

## **Evaluación de tecnologías para reutilización de aguas residuales en refinación con enfoque de circularidad hídrica**

Evaluation of technologies for wastewater reuse in refining with a water circularity approach

Gabriel Orlando Lobelles-Sardiñas<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2128-6146>

Suanet Emilia Brunet-Ruiz<sup>2</sup> <https://orcid.org/0009-0002-7897-0165>

Claudia Águila-Prado<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0439-2430>

Melisa García-Álvarez<sup>3</sup> <https://orcid.org/0009-0009-4872-3092>

<sup>1</sup>Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba

<sup>2</sup>Departamento de química. Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos. Cuba

<sup>3</sup>Refinería Cienfuegos S.A. Cienfuegos, Cuba

\*Autor para la correspondencia. Correo: globelles58@gmail.com

### **RESUMEN**

El estudio analiza la gestión de las aguas agrias de refinación para asegurar su transición hacia modelos de economía circular. Es objetivo evaluar alternativas tecnológicas para la reutilización de aguas residuales bajo un enfoque de circularidad hídrica. Se identificaron las causas que impiden la reutilización de estas aguas. Por votación ponderada se seleccionó la causa principal. Se identificaron dos alternativas tecnológicas para su solución y se planteó una integración de tecnologías como propuesta de mejora. Se evaluó el desempeño técnico, económico y ambiental de cada alternativa mediante un análisis multicriterio tipo AHP, complementado con indicadores de transición circular (CTI) y MET–Inedit. Los resultados muestran que la configuración despojadora integrada con procesos de oxidación avanzada tipo Fenton constituye la mejor opción para maximizar la reutilización del agua y reducir la carga contaminante. Se muestran índices de circularidad del agua superiores a la unidad, con reducciones significativas en el consumo de agua fresca y en los volúmenes de descarga.

**Palabras clave:** aguas residuales; reutilización; circularidad hídrica; refinación.

## ABSTRACT

This study analyzes the management of sour refining water to ensure its transition to circular economy models. Its objective is to evaluate technological alternatives for wastewater reuse under water circularity approach. The causes preventing the reuse of this water were identified. The primary cause was selected by weighted voting. Two technological alternatives were identified as solutions, and an integration of technologies was proposed as an improvement. The technical, economic, and environmental performance of each alternative was evaluated using an AHP-type multi-criteria analysis, complemented by circular transition indicators (CTI) and MET-Inedit. The results show that the stripping configuration integrated with advanced oxidation processes such as Fenton is the best option for maximizing water reuse and reducing the pollutant load. Water circularity indices greater than one are shown, with significant reductions in freshwater consumption and discharge volumes.

**Keywords:** wastewater; reuse; water circularity; refining.

Recibido: 12/01/2026

Aceptado: 20/03/2026

## Introducción

Las refinerías de petróleo generan múltiples corrientes líquidas contaminadas que requieren tratamiento previo a su descarga o reúso, tales como, las aguas agrias, las aguas sulfurosas alcalinas, aguas albañales, entre otras. Entre ellas, las aguas agrias constituyen una de las más críticas debido a la presencia simultánea de sulfhídrico ( $H_2S$ ), amoníaco ( $NH_3$ ), cianuros, fenoles, compuestos orgánicos disueltos y sales inorgánicas. Estas corrientes se originan en unidades de hidrotratamiento, craqueo catalítico, coquificación, unidades de aminas y sistemas de despojamiento de gases.

Históricamente, la tecnología más utilizada para el tratamiento de aguas agrias ha sido la torre despojadora *Sour Water Stripper* (SWS), <sup>(1,2)</sup> en la cual el agua es sometida a un proceso de despojamiento con vapor para volatilizar el  $H_2S$  y el  $NH_3$ , y enviar dichas corrientes gaseosas a una unidad de recuperación de azufre (SRU) tipo Claus. <sup>(3)</sup> No obstante, la creciente presión regulatoria, los objetivos

corporativos de descarbonización y la necesidad de mejorar la circularidad hídrica han impulsado la evaluación de tecnologías complementarias o alternativas.<sup>(4,5)</sup>

En este contexto, algunos autores coinciden en señalar que los procesos de oxidación avanzada, en particular los basados en Fenton y foto-Fenton, han mostrado un elevado potencial para la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes presentes en efluentes industriales complejos, incluyendo aguas provenientes de refinerías.<sup>(6,7)</sup>

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar, desde una perspectiva técnica, económica, ambiental y de circularidad hídrica, tres alternativas tecnológicas para la reutilización de aguas residuales en la refinería: (a) se propone una configuración integrada, basada en la despojadora (SWS) como etapa primaria y la oxidación avanzada como etapa de pulido, (b) despojadora de aguas agrias (SWS) integrada con la recuperadora de azufre (SRU) y (c) sistema de tratamiento Fenton intensificado.

