

Evaluación integral de una torre despojadora para recuperar aguas sulfurosas en la Refinería de Cienfuegos

Integral evaluation of a stripping to recover sulphurous waters in the Cienfuegos soil Refinery

Gabriel Orlando Lobelles-Sardiñas^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-2128-6146>

Leidis Debora-Mira¹ <https://orcid.org/0000-0001-6543-3796>

Arianna Sabina-Delgado² <https://orcid.org/0000-0002-1437-0462>

¹Refinería Cienfuegos S.A, Cienfuegos, Cuba

²Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cuba

*Autor para la correspondencia: correo globelles@refcfg.cu

RESUMEN

En la Refinería de Cienfuegos se espera un incremento del consumo de agua y la generación de residuales, sin que exista una tecnología de tratamiento que permita su reutilización. Es objetivo de este estudio evaluar integralmente una torre despojadora para determinar su rehabilitación y consigo procesar las aguas residuales sulfurosas, disminuyendo costos de producción e impacto al medio ambiente. En tal sentido, se realizó un diagnóstico del sistema de agua técnica que posibilitó la identificación de las oportunidades de reúso de agua mediante la metodología *WaterPinch*, sobre la base de los niveles de concentración de efluentes, que conllevó a una disminución del impacto ambiental con la introducción de una nueva red de distribución. Posteriormente se realizó una evaluación técnico-económica-ambiental para sustentar la propuesta de mejora tecnológica. En la evaluación técnica, se simula el proceso mediante el simulador *ProMax® 2.0* para el caso de estudio, lo que permitió la obtención de los parámetros de operación de dicha torre. Se calculan los eco-costos evitados que permitieron demostrar la

viabilidad y sostenibilidad de la propuesta de mejora. Como resultado se logra la recuperación de la torre y la reutilización del 98 % de las aguas técnicas y la reducción de los costos e impacto ambiental de las mismas, representando un ahorro anual de 667 757 m³ de agua, equivalente a una disminución de 1 035 023 CUC en los costos de producción, a razón de 1,55 CUC/m³ de agua.

Palabras clave: aguas residuales; evaluación; reutilización; torre despojadora.

ABSTRACT

At the Cienfuegos refinery, an increase in water consumption and waste generation is expected, without there being a treatment technology that allows its reuse. The objective of this study is to fully evaluate a stripping tower to determine its rehabilitation and to process sulfurous wastewater, reducing production costs and impact on the environment. In this sense, a diagnosis of the technical water system was carried out that made it possible to identify opportunities for water reuse using the Water Pinch methodology, based on the concentration levels of effluents, which led to a decrease in environmental impact with the introduction of a new distribution network. Subsequently, a technical-economic-environmental evaluation was carried out to support the technological improvement proposal. In the technical evaluation, the process is simulated using the ProMax® 2.0 simulator for the case study, which allowed obtaining the operating parameters of said tower. The avoided eco-costs are calculated that allowed to demonstrate the viability and sustainability of the improvement proposal. As a result, the recovery of the tower and the reuse of 98% of the technical water is achieved and the reduction of costs and environmental impact of the same, representing an annual saving of 667,757 m³ of water, equivalent to a decrease of 1,035 023 CUC in production costs, at a rate of 1,55 CUC / m³ of water.

Keywords: waste water; evaluation; reuse; stripping tower.

Recibido: 20/04/2020

Aceptado: 15/08/2020

Introducción

Es conocido que el 25 % de las reservas de agua dulce del planeta se consume en procesos industriales, cuyos residuales contaminan severamente las fuentes de abasto.⁽¹⁾ Para contrarrestar esos impactos se han desarrollado nuevas tecnologías que descontaminan los residuales, partiendo de factores fundamentales como la factibilidad de la reutilización,⁽²⁾ la economía y la eficiencia de los procesos.⁽³⁾ Sin embargo, en los últimos años, la efectividad de esos procesos se ha visto seriamente limitada debido a restricciones ambientales cada vez más severas.^(4,5)

En tal sentido, la Refinería Cienfuegos S.A trabaja con parámetros de calidad reconocidos según las normas internacionales y con un tratamiento primario de sus residuales, con el objetivo de minimizar los costos de producción y mitigar los impactos medioambientales, no obstante aún persisten problemas como:

- La implementación de nuevas unidades de proceso incrementa el consumo de agua potable generando mayor cantidad de residuales.
- No se cuenta con una tecnología para tratar los residuales que posibilite su reutilización.
- La tendencia al aumento de los precios del crudo, del agua y de la energía.

La puesta en marcha de unidades de conversión media en busca de mayor rendimiento tecnológico, unido a nuevas unidades medioambientales traerá consigo un incremento considerable de residuales líquidos y gaseosos.^(6, 7)

Para dar solución a la problemática presentada, es objetivo de este estudio evaluar integralmente una torre despojadora para determinar su rehabilitación y consigo procesar las aguas residuales sulfurosas, disminuyendo costos de producción e impacto al medio ambiente.

