

***METODOLOGÍA CON ENFOQUE DE ECONOMÍA ECOLÓGICA
PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE AGUAS SULFUROSAS EN UNA
REFINERÍA DE PETRÓLEO***

***A METHODOLOGY BASED ON AN ECOLOGICAL ECONOMY APPROACH
FOR THE INTEGRATING MANAGEMENT OF THE SULPHUROUS WATER IN
AN OIL REFINERY***

Gabriel Orlando Lobelles Sardiñas^{1}, Eduardo Julio López Bastida²,
Julio Pedraza Gárciga³ y Luis Manuel Peralta Suárez³*

¹ Refinería de petróleo "Camilo Cienfuegos". Finca La Carolina. Cienfuegos, Cuba.

² Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez. Cuatro Caminos Carretera a Rodas, km 3 ½, Cienfuegos, Cuba.

³ Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

Recibido: Junio 22, 2016; Revisado: Julio 5, 2016; Aceptado: Julio 21, 2016

RESUMEN

Hoy en día, a pesar de las estrictas normas internacionales, todavía hay generación de emisiones líquidas y gaseosas en la refinería de petróleo de Cienfuegos, que contaminan el medio ambiente. La construcción de nuevas unidades por la remodelación de dicha refinería trae consigo un incremento de esas emisiones, si bien no existen condiciones tecnológicas para la reutilización de las aguas sulfurosas. El objetivo del estudio es proponer una metodología de gestión integral de las aguas residuales sulfurosas en el proceso de refinación de petróleo, incluyendo la valoración y selección de la variante tecnológica más favorable para minimizar la contaminación del agua con azufre y las emisiones derivadas de esta durante dicho proceso. La metodología propuesta se basó en herramientas de economía ecológica, lo que permitió hacer una valoración integral de seis variantes tecnológicas de la refinería de Cienfuegos. Se aplicó el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), mediante el software SimaPro 7.1 y se evaluó por el método Eco-Speed para disminuir la incertidumbre. Se realizó una evaluación económica donde se tuvieron cuenta los costos externos para un análisis más integral, lo que permitió junto a los indicadores ecológicos seleccionar la mejor variante tecnológica. Como resultado relevante se logró una metodología de evaluación integral y como impacto positivo,

Copyright © 2016. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Gabriel O. Lobelles, Email: globelles@cuenpetrol.cu

la implementación de la variante seleccionada (V5), se logró recuperar el 98,27 % del agua de proceso y aumentar el recobrado de azufre de 94 a 99,8 %, lográndose una reducción de las emisiones de 12 200 a 120 mg/Nm³ como SO₂.

Palabras clave: agua-sulfurosa, economía-ecológica, gestión-integral

ABSTRACT

Despite the current highly stringent international standards regulating the contaminating emissions to the environment, the Oil refinery of Cienfuegos is still generating liquid and gaseous emissions contaminating the environment. The construction of new units as part of the Refinery expansion leads to an increase of these emissions due to the lack of technologies for the reutilization of the sulphurous water. The objective of this paper is to propose a methodology for the integral management of the sulphurous residual water in the oil refining process, including the evaluation and selection of the most feasible technological variant to minimize the sulphur contamination of water and the resulting emissions during the process. The methodology is based on the ecological economy tools, allowing a comprehensible evaluation of six technological variants at the refinery of Cienfuegos. The Life Cycle Assessment was applied (ACV by its Spanish acronym), by means of the software SimaPro 7.1. It was evaluated through the Eco Speed Method, to minimize the possible uncertainty. An economic evaluation was performed, taking into account the external costs for a more comprehensive analysis, enabling, along with the ecological indicators, the selection of the best technological variant, achieving a methodology based on a comprehensive evaluation, and as a positive impact, the implementation of the chosen variant (V5), 98.27% of the process water was recovered, as well as the sulphur that recovered from 94 to 99.8 %, reducing the emissions from 12 200 to 120 mg/Nm³ as SO₂.

Key words: sulphurous water, ecological economy, integral management

1. INTRODUCCIÓN

Según informe del Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP, 2009) es conocido que el 25 % del agua es consumida en diferentes procesos industriales, que al mismo tiempo contaminan severamente las diferentes fuentes de abasto con los vertimientos de sus residuales. De acuerdo con (Gary y Handwerk, 2006) las refinerías de petróleo son de las industrias más consumidoras de agua y también de las que más la contaminan. Esta contaminación está dada fundamentalmente por la presencia del azufre en el petróleo crudo usado como materia prima, que se transforma en sulfuro de hidrógeno (H₂S) y otros compuestos durante en el proceso de refinación.

