

## Mejora tecnológica en el drenaje de tanques de turbo combustible Jet A-1 para reducir contaminantes en residuales de Refinería Cienfuegos S.A.

Technological improvement in the drainage of Jet A-1 turbo fuel tanks to reduce contaminants in residuals from the Cienfuegos S.A Refinery

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

Daniela Santana Padrón<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0008-2168-3927>

Alexis González Martínez<sup>2</sup> <https://orcid.org/0009-0005-0695-3624>

Elisa María Chou Rodríguez<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6100-203X>

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

<sup>2</sup>Refinería Cienfuegos S.A. Cienfuegos. Cuba

\*Autor para la correspondencia. Correo: [globelles58@gmail.com](mailto:globelles58@gmail.com)

### RESUMEN

El turbo Jet A-1 es el combustible por excelencia utilizado para la aviación civil o comercial y se rige internacionalmente por la norma (Defence 91-091, 2023), acordada por la Autoridad de Aviación Civil del Reino Unido. Su precio en el mercado del Caribe es de 70,85 USD/Bl. Según establecen las normas, dicho producto, luego de un asentamiento de 4 horas en los tanques de almacenamiento, estos deben ser drenados en horas de la mañana, antes de realizar cualquier tipo de operación. Sin embargo, el sistema actual de drenaje de los tanques de turbo combustible Jet A-1, genera pérdidas económicas y una serie de contaminantes, que impactan de manera negativa en el tratamiento del agua residual. En tal sentido, es objetivo del presente trabajo, proponer un sistema cerrado para el drenaje de los tanques del turbo combustible Jet A-1 en la Refinería Cienfuegos S.A que disminuya las pérdidas económicas y su impacto ambiental. Se presentan tres variantes tecnológicas de operación para el sistema estudiado y se evalúan integralmente mediante el *software* de simulación *PipePhase v7*. Posteriormente se calculan los

los indicadores dinámicos de rentabilidad en una evaluación económica y ambiental para aportar los mayores criterios para la toma de decisiones. Como resultado, las variantes V2 y V3 resultan económicamente factibles pues su período de recuperación oscila entre 0,73 – 1,66 años. Solo la variante V3 hace sostenible el proceso de drenaje del turbo. Por el método de Decisión Multicriterio Discreta los expertos deciden continuar con la explotación de la variante V2.

**Palabras clave:** turbo combustible; pérdidas económicas; drenaje cerrado.

### **ABSTRACT**

The Jet A-1 turbo is the fuel par excellence used for civil or commercial aviation and is governed internationally by the standard (Defence 91-091, 2023), agreed by the Civil Aviation Authority of the United Kingdom. Its price in the Caribbean market is 70,85 USD/BI. As established by the standards, this product, after settling for 4 hours in the storage tanks, all tanks must be drained in the morning, before carrying out any type of operation. However, the current drainage system for the Jet A-1 turbo fuel tanks generates economic losses and a series of contaminants, which negatively impact the treatment of the wastewater. In this sense, the objective of this work is to propose a closed system for the drainage of the Jet A-1 turbo fuel tanks at the Cienfuegos S.A. Refinery that reduces economic losses and its environmental impact. Three technological variants of operation are presented for the system studied and are comprehensively evaluated using simulation software *PipePhase v7* and dynamic profitability indicators are calculated in an economic and environmental evaluation to provide the best criteria for decision making. As a result, the V2 and V3 variants are economically feasible since their recovery period ranges between 0,73 – 1,66 years. Only the V3 variant makes the turbo draining process sustainable. Using the Discrete Multicriteria Decision method, the experts decide to continue exploiting the V2 variant.

**Keywords:** turbo fuel; economic losses; closed drain.

Recibido: 18/01/2025

Aceptado: 28/04/2025

## Introducción

El turbo combustible Jet A-1 es el combustible por excelencia utilizado para la aviación civil o comercial. Su precio en el mercado del Caribe, escenario base de precios (Jet Caribe), según los lineamientos de PDVSA es de 70,85 USD/Bbl. <sup>(1)</sup>

Las especificaciones de calidad del turbo combustible Jet A 1 están de acuerdo con las normas vigentes del Reino Unido <sup>(2)</sup> y el catálogo de especificaciones de los productos combustibles de Cupet <sup>(3)</sup> y su entrega siempre debe ir acompañada por la declaración de conformidad correspondiente.