### **Marco teórico**

Las aguas agrias se definen como aquellas corrientes acuosas que contienen concentraciones significativas de gases ácidos, principalmente  $H_2S$  y  $NH_3$ , junto con otros contaminantes como fenoles, cianuros, mercaptanos, hidrocarburos solubles y sólidos disueltos totales. En ese sentido, algunos autores sostienen que su tratamiento adecuado es indispensable para evitar la inhibición de procesos biológicos, la corrosión acelerada de equipos y las emisiones fugitivas de compuestos tóxicos y odoríferos.<sup>(8)</sup>

La tecnología de despojamiento se basa en un equilibrio líquido-vapor controlado mediante el aporte de vapor de agua en la parte inferior de una columna de platos o empaque. El  $H_2S$  y el  $NH_3$  se volatilizan y ascienden por la columna, mientras que el agua despojada se retira por el fondo. La integración de la SWS con una unidad Claus permite convertir el  $H_2S$  en azufre elemental, cerrando el ciclo del azufre y reduciendo emisiones de  $SO_2$ .<sup>(9)</sup>

Los procesos de oxidación avanzada (AOP) con Fenton intensificado se apoyan en la generación in situ de radicales hidroxilos ( $\bullet OH$ ) a partir de la reacción entre  $Fe^{2+}$  y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) en medio ácido. Estos radicales presentan un elevado potencial de oxidación y son capaces de degradar compuestos orgánicos persistentes, aumentando la biodegradabilidad del efluente y reduciendo la demanda química de oxígeno (DQO). Cuando se combinan con

irradiación UV o con soportes catalíticos heterogéneos, se incrementan la eficiencia y la estabilidad del proceso.<sup>(10)</sup>

Por otra parte, la economía circular como estrategia de gestión de recursos, reemplaza el enfoque lineal de "producir, usar y desechar" por un ciclo continuo de aprovechamiento de recursos. Se presenta como un sistema que promueve la reutilización, el reciclaje y la regeneración de materiales, transformando los productos al final de su vida útil en recursos valiosos para ser reintegrados al proceso productivo.<sup>(11,12)</sup>

En su informe Cerdá Tena<sup>(13)</sup>, establece que los principios de la economía circular también son aplicables a la ingeniería de producto, donde, además de los flujos de materiales, la circularidad del agua es un elemento de suma importancia. Las características de la circularidad del agua, más allá de la cantidad de flujo, son su calidad y los niveles regionales de estrés hídrico.

El concepto de circularidad hídrica en refinerías implica maximizar la recuperación y el reúso interno de agua, minimizando el consumo de agua fresca y las descargas, al tiempo que se evitan transferencias de impacto hacia otros vectores ambientales. Los marcos de indicadores de transición circular (CTI),<sup>(14,15)</sup> y metodologías de análisis integrados, como MET-Inedit,<sup>(16)</sup> ofrecen herramientas cuantitativas para evaluar el desempeño circular de sistemas industriales a nivel de planta y de cadena de valor.

## **Materiales y métodos**

Se seleccionó la Refinería Cienfuegos S.A como caso de estudio, por su generación de grandes volúmenes de aguas residuales y elevado consumo de agua. Dicha empresa trabaja en la implementación de una estrategia de economía circular para lograr la sostenibilidad de su proceso de refinación.

El estudio se centró únicamente en las aguas agrias de refinación. Las aguas sulfurosas alcalinas, aunque son tratadas en la planta de tratamiento de residuales (PTR) antes de su disposición final, aún no pueden ser reutilizadas en la refinería estudiada. Esta situación avala la propuesta de la integración de procesos SWS + Fenton con el objetivo de lograr mejor calidad del agua recuperada y favorecer su reutilización en diferentes procesos.

Inicialmente se realizó un diagnóstico al proceso estudiado, donde se identifican las causas que impiden la reutilización de las aguas residuales; por el método de

votación ponderada se selecciona la de mayor incidencia. En consecuencia, se identifican y estudian las alternativas tecnológicas para su solución y mediante el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) <sup>(17)</sup>, se realiza la evaluación técnica, económica y ambiental de dichas alternativas.

Se evaluaron tres alternativas tecnológicas para lograr la circularidad del agua técnica en el proceso de estudiado. Las alternativas evaluadas fueron:

**Alternativa A1.** Integración de la SWS + Fenton intensificado

**Alternativa A2.** Despojadora SWS con una unidad Claus.

**Alternativa A3.** Oxidación avanzada (AOP) con Fenton intensificado.

**La metodología de evaluación** se estructuró en las siguientes etapas: (I) caracterización fisicoquímica de la corriente de aguas agrias; (II) diseño operativo de una despojadora SWS integrada a la unidad de recuperación de azufre; (III) evaluación conceptual de un sistema de oxidación avanzada tipo Fenton intensificado; (IV) evaluación conceptual de la integración SWS+Fenton intensificado; (V) selección de la mejor alternativa por análisis multicriterio mediante el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP); (VI) evaluación mediante el diagrama Sankey <sup>(18)</sup> de la circularidad del agua para la tecnología seleccionada; (VII) cuantificación de la circularidad hídrica mediante indicadores basados en CTI y MET–Inedit y (VIII) finalmente se define el Nivel de circularidad del proceso, en etapa posterior a la implementación, según: Rango: < 30% baja; 30 – 75% media; > 75% alta.

La caracterización de las aguas agrias y los valores utilizados en el estudio acerca de los flujos y concentraciones de contaminantes, fueron reportados por el proveedor en el balance de materiales para el diseño de la torre despojadora de aguas agrias. <sup>(19)</sup> La tabla 1 muestra la procedencia de dichas aguas.