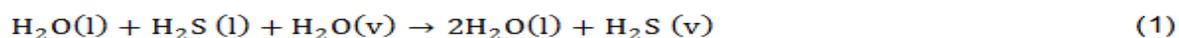
Fundamentación teórica

Procesos como despojamiento, extracción líquido-líquido, sistemas de enfriamiento y operaciones de lavado son unos pocos de muchos procesos, que están presentes en las refinerías donde se utiliza intensivamente el agua,⁽⁸⁾ que a lo largo de todo el ciclo de vida del proceso, va adquiriendo contaminantes una vez que entra en contacto

con ellos. Es decir, la calidad del agua se va degradando en función de la profundidad del proceso en que tiene participación.

Algunos autores reportan, ^(9,10) la emisión de aguas ácidas residuales provenientes del vapor del agua desmineralizada que se utiliza para el craqueo térmico, en el hidrotreamiento de los diferentes productos de la refinación, en la desalación del crudo de alimentación y en los sistemas de tope de las diferentes torres de estabilización y destilación. Cuando los productos pesados son craqueados (agrietados), el azufre se convierte en H₂S y mercaptanos. Durante el hidrotreamiento, los compuestos de nitrógeno se convierten a NH₃. La reacción entre el vapor y los hidrocarburos cíclicos produce fenol. Estos condensados son llamados condensados amargos o aguas ácidas y son ricas en NH₄⁺, HS⁻ y fenoles. Su concentración asciende de 6 a 12 % peso respecto a la carga de cada unidad y no pueden ser descargados en la alcantarilla sin desulfurización previa. ^(11, 12)

En los sistemas de tope de las torres, el vapor de agua se contamina con el H₂S presente en los gases y luego se condensan en el tambor de reflujo, desde donde puede separarse el agua ácida sulfurosa resultante. Entonces para eliminar finalmente ese contaminante será necesaria una torre despojadora donde ocurren los siguientes cambios de fase:



En dicha torre, más que una reacción química, ocurre un desplazamiento del H₂S (v) por la acción del H₂O (v), pues en condiciones operacionales de presión y temperatura, el H₂S se vaporiza a partir de los 89 °C. El agua ácida o agria entra a la torre con 84 °C y a una presión de 0,27 MPa (a), el H₂S es despojado completamente sobre los 92 °C. En el caso del H₂S, esta sustancia se forma en los mismos procesos de refinación por la presencia del azufre en el crudo de alimentación. Esto ocurre sobre todo en los procesos de craqueo y de hidrodesulfurización. ^(10,12)

Tabla 1. Emisión de efluentes – aguas ácidas y los respectivos contaminantes por procesos

Procesos	Aguas (% peso)	pH	HS ⁻ RSH (mg/L)	CL ⁻ (mg/L)	CN ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	Fenoles (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 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

En la tabla 1 puede apreciarse la mayor contaminación del agua por parte del HS⁻ y del NH₄⁺, para cada uno de los procesos de refinación y los rangos de contaminación dependen en gran medida del crudo de alimentación utilizado. En los procesos auxiliares de la refinación el H₂S es despojado, tanto de las aguas ácidas, como de los gases ácidos y posteriormente venteados a la atmósfera mediante la antorcha o enviado como corriente de alimentación a la Unidad Recuperadora de Azufre (URA).

Sin embargo, en ambos casos persisten las emisiones gaseosas provocando un considerable impacto ambiental, a pesar del establecimiento de regulaciones ambientales cada vez más estrictas.^(4,5)

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Inicialmente se realizó un diagnóstico general del sistema de agua técnica. Para el mismo se consideró el balance de materiales utilizado para el diseño de la torre despojadora, mostrado en la tabla 2.⁽¹³⁾

Tabla 2- Corrientes de la curva compuesta de fuentes y demandas ordenadas en sentido creciente en función de la concentración

Corrientes	Concentración Contaminantes (ppm)	Flujo de agua (kg/h)	Carga de contaminantes (kg/h)	Flujo Acumulado	Carga Acumulada
D1(UHTN)	7,96	7 450	59,3	7 450	59,3
D2 (UDA)	9,99	9 162	91,6	16 612	150,9
D3 (UCC)	13,04	12 680	165,3	29 292	316,2
D4 (UDV)	14,31	14 490	207,3	43 782	523,5
D5 (URA)	14,72	16 000	235,5	59 782	759,0
D6 (UCR)	17,43	17 791	310,1	77 573	1 069,1
TOTAL		77 573	1 069,1		
F1(UHTN)	0,15	7 350	1,1	7 350	1,1
F2 (UDA)	0,18	9 137	1,6	16 487	2,7
F3 (UCC)	0,18	12 100	2,2	28 587	4,9
F4 (UDV)	0,22	14 275	3,1	42 862	8,0
F5 (URA)	0,28	15 859	4,4	58 721	12,4
F6 (UCR)	0,32	17 507	5,6	76 228	18,0
TOTAL		76 228	18,0		

Leyenda: D1-D6-Demandas: Corrientes de aguas contaminadas desde las unidades de proceso

F1-F6-Fuentes: Corrientes de agua despojadas de reuso hacia las unidades de proceso

UHTN: Unidad de hidrotreatmento de nafta

UDA: Unidad de destilación atmosférica

UCC: Unidad de craqueo catalítico

UDV: Unidad de destilación al vacío

URA: Unidad de recuperación de azufre

UCR: Unidad de coquificación retardada

Los datos de flujos y concentraciones de contaminantes que se utilizan en el estudio, se obtuvieron por simulación en Petro-SIMTM6.1.⁽¹⁴⁾ Dicha torre permite disminuir la carga contaminante que se envía a la Planta de Tratamiento de Residuales (PTR). Sin embargo, considerando que no quedaba claro cómo lograr la reutilización del agua despojada, ni los criterios para su selección, fue necesario aplicar el *Software WaterPinch* para evaluar la torre antes mencionada, lo que requirió adaptaciones en los enfoques de dicha metodología de integración de procesos. Para ello, en la tabla 2 las aguas despojadas aparecen como corrientes de fuentes y las entradas aparecen como corrientes de demandas.

