

Mantenimiento sostenible: herramienta cuantitativa para la toma de decisiones

Giacomo Barbieri

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia, (correo: g.barbieri@uniandes.edu.co)*

Resumen: El mantenimiento está evolucionando hacia un proceso más sostenible, buscando minimizar simultáneamente el impacto de los activos en la economía, la sociedad y el entorno, al tiempo que mitiga las posibles consecuencias adversas de las actividades de mantenimiento. Para gestionar el mantenimiento desde una perspectiva sostenible, se requieren índices apropiados capaces de presentar los resultados de la evaluación ambiental de manera agregada y sintética, junto con herramientas racionales de toma de decisiones que puedan simular diferentes alternativas de mantenimiento considerando diversas dimensiones de sostenibilidad. En respuesta a este desafío, se propone una herramienta basada en Índices de Sostenibilidad y análisis RAM para respaldar la toma de decisiones en prácticas de mantenimiento sostenibles. Al aplicar la herramienta a un caso de estudio, se ha demostrado que el enfoque permite evaluar tanto los impactos ambientales como económicos de diferentes actividades de mantenimiento. Además, la metodología facilita la identificación de dimensiones ambientales específicas que requieren mejoras, junto con la distinción de las contribuciones individuales de los componentes a los impactos ambientales y económicos a nivel del sistema. Estos conocimientos ofrecen información valiosa para tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos internos para la mitigación de impactos. Los resultados obtenidos destacan la aplicabilidad potencial de este enfoque en sistemas industriales, señalando su contribución hacia la consecución de prácticas de mantenimiento sostenibles.

1. INTRODUCCIÓN

El *desarrollo sostenible* consiste en gestionar la actividad humana para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones [1]. Se centra en tres áreas principales conocidas como la Triple Bottom Line (TBL) [2]: prosperidad económica, protección ambiental y equidad social. Así, es una forma de organizar la empresa para considerar tanto las imperativas actuales como futuras, como la preservación del medio ambiente, los recursos naturales y humanos, los riesgos industriales y la seguridad.

Debido a las presiones sociales, ambientales y regulatorias actuales, los gerentes se enfrentan a la dificultad de determinar cómo implementar una estrategia destinada a equilibrar las necesidades sociales, ambientales y económicas tanto de la empresa como de la sociedad [3]. Por lo tanto, el desafío ya no es si implementar la sostenibilidad, sino cómo hacerlo.

El *mantenimiento* se define como la "combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y gerenciales durante el ciclo de vida de un elemento destinado a retenerlo o restaurarlo a un estado en el que pueda realizar la función requerida" [4]. Un proceso de mantenimiento efectivo y eficiente tiene un gran potencial para perseguir la sostenibilidad a través de sus actividades y sus efectos [5-6]. Las actividades de mantenimiento consumen energía, generan emisiones, utilizan materiales e involucran a personas en la ejecución de varias tareas de mantenimiento. Las operaciones de mantenimiento bien gestionadas conservan recursos y proporcionan un

entorno de trabajo seguro y fluido. Más importante aún, un sistema de mantenimiento efectivo tiene un gran impacto en el rendimiento de los activos mantenidos a lo largo de la TBL. Por lo tanto, el mantenimiento se considera un proceso que debe gestionarse desde una perspectiva sostenible [7].

La función de mantenimiento está transformando su papel para respaldar mejor la creación de valor, contribuyendo tanto a la dimensión económica como ampliando su cuidado por los aspectos ambientales y sociales [8]. Según Ajukumar & Gandhi [9], el mantenimiento ha evolucionado desde una función reactiva sin acciones preventivas, convirtiéndose primero en un enfoque preventivo, luego en un proceso ágil y posteriormente en un proceso sostenible. En este contexto, Franciosi et al. [10] definen el *mantenimiento sostenible* como 'un conjunto de procesos interconectados que, por un lado, deben sostener los activos/equipos durante su operación para garantizar el cumplimiento del proceso de producción, de los productos fabricados y para reducir sus impactos industriales en la economía, sociedad y entorno circundante. Por otro lado, debe ser en sí misma una función comercial sostenible para limitar sus defectos e impactos generados durante las actividades de mantenimiento'.