El turbo combustible luego de un asentamiento de 4 horas en los tanques de almacenamiento, estos deben ser drenados diariamente en horas de la mañana, antes de realizar cualquier tipo de operación. <sup>(4)</sup>

El drenaje es enviado a través de las redes de tuberías soterradas hacia las piscinas de recolección de hidrocarburos y aguas oleosas, en la Planta de Tratamiento de Residuales (PTR). Actualmente todo el producto drenado (agua en suspensión + turbo combustible) constituye una carga adicional al sistema de tratamiento de residuales sin que sea posible su recuperación y por otra parte aporta elementos contaminantes tales como, compuestos de azufre y fenoles contenidos en el propio combustible, los que generan problemas en el tratamiento de los residuales.

Es objetivo del presente trabajo proponer un sistema cerrado para el drenaje de los tanques del turbo combustible Jet A-1 en la Refinería Cienfuegos S.A que disminuya las pérdidas económicas y su impacto ambiental.

## Fundamentación teórica

El turbo combustible Jet A-1, es un combustible líquido inflamable e incoloro o ligeramente amarillo, constituido por una mezcla de hidrocarburos parafínicos, ciclos parafínicos, aromáticos y olefínicos, donde predominan el número de átomos de carbono en el intervalo C<sub>8</sub> a C<sub>16</sub>. También puede contener uno o más de los siguientes aditivos mostrados en la tala 1:

**Tabla 1-** Aditivos en el turbo combustible Jet A-1

Tipo	Composición	Función
Antioxidantes	Fenoles	Mejorar estabilidad
Anticongelantes	Glicoles	Mejorar funcionamiento en frío
Antiestáticos	Sales Metálicas	Disipar cargas estáticas
Bióxidos	Varios	Evitar formación de bacterias durante el almacenaje

Determinados crudos producen fracciones de querosenos que cumplen con los estándares internacionales de Jet-A1 de una forma directa, sin embargo, para casi la totalidad de crudos es necesario un posterior tratamiento hidrogenante suave o un endulzamiento para eliminación de compuestos azufrados tales como sulfuros, mercaptanos y ácidos nafténicos, que pueden tener un comportamiento corrosivo y que le confieren al producto una baja estabilidad térmica. <sup>(5)</sup>

## **Métodos utilizados y condiciones experimentales**

**Objeto de Estudio.** Método de ejecución del drenaje de los tanques de turbo combustible en la Refinería Cienfuegos S.A.

Existen 4 tanques de almacenamiento de turbo combustible que constituyen fuentes de emisión del drenaje (Tk-25-1061, Tk-25-1017, Tk-25-1018, Tk-25-1019)

Un tanque receptor del producto drenado (Diesel) (Tk-27-1030)

1. Se analizan tres variantes de operación para el sistema de drenaje utilizando el software de simulación PipePhase v7. El simulador PipePhase v7 está recomendado en el Manual de Diseño de procesos para fase líquida para redes de flujo de fluido. <sup>(6), (7)</sup>

- **V1.** Sistema manual por gravedad.
- **V2.** Sistema manual con las bombas incluidas en los separadores de drenaje (TS). (Sistema existente en explotación).
- **V3.** Sistema automático con la utilización del tambor de recuperación de drenaje (TRD). (Propuesta de mejora)

## **Valoración económica de las variantes de operación**

Las propuestas se analizan, según la Metodología de PDVSA, como una **Propuesta de reemplazo**: que incluye los programas que no generan ingresos, pero disminuyen costos de operación. <sup>(1)</sup> Las propuestas de reemplazo consisten en la comparación de alternativas relacionadas con:

- Deterioro físico. Desgaste del activo que incrementa los costos de operación y de mantenimiento.
- Obsolescencia funcional/ tecnológica. Disminución de la calidad, cantidad del producto o en su disponibilidad oportuna.

Con la información recopilada se realiza un Estimado de costo Clase V, cuyos propósitos son: la planificación estratégica de negocios, evaluación de

alternativas, estudios de ubicación y de pre- factibilidad, entre otros. En este caso el estimado de costos permitirá calcular los ingresos por concepto de disminución de las pérdidas y justificará la ejecución del proyecto objeto de análisis. Serán utilizados los precios de las ofertas de equipos similares solicitadas para el Proyecto Expansión en el año 2012. Se calcula el valor del costo total de equipos de las propuestas para el año 2022. Debido a que los costos de los equipos estarán dados en un tiempo determinado, se actualizarán mediante la siguiente Ec.1, <sup>(8)</sup> y el índice de costo <sup>(9)</sup>

$$C_2 = C_1 \frac{CEPCI_2}{CEPCI_1} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde:

C<sub>2</sub>- Costo actualizado

C<sub>1</sub>- Costo al año base

CEPCI<sub>1</sub>-índice de costo año base

CEPCI<sub>2</sub>- índice de costo actual.