**Tabla 1-** Emisión de aguas agrias y sus respectivos contaminantes por procesos

| Procesos                      | Aguas<br>(% peso) | pH    | RS <sub>2</sub> ; RSH<br>(mg/L) | CL <sup>-</sup><br>(mg/L) | CN <sup>-</sup><br>(mg/L) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>(mg/L) | Fenoles<br>(mg/L) | HC<br>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 fluidizado | 6-12              | 8-9,5 | 500-3 000                       | 10-50                     | 5-200                     | 300-3 000                              | 80-300            | 5-60       |
| Recuperación de azufre        | 6-8               | 5-6   | 2 500-4 000                     | ---                       | ---                       | ---                                    | ---               | 100-150    |
| Hidrotratamiento de nafta     | 3-6               | 5-6   | 1 500-3 000                     | 10-30                     | 5-10                      | 1 000-2 000                            | 10-20             | 5-20       |
| Hidrocraqueo catalítico       | 6-12              | 8-9,5 | 500-2 000                       | 10-30                     | 5-100                     | 100-2 000                              | 50-200            | 5-20       |
| Hidrotratamiento de diesel    | 5-6               | 5-6   | 3 000-5 000                     | 10-30                     | 5-10                      | 1 500-3 000                            | 10-20             | 5-20       |
| Craqueo con vapor             | 15-35             | 6-8,5 | 10-20                           | 10-30                     | ---                       | Trazas                                 | 20-30             | 30-50      |

## Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

Para comparar las tres tecnologías se empleó el método AHP estructurando el problema en tres niveles: objetivo, criterios y alternativas. El objetivo global fue seleccionar la tecnología o combinación de tecnologías que maximice la reutilización de agua y el desempeño ambiental, manteniendo la viabilidad técnica y económica. Se definieron cuatro criterios de evaluación, con su debida justificación (tabla 2).

**Tabla 2 - Criterios para la evaluación**

| Criterios                                                     | Tipo         | Justificación                             |
|---------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------|
| Remoción integral (H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> y Fenol) | Técnico      | Seguridad, emisiones, tratamiento, pulido |
| Costo operativo                                               | Económico    | OPEX                                      |
| Impacto ambiental                                             | Ambiental    | Subproductos, riesgo, toxicidad           |
| Compatibilidad con reúso                                      | Circularidad | Reúso, calidad final                      |

### Evaluación de la circularidad hídrica para la alternativa seleccionada mediante Sankey e indicadores de transición circular (CTI y MET-Inedit)

El objetivo de la circularidad del agua es reducir la demanda de agua dulce y garantizar la disponibilidad del recurso para todos los usuarios.

En particular, se definieron cinco indicadores principales: (I) el índice de circularidad del agua (WCI), que relaciona los volúmenes de agua recuperada y reusada con el volumen de agua de alimentación. Un índice IC\_agua que se calcula desde dos enfoques diferentes: (II) (MET-Inédit): IC\_agua que relaciona el caudal de agua reusada con la suma de los caudales descargados y despojados: (III) (Circular Trans): IC\_agua que se relaciona como la media de las entradas circulares (entradas de agua recirculada de otros procesos), y salidas circulares de agua (salidas de agua destinadas a ser reutilizadas): (IV) % Circulación *in situ* que relaciona la circulación interna de las instalaciones a través de la reutilización y el reciclaje respecto al proceso general, y PAR, que relaciona la proporción de agua reutilizada (PAR) respecto al proceso general de refinación. Entonces, la circularidad hídrica del sistema se evaluó adaptando conceptos de los indicadores de transición circular (CTI v3.0) <sup>(14,15)</sup>, se determina el índice WCI para el proceso estudiado:

$$\bullet \text{ WCI} = \frac{\text{Q Agua recuperada en SWS} + \text{Q agua reusada en proceso}}{\text{Q Agua entrada a SWS}} \quad (1)$$

Por otra parte, la metodología MET-Inédit,<sup>(16)</sup> 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:

$$\bullet (MET - Inédit): IC_{agua} = \frac{Q \text{ Agua reusada en proceso}}{Q \text{ Agua descargada} + Q \text{ Agua despojada}} \quad (2)$$

Además, se ofrece un indicador interno centrado en la circulación interna a través de la reutilización y el reciclaje respecto al proceso general:

$$\bullet \% \text{ Circulación in situ} = \left( \frac{Q \text{ Agua reusada en refinación} - Q \text{ Agua entrada a refinación}}{Q \text{ Agua entrada a Refinería}} + 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

Adicionalmente fueron calculados otros indicadores de Circular Trans, así como, se definió el nivel de circularidad del proceso estudiado según Inédit.<sup>(20)</sup>

$$\bullet (Circular Trans): IC_{agua} (SWS + Fenton) = \frac{\text{Media de salidas circulares}}{\text{Media de entradas circulares}} \times 100 \quad (4)$$

$$\bullet PAR = \frac{\text{Vol. total de agua reutilizada}}{\text{Vol. total de agua consumida en proceso de refinación}} \times 100 \quad (5)$$

- Nivel de circularidad del proceso, etapa posterior a la implementación.<sup>(20)</sup>, según:  
Rango: < 30% baja; 30 – 75% media; > 75% alta.

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.