Aunque se conoce la relación entre mantenimiento y sostenibilidad, varios autores han enfatizado la falta de investigación y contribuciones limitadas que vinculen los conceptos de sostenibilidad y los impactos del mantenimiento para ayudar al proceso de *toma de decisiones en mantenimiento*. Destacaron que la investigación tradicional en

gestión de mantenimiento se centraba principalmente en aspectos económicos y técnicos, pasando por alto los impactos subsiguientes en diversas dimensiones de sostenibilidad [11-13]. La integración completa de consideraciones de sostenibilidad en la gestión de mantenimiento requiere un monitoreo y medición cercanos del impacto del mantenimiento en la TBL a través de [14]: i) índices apropiados capaces de presentar el resultado de la evaluación de manera agregada y sintética; ii) herramientas racionales de toma de decisiones (por ejemplo, modelos matemáticos, simulación, etc.) que tengan en cuenta diversas dimensiones de sostenibilidad.

La toma de decisiones que incluye la sostenibilidad es inherentemente compleja, multidimensional y con compensaciones entre múltiples dimensiones de sostenibilidad [15]. Además, la evaluación de la sostenibilidad no es una tarea fácil. Para capturar la complejidad de la sostenibilidad, las evaluaciones de sostenibilidad a menudo requieren la integración de múltiples indicadores para formar índices compuestos [16-17]. En este contexto, los *Índices de Sostenibilidad* (SIs, por sus siglas en inglés) proporcionan información sobre el rendimiento actual y respaldan a los tomadores de decisiones en el proceso de toma de decisiones con respecto a las futuras direcciones de las operaciones [18].

Entre las herramientas de toma de decisiones de mantenimiento, el *Análisis RAM* (Confiablez, Disponibilidad y Mantenibilidad) incluye una variedad de métodos, tanto cualitativos como cuantitativos, y herramientas de software disponibles comercialmente para permitir la evaluación y predicción de indicadores relacionados con el mantenimiento durante el ciclo de vida del activo. Esta información se utiliza generalmente para respaldar la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento, como la implementación de modificaciones de diseño, la obtención de requisitos de confiabilidad y mantenibilidad, y la definición de planes de mantenimiento, estrategias de gestión de inventario y costos del ciclo de vida, entre otros [19-20].

En este contexto, este documento introduce una *herramienta innovadora de mantenimiento sostenible* que aprovecha los Índices de Sostenibilidad (SIs) y el análisis RAM para facilitar la toma de decisiones en relación con las actividades de mantenimiento. Esta herramienta tiene en cuenta no solo consideraciones técnicas y económicas, sino que también incorpora la sostenibilidad ambiental. Es importante tener en cuenta que este trabajo se centra específicamente en la toma de decisiones relacionada con la sostenibilidad de las actividades de mantenimiento y no aborda su impacto en el rendimiento de los activos mantenidos a lo largo de la TBL. El documento está estructurado de la siguiente manera: la sección 2 ilustra la herramienta propuesta a través de la aplicación a un caso de estudio. Los resultados obtenidos se discuten en la sección 3 y, finalmente, la sección 4 presenta las conclusiones y establece las direcciones para trabajos futuros.

2. HERRAMIENTA PARA EL MANTENIMIENTO SOSTENIBLE

La herramienta de mantenimiento sostenible se describe y valida mediante un caso de estudio. Para evaluar su efectividad, se desarrolla un estudio de caso semi-realista, emulando un sistema de bombeo de transporte de petróleo crudo situado en una refinería de petróleo en Barrancabermeja, Colombia. El sistema consta de dos bombas de lodo Atlas 80SPL-A52¹ que funcionan en una configuración de 1-de-2, donde una bomba opera mientras que la otra sirve como reserva. El sistema está diseñado para operar continuamente, las 24 horas del día y los 7 días de la semana, con un caudal de petróleo de 100m³/h. El objetivo principal del análisis es investigar estrategias de mantenimiento que puedan mitigar el impacto ambiental y, al mismo tiempo, mantener la sostenibilidad económica. En las secciones siguientes, la metodología de mantenimiento sostenible se aplica al estudio de caso presentado.

2.1 Flujo de trabajo para índices de sostenibilidad

Definir el propósito del índice. La definición del propósito del índice ambiental es crucial para garantizar la alineación con las fases posteriores del proceso. Para lograr esto, es esencial considerar las necesidades de los usuarios finales o la audiencia objetivo. En el contexto del caso de estudio, el índice se adaptó específicamente para los tomadores de decisiones de mantenimiento con el objetivo de evaluar los impactos del mantenimiento en la sostenibilidad ambiental. El objetivo final era guiar la formulación de estrategias de mantenimiento que pudieran mitigar efectivamente el impacto ambiental mientras se preservaba la sostenibilidad económica.