La incorporación de nuevas unidades de proceso (destilación a vacío, craqueo catalítico, endulzamiento de diesel, nafta, gas licuado) con motivo de la expansión tecnológica de la refinería, incrementan tanto las aguas ácidas como los gases ácidos, apareciendo los efluentes gaseosos, pues el ácido sulfhídrico presente en esos productos es separado por absorción con metildietanolamina (MDEA) y enviado como materia prima de

alimentación para la unidad de recuperación de azufre (URA). En dicha unidad se logra entre un 94 % de conversión del H₂S en azufre elemental, según las tecnologías de SiirtecNigi S.p.A (2014), (Worley Parsons, 2012), y 99,9 %, según las tecnologías de LURGI (2014), Prosernat (2014), entre otras, basado fundamentalmente en las siguientes reacciones químicas:



Hasta hace muy poco tiempo, sólo existían unas cuantas nociones científicas sobre la práctica de la gestión del agua, acerca de su consumo y su contaminación durante la producción y las cadenas de suministro. Hoekstra y Chapagain (2008) han demostrado que la gestión del uso del agua en el procesamiento de los productos puede ayudar a una mejor comprensión del carácter global del agua dulce y la cuantificación de los efectos de su consumo y comercio. Por consiguiente, una gestión integral de dicho recurso requiere seguir un enfoque de principio a fin del proceso, que abarque no solo el agua como recurso sino también el tratamiento posterior de los principales contaminantes que se le separen a esta durante la limpieza.

Para dar solución a la problemática presentada el objetivo de este estudio es proponer una metodología de gestión integral de las aguas residuales sulfurosas en el proceso de refinación de petróleo, incluyendo la valoración y selección de la variante tecnológica más favorable para minimizar la contaminación del agua con azufre y las emisiones derivadas de esta durante el proceso de refinación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de todo lo expuesto se propone un esquema metodológico que fundamentado en la economía ecológica y sus principales herramientas, permite valorar la sostenibilidad de la gestión del agua en los procesos de refinación de petróleo.

Esta metodología, en relación con las tradicionales, representa las siguientes ventajas:

- ❖ Por primera vez en Cuba, para los procesos de refinación de petróleo, presenta indicadores de economía ecológica que complementan los indicadores económicos y energéticos tradicionales.
- ❖ Propone mejoras tecnológicas al proceso de recuperación de azufre a partir de las aguas agrias, dentro de los procesos de refinación de petróleo, ahorrando agua en los mismos y aportando el azufre como producto comercializable al mercado a partir de la concepción de Producciones más Limpias.
- ❖ Adapta la metodología *Water Pinch*, normalmente usada para optimizar el uso del agua en sistemas de distribución, a la valoración de un proceso unitario.
- ❖ Incorpora el análisis de las externalidades dentro de la evaluación económica, permitiendo una mayor integralidad al análisis económico.
- ❖ Propone una evaluación de potenciales impactos ambientales en los diferentes escenarios tecnológicos, permitiendo una valoración técnico-económico-ecológica del recurso agua para determinado proceso desde su etapa de diseño hasta su explotación.

Su diagrama heurístico se presenta en la Figura 1.