## Evaluación económica-ambiental

### Metodología de cálculo de la Huella Ecológica Corporativa (HEC)

Para calcular la HEC se consultó el documento: “Guía metodológica para el cálculo de la huella ecológica corporativa,<sup>(10)</sup> a la que se le introdujeron adaptaciones con el fin de llevarla al ámbito del presente estudio. Dicho cálculo se hace a partir de la sumatoria de las siguientes sub-huellas:

❖ Sub-huella energía (SH<sub>ENERGIA</sub>).

$$SH_{ENERGIA} \text{ (ha)} = \sum_{i=1}^n \frac{C_x \cdot F_x}{FC} \quad \text{(Ec. 2)}$$

❖ Sub-huella de los insumos (SH<sub>INSUMOS</sub>).

$$SH_{INSUMOS} \text{ (ha)} = \sum_{i=1}^n \frac{E_x \cdot G_x}{FC} \quad \text{(Ec. 3)}$$

❖ Sub-huella de superficie construida (SH<sub>SUPFCONST</sub>).

$$SH_{SUPFCONST} \text{ (ha)} = \sum_{i=1}^n \frac{A_x}{m^3} \quad \text{(Ec. 4)}$$

Conocidas las diferentes sub-huellas, entonces se calcula la Huella Ecológica corporativa por la siguiente Ecuación:

$$HEC \text{ (ha/MW.h/año)} = (SH_{ENERGIA} + SH_{INSUMOS} + SH_{SUPFCONST}). \quad \text{(Ec. 5)}$$

### Selección de expertos y Decisión Multicriterio Discreta (DMD)

Para lograr la integralidad del análisis se acude al criterio de expertos, cuya selección se hará por el Método TZ combinado según la siguiente formula <sup>(11)</sup>:

$$n = \frac{p (1-p) * k}{i^2} \quad \text{(Ec.6)}$$

donde:

*n*: Cantidad o número de expertos.

*p*: Proporción de error por estimaciones con los expertos. En este caso  $p = 0,02$

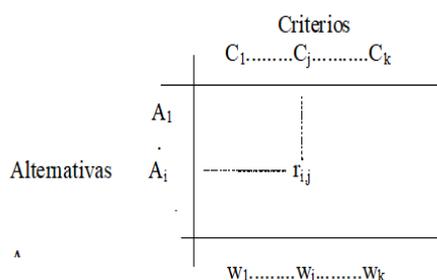
*i*: Precisión del experimento. Debe ser  $i \leq 0,12$ . En este caso  $i \leq 0,091$

*k*: Constante que depende del nivel de significación estadística  $(1-\alpha)$ , que se obtiene a través de la tabla 2, en este caso se trabaja con 3,8416.

**Tabla 2-** Coeficientes de significación estadística

$(1 - \alpha)$	<i>k</i>
99%	6,6564
<b>95%</b>	<b>3,841</b>
90%	2,689

El análisis se hará por medio de la matriz de Decisión Multicriterio Discreta (DMD), cuyo núcleo es la denominada matriz de decisión o de impactos, mostrada en la figura 1, 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. <sup>(12)</sup>



**Fig. 1-** Matriz de decisión o de impactos. Fuente: <sup>(12)</sup>

donde:

$r_{i,j}$ : Evaluación de la variante  $i$  con respecto al criterio  $j$ .

$A_i$ : Conjunto discreto de variantes;  $C_j$ : Conjunto discreto de criterios.

$w_k$ : Factores de peso;  $m$ : Número de variantes;  $k$ : Número de criterios.

Es necesario señalar que en la DMD las escalas de medida de las evaluaciones pueden ser diferentes (numérica, jerárquica cualitativa, probabilística). Entonces será necesario realizar un proceso de normalización de acuerdo con las siguientes ecuaciones que permiten una normalización en el intervalo (0,1).

$$Valor\ normalizado = \frac{|X_{i,j} - X_{max}|}{X_{max} - X_{min}} \quad Ec: (7) \quad Valor\ normalizado = \frac{X_{i,j} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad Ec: (8)$$

donde:

$X_{i,j}$ : Evaluación de la variante  $i$  con el criterio  $j$ .

$X_{max}$ : Máxima evaluación realizada de las variantes para el criterio que se analiza.

$X_{min}$ : Mínima evaluación realizada de las variantes para el criterio que se analiza.