Conocidas las posibilidades de reuso del agua, en cantidades y calidades, resta establecer una propuesta tecnológica que permita lograr ese objetivo. Para validar la propuesta tecnológica de recuperar la torre despojadora se realiza una evaluación integral, comenzando con la evaluación técnica.

Para la evaluación técnica de la presente investigación se seleccionó el simulador de procesos *ProMax® 2.0*⁽¹⁵⁾ y el modelo termodinámico *Electrolytic ELR-PR* que puede aplicarse en simulaciones de torres despojadoras, hidrotadoras, unidades de

crudo o cualquier proceso que contenga hidrocarburos, gases ácidos y agua.⁽¹⁶⁻¹⁷⁾ Después de elegido el modelo termodinámico del proceso, mediante la opción “*Components*”, se añaden los componentes presentes en el caso de estudio:



Se confeccionó un diagrama de flujo de información (DFI), que consta con un solo módulo, una columna de destilación de 38 platos, que además de su alimentación requiere de la instalación de un rehervidor y la extracción de una corriente de tipo flujo circulante por el plato 34 que retorna en el plato 38. Para calcular este módulo se consideraron además, la especificación de capacidad de intercambio del rehervidor igual a 35 564 000 kJ/h, el flujo de la corriente de recirculación (98 614 kg/h) y la temperatura de retorno de esa corriente (55 °C), de esa forma quedan definidas las corrientes de salida (vapor despojado y agua despojada).

A este módulo entrará por el plato 33 la alimentación de agua agria y se espera que las salidas sean agua despojada y vapor despojado definidos a continuación en la tabla 3.

Tabla 3-Variables definidas de entrada y salida a la torre despojadora.

	Composición (kg/h)						Total (kg/h)
	H ₂ O	H ₂ S	NH ₃	CO ₂	C ₆ H ₆ O	HCN	
(Entrada) Agua Agria	76 503,6	720,5	311,5	18,4	17,3	2,1	77 573
(Salida) Agua despojada	76 209,90	0	0,70	0	17,20	0	76 228
(Salida) Vapor despojado	293,70	720,50	310,80	18,40	0,10	2,10	1 345

Para la validación del modelo se simuló el proceso de la torre despojadora a las condiciones de diseño y se compararon los resultados obtenidos, estimándose el error que se comete al estudiar el sistema con el modelo simulado. Como criterio de comparación se tomó el error relativo:

$$e_{\text{relativo}} = \left| \frac{X_{\text{diseño}} - X_{\text{calculada}}}{X_{\text{diseño}}} \right| * 100 \% \quad (2)$$

Para medir la sensibilidad del modelo de simulación se hacen corridas manipulando una variable dentro de los rangos de operación. Las demás variables se mantienen

estables para poder observar cuales son los mejores resultados. Para cada caso se presentan los resultados gráficos involucrando la variable composición de NH₃ y H₂S tanto en el vapor despojado como en el agua despojada, teniendo en cuenta que son los que provocan la mayor contaminación. Estos contaminantes deben ser controlados con mayor rigurosidad debido a que después de ser despojados se envían a la unidad de recuperación de azufre, donde el sulfuro de hidrógeno en presencia de oxígeno se convierte en azufre elemental mientras el amoníaco es totalmente destruido, por acción de las altas temperaturas en el reactor de oxidación térmico para evitar que se formen sales de amonio.

Metodología para la evaluación económica

Para realizar la evaluación económica, se calculan indicadores económicos mediante la metodología propuesta por Peters, por lo que los costos directos e indirectos así como el capital fijo invertido se calcularon utilizando la tabla 17 de dicho libro.⁽¹⁸⁾ Se tuvo en cuenta que los cálculos se realizan para una planta que está incluida dentro de un sector de proceso, por lo que muchos de los aspectos considerados en esta metodología son adaptados a las condiciones reales.