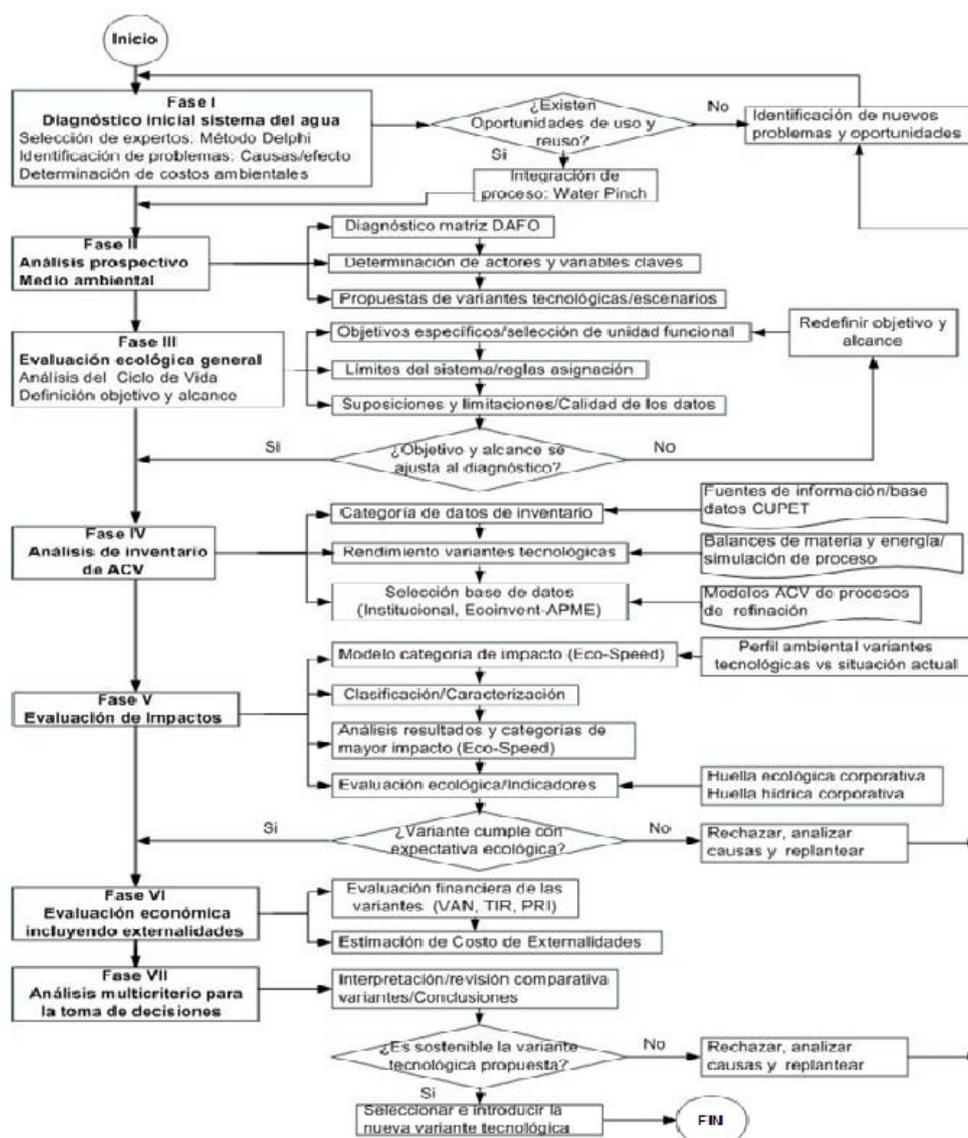


Figura 1. Diagrama de la metodología para la gestión integral del agua residual sulfurosa

La metodología incluye: a) Diagnóstico inicial del sistema de agua y evaluación de oportunidades de uso y reuso, b) Análisis prospectivo medio ambiental: identificación de escenarios tecnológicos, c) Evaluación ecológica general (análisis de ciclo de vida, definición de objetivo y alcance), d) Análisis de inventario, e) Evaluación de impactos, f) Evaluación económica integral (incluye los costos de externalidades), g) Análisis multicriterio para la toma de decisiones.

2.1. Fases del desarrollo de la metodología.

2.1.1. Fase I-Diagnóstico inicial del sistema del agua

Para el desarrollo de esta fase, el autor del trabajo propone las siguientes herramientas generales y específicas:

- a) Selección de expertos: Método Delphi
- b) Diagrama causa – efecto o diagrama de Ishikawa.

c) Balance de materiales

e) Determinación de los costos medioambientales. Para este cálculo se aplica la metodología desarrollada por Juvier (2010) y se utilizan las listas de chequeos establecidas por (Gale y Stokoe, 2001), que son fundamentales para la búsqueda de los elementos relacionados con el medio ambiente.

Una vez concluido el diagnóstico se identifican las oportunidades de uso y reuso del agua de proceso aplicando el método de integración de procesos *Water Pinch*, establecido por Uneptie. org. (1998). Para la recuperación y utilización del agua de proceso, se aplica la tecnología de despojamiento con vapor, entonces, la contaminación pasa al medio atmosférico. A la salida de la torre despojadora se coloca un analizador en línea para el monitoreo continuo de la calidad del agua despojada. De acuerdo con Technip S.p.A (2014), en el caso de estudio el agua despojada debe tener una concentración máxima de 10 ppm (wt) de H₂S y 50 ppm (wt) de NH₃. Si bien esta tecnología permite recuperar aproximadamente el 98 % del agua sulfurosa procesada, el análisis no concluye sino con un estudio general para el tratamiento del contaminante despojado. Por consiguiente, es necesario determinar qué tratamiento se da al contaminante despojado para que el análisis sea integral. En este caso se inicia un estudio prospectivo medioambiental para conocer los escenarios futuros a los que debe enfrentarse el proceso general.

2.1.2. Fase II- Análisis prospectivo medioambiental

Para este análisis se aplica el Método de Escenarios de Godet (2007). Para visualizar el comportamiento de una organización en un período de tiempo dado, es necesario el análisis interno para encontrar las debilidades y fortalezas. Donde las debilidades constituyen el conjunto de sensibilidades presentes en el proceso, mientras que las fortalezas constituyen el conjunto de puntos fuertes presentes en el proceso. El análisis externo se realiza para encontrar las amenazas y oportunidades. Donde las amenazas constituyen un factor que influye significativamente en el proceso, de ahí que su dominio sea determinante en el desarrollo sostenible y sus posibilidades de éxito. Mientras que las oportunidades constituyen factores que influyen positivamente en la transformación deseada.

En el desarrollo de este método se determinan las variables claves, que constituyen un factor importante para la selección de los escenarios, mediante una matriz de relaciones directas con la ayuda del programa MIC-MAC. Así como se definen los actores claves, mediante matrices de influencia, con la ayuda del programa MACTOR, para valorar las relaciones de fuerza entre ellos, sus convergencias y divergencias. Por otra parte se elaboran los escenarios prospectivos mediante el análisis en el programa SMIC-Prob-Expert, utilizando métodos de impactos cruzados probabilistas. Los tres programas anteriores fueron tomados de la Caja de Herramientas de Godet (2007).