## Resultados y discusión

Se desarrolló un diagnóstico al proceso estudiado y se identificaron 24 deficiencias. Entonces, se realizó una reducción hasta las 10 causas que generan los mayores impactos y mediante la técnica de votación ponderada (tabla 3) se pudo realizar la siguiente selección:

**Tabla 3 - Votación Ponderada.**

| Expertos votantes        | Puntuaciones por causas |   |    |   |   |    |   |   |   |    |
|--------------------------|-------------------------|---|----|---|---|----|---|---|---|----|
|                          | 1                       | 2 | 3  | 4 | 5 | 6  | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Experto 1                | 5                       |   | 4  |   | 2 | 3  |   | 1 |   |    |
| Experto 2                | 5                       |   |    | 2 |   | 4  |   | 3 |   | 1  |
| Experto 3                | 4                       | 3 | 5  |   |   | 2  |   |   | 1 |    |
| Experto 4                | 4                       | 2 | 5  |   | 1 | 3  |   |   |   |    |
| Experto 5                | 5                       |   | 4  |   | 2 | 3  | 1 |   |   |    |
| Suma                     | 23                      | 5 | 18 | 2 | 5 | 15 | 1 | 4 | 1 | 1  |
| Frecuencia de puntuación | 5                       | 2 | 4  | 1 | 3 | 5  | 1 | 2 | 1 | 1  |
| Orden de prioridad       | 1                       | 5 | 2  | 7 | 4 | 3  | 8 | 6 | 9 | 10 |

De acuerdo al resultado de la votación ponderada, la selección se planteó según el orden siguiente:

1. No existe tecnología para recuperar y reusar el agua técnica de proceso.
2. No existen estrategias para la aplicación de técnicas de economía circular.
3. No existe criterio de uso y reúso del agua en la refinería.

### **Diseño operativo de la despojadora (*Sour Water Stripper*. SWS)**

La despojadora SWS fue diseñada para tratar una corriente real en el proyecto de expansión de la refinería, sobre un caudal total de 77 573 L/h <sup>(19)</sup> de aguas agrias, con un sobre diseño del 20 % para que pueda admitir una corriente adicional de agua contaminada. <sup>(19)</sup> Presenta una configuración de columna de platos equipada con rehervidor de fondo y condensador de tope. El objetivo principal del diseño fue maximizar la remoción de H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub>, garantizando, al mismo tiempo, una calidad de agua adecuada para su integración con etapas posteriores de tratamiento y reúso.

La columna opera a presión ligeramente elevada y con una temperatura de rehervidor adaptada para minimizar el arrastre de NH<sub>3</sub> hacia la unidad Claus, reduciendo así la formación de NO<sub>x</sub> en la combustión y mejorando la estabilidad del proceso de recuperación de azufre. <sup>(21)</sup> Con las condiciones de operación simuladas, la SWS es capaz de recuperar 76 228 L/h de agua tratada, <sup>(22)</sup> con una eficiencia de recuperación superior al 98 % respecto del caudal de alimentación, coincidiendo con el balance de materiales presentado por el proveedor. La diferencia de caudal (alrededor de 1 345 L/h) corresponde al despojamiento gaseoso por el tope de la torre y que es enviado como alimentación a la unidad Claus, para la recuperación del azufre antes de ser vertido a la atmósfera. Sin embargo, la corriente de agua recuperada aún presenta una carga de 17,10 kg/h de fenol que no puede eliminarse en la despojadora. <sup>(22)</sup> Esto limita la posibilidad de reutilización en otros procesos tecnológicos con mayores exigencias de calidad

del agua. Esta imposibilidad de reúso justifica la propuesta de integración de procesos para lograr mayor reutilización y la verdadera circularidad hídrica. Entonces se propone que el agua recuperada en la SWS (76 228 L/h) sea enviada para un tratamiento de pulido posterior en la unidad Fenton con el objetivo de lograr un agua químicamente más limpia que permita su recirculación y reutilización.

#### **Ventajas de la SWS**

Tecnología probada en más del 90% de las refinerías a nivel mundial; Alta eficiencia en remoción de  $H_2S$  (95–99%); Manejo integrado con unidades de recuperación de azufre (SRU); Permite recuperar agua clara para uso interno (aguas de proceso o clarificación secundaria); Bajo Opex relativo.

#### **Desventajas de la SWS**

Baja remoción de materia orgánica (fenoles, TOC); Alto consumo de vapor; Requiere instrumentación de seguridad por riesgo de vapores tóxicos; el agua despojada con altas cargas orgánicas necesita tratamientos adicionales.

### **Evaluación conceptual del sistema de tratamiento Fenton intensificado**

Es el tratamiento mayoritariamente utilizado en industrias químicas para el tratamiento de residuales sulfurosos alcalinos, con alta presencia de fenol y de Hidróxido sódico (Soda cáustica).<sup>(23)</sup>

El sistema Fenton intensificado se planteó como etapa de pulido posterior a la SWS, con el objetivo de reducir la carga de compuestos orgánicos recalcitrantes (fenoles, hidrocarburos solubles, aminas no volátiles) y mejorar la biodegradabilidad del efluente.<sup>(10)</sup> El esquema conceptual incluye un reactor agitado, dosificación de sales de hierro y peróxido de hidrógeno, control de pH en el rango 2,5–3,5 y posterior neutralización y clarificación de lodos.

Los parámetros de diseño asumidos se basaron en literatura reciente para efluentes complejos de refinería, con tiempos de residencia del orden de 30–60 minutos y razones molar  $Fe^{2+}/H_2O_2$  optimizadas para maximizar la remoción de DQO y minimizar el consumo de reactivos.<sup>(24,25)</sup>

### **Ventajas de Fenton intensificado**

Reduce compuestos orgánicos tóxicos que la SWS no elimina; Mejora la biodegradabilidad del efluente; Permite tratar las aguas sulfurosas alcalinas que antes no se recuperaban; Permite alcanzar calidad apta para reúso como etapa de pulido adicional.