Para calcular el costo total del equipamiento se consultó el estimado de costo Clase II realizado en el año 2013 para el proyecto de expansión de la refinería de Cienfuegos. Para conocer el costo total actual de equipamiento se necesitó actualizar los mismos por el Índice de Costo ⁽¹⁹⁾ de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo actual} = \text{Costo original} \cdot \frac{\text{Índice de costo actual}}{\text{Índice de costo original}} \quad (3)$$

Para la estimación del costo total de producción se utilizaron los factores de proporción y las ecuaciones correspondientes de la tabla 27 del Peter.⁽¹⁸⁾

Metodología para la evaluación económica-ambiental

Para esta evaluación se tomó como referencia la metodología desarrollada por la CEPAL y aplicada por algunos autores ⁽²⁰⁾ según las ecuaciones siguientes:

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

$$(Cfgs) \text{ Eco Costos evitados } \left(\frac{CUC}{\text{año}} \right) = \frac{(Cfgs) \text{ Emisiones } \left(\frac{t}{\text{año}} \right) * (Tula) \text{ Eco Costos evitados } \left(\frac{CUC}{\text{año}} \right)}{(Tula) \text{ Emisiones } \left(\frac{t}{\text{año}} \right)} \quad (5)$$

$$(P) \text{ Eco Costos evitados } \left(\frac{CUC}{\text{año}} \right) = \frac{(P) \text{ Emisiones } \left(\frac{t}{\text{año}} \right) * (Cfgs) \text{ Eco Costos evitados } \left(\frac{CUC}{\text{año}} \right)}{(Cfgs) \text{ Emisiones } \left(\frac{t}{\text{año}} \right)} \quad (6)$$

Resultados y discusión

Según el balance de materiales mostrado en la tabla 2, se aprecia una recuperación de 76 228 kg/h de agua despojada, que representa el 98,27 % del agua total de entrada. No obstante, la información obtenida de las corrientes ordenadas en función de la concentración, al incorporarlas al software *WaterPinch*, se obtuvo el punto *Pinch* en un valor de 8 ppm, relacionado con la carga acumulada de 0,6 kg/h de contaminantes. (figura1).

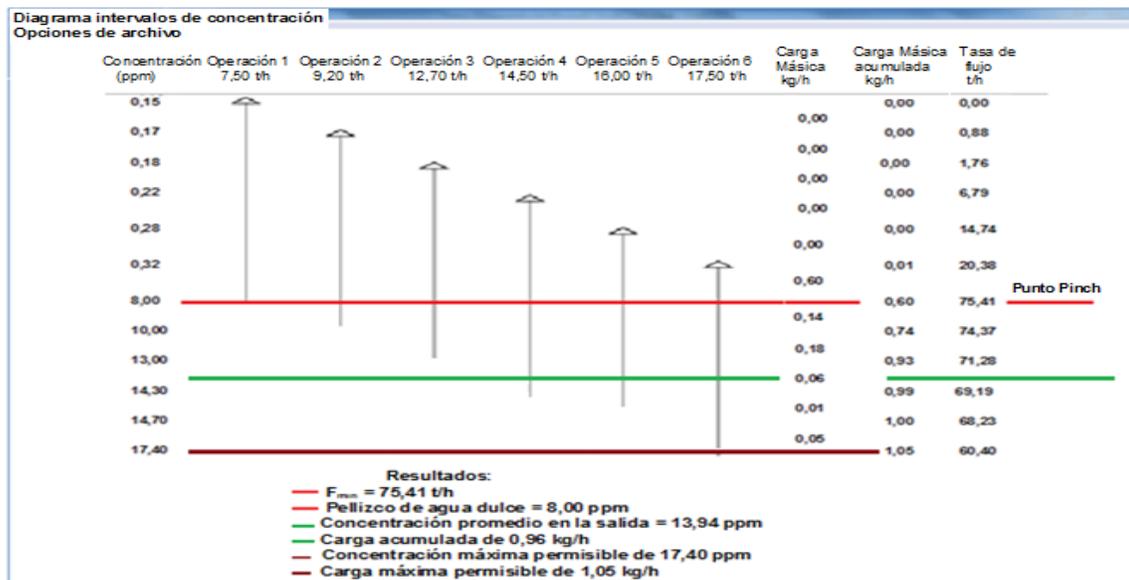


Fig. 1-Diagrama de determinación del Punto *Pinch* según los intervalos de concentración entre fuentes y demandas. Fuente: Software *WaterPinch*.

Del análisis de la figura 1 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 máxima de 75,41 t/h de agua despojada, que representa el 97,21 % del agua ácida de entrada a la torre.
- ❖ Alrededor del punto *Pinch* y hasta la concentración media de 13,94 ppm, aparecen las aguas recuperadas en la despojadora, con una carga acumulada de 0,96 kg/h, que representa el flujo ideal que se puede reutilizar. Por debajo del punto *Pinch* y con una concentración superior a 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. Entonces el flujo para reutilizar sería de 60,40 t/h, como se refleja en la figura. Para cada intervalo de concentración, el software identifica la carga acumulada y en correspondencia, calcula los flujos que pueden reusarse.

Sin embargo, es posible una reutilización adicional, pues algunos procesos tecnológicos, con requerimientos de calidad de agua menos exigentes, (como el lavado y desalado del crudo, agua para lastre de barcos) pueden reutilizar las aguas cuya concentración esté comprendida entre 17,40 ppm y 18,00 ppm.

Como conclusión se puede afirmar que la información suministrada por el *software* por intervalos de concentración, permite analizar la red inicial de entrada de agua y propone una nueva red de distribución optimizada que refleja las oportunidades de reutilización de agua y la reducción de los efluentes, mostrada en la figura 2.