Como resultado de este método se identifican los escenarios tecnológicos que pueden aportar la solución a la problemática señalada. Entonces corresponde una evaluación integral para seleccionar el escenario tecnológico más deseable.

2.1.3. Fase III- Evaluación ecológica integral

Para esta evaluación se ha seleccionado la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Según las normas de la NC-ISO 14040:2009 y NC-ISO 14044:2006.

2.1.4. Fase IV-Análisis del inventario del ciclo de vida

Se desarrolla por la norma NC-ISO 14 040: 2009: Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Definición del objetivo, alcance y análisis del inventario.

Los valores adoptados en el estudio acerca de los flujos y concentraciones de contaminantes que se utilizan en el mismo, corresponden a lo reportado por Technip S.p.A (2014) y LURGI (2014) del balance de materiales y energía para el diseño básico de la torre despojadora de aguas agrias y la unidad recuperadora de azufre respectivamente.

2.1.5. Fase V- Evaluación del impacto del ciclo de vida

Se desarrolla según la norma NC-ISO 14 044: 2006: Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.

Actualmente existen varias metodologías para evaluar los impactos de un ACV, sin embargo, para este trabajo se ha seleccionado la metodología Eco- Speed desarrollada por (Rodríguez et al., 2014) atendiendo a que:

- Su uso está concebido para la evaluación del perfil ambiental de un sistema de producto de la industria química. Adicionalmente, por este método se corroboró que la categoría relacionada con el uso del agua no está suficientemente tratada en otras metodologías, siendo esta de vital importancia para la industria de procesos y para el caso de estudio.
- La Metodología Eco Speed fue diseñada para la evaluación de impacto de ciclo de vida para la industria cubana.
- Los factores de caracterización de las categorías de carácter regional y local están limitados a las condiciones de Cuba, disminuyendo así la incertidumbre espacial.
- Los factores de caracterización de las categorías globales están en concordancia con los reportados por otras metodologías, siendo factibles de usar en Cuba.

2.1.6. Fase VI- Evaluación integral de variantes tecnológicas

Durante la Fase I se indicó la necesidad de un estudio general para el tratamiento del contaminante despojado y en el caso de estudio se analiza el proceso de recuperación de azufre a partir de las aguas sulfurosas. Para esta evaluación se consideran los siguientes indicadores económicos:

Ingresos por ventas; Costos de producción; Gastos generales, Inversión inicial y externalidades. Para determinar los costos externos (externalidades) en este caso, se aplicó la metodología de cálculo reportada en un estudio realizado por la CEPAL-SEMARNAT (2007) en la refinería de petróleo de Tula, México, que pertenece a la región de América Latina y el Caribe con condiciones similares al caso de estudio, por no existir referencias para Cuba.

Para este análisis se han identificado los siguientes indicadores:

Crudo procesado (bbl/año); Emisiones de SO₂ (t/año) y Externalidades (\$/año)

Los indicadores económicos antes señalados fueron analizados según (Martín, y col., 2007) para determinar los siguientes indicadores de rentabilidad de las variantes tecnológicas:

Valor Actual Neto (VAN); Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).

2.1.7. Fase VII- Decisión Multicriterio Discreta (DMD)

El núcleo de la DMD es la denominada matriz de decisión o de impactos, que recoge las evaluaciones realizadas por el grupo de expertos a cada variante, con respecto a cada uno de los criterios propuestos, determinándose además, los factores de peso de cada uno de los criterios. La evaluación fue desarrollada según Solano (2014), cuya metodología incluye un proceso de normalización para los criterios, teniendo en cuenta las diferencias entre las escalas de medidas. Al tener normalizado todos los valores es necesario aplicar un método de ordenación. Para la realización de este trabajo se seleccionó el método de Ponderación Lineal, que permite obtener una puntuación “score” de cada opción tecnológica, posibilitando un ordenamiento de las mismas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología se valida para seisvariantes (escenarios) tecnológicas a partir de los datos obtenidos en el año 2014. Para el desarrollo de la misma se convocó la participación de un grupo de expertos conformado por diversas disciplinas debido a la diversidad de procesos y unidades donde el agua tiene participación.

Fase I. Se determinó el número de expertos que participan en el estudio mediante el método Delphi, Landeta (2006), por la siguiente expresión: $n = \frac{p(1-p)*k}{i^2} = 9$

Como resultado se obtuvo que de los 26 candidatos propuestos para la investigación, 9 resultaran evaluados de alta competencia y 17 presentan competencia media.

De acuerdo con la metodología aplicada, los costos medioambientales para el período octubre-noviembre-diciembre/2014 equivalen a 4 976 739 CUC.

Para determinar la posible reutilización de las aguas recuperadas se aplicó el método *Water Pinch* a una torre despojadora de aguas agrias, donde se identificaron las corrientes de fuentes y demandas y se ordenaron en sentido creciente del criterio deconcentración de contaminantes. Se considera una concentración única que incluye todos los contaminantes. Los datos se introdujeron en el software *Water Pinch*, los resultados se reflejan en la figura 2.