### **Desventajas de Fenton intensificado**

Generación de lodos férricos; Relativamente alto Opex por consumo de  $H_2O_2$ ; No remueve eficientemente  $NH_3$ ; requiere integración con otra tecnología; Riesgo operacional por manejo de peróxido.

## **Evaluación conceptual de la configuración SWS + Fenton intensificado**

Se consideró que la aplicación del proceso Fenton sobre el agua tratada por la SWS permite alcanzar reducciones adicionales de DQO entre 60 y 80 %, dependiendo de la composición específica de la corriente. <sup>(10)</sup>. Esta fracción residual se considera en los balances de masa utilizados para la evaluación de la circularidad hídrica.

### **Ventajas de la configuración SWS + Fenton intensificado**

Combina una alta eficiencia de remoción de  $H_2S$  y  $NH_3$  con una reducción sustancial de la carga orgánica; Permite tratar las aguas sulfurosas alcalinas que antes no se recuperaban; Aumenta el volumen de agua recuperada y reusada; Permite alcanzar calidad apta para reúso en varios procesos; Reduce la huella hídrica al permitir reúso interno.

### **Desventajas de la configuración SWS + Fenton intensificado**

Alto consumo de vapor; Requiere mayor instrumentación por riesgo de vapores tóxicos y residuales líquidos, aunque estos son tratados en la PTR.

## **Comparación de alternativas mediante el método AHP <sup>(17)</sup>**

Los resultados del AHP se expresan en términos de un puntaje adimensional entre 0 y 1 para cada alternativa, lo que permite compararlas directamente.

Para el caso de estudio, se consideraron los valores de diseño y que con la configuración SWS+Fenton, al menos el 90 % del caudal recuperado se reutiliza internamente en la refinería (como agua de reposición para sistemas de enfriamiento, o como agua de alimentación a calderas después de tratamientos complementarios). A partir de estos valores se calcularon los indicadores de transición circular.

Los resultados se presentan en tres ámbitos: (i) desempeño de la SWS en términos de remoción de contaminantes y recuperación de agua, (ii) evaluación de las alternativas tecnológicas por el análisis multicriterio AHP y (iii) estimación de los indicadores de circularidad hídrica para la configuración seleccionada, así como, se define el nivel de circularidad del proceso auxiliar en dos momentos diferentes: Caso A. Proceso actual y Caso B. Posterior a la implementación de la mejora tecnológica.

En primer lugar, la SWS diseñada alcanza eficiencias de remoción de  $H_2S$  superiores al 98 % y de  $NH_3$  superiores al 90 %, en línea con valores reportados en la literatura para sistemas bien optimizados. La recuperación de agua 76 228 L/h implica que solo una fracción menor del caudal de alimentación requiere ser manejada como *blowdown* o purga, lo que minimiza tanto el volumen de descarga como el consumo de agua fresca de reposición.

Los pesos de cada criterio se obtuvieron mediante comparaciones pareadas apoyadas en la experiencia de operación de refinerías. La consistencia de las matrices de comparación se verificó asegurando índices de consistencia menor a 0,1. Según  $CI = 0,016$  (aceptable  $< 0,10$ ). La ponderación de los criterios (tabla 4) asigna mayor relevancia al impacto ambiental y a la compatibilidad con reúso (con un peso de 0,39), en coherencia con el enfoque de economía circular y cierre de ciclos hídricos que guía este estudio.

**Tabla 4** - Matriz de comparación por pares. Peso por criterio. Índice de Consistencia

| Criterios                   | C1 Remoción | C2 OPEX | C3 Ambiental | C4 Reúso | Peso  | IC                 |
|-----------------------------|-------------|---------|--------------|----------|-------|--------------------|
| C1 Remoción integral        | 1           | 3       | 1/3          | 1/3      | 0,152 | 0,016<br>aceptable |
| C2 OPEX                     | 1/3         | 1       | 1/5          | 1/5      | 0,068 |                    |
| C3 Impacto Ambiental        | 3           | 5       | 1            | 1        | 0,390 |                    |
| C4 Compatibilidad con Reúso | 3           | 5       | 1            | 1        | 0,390 |                    |

Los resultados del análisis multicriterio mediante el método AHP (tabla 5) evidencian diferencias claras entre las alternativas evaluadas para el tratamiento de aguas agrias, considerando los criterios seleccionados.

**Tabla 5** - Desarrollo de la Matriz AHP por criterios (alternativas)

|                                             |                     |     |        |         |
|---------------------------------------------|---------------------|-----|--------|---------|
| <b>C1 – Eficiencia de remoción integral</b> |                     |     |        |         |
| Alternativas                                | SWS + Fenton        | SWS | Fenton | Peso    |
| SWS + Fenton                                | 1                   | 3   | 5      | 0,637   |
| SWS                                         | 1/3                 | 1   | 3      | 0,258   |
| Fenton                                      | 1/5                 | 1/3 | 1      | 0,105   |
| <b>C2 – Costos operativos (OPEX)</b>        |                     |     |        |         |
| Alternativas                                | SWS + Fenton        | SWS | Fenton | Peso    |
| SWS + Fenton                                | 1                   | 7   | 7      | 0,778   |
| SWS                                         | 1/7                 | 1   | 1      | 0,111   |
| Fenton                                      | 1/7                 | 1   | 1      | 0,111   |
| <b>C3 – Impacto ambiental</b>               |                     |     |        |         |
| Alternativas                                | SWS + Fenton        | SWS | Fenton | Peso    |
| SWS + Fenton                                | 1                   | 3   | 7      | 0,649   |
| SWS                                         | 1/3                 | 1   | 5      | 0,279   |
| Fenton                                      | 1/7                 | 1/5 | 1      | 0,072   |
| <b>C4 – Compatibilidad con reúso</b>        |                     |     |        |         |
| Alternativas                                | SWS + Fenton        | SWS | Fenton | Peso    |
| SWS + Fenton                                | 1                   | 3   | 7      | 0,279   |
| SWS                                         | 1/3                 | 1   | 5      | 0,649   |
| Fenton                                      | 1/7                 | 1/5 | 1      | 0,072   |
| <b>Resultado final de la Matriz AHP</b>     |                     |     |        |         |
| Alternativas                                | Puntaje total (0–1) |     |        | Ranking |
| SWS + Fenton                                | 0,586               |     |        | 1ro     |
| SWS                                         | 0,324               |     |        | 2do     |
| Fenton                                      | 0,090               |     |        | 3ro     |