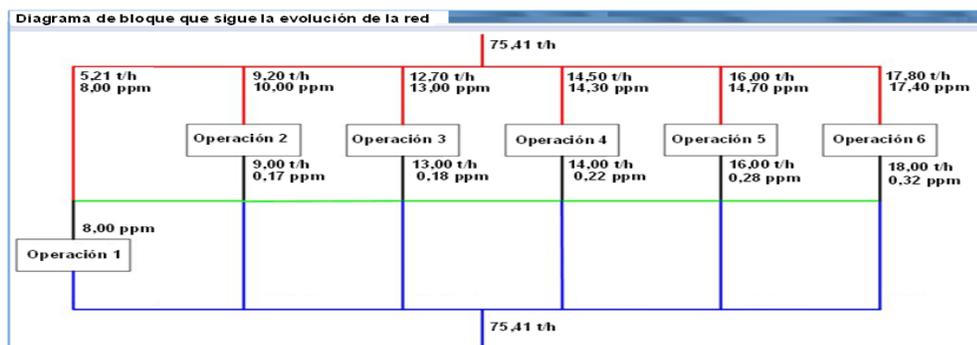


Fig. 2-Diagrama optimizado de la red de distribución de agua recuperada.

Fuente: Software WaterPinch.

Esta figura refleja además las operaciones simplificadas para cada corriente de entrada (color rojo) y las corrientes de agua despojadas, corrientes de salida (color azul), que son enviadas a un nudo de mezcla, en este caso la PTR; desde donde son devueltas a los diferentes procesos según sus demandas. Se debe señalar que en el nudo de mezcla se repone con agua limpia el volumen perdido durante las operaciones del proceso.

Si bien la reutilización óptima refiere 75 410 kg/h y el balance de materiales muestra una recuperación de 76 228 kg/h; en el intervalo de concentración por encima de 17,40 ppm y hasta 18,00 ppm antes señalado, pueden estar incluidos los 818 kg/h restantes que deben ser reutilizados y que representan el 1,05% del total entrado a la torre. Estas aguas están representadas en el área señalada debajo de la línea de 17,40 ppm de concentración como carga máxima permisible.

La posible reutilización antes señalada, conlleva un flujo de 76 228 kg/h, es decir 98,27 % de recuperación, coincidiendo con el balance de materiales representado en la tabla 2. Esta reutilización, para un año de trabajo de la torre despojadora, 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.

Conocidos los resultados del diagnóstico, las posibilidades de recuperación y reutilización de agua residual despojada, en cuanto a cantidades y calidades. Se procede a evaluar la propuesta de mejora tecnológica para la rehabilitación de la torre despojadora, comenzando con la evaluación técnica mediante la simulación.

La implementación y validación del modelo de simulación en *ProMax® 2.0* se realiza según la metodología explicada anteriormente y los resultados se muestran en la tabla 4 y figura 3

Tabla 4-Análisis comparativo para los flujos de salida en la torre despojadora de agua agría

Corriente	Agua despojada			Vapor despojado		
	Diseño (kg/h)	Simulación (kg/h)	% Error	Diseño (kg/h)	Simulación (kg/h)	% Error
H ₂ O	76 209,90	76 221	0,02	293,70	284	3,30
H ₂ S	0	0	0	720,50	720,50	0
NH ₃	0,70	0,75	7,14	310,80	310,75	0,016
CO ₂	0	0	0	18,40	18,40	0
C ₆ H ₆ O	17,20	17,10	0,58	0,10	0,20	2
HCN	0	0	0	2,10	2,10	0
Total (kg/h)	76 228	76 238,85	0,014	1 345	1 335,95	0,75

