agua en refinerías puede cuantificarse y utilizarse como criterio de decisión para orientar la transición hacia modelos industriales más sostenible.

CONCLUSIONES

El estudio desarrollado sobre una refinería con una generación de 77 573 L/h de aguas agrias demuestra que la despojadora SWS diseñada, integrada con la unidad de recuperación de azufre, es capaz de recuperar 76 228 L/h de agua tratada, con eficiencias de remoción de H₂S

y NH₃ acordes con las mejores prácticas industriales y una fracción de purga (blowdown) limitada.

La cuantificación de la circularidad hídrica mediante indicadores inspirados en CTI y MET-Inédit evidencia que es posible alcanzar índices superiores a la unidad, reduciendo significativamente el consumo de agua fresca y los volúmenes de descarga, y alineando la operación de la refinería con los objetivos internacionales de uso sostenible del agua y transición hacia una economía más circular.

La implementación de la propuesta es pertinente con las políticas públicas para la transición a la economía circular. La factibilidad técnica, económica, ambiental y social es favorable; contribuyendo a mejorar las métricas de circularidad del agua, de sostenibilidad, y de responsabilidad social de la Refinería Cienfuegos S.A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afghani, N., Hamhaber, J., and Frijns, J. (2022). An integrated assessment framework for transition to Water Circularity systems. *Sustainability*, **14**(14), 8533.
- Al Haj Eid, M., Dandis, Ala', O., & Cathro, V. (2025). The social dimension of the circular economy: A review towards a comprehensive narrative. *Sustainable Development*, **33** (6), 8025-8040. <https://doi.org/10.1002/sd.70054>
- CEPAL-SEMARNAT. (2007). *Evaluación de externalidades ambientales del sector Energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca*. México : CEPAL-SEMARNAT, 2007. LC/MEX/L.788/
- Cerdá, E. & Khalilova, A. (2016). *Economía circular*. Economía industrial, **401**(3), 11-20. ISSN 0422-2784. <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/447151>
- Farrar, G. (2016; 2025). *Nelson-Farrar Quarterly Costimating: Indexes for selected equipment items*. Oil and Gas Journal. <https://www.ogj.com/refining-processing/article/17229141/nelson-farrar-quarterly-costimating-indexes-for-selected-equipment-items>
- Hoekstra A.Y.; Chapagain A.K.; Aldaya M.M.; Mekonnen M.M. (2011). *Manual de evaluación de la huella hídrica. Establecimiento de estándar mundial*. AENOR International S.A.U. ISBN 978-1-84971-279-8. <https://www.waterfootprint.org/resources>
- Ineditinnova. (2025). *Autoevalúate con la herramienta de circularidad de Inédit*. <https://circular.ineditinnova.com/>
- Jiménez, H. L. M & Pérez, L.E. (2019). Principios y características de la economía circular. En: *Economía circular-espiral: transición hacia un metabolismo económico cerrado*. Departamento de Fundamentos del Análisis Económico e ICEI. Editorial Ecobook. Madrid. ISBN: 978-84-948178-4-7. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro>

Lobelles-Sardiñas, G.O., Debora-Mira, L., Sabina-Delgado, A. (2021). Evaluación integral de una torre despojadora para recuperar aguas sulfurosas en la Refinería de Cienfuegos. *Tecnología Química*. 41(1), 123-140. ISSN 2224 6185. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5184>

Lofrida, N., Spada, E., Gulisano, G., De Luca Anna, I., & Falcone, G. (2024). The social impacts of circular economy: disclosing epistemological stances and methodological practices. *Environment, Development and Sustainability*, 1(34). <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05438-z>

OECD. (2025). *The circular water economy in Latin America*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Publishing. <https://www.oecd.org/a0508572>

Peters, M. & Timmerhaus, K. (1991). *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill International Editions. Fourth Edition. Chemical and Petroleum Engineering Series.pp:183 Table 17 and pp:210 - 211 Table 27. ISBN: 0-97-100871-3

Soares, A.F., Dellosso E.P., Komesu A., Diniz A. (2021). *Influence of operational parameters in sour water stripping process in effluents treatment*. Journal of Water Process Engineering, 41(8). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102012>

Sokolov, M. V. (2024). NPV, IRR, PI, PP, and DPP: A unified view. *Journal of Mathematical Economics*, 114 (315)102992. <https://doi.org/10.1016/j.jmate-co.2024.102992>

Taheri, M. M., Zahra, T.R., Mehrdad, M. (2020). Two-column sour water stripping without sending ammonia to Claus. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 10 (2), 12-18. <https://doi.org/10.22078/jpst.2020.4040.1643>

Technip S.p.A. (2014). Heat & Materials Balance for the Sour Water Stripper Unit at The Cienfuegos’s oil refinery Expansion Project. Engineering & Contacting Solutions. Italian Sulphur Technology Provider.

UN/WWDR. (2023). *United Nations World Water Development Report*. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report>

WBCSD. (2022). *Circular Transition Indicators v3.0. Metrics for business, by business*. World Business Council for Sustainable Development. <https://www.wbcsd.org/resources/circular-transition-indicators-v3-0/>

WBCSD. (2024). *Circular Transition Indicators: Guidance for the chemical industry to accelerate the deployment of circular metrics*. World Business Council for Sustainable Development. <https://www.wbcsd.org/resources/cti-guidance-for-the-chemical-industry-to-accelerate-deployment-of-circular-metrics/>

World Bank. (2024). *Incorporating circular economy and resilience principles in the water sector*. World Bank Technical Report. <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/6843853c1a601b962242c40c9814f236-0320082024/original/Session-1-Overview-of-the-principles-of-circular-economy-and-resilience-in-the-water-sector.pdf>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribuciones de los autores

Autor	Roles
Autor 1	Encargado de: Conceptualización, Metodología, Escritura – borrador original, Redacción – revisión y edición
Autor 2	Encargado de: Validación, Análisis formal, Supervisión
Autor 3	Encargado de: Adquisición y Curación de datos, Investigación

Universidad & Sociedad publica sus artículos bajo una licencia Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