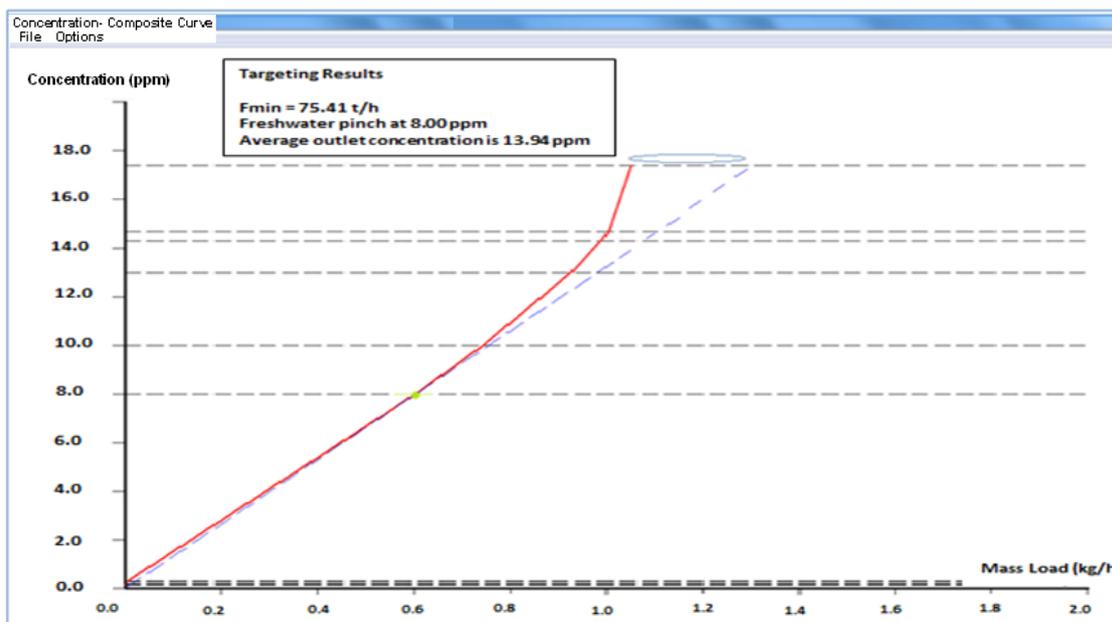


Figura 2. Diagrama de determinación del Punto Pinch. **Fuente:** Software Water Pinch.

Del análisis de la figura 2 se puede concluir que:

- La concentración media de contaminantes es de 13,94 ppm y la concentración máxima permisible, según los resultados del software, se extiende hasta 17,40 ppm, esto permite, de forma óptima, la reutilización mínima de 75,41 t/h de agua despojada, que representa el 97,21 % del agua ácida de entrada a la torre.
- A la derecha del punto *Pinch* y por encima de 13,94 ppm, se localizan los residuales que aún se pueden recuperar hasta la concentración máxima permisible de 17,40 ppm, según el software, con una carga de 1,05 kg/h. La posible reutilización antes señalada, conlleva un flujo de 76 228 kg/h, es decir 98,27 % de recuperación, coincidiendo con en el balance de materiales de dicha torre. Para un año de trabajo, esta reutilización supone una recuperación anual de 667 757,28 m³ de agua, equivalente a una disminución de 1 035 023, 78 CUC en los costos de producción, a razón de 1,55 CUC/m³ de agua.

Fase II. El análisis prospectivo permitió identificar seis escenarios tecnológicos (variantes), las que quedan enunciadas como sigue:

Variante V0. Situación actual de la refinería de petróleo

Variante V1. V0 + unidad de vacío y craqueo catalítico

Variante V2. V1 + unidades auxiliares de proceso

Variante V3. V2 + unidad Claus sin Incinerador

Variante V4. V2 + unidad Claus con Incinerador

Variante V5. V3 + integración de reactor de reducción y despojador húmedo

Fase III, IV y V. Evaluación ecológica integral. Como unidad funcional se tomó 1 m³ de agua residual sulfurosa, cuyos contaminantes según el balance de materiales se aprecian en la tabla 1. La evaluación del estudio se realiza para el año 2014.

En la tabla 1 se puede apreciar la recuperación de azufre en kg por cada m³ de agua residual sulfurosa según las tres variantes que incluyen el proceso Claus.