La alternativa SW Salcanza un puntaje global de 0,324, por su equilibrio entre desempeño ambiental (capacidad para remover amoníaco, estabilizando la corriente líquida y reduciendo la carga contaminante hacia unidades posteriores), costos operativos y viabilidad de reúso. No obstante, Fenton presenta mayor contribución en degradación de compuestos orgánicos y compatibilidad con reúso exigente, lo que justifica la configuración integrada SWS + Fenton (figura 1), que alcanza el mayor puntaje global (0,586), como alternativa óptima para maximizar la circularidad del agua. La consistencia del modelo ( $IC < 0,10$  en todas las matrices) refuerza la robustez de esta priorización.

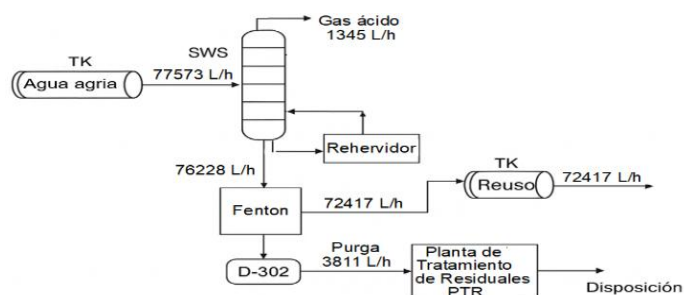


**Fig. 1** - PDF de sistema integrado SWS + Fenton + PTR

Entonces, la SWS+Fenton (figura 1) se posiciona como la opción preferente, combina la alta eficiencia de remoción de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{NH}_3$  con una reducción sustancial de la carga orgánica, habilitando mayor calidad de agua para diferentes aplicaciones internas dentro de la refinería. Los resultados respaldan la idea de que la circularidad hídrica requiere soluciones híbridas que combinen tecnologías de separación física/química y procesos de oxidación avanzada.

La circularidad del agua lograda con la integración de tecnologías, señalada anteriormente, se refleja en el diagrama Sankey (figura 2).

La integración de estos resultados con el diagrama Sankey de circularidad hídrica permite una interpretación más profunda del desempeño sistémico. El Sankey muestra que la SWS actúa como etapa estructural del sistema, recuperando más del 98 % del caudal tratado y separando eficientemente la fracción gaseosa rica en  $\text{H}_2\text{S}/\text{NH}_3$  hacia la unidad Claus, mientras que la corriente líquida estabilizada se dirige a tratamiento posterior.

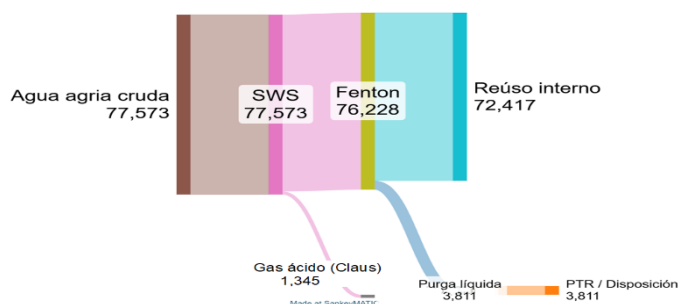


**Fig. 2** - Diagrama Sankey de circularidad de agua para la tecnología SWS+Fenton

En este esquema, la incorporación de Fenton como etapa de pulido se alinea directamente con los flujos representados en el diagrama, donde una fracción controlada del efluente es sometida a oxidación avanzada, permitiendo una reducción adicional de carga orgánica y habilitando su reincorporación al circuito de agua de proceso.

De esta manera, el AHP respalda cuantitativamente una tecnología híbrida SWS + Fenton, en la cual SWS maximiza la eficiencia global y la estabilidad operativa, mientras que Fenton aporta un valor incremental clave en términos de calidad del agua y circularidad. El diagrama Sankey permite visualizar la minimización de purgas, la maximización del reúso interno y la reducción de descargas finales, consolidando la propuesta como una solución técnicamente robusta y alineada con los principios de economía circular en refinerías.

## Indicadores de circularidad hídrica para la alternativa seleccionada

La circularidad hídrica del tren SWS+Fenton propuesto, se cuantifica definiendo un índice como la fracción del caudal líquido despojado que retorna a las unidades de proceso que lo produjeron, luego del tratamiento avanzado. Considerando un caudal de salida de la SWS de 76 228 L/h, una purga del 5 % tras el Fenton (3 811 L/h) y una corriente de reúso de 72 417 L/h.