Al tener normalizados todos los valores, es necesario aplicar el método de Ponderación Lineal, que consiste en multiplicar cada evaluación ( $r_{i,j}$ ) por el factor de peso del criterio ( $w_j$ ) y dividir por la suma de los factores de peso. El procesamiento de cada variante pudiera describirse en la siguiente ecuación:

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^k w_j \cdot r_{i,j}}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (Ec.9)$$

donde:

$w_j$ : Factores de peso;  $k$ : Número de impactos.

$r_{i,j}$ : Evaluaciones en las escalas definidas (incluyendo el proceso de normalización).

Esta función permite obtener una puntuación ("score") de cada variante tecnológica, lo que posibilita realizar un ordenamiento de estas.



**Tabla 3-** Volumen drenado anual.

Volumen Drenado	TURBO, Precio (USD/BI)	Valor del TURBO	DIESEL, Precio (USD/BI)	Valor del DIESEL
2,35 m <sup>3</sup> /día	70,85	1 047, 23	69,36	1 025,22
822,5 m <sup>3</sup> / año	70,85	366 507, 05	69,36	358 799, 28
5173 BI/ año	70,85	366 507, 05	69,36	358 799, 28

Se convierte el volumen de producto de m<sup>3</sup> a barriles debido a que los precios del combustible en el mercado se valoran en USD/barriles.

Precio del turbo Jet A-1: 70,85 \$ (USD)/BI promedio real de enero- abril 2022.

Precio del diesel: 69,36 \$ (USD)/BI promedio real de enero- abril 2022.

La tabla 4 muestra los precios de los equipos principales, según oferta de 2014.

**Tabla 4-** Precios de las ofertas de los equipos del sistema de drenaje cerrado.

Nº	Descripción	Nº Equipos	Precio Oferta Reuco	Precio del estimado 2014 (USD)
1	Separador de drenaje TS Capacidad = 0,2 m <sup>3</sup>	3		6 807,00
2	Separador de drenaje TS Capacidad = 1,7 m <sup>3</sup>	1	8 023,74	6 807,00
3	Bombas centrifugas Q= 5 + 3 m <sup>3</sup> /h P <sub>d</sub> =2 bar <sub>abs</sub>	2		21 490,18
4	Tambor separador de drenaje Volumen V=10/8 m <sup>3</sup>	1		54 608,71

Después de actualizar los precios de la tabla se hace el estimado de costo clase V, según se muestra en la tabla 5.

V2. Operación manual con bombas. Estimado de costo Clase V= 636 964,1 USD

V3. Operación automática. Estimado de costo Clase V=1 023 445,3 USD.

Tasas de descuento del 10 % y 12 %.

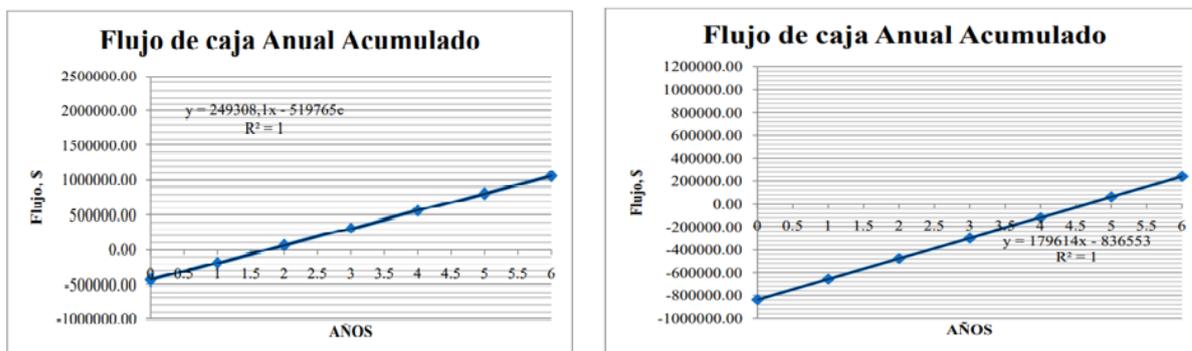
**Tabla 5-** Resultados del estimado de costos.

Variantes	Costos Asociados a la Inversión						Costo de Operación	Costo Total
	Equipos con costos actualizados por capacidad	Costo Total directo (USD)	Costo total indirecto (USD)	Costo total de la inversión (USD)	Costos de Mto. 7% del costo de Inversión	Contingencia. 15% del costo de Inversión (USD)	Costos Operacionales (USD)	Costos inversión + costos de Operación (USD)
<b>V2</b>	Operación manual	399 060, 98	120 704,7	519 765,7	36 383,6	77 964,81	2 850,50	636 964,1
<b>V3</b>	Operación automáti	652 830,7	183 722,5	836 553,2	58 558,7	125 482,9	2 850,50	1 023 445,3

No será considerada la Variante V1, asumiendo que por el método de drenaje a canalización los residuales contaminantes aumentan y en consecuencia el impacto ambiental es mayor.