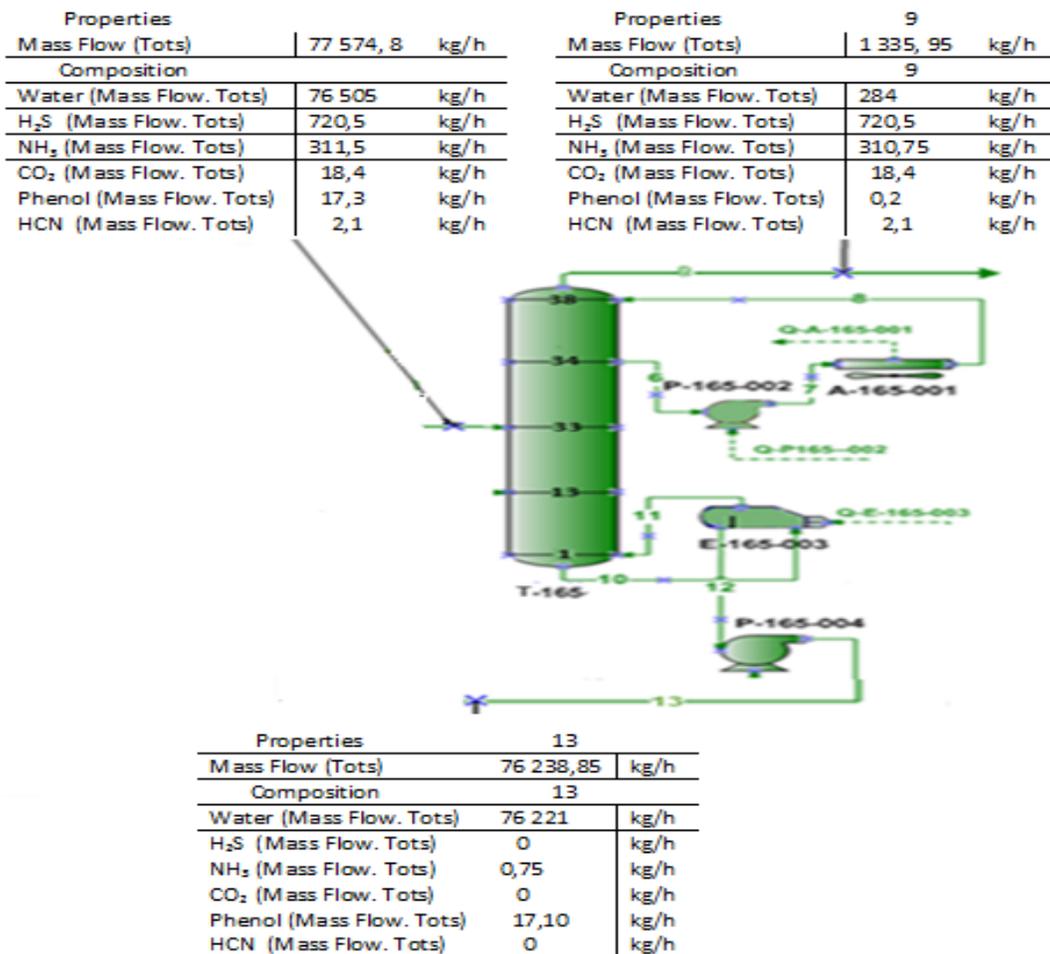


Fig.3-Resultados de la simulación de la torre despojadora de aguas ácidas

De acuerdo con los resultados se considera que el modelo se ajusta a los parámetros de este tipo de proceso, pues entre los datos de diseño y los datos obtenidos por el *software*, ninguno sobrepasa el 10 % de error permisible, lo que indica que los valores mostrados por la simulación se acercan a la realidad.

Una vez comprobado el ajuste del modelo al caso base se realiza el análisis de sensibilidad a dicho modelo para verificar su respuesta ante los cambios de los parámetros que lo conforman. Se verifica la temperatura de alimentación a la torre (84 °C) (Caso A) y la capacidad de intercambio del rehervidor (35 564 000 kJ/h) (Caso B), utilizándose dos valores por defecto y dos por exceso de la variable sujeta a cambio. En cada caso se involucra la composición de NH₃ y H₂S, teniendo en cuenta que son los que provocan la mayor contaminación, tanto en el agua despojada como en el vapor despojado.

Resultados del análisis de sensibilidad

En el Caso A, a medida que se incrementa la temperatura de alimentación a la torre, los flujos de sulfuro de hidrógeno y amoníaco en el efluente líquido disminuyen, este comportamiento es lógico pues ocurre mayor despojamiento de ambos compuestos en el tope de la torre. No obstante, el control de esta temperatura para el proceso tiene una marcada importancia, pues al aumentar en demasía la misma, ocurriría mayor evaporación del agua, trayendo consigo trastornos operacionales en los procesos ubicados aguas abajo, como el caso de la unidad recuperadora de azufre.

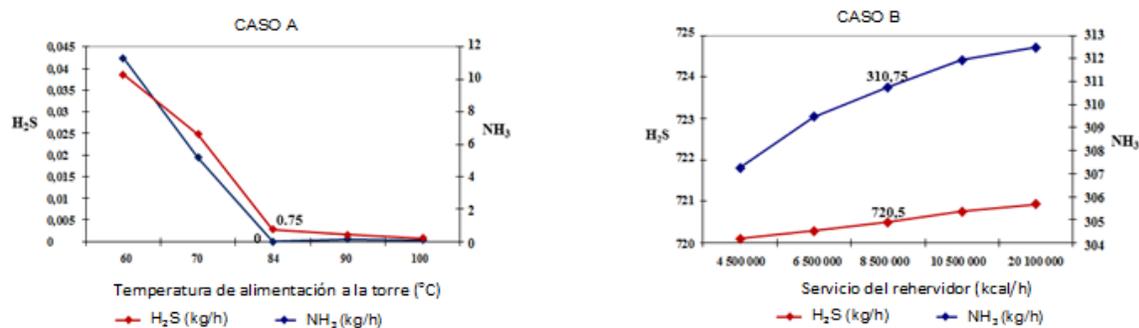


Fig. 4-Comportamiento de H₂S y NH₃ en el agua despojada ante variaciones en la temperatura de alimentación a la torre (Caso A) y en el vapor despojado ante variaciones en la capacidad de intercambio del rehervidor (Caso B)

En el Caso B, se concluye que la presencia de los compuestos sulfuro de hidrógeno y amoníaco en la composición del vapor despojado, aumenta en la misma medida que aumenta la capacidad de intercambio del rehervidor, por consiguiente, se logra un mayor despojamiento de ambos compuestos, al mismo tiempo que aumenta el reflujo, quien regula la temperatura en el tope de la torre.

Resultados del análisis económico integral

El VAN > 0 indica que el proyecto sujeto a estudio es factible, pues es capaz de generar suficiente ingreso indirecto (por concepto de ahorro) que permite pagar la inversión y los costos de operación. El período de recuperación de la inversión es de 8,5 años en un período de vida útil de 20 años (figura 5a).