Tabla 1. Inventario para 1m³ de agua. Fuente: Balance de Energía y Materiales. LURGI (2014)

Variantes	V 0	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5
Sal (NaCl) (kg)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
MDEA (kg)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Con. Eléctrico (kW/h)	0,7	0,8	0,9	1,00	1,00	1,00
Con. Fuel Oil (kg)	8,00	13,00	13,00	18,00	23,00	20,00
Con. Fuel Gas (kg)	-	-	-	50,00	100,00	50,00
Emisiones al aire (kg)						
Hidrógeno (H ₂)	6,00	6,00	0,005	2,00	-	-
Metano	0,0004	3,00	3,00	-	-	-
Sulfuro de Hidrógeno	8,00	9,00	20,00	3,00	-	-
Amoniaco (NH ₃)	0,7	0,7	3,00	-	-	--
Propano	1,00	2,00	2,00	-	-	-
Butano	7,00	0,7	1,00	-	-	-
Etano	1,00	1,00	0,7	-	-	-
Pentano	0,4	0,5	0,5	-	-	-
Hexano	0,7	0,02	0,7	-	-	-
Agua (H ₂ O)	-	0,2	-	-	-	-
Etileno	-	0,1	-	-	--	-
Dióxido de Carbono(CO ₂)	-	0,2	0,2	4,00	7,00	-
Dióxido de azufre (SO ₂)	-	-	-	2,00	0,5	-
Monóxido de Carbono (CO)	-	-	-	1,00	-	-
Nitrógeno (N ₂)				336	1600	-
Emisiones al agua (kg)						
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	0,9	1,00	-	-	-	-
Amoniaco (NH ₃)	-	0,0002	-	-	-	-
Agua (H ₂ O) (m ³)	1	1	-	-	-	-
Recuperación de S₈ (kg)	-	-	-	25	25	27

Los datos del balance por variante se introdujeron en el software Sima Pro 7.1 y se evaluaron por el método Eco-Speed 1.0, los resultados aparecen en la figura 3.

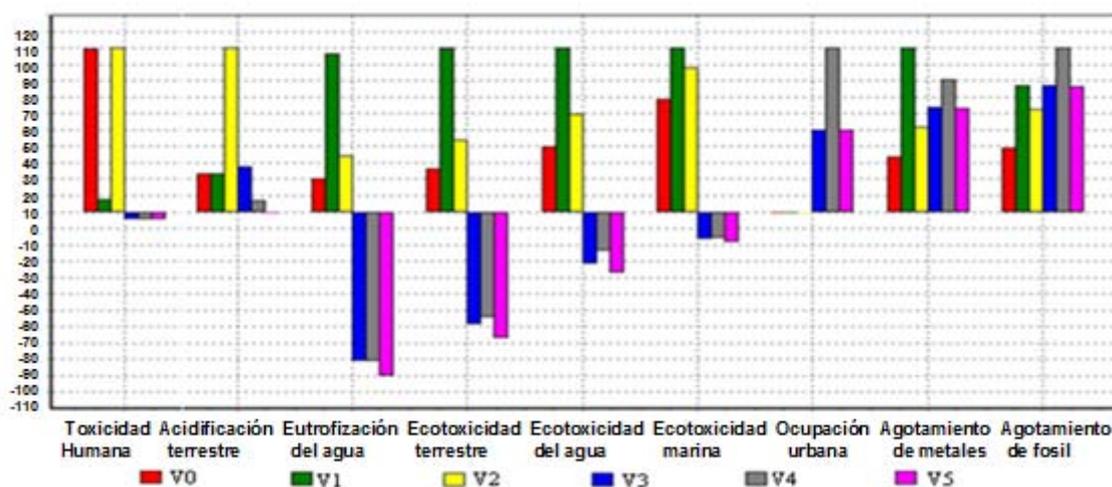


Figura 3. Evaluación del daño ambiental por variantes tecnológicas. **Fuente:** Elaboración a partir de SimaPro 7.1. Método Eco-Speed 1.0 (2012) V 1.00/ world / puntuación única.

- ❖ En la figura 3 se puede apreciar que las tres variantes del proceso Claus tienen un impacto positivo, pues logran disminuir:
 En más de un 90 % las categorías de daños como eutrofización del agua fresca; en más de un 60 % la eco-toxicidad terrestre; en un 40 % la eco-toxicidad del agua fresca; en un 20 % la eco-toxicidad marina y en más de un 5 % la toxicidad humana
- ❖ Se puede apreciar que la variante V5 presenta poca carga medioambiental que es motivada por la utilización de recursos para su puesta en marcha. Logra un 99,8 % de recuperación de azufre, superando las variantes V3 y V4 que tienen un 94 % de recuperación. Es de destacar que esta es la única variante que cumple las normas de emisiones del Grupo del Banco Mundial.

Fase VI. Evaluación económica incluidas las externalidades

Para la evaluación económica-ambiental solo se analizaron las variantes V3, V4 y V5, pues solo estas se relacionan con la eliminación de H₂S y la recuperación de azufre.