Las figuras 4(a) y 4(b) muestran el tiempo de recuperación de la inversión para la Variante **V2**=2,08 años y para la Variante **V3**=4,66 años. Hay que señalar

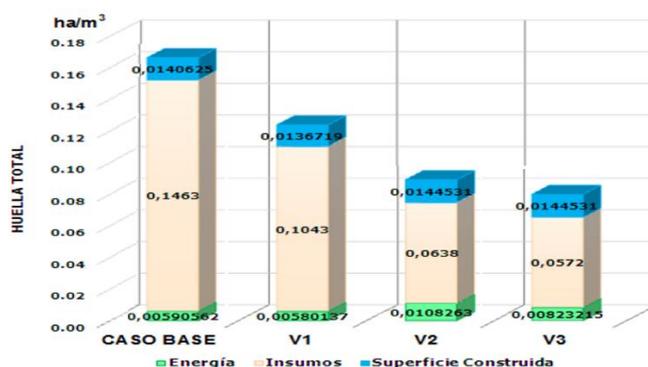
que en ambos casos la inversión resulta factible si se considera que el tiempo de vida útil de ellas es por 20 años.



**Fig.4- (a)** Tiempo de recuperación para la V2. **(b)** Tiempo de recuperación para la V3

### Huella Ecológica Corporativa (HEC)

La Huella Ecológica Corporativa total, representativa de 1m<sup>3</sup> de agua residual oleosa fue calculada por la Ecuación 5 y se muestra en la figura 5.



**Fig. 5-** Huella ecológica corporativa a partir de los drenajes de turbo

La sub-huella Insumos es la más representativa pues oscila desde un 40% al 80% de la HEC total. A pesar de que las variantes V2 y V3 tienen mayor consumo energético que las variantes V1 y el caso base, estas presentan una huella total menor, aproximadamente en un 40%. Esto se debe a que la sub-huella Insumos está marcada por los consumos de reactivos químicos para tratamiento en la PTR, también mayores que las variantes V1 y V2, sin embargo, debido a la recuperación de turbo o diésel como consecuencia del drenaje, que fue restada de los demás insumos, esto influye en la huella ecológica total, minimizando así su impacto, esto justifica que la variante V3 tiene la menor Huella Ecológica corporativa debido a que presenta similar recuperación de turbo o diésel y sin emisión de contaminantes.

## Eco-costos evitados

Para la evaluación económica-ambiental no será considerado el Caso Base, ni la Variante V1, desechadas anteriormente. En esta evaluación se determinan los costos relacionados con los principales desechos y desperdicios, según los elementos que se describen en las listas de chequeo <sup>(13)</sup>. En el caso de estudio, el agua residual oleosa es el residual de mayor importancia en relación con el medio ambiente, por tal motivo, se determina la relación entre costos y gastos medioambientales en el mes de junio de 2022, y se presentan en la tabla 6:

Para el cálculo los costos/gastos, se siguió el procedimiento diseñado por Juviel. <sup>(14)</sup> El análisis de estos permitió conocer que la categoría de mayor influencia fue el valor de compra de las salidas de los no-productos con un 63 % de incidencia. Esto demuestra que se está gastando mucho en la compra de materias primas, que finalmente serán depuestas como residuos y no como productos.

**Tabla 6-** Relación de costos/gastos medioambientales de la Refinería Cienfuegos S.A

Categoría de costo/ gasto ambiental	UM
<b>1. Tratamiento de desechos y emisiones</b>	
<b>1.1 Depreciación de equipamiento relacionado</b>	
• Depreciación de las bombas de la Sección MCP	28 422,40
• Depreciación de las bombas de PTR	32 526,88
<b>1.2 Mantenimiento y materiales y servicios operativos</b>	
• Sulfato de alúmina	540,37
• Gasto de electricidad de las bombas de PTR	22 769,73
• Gasto de electricidad de las bombas de la sección MCP	28 271,22
<b>1.3 Personal</b>	
• Jefe sector agua y tratamiento	625,00
• Tecnólogo "B" sector agua y tratamiento	430,27
• 4 Jefe de brigada sector agua y tratamiento	1 661,33
• 12 Operadores "C" (3 por turnos)	4 260,85
• Tecnólogo "A" Procesos Industriales	573,86
• Programador Mantenimiento	350,25
• Inspector de Equipos Técnicos	385,00
• Especialista "B" A.I.T	447,41
<b>2. Prevención y gestión ambiental</b>	
<b>2.2 Personal para actividades generales de gestión ambiental</b>	
Especialista en SHA	495,00
<b>3. Valor de compra del material de las salidas de no-productos.</b>	
• Agua con hidrocarburos de tanques almacenamiento Turbo	211 748,55
<b>Σ Gastos ambientales</b>	<b>333 508,12</b>