Si bien es cierto que este período de recuperación no es económicamente el más deseado, entonces es necesario tener en cuenta que el objeto social de estas torres es meramente ambiental, por lo cual dicha inversión es necesaria aun cuando sus resultados económicos no sean los más alentadores. En la tabla 5a y 5b se muestran los resultados de la evaluación económica tradicional y económica ambiental respectivamente.

Tabla 5a - Resultados de la evaluación económica tradicional

Costo de inversión actual		
Costo total actual de equipamiento	CUC	1 748 149,80
Costo total directo de la planta	CUC	2 464 891,22
Costo total indirecto de la planta	CUC	262 222,47
Capital total actual invertido	CUC	2 999 825,06
Costos de producción	CUC/año	341 849,46
Gastos generales	CUC/año	6 836,99
Ganancia	CUC/año	693 174,32
Depreciación	CUC/año	136 355,68
Ingreso total	CUC/año	1 035 159,56
VAN	CUC	1 300 555,60
TIR	%	19
PRD	años	8,5

donde: VAN: valor actual neto; TIR: tasa interna de retorno;
PRD: período de recuperación al descontado

Tabla 5b. Resultados de la evaluación económica - ambiental

Costo de inversión actual		
Crudo procesado refinera Tula	bbl/año	142 926 971,62
Emisiones SO ₂ refinera Tula	t/año	150 700
Externalidades refinera Tula	CUC/año	868 400 000
Crudo procesado refinera Cienfuegos	bbl/año	23 400 000
Emisiones SO ₂ refinera Cienfuegos	t/año	24 672,6
Emisiones SO ₂ despojadora de agua	t/año	183, 17
Externalidades refinera Cienfuegos	CUC/año	142 174 424
Externalidades despojadora de agua	CUC/año	1 055 506
Ingreso total	CUC/año	1 035 159,56
Ingreso total + Costos externos	CUC/año	2 090 665,56
VAN	CUC	6 228 082,20
TIR	%	43
PRD	años	3

Para sustentar un mejor criterio hacia la toma de decisiones es necesario entonces determinar los eco-costos evitados, en los que se incurre para los tratamientos de estas aguas ácidas en ausencia de las torres despojadoras. Visto así, habrán de

adicionarse estos eco-costos evitados a los ingresos por ahorros, que de conjunto constituyen ingresos indirectos.

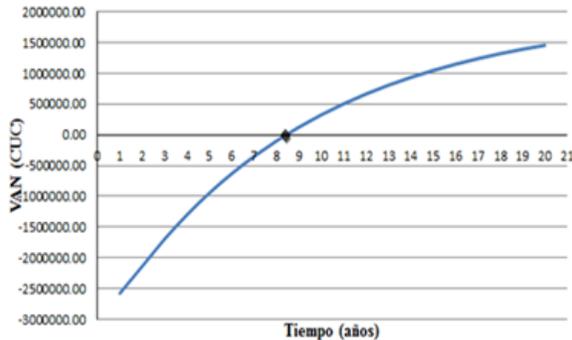


Fig.5a- Período de recuperación al descuento (PRD) sin incluir los eco-costos evitados

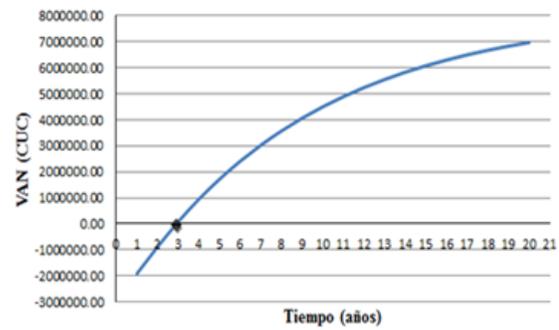


Fig.5b- Período de recuperación al descuento (PRD) incluyendo los eco-costos evitados

Del análisis de la figura5b se puede concluir que:

Al sumar al ingreso indirecto, por concepto de ahorro, los costos externos por gastos de tratamientos (ambos como ingresos indirectos) se aprecia una reducción en el período de recuperación de la inversión hasta aproximadamente 3 años, influenciados por el considerable aumento que recibieron los índices de rentabilidad del VAN y TIR, cuyos criterios de aceptación se mantienen en los intervalos permisibles.

Este análisis justifica la necesidad de considerar los eco-costos evitados por tratamiento, cuando el análisis se trate de procesos auxiliares cuyo resultado tributa a la reducción de residuales y por consiguiente, a la reducción de impacto ambiental. O sea, que al contemplar el eco-costo evitado el análisis consigue la integralidad y en consecuencia aporta criterios de mayor peso para la toma de decisiones respecto a una inversión.

Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados anteriores de la evaluación integral se puede concluir que:

- ❖ La evaluación técnica por el método de simulación demostró que es técnicamente adecuada la rehabilitación de la torre despojadora para el tratamiento de las aguas residuales sulfurosas, permitiendo con su incorporación al proceso, lograr una recuperación y reutilización de dichas aguas de 667 757 m³/año equivalente a una disminución de 1 035 023 CUC en los costos de producción, a razón de 1,55 CUC/m³ de agua.
- ❖ La evaluación económica a partir de los indicadores de rentabilidad deja abierta la idea de continuar trabajando con una visión de mejora continua y apenas permite alcanzar criterios de peso para la toma de decisiones respecto a la inversión o no para la rehabilitación de la torre.
- ❖ Por su parte la evaluación económica-ambiental aporta criterios más elocuentes que tributan a la mejor toma de decisiones respecto a la rehabilitación e incorporación de la torre recuperada, pues demuestra con sus resultados la viabilidad y sostenibilidad del proceso que ha de desarrollarse por la torre despojadora objeto de estudio.

Referencias bibliográficas

1. WWAP. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos. Tercera edición del Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. 5º Foro Mundial del Agua, Estambul, Turquía, 16 de marzo de 2009, pp. 96-123.
2. FORERO, G.J. *Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería (primero)*. Consejo de Estado, La Habana, Cuba, 2013, pp. 10-22.
3. MARTÍNEZ, E. y LÓPEZ G. *Proceso Fenton intensificado para la destrucción de contaminantes orgánicos*. 18º Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente. Buenos Aires, 2013.
4. International Finance Corporation (IFC) *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Petroleum Refining*. 2007. Disponible en línea <http://www.ELAW.org>.

5. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas, NC-521:2012, Ciudad Habana, Cuba, 2007. Disponible en :www.nc.cubaindustria.cu.
6. PEMEX. *Aprovechamiento y reúso del agua en procesos de refinación de petróleo*. Refining Process. México. 2013. Disponible en: http://www.sener.gob.mx/res/85/Refinacion_Web.pdf.
7. JONES. D. & PUJADO. P. *Handbook of Petroleum Processing*. First part. Pp 631-643. 2006. Disponible en línea: <http://es.slideshare.net/BenimbenFaruk/handbook-of-petroleum-processing>.
8. ANDERSON, J. "The environmental benefits of water recycling and reuse". *Water Science and Technology*. Water Supply. 2009. **3**. (4), 1- 10.
9. WAUQUIER, J.P. *Distillation, Absorption and Stripping in the Petroleum Industry*. In Separation Processes. Editions TECHNIP. Institut Français du Pétrole Paris. 2001. Chapter 5: pp. 241-251. ISBN: 2-7108-0761-0.
10. DECOOPMAN, F. Water Treatment. In *Petroleum Refining III Conversion Processes*. Editions TECHNIP. Institut Français du Pétrole. Paris. 2002. pp.639-667. ISBN: 2-7108-0779-3
11. GARY, H. J.; HANDWERK, G. E. *Crude Distillation. Petroleum Refining-Technology and Economics*. 4th Edition. New York: Marcel Dekker: 2006. pp. 46-49. ISBN: 0-8247-0482-7
12. LLUCH URPI. J. *Tecnología y margen de refino*. Ediciones Díaz de Santos. España. 2008. ISBN: 978-84-7978-875-9. Disponible en: <http://www.diazdesantos.es/ediciones>
13. LOBELLES, G. O. "Aplicación de la tecnología *WaterPinch* para minimizar aguas residuales sulfurosas en una refinería de petróleo". *Revista Centro Azúcar*. 2017, **44** (1), Editorial Feijóo. 2017. pp.1-10. ISSN: 2223- 4861.
14. KBC. ADVANCED-TECHNOLOGIES. *Petro-SIM™ 6.1 Process Simulator*. *Petro-SIM y Profimatics es una marca registrada de KBC Advanced Technologies*. United Kingdom : United Kingdom Oil & Gas news in Europe, 2004. www.kbc.com
15. BR&E ProMax® with TSWEET® Process Simulation Software. 2015. Disponible en <https://www.bre.com/ProMax-Main.aspx>

16. ÁLVAREZ, H. C. *Optimización de la Unidad Despojadora de Aguas Agrías (T-2590) de la Gerencia Complejo Barrancabermeja mediante la aplicación de herramienta de simulación*. Tesis de Grado, Santander; Colombia: ECOPETROL.
17. MACÍAS, M. *Diseño de una unidad de tratamiento de aguas ácidas en refinería*. Proyecto de fin de carrera de Ingeniería Química. 2007. Universidad de Cádiz.
18. PETERS, M. and TIMMERHAUS, K.. *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill International Editions. 4thEdition. 1991. pp: 210 - 211
19. FARRAR, G. Nelson-Farrar “Quarterly Costimating: Indexes for selected equipament items”. (E. Perspective, Ed.) *Oil and Journal Digital Megazine*. 2015. disponible en <http://www.ogj.com>.
20. LOBELLES, G.O. *Metodología para la gestión tecnológica integral de aguas sulfurosas en la refinería de Cienfuegos con enfoque de economía ecológica*. Tesis Doctoral, Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara. Cuba.2017.

Conflicto de interés

Los autores plantean que no existe conflictos de intereses

Contribución de los autores

Gabriel Orlando Lobelles Sardiñas: dirección de la investigación, revisión y corrección del informe final.

Leidis Debora Mira: elaboración de trabajos de aplicación, mediciones, análisis y elaboración del informe final.

Arianna Sabina Delgado: elaboración de trabajos de aplicación, mediciones y análisis.