### **WCI – Water Circularity Indicator**

De acuerdo con los resultados de Sankey, se asume que alrededor del 95 % del agua líquida que abandona la SWS permanece dentro del circuito hídrico interno de la refinería, mientras que el 5 % restante se elimina como purga y se envía para su tratamiento como efluente en la PTR. Entonces:

- a) Q Agua\_total a SWS= 77 573 L/h = 679 539 m<sup>3</sup>/año
- b) Q Agua\_recuperada en SWS = 76 228 L/h = 667 757 m<sup>3</sup>/año
- c) Q Agua\_reusada en proceso = 72 417 L/h = 634 373 m<sup>3</sup>/año
- d) Q Agua a PTR = 3 811 L/h
- e) Q Agua despojada = 1 345 L/h
- f) Q agua total entrada a refinería = 1 302 130 m<sup>3</sup>/año
- g) Q agua total usada en proceso de refinación = 1 200 880 m<sup>3</sup>/año

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

WCI = 1,92 (Circularidad muy alta en el proceso según CTI v3).

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

$$\bullet \% \text{Circulación in Situ} = \left( \frac{634\,373\text{ m}^3/\text{año} - 1\,200\,880\text{ m}^3/\text{año}}{1\,302\,130\text{ m}^3/\text{año}} + 1 \right) \times 100 = 56,49\%$$

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

Si el análisis se extiende a los volúmenes de agua reutilizada respecto a la generación total de aguas agrias, entonces:

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

La fracción recuperada como agua de reúso equivale al 93,35 %, evidenciando un alto grado de cierre del ciclo hídrico asociado a este esquema de tratamiento. Entonces se calcula el porcentaje de agua reutilizada en el año respecto al proceso general.

### Proporción de agua reutilizada en el proceso general de refinación:

$$\bullet PAR = \frac{634\,373\,m^3/año}{1\,200\,880\,m^3/año} \times 100 = 52,83\%$$

Este resultado demuestra la incidencia de la circularidad lograda para este tipo de agua, sobre el proceso de refinación y la necesidad de incorporar otras aguas residuales para alcanzar la sostenibilidad de dicho proceso. Al incorporar las aguas sulfurosas alcalinas, obviamente aumenta el volumen de agua recuperada y recirculada, mejorando así, los indicadores de transición circular (CTI) del proceso general de refinación.

Considerando el balance de caudales estudiados, el índice de circularidad del agua WCI resulta superior a la unidad, lo que indica un elevado grado de recirculación y reutilización dentro de los límites de planta. De manera análoga, el indicador IC\_agua muestra que el volumen de agua reusada supera ampliamente la suma de los volúmenes descargados (3 811 L/h) y despojados (1 345 L/h), evidenciando una mejora sustancial respecto de esquemas lineales de uso único y vertido. Conocidos estos resultados se calcula el nivel de circularidad general del proceso estudiado (figura 3) según Inedit, comparando dos momentos diferentes, antes y después de la mejora tecnológica.



**Fig. 3** - Nivel de circularidad del proceso auxiliar estudiado según Inédit, antes y después de implementar la alternativa tecnológica

El análisis de esta figura muestra un alto nivel circularidad ( $\geq 75\%$ ) (Caso B), así como, un bajo potencial de mejora posterior en los cinco aspectos técnicos trabajados con anterioridad. Se debe destacar que, este nivel de circularidad responde únicamente al proceso auxiliar de refinación estudiado, antes y después de la incorporación de la propuesta de mejora tecnológica, que, en consecuencia, logra la circularidad de dichas aguas en ese proceso. Nótese la coincidencia de la circularidad del agua por indicador de Circular Trans (98,27) y el índice de circularidad de Inédit (97/100), este a su vez, impacta en una mejora al proceso general de refinación, con una reducción del consumo de agua técnica aproximadamente en un 52,83 % respecto al total consumido.

En este caso, lograr la circularidad de las aguas residuales del proceso estudiado, permite el cumplimiento del segundo principio de la economía circular. Estos resultados muestran que la integración de tecnologías de tratamiento avanzadas 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. <sup>(5)</sup>

## Conclusiones

El estudio desarrollado en la 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  $H_2S$  y  $NH_3$  acordes con las mejores prácticas industriales y una fracción de purga (*blowdown*) limitada.

La comparación de tres alternativas tecnológicas (SWS+Fenton, sistema Fenton intensificado y despojadora SWS) mediante un enfoque multicriterio tipo AHP muestra que la configuración híbrida SWS + Fenton ofrece el mejor equilibrio global entre desempeño técnico, viabilidad económica e impacto ambiental, al tiempo que habilita altos niveles de circularidad hídrica.

La cuantificación de la circularidad hídrica mediante indicadores inspirados en CTI y MET–Inedit 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.