Por el orden de incidencia, le sigue la categoría de tratamiento de desechos y emisiones, con un 36 % de incidencia, un valor marcado por la depreciación del equipamiento, sobre todo de la planta de tratamiento de residuales (PTR) y por el consumo de reactivos químicos para tratamientos.

Para establecer los indicadores económicos y de rentabilidad fueron considerados los 5173 BI/años drenados y solo se tomó el precio del diésel, porque en esta refinería todos los drenajes recuperados se degradan a diésel por medidas de seguridad operacional y normas establecidas. Para el cálculo de dichos indicadores se trabajó con la metodología de Peters <sup>(15)</sup> y se muestran en las tablas 7 y 8.

**Gastos Generales (2 % CTP) = Variante V2 = 10 395, 31 USD**

**Variante V3 = 16 731, 06 USD**

**Tabla 7-** Indicadores económicos y de rentabilidad de variantes seleccionadas

INDICADORES	VARIANTE V2	VARIANTE V3
Ingresos por ventas/año	366 507, 05	358 799, 28
Costos de producción/año	519 765, 7	836 553, 2
Gastos generales/año	10 395, 31	16 731, 06
Inversión inicial.	636 964,1	1 023 445,3
VAN	920 113,21	242 820,27
TIR	46,9	17
PRI	2,08	4,66

Una vez determinados los costos y gastos ambientales, se calculan nuevamente los indicadores de rentabilidad. Para relacionar los Eco Costos evitados con las herramientas de análisis económico VAN, TIR y PRI, es necesario sumar estos eco-costos evitados por tratamiento de las emisiones (como ahorro) en un año, a los ingresos por ventas del producto recuperado. Ver tabla 7

**Tabla 8-** Indicadores económicos y de rentabilidad incluyendo los Eco costos evitados según metodología de la CEPAL. <sup>(16)</sup>

INDICADORES	VARIANTE V2	VARIANTE V3
Eco Costos externos (USD/año)	333 508, 12	333 508, 12
Ingresos por ventas/año	366 507, 05	358 799, 28
Ingresos + Eco costos evitados	700 015, 17	692 307, 40
Costos de producción/año	519 765, 7	836 553, 2
Gastos generales/año	10 395, 31	16 731, 06
Inversión inicial	519 765, 7	835 553
VAN	1 757 382,26	468 524, 12
TIR	89,57	32,80
PRI	0,73	1,65

### Selección de expertos y Decisión Multicriterio Discreta (DMD)

Se determinó el número de expertos que participan en el estudio sustituyendo valores en ecuación 6 y se tiene que:  $n = 9,09 \approx 7$

Posteriormente se determina el coeficiente de competencia ( $K_{\text{competencia}}$ ) de cada uno de los expertos por la siguiente expresión:

$$K_{\text{competencia}} = \frac{1}{2} (K_c + K_a) \quad E_c.(10)$$

donde:

$K_c$ : Promedio de los valores que el candidato le confiere a cada aspecto

$K_a$ : Coeficiente de argumentación, dado por la sumatoria de los valores adquiridos por el grado de influencia de cada una de las fuentes de argumentación

Resulta válido destacar que:

- La Competencia del experto es Alta (A): Si  $K_{\text{competencia}} > 9,00$
- La Competencia del experto es Media (M): Si  $7 < K_{\text{competencia}} \leq 9,00$
- La Competencia del experto es Baja (B): Si  $K_{\text{competencia}} \leq 7$

Como resultado se obtuvo que, de los 14 candidatos propuestos, ninguno presenta evaluación de baja competencia, mientras 7 resultan evaluados de alta competencia y 7 presentan competencia media.

### Decisión Multicriterio Discreta (DMD)

Para el desarrollo de este método se analizaron las tres variantes para que la decisión de los expertos fuera lo más integral posible. En la matriz (tabla 9) se muestran las variantes propuestas por el grupo de expertos con su factor de peso.