Tabla 2. Indicadores económicos que incluyen los costos externos por variantes

INDICADORES	V 2	V 3	V 4	V 5
Crudo (bls/año) [a]	23 400 000	23 400 000	23 400 000	23 400 000
Emisiones SO ₂ (t/año) [b]	24 672,60	183,17	16,42	0
Costos ext. (\$/año [c])	93 213 289,70	692 018,54	62 034,96	0
Ingresos*ventas \$/año [d]	-	3 790 080	3 790 080	3 991 680
[d]-[c]	-	3 098 061,46	3 728 045,04	3 991 680
Costos de prod. \$/año [e]	-	35 670	198 446	46 632
Gastos gen. \$/año [f]	-	12 986	12 998	12 996
Inversión inicial. [g]	-	3 727 300	6 623 000	5 404 200
VAN Caso A	-	8 752 589, 83	8 800 342, 10	9 301 499, 73
Caso B	-	7 122 432, 94	8 670 344, 87	9 301 499, 73
TIR Caso A	-	31%	-15%	7%
Caso B	-	15%	-16%	7%

El análisis económico se realizó en el Caso A sin incluir los costos de externos, en el Caso B se repite el análisis pero considerando el valor de los costos de externos provocados por las emisiones de SO₂ en la refinería estudiada. Los costos externos se restan del total de ingresos por ventas, para mayor precisión en el análisis.

Del procesamiento de los flujos de caja de estas variantes para ambos casos, se obtienen los resultados de VAN y TIR, para cada una de ellas, incluyendo los costos externos mostrados en las Tabla 2, Caso A y Caso B, así como el PRI mostrado en la figura 4.

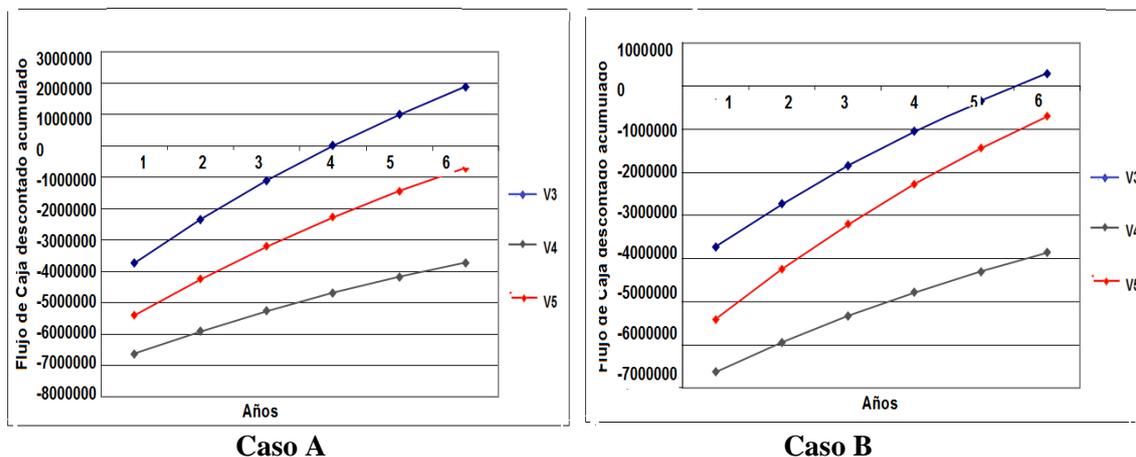


Figura 4. Período de Recuperación de la Inversión (PRI) Caso A y Caso B

- En la variante V5 se obtienen ingresos por ventas superiores a las otras variantes, pues en ella se obtiene un aumento de 5,8 % de recobrado de azufre elemental.
- La variante V5 no se afecta por los costos externos debido a su bajo nivel de emisiones, cumpliendo las normas emisiones gaseosas. Este es un criterio de peso, pues el objeto social de estas unidades es puramente ambiental, independientemente del aporte económico que presenta por la venta del azufre.

Fase VII. Decisión Multicriterio discreta (DMD)

En el desarrollo de la **Fase VI** solose analizaron las variantes V3, V4 y V5, sin embargo, para el desarrollo del método DMD serán retomadas las seis variantes analizadas en el inicio, en aras de que la decisión de los expertos sea lo más acertada desde el punto de vista de la integralidad.

Los expertos seleccionaron los criterios de peso. La matriz de decisión de impactos permite la selección de alternativas a través de un análisis cualitativo de opciones, basado en criterios propios del evaluador, decisor o grupo de expertos.

Para cada variante los valores de los criterios fueron normalizados en el intervalo [0;1]. Todos los criterios fueron minimizados, excepto el recobrado de azufre elemental que fue maximizado, esto debido a que el aumento de este valor es directamente proporcional a la eficiencia del proceso. Luego se realizó una ponderación lineal para poder obtener el valor de la función global que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Matriz de decisión o de impactos

CRITERIOS							
Variante	Consumo eléct. (MW/h)	Consumo agua (m³/h)	Consumo vapor (t/h)	Recobrado azufre %	Costos inversión (*1000)	Emisiones SO₂ (kg/h)	Función global
V0	10,17	105,19	22	0	0	34,8	0,52
V1	11,9	321,53	66,6	0	53026,8	40,51	0,36
V2	14,94	463,53	132,9	0	58878,3	98	0,11
V3	14,9	957,83	201,5	94	62605,6	21,2	0,64
V4	15,45	960,75	338,3	94	69228,6	1,9	0,67
V5	15,02	959,62	339,1	99	68009,8	0	0,71
Factor peso (w)	5	5	5	35	15	35	-