## Referencias bibliográficas

1. ALFA-LAVAL. *Sour water stripping*. Alfa Laval Technical Note. 2020. <https://www.alfalaval.com/en-TT/industries/energy-and-utilities/crude-oil-refinery/treatment-processing/sour-water-stripping/>
2. YOKOGAWA. *Sour water stripper process*. Yokogawa Application Note. 2020. <https://www.yokogawa.com/library/resources/application-notes/sour-water-stripper-process/>
3. SPEIGHT, J. G. *The refinery handbook*. (2nd ed.). 2020. Gulf Professional Publishing.
4. OECD. *The circular water economy in Latin America*. 2025.OECD Publishing.
5. WORLD BANK. *Incorporating circular economy and resilience principles in the water sector*. 2024. World Bank Technical Report.
6. HASSAN, A.A., SABA, A.G., SAFAA, M.R.A., GHASSAN, H.A., ADAM, H. Aromatic-free Fenton process for rapid removal of phenol from refinery wastewater in an oscillatory baffled reactor. *Arabian Journal of Chemistry*, 2022. **15**(10).103635. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103635>
7. MATHEUS, P.P., MARÍA DE OLIVEIRA, S., BORGES, M.K., MEDEIROS DE ARAÚJO, D. Fenton: Una revisión sistemática de su aplicación en el tratamiento de aguas residuales. *Procesos*. 2023, **11**(8), 2466. <https://doi.org/10.3390/pr11082466>
8. BECHTEL. *Sour water: Where it comes from and how to handle it*. Bechtel Process Safety Series. 2018. <https://www.bechtel.com>
9. MONTESANTOS, N.; SKJOLDING, L.M.; BAUN, A.; MUFF, J.; MASCHIETTI, MARCO. Reducing the environmental impact of offshore H<sub>2</sub>S scavenging wastewater via hydrothermal oxidation. *Water Research*. 2023, **241**, 120–135. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119507>
10. PARRA-OROBIO, B. A., RICO-LIZCANO, Y., SOTO-PAZ, J., GUERRA-HERNÁNDEZ, L.A., MANYOMA-VELÁSQUEZ, P.C. Optimization of electro-Fenton parameters for phenol removal in complex wastewaters. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. **22**, 101–145. [www.sciencedirect.com/journal/chemical-engineering-journal-advances](http://www.sciencedirect.com/journal/chemical-engineering-journal-advances)
11. STAHEL, W.R. La economía Circular. *Revista Naturaleza*. 2016, **531**(1), 435-438 <https://www.nature.com>

12. CERDÁ, E. & KHALILOVA, A. Economía circular. Economía industrial, 2016. **401**(3), 11-20. ISSN 0422-2784.

<https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/447151>

13. CERDÁ TENA, E. 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. 2019. ISBN formato PDF: 978-84-948178-5-4

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

15. AFGHANI, N., HAMHABER, J., AND FRIJNS, J. An integrated assessment framework for transition to Water Circularity systems. *Sustainability*. 2022. **14**(14), 8533. <https://www.researchgate.net/publication/361967644>

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

17. SAATY, T.L. Fundamento axiomático del proceso analítico jerárquico. *Management Science*. 1986. **32**(7), 841-855. *Scientific Research and Academic Publisher*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.7.841>

18. BOGART, S. Diagrama Sankey online para análisis de circularidad del agua. 2025. <https://sankeymatic.com/build/>

19. TECHNIP S.p.A. *Heat & Materials Balance for the Sour Water Stripper Unit at The Cienfuegos's oil refinery Expansion Project*. 2014. Engineering & Contacting Solutions. Italian Sulphur Technology Provider.

20. INEDITINNOVA. *Autoevalúate con la herramienta de circularidad de Inédit*. 2025. <https://circular.ineditinnova.com/>

21. TAHERI, M. M.; ZAHRA, T.R.; MEHRDAD, M. Two-column sour water stripping without sending ammonia to Claus. *Journal of Petroleum Science and Technology*. 2020. **10** (2), 12-18. DOI:10.22078/jpst.2020.4040.1643. <https://jpst.ripi.ir/>

22. LOBELLES-SARDIÑAS, G.O., DEBORA-MIRA, L., SABINA-DELGADO, A. Evaluación integral de una torre despojadora para recuperar aguas sulfurosas en la Refinería de Cienfuegos. *Tecnología Química*. 2021. **41**(1), 123-140. ISSN 2224 6185. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5184>

23. SADEK, NOOR J.; ALARDHI, SAJA MOHSEN; ALBAYATI, TALIB M.; SALIH, ISSAM K. Recent Developments in Petroleum Wastewater Treatment Based on Advanced Oxidation Processes: A Review. *Iran Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*. 2025. **44**(4), 1089-1120. ISSN: 1021-9986. [https://ijcce.ac.ir/article\\_721276\\_04fccd990896b56270012012b30a180d.pdf](https://ijcce.ac.ir/article_721276_04fccd990896b56270012012b30a180d.pdf)
24. MINNALKODI SENGUTTUVAN, K. R., KANMANI, S. SARANYA, K. Performance evaluation of the electro-Fenton process for distillery wastewater. *Sustainability*. 2024. **16**(15), 6512. <https://doi.org/10.3390/su16156512>
25. WIJAYANTI, K.A., HAKIKA, D.C., SETYAWAN, M., BIDDINIKA, M.K. Comparative study of distillery wastewater treatment by direct UV irradiation, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV-photo-fenton processes. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2025. **60**(6), 33–45. <https://doi.org/10.59957/jctm.v60.i6.2025.15>

## Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

## Contribución de los autores

Gabriel Orlando Lobelles Sardiñas: concepción y dirección de la investigación, análisis y escritura del artículo.

Suanet Emilia Brunet Ruiz: realizó la parte de evaluación económica ambiental y de circularidad hídrica.

Melisa García Álvarez: realizó el aporte y tratamiento de datos, análisis formal, validación.

Claudia Águila Prado: colaboró con el análisis de los resultados, supervisión o revisión del manuscrito.