**Tabla 9-** Matriz de decisión o de impactos

Variantes	CRITERIOS					
	Consumo electricidad (MWh/día)	Costo de mantenimiento (0,02% CFI)	Consumo de químicos en PTR (t/ día)	Recobrado de Turbo (%)	Costos de inversión (USD)	Emisiones al medio (kg/m <sup>3</sup> de agua oleosa)
V1	14,90	12 340	201,5	90	18783,1	21,2
V2	15,45	42 630	238,3	97	519 765	1,9
V3	15,05	54 542	239,1	99	835 553	0
Factor de peso (w). %	5	5	5	35	15	35

En la matriz de decisión o de impactos puede observarse que:

- ❖ La implementación de las variantes V2 y V3 y los cambios en el equipamiento conllevaron a un aumento en los costos de inversión, superior en la variante V3 por la inclusión de la automatización y TRD superior en costo al resto del equipamiento.
- ❖ Los criterios de mayor peso (w) corresponden al recobrado de Turbo y a las emisiones al medio ambiente, con valores de 35% en peso para la toma de decisiones.

La mejor respuesta ante estos criterios correspondió a la variante V3, con un recobrado de Turbo de 99 %, y las emisiones al medio ambiente 0,00 kg/m<sup>3</sup>.

❖ Otro criterio de peso fue el costo de inversión, con un valor de 15% en peso para la toma de decisiones. Es importante resaltar que la variante V3, a pesar de tener mejores respuestas ante los criterios de mayor peso, fue la variante de mayor costo, influenciado por los costos de la automatización.

La tabla 10 muestra para cada variante los valores de los criterios normalizados por las ecuaciones (8 y 9), todos los criterios fueron minimizados, excepto el recobrado de Turbo que fue maximizado, debido a que el aumento de este valor es directamente proporcional a la eficiencia del proceso.

**Tabla 10-** Criterios normalizados

Variantes	CRITERIOS					
	Consumo electricidad (MWh/día)	Costo de mantenimiento (0,02% CFI)	Consumo de químicos en PTR (t/ día)	Recobrado de Turbo (%)	Costos de inversión (USD)	Emisiones al medio (kg/m <sup>3</sup> de agua oleosa)
V1	1	1	1	0	1	0
V2	0	1	0,02	0	0	0,91
V3	0,78	0	0	1	0,34	1
Factor de peso (w), %	5	5	5	35	15	35

Método de ordenación: Ponderación Lineal (Ecuación 9)

**Tabla 11-** Criterios linealizados y valor de la función global

Variantes	CRITERIOS						Valor de la Función Global
	Consumo electricidad (MWh/día)	Costo de mant-to (0,02% CFI)	Consumo de químicos en PTR (t/ día)	Recobrado de Turbo (%)	Costos de inversión (USD)	Emisiones (kg/m <sup>3</sup> de agua oleosa)	
V1	0,05	0,05	0,05	0	0,15	0	0,20
V2	0	0,05	0,001	0	0	0,32	0,47
V3	0,039	0	0	0,35	0,051	0,35	0,69

Del análisis de la tabla 11 se pudo llegar a la siguiente conclusión:

El mayor valor (0,69) corresponde a la variante V3, debido a su mejor respuesta ante los criterios con mayor factor de peso. En los demás criterios de selección, la variante V3 presenta valores que no responden satisfactoriamente a estos, pero son similares a los valores de las variantes V2 y distantes de la variante V1, que anteriormente ya había sido rechazada por presentar mayor contaminación.

Entonces, por el análisis de estos resultados, aun cuando la variante más deseada es V3= 0,69, por ser la más sostenible para el proceso de recuperación de turbo. Se selecciona para continuar en explotación la variante

V2. Atendiendo a consideraciones objetivas, tecnológicas y de actualidad operacional los decisores argumentan mediante resolución interna la selección de la variante V2 para su explotación considerando que:

- Es una instalación actual y en explotación, que satisface los requerimientos actuales dado el nivel de producción.
- Está contemplado en el proyecto de expansión de Refinería la instalación y montaje de un sistema de drenaje nuevo automático dado que los volúmenes de drenaje aumentarán con la instalación de nuevas unidades de proceso.