4. CONCLUSIONES

1. La metodología integral propuesta permite evaluar los impactos ambientales provocados por la contaminación del agua con azufre, durante el proceso de refinación que está basada en herramientas tradicionales como método estadístico, *Water Pinch* y herramientas de economía ecológica como ACV, Huella Ecológica Corporativa y las externalidades, constituyendo un aporte a la literatura consultada que posibilita valorar la sostenibilidad del recurso agua desde su etapa de diseño hasta su explotación.
2. Se demostró la efectividad de la metodología propuesta a través de una validación en seis variantes tecnológicas para el tratamiento de las aguas sulfurosas en la refinería de petróleo de Cienfuegos, como estudio de casos, permitiendo seleccionar la variante que hace sostenible el proceso de recuperación de azufre. La implementación de dicha variante permitió la recuperación del 99,8 % del azufre en la corriente de alimentación a dicho proceso, así como una reducción de las emisiones de SO₂ hasta 120 mg/Nm³, permitiendo el cumplimiento de las normas del Grupo del Banco Mundial, a las que debe ceñirse la refinería estudiada para el control de las emisiones gaseosas. La misma proporciona un 98,27 % de ahorro de agua en el proceso productivo, motivado por su recuperación y reutilización.

REFERENCIAS

- CEPAL-SEMARNAT., Comisión Económica para América Latina y Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales. Evaluación de externalidades ambientales del sector Energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca, México. LC/MEX/L.788/Rev.1. 11 de septiembre de 2007, pp. 43-55.
- Gale, R.J., and Stokoe, P.K., Environmental Cost Accounting and Business Strategy. IÖW, USA : En Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing. EUA: Chris Madu (Ed.) from Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 121-125.
- Gary, H.J. and Handwerk, G.E., Petroleum Refining-Technology and Economics. Fourth Edition, pag. 49. Ed.Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 2006, pp. 49-57.

- Godet, M., *Prospectiva Estratégica: problemas y métodos.*, Cuaderno No. 20 de LIPSOR, Segunda edición. Ed. PROSPEKTIKER, 2007, pp.63-73, 82-86.
- Hoekstra, A.Y., and Chapagain, A.K., *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources.*, Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2008, pp. 60-74.
- Juvier, O., *Procedimiento para presupuestar los costos medioambientales en la refinera de petróleos de Cienfuegos*, Tesis en opción del título de Licenciado en contabilidad y finanzas, Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba, 2010.
- Landeta, J., *Current validity of the Delphi method in social sciences.*, Revista Technological forecasting and social change, Vol.73. No.5, 2006, pp. 467-482.
- LURGI., *Heat & Materials Balance for the Sulphur Recovery Unit.*, Frankfurt, Germany, The Germany Sulphur Tecnology Provider, 2014, pp. 2-17.
- Martín, W.F., López, E., y Monteagudo, J., *Uso racional del agua y su vínculo con el ahorro de energía.*, Cienfuegos: CEEMA, MES, Universidad de Cienfuegos, Universo Sur, 2008, pp.120.
- NC- ISO 14040., *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Definición del objetivo y alcance y análisis del inventario [ISO 14 040: 2009 (Traducción certificada), IDT]*
- NC-ISO 14 044., *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida. [ISO 14 044: 2006 (Traducción certificada), IDT]* ONN
- Prosernat., *Subsidiary of HEURTEY PETROCHEM and part of IFP Group Technologies, specialized in natural gas processing.*, International Sulphur Technology Providers, 2014, pp. 24-30.
- Rodríguez, B., Contreras, A., y Rosa, E., *Eco-Speed, a new Life Cycle Assessment Methodology for Latin American Countries.*, IV International Conference on Life Cycle Analysis, Coatzacoalcos, México, 2011, pp. 64-72.
- Siirtec.Nigi-S.p.A. *Heat & Materials Balance for the Sulphur Recovery Unit.*, Italian Engineering & Contacting Solutions, Italian Sulphur Technology Provider, 2014, pp. 1-15.
- Solano, R., *Evaluación integral de alternativas para la eliminación de sulfuro de hidrógeno en la refinera de petróleo de Cienfuegos.*, Tesis en opción del título de Ingeniero Químico, Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba, 2014.
- Technip.S.p.A. *Heat & Materials Balance for the Sour Water Strepper Unit.*, Roma, Italia: Technip S.p.A. Engineering & Contacting Solutions, Italian Sulphur Technology Provider, 2014, 2-10.
- Unep.org., *Coastal Waters of the World: Trends, Threats and Strategies.* Washington, D.C. Island Press, 1998, Disponible en: http://www.unep.org/outreach/wssd/docs/TM/tm_notes_and_resources.pdf
- Worley Parsons., *Australian engineering company.*, It provides project delivery and consulting services to the resources and energy sectors, Australian Sulphur Technology Providers, 2012, 1-12.
- WWAP., *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos.*, Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, 5º Foro Mundial del Agua, 2009, 20-25.