## Conclusiones

1. Se demostró la efectividad de la metodología de evaluación presentada a través de una validación de tres variantes tecnológicas para el tratamiento de las aguas residuales oleosas en la Refinería Cienfuegos S.A, como estudio de caso, permitiendo seleccionar la variante que hace sostenible, desde el punto de vista tecnológico, económico y ambiental, el proceso de drenaje del Turbo Jet A-1.
2. Se demostró que, tanto la Variante V2 como la variante V3, son técnico - económicamente factibles para la operación de drenaje del turbo combustible. Sin embargo, solo la Variante V3 hace sostenible dicho proceso.
3. Teniendo en consideración los criterios de expertos, mediante la Decisión Multicriterio Discreta, se selecciona la Variante V2 para continuar en explotación, a la espera del desarrollo del proyecto de expansión de dicha Refinería.

## Referencias bibliográficas

1. PDVSA. *Lineamientos para la Evaluación Económica de proyectos de Inversión de Capital*. LEEPIC, Anexo V. 2013.
2. AVTUR. Ministry of Defence. *Turbine Fuel, Kerosene Type, Jet A-1; NATO Code: F-35*. (Defence Standard 91-091, 2023). Reino Unido. Date: December 14, 2023.
3. CUPET. *Catálogo de Especificaciones de productos. Rama Combustible*. OC-MM 01/C 06. [ed.] Dirección Técnica de Cupet. 2021, páginas. 16,17 y 18.

4. LÓPEZ, B.L. *Instrucción de Seguridad para el Drenaje de Equipos, recipientes y Tuberías*. RF-DMCP-IGS-21-02. Refinería Cienfuegos S.A, 2011.
5. LLUCH-URPÍ, J. *Tecnología y margen de refino de petróleo*. Madrid. ediciones@diazdesantos.es. 2008. Cap.5, pp: 68-79 ISBN: 978-84-7978-875-9. Disponible en: <http://www.diazdesantos.es/ediciones>.
6. NOGUERA BULMARO, A. *Pipephase v7 es un software comercial de simulación orientado a la industria de los hidrocarburos y diseño de líneas de tuberías*. Ingeniería Química Reviews. 2020. <http://www.ingenieriaquimicareviews>.
7. PDVSA. *Manual de Diseño de Proceso para fase líquida para redes de flujo de fluido*. Caracas. 2009. MDP-02-ff-03.
8. COUPER, JR.; HERTZ, DW.; LEE SMITH, F.. *Process Economics*. In *Perry's chemical engineers handbook*. McGraw-Hill Education, 8th edition, section 9, table 9-9 and equation 9. 2008
9. FARRAR, N. *Nelson-Farrar Quarterly Costimating: Indexes for selected equipment items*. (E. Perspective, Ed.) Oil and Journal Digital Megazine. Retrieved Diciembre 21, 2022, from <http://www.ogj.com>
10. DOMÉNECH, J.L. *Guía metodológica para el cálculo de la huella ecológica corporativa*. Argentina : Disponible en internet://[www.caei.com.ar](http://www.caei.com.ar), 2006.
11. GARCÍA-MARTINEZ, V; AQUINO ZÚÑIGA, S; GUZMÁN SALAS, A; MEDINA MELÉNDEZ, A. *Propuesta para el desarrollo de instrumentos de autoevaluación para programas educativos a distancia*. Revista electrónica "Actualidades investigativas en educación". Vol 11, número 2, pp 14-17. ISSN 1409-4703. 2011. Universidad de Costa Rica. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44720020017>
12. SOLANO-JUVIER, R. *Evaluación integral de alternativas para la eliminación de sulfuro de hidrógeno en la refinería de petróleo Camilo Cienfuegos*. Tesis de grado inédita. Universidad Carlos Rafael Rodríguez, 2014.
13. 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.

14. JUVIER, O. *Procedimiento para presupuestar los costos medioambientales en la refinería de petróleos de Cienfuegos. Tesis de grado inédita*. Universidad Carlos Rafael Rodríguez. 2010.

15. PETERS, M. AND TIMMERHAUS, K. *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill International Editions. Fourth Edition. Chemical and Petroleum Engineering Series.pp:183 Table 17 and pp:210 - 211 Table 27. 1991.

16. CEPAL-SEMARNAT. *Evaluación de extarnalidades ambientales del sector Energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca*. México. México : CEPAL-SEMARNAT, 2007. LC/MEX/L.788/Rev.1. 11 de septiembre

## **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

## **Contribución de los autores**

- Gabriel Orlando Lobelles Sardiñas: concepción y dirección de la investigación, análisis y escritura del artículo.
- Daniela Santana Padrón: realizó la corrida de los datos en el Software PipePhase y la evaluación económica y económica-ambiental.
- Alexis González Martínez: colaboró con el análisis de los resultados y la escritura del artículo
- Elisa María Chou Rodríguez: colaboró con el análisis estadístico, confección o revisión del manuscrito.