Determinar el índice ambiental. Antes de seleccionar el índice, es crucial desarrollar una comprensión conceptual del sistema de mantenimiento al que está relacionado el índice. Ghaleb & Taghipour [21] realizaron una revisión y análisis exhaustivos de las evidencias bibliográficas sobre los impactos sociales, ambientales y económicos del mantenimiento. Identificaron indicadores relacionados con la sostenibilidad significativamente afectados por las acciones de mantenimiento y los categorizaron en grupos funcionales. Para la evaluación de la sostenibilidad ambiental, se consideraron indicadores relacionados con el consumo de recursos, emisiones y contaminación. En este estudio, nos centramos en la selección del índice en el consumo de recursos y emisiones, mientras que se descartó la contaminación para mantener una complejidad manejable para el caso de estudio.

Después de obtener una comprensión conceptual del sistema de mantenimiento, se selecciona el índice ambiental apropiado. Aunque el propósito principal del índice puede no ser informar a los stakeholders generales sobre los impactos ambientales de las actividades de mantenimiento, elegir un índice alineado con los objetivos de sostenibilidad de la empresa puede ofrecer una justificación sólida para implementar cambios en las estrategias de mantenimiento, especialmente al presentarlos a la alta dirección.

¹ <https://www.tiiec.com/slurry-pumps-performance-curve-atlas-80-spl-heavy-duty-high-head-slurry-pump-tiiec.html>

El dióxido de carbono equivalente, también conocido como CO2 equivalente o CO2-eq, es una medida métrica utilizada para comparar las emisiones de gases de efecto invernadero según su potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés). Permite convertir las emisiones de diferentes gases en cantidades equivalentes de dióxido de carbono con el mismo GWP [22]. Como índice crucial para evaluar la sostenibilidad ambiental, el CO2-eq está cobrando importancia entre las empresas. Específicamente, el Carbon Disclosure Project utiliza puntajes y calificaciones de CO2-eq para evaluar empresas según sus emisiones informadas y estrategias relacionadas con el cambio climático. Del mismo modo, los Índices de Sostenibilidad Dow Jones (DJSI) incorporan emisiones de CO2-eq como un componente clave de sus criterios ambientales para evaluar el desempeño de sostenibilidad de las empresas.

En su marco, Ghaleb & Taghipour [21] categorizaron la energía, el uso del agua y los indicadores de material en la categoría funcional de consumo de recursos, mientras que las emisiones de carbono y otras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se clasificaron en la categoría de emisiones. Notablemente, el índice de CO2-eq abarcaba indicadores relacionados con las emisiones pero no con el consumo de recursos. Para abordar esto, introdujimos un índice extendido de dióxido de carbono equivalente (eCO2-eq). Este índice permitió la cuantificación indirecta de los recursos consumidos durante las actividades de mantenimiento en equivalentes de dióxido de carbono, como se detalla en la sección 2.3. La decisión de utilizar eCO2-eq tenía como objetivo crear un índice integral que abarcara todas las dimensiones ambientales seleccionadas, al tiempo que permanecía comprensible para la alta dirección debido a su semejanza con CO2-eq.

Seleccionar indicadores para incluir en la función de agregación. El objetivo de esta fase es seleccionar indicadores adecuados para incluir en la función de agregación. Siguiendo el marco propuesto por [21], se utilizaron los indicadores ambientales enumerados en la Tabla 1 en el caso de estudio presentado. Estos indicadores se alinean con las dimensiones identificadas para el índice eCO2-eq y se pueden calcular utilizando el análisis RAM asignando valores de estos indicadores a cada actividad de mantenimiento, como se detalla en la sección 2.3.

Categoría	Indicadores	Unidad Funcional
Consumo de recursos	Energía	kWh
	Agua	Galón (o) m ³
	Material	kg
Emisiones	Emisiones de carbono	kg-CO2-eq
	Otras emisiones de gases de efecto invernadero	kg-CO2-eq

Tabla 1: Indicadores ambientales seleccionados para el cálculo del CO2-eq.

Identificar la función de agregación y el esquema de ponderación. En esta fase, los indicadores ambientales seleccionados se convirtieron en el índice eCO2-eq. Los métodos de agregación aditiva utilizan funciones que suman los valores normalizados de los subindicadores para formar un índice de sostenibilidad. Hasta ahora, el método de agregación

aditiva más extendido es la media aritmética ponderada [23]:

$$SI = \omega_1 I_1 + \omega_2 I_2 + \dots + \omega_n I_n$$

donde SI es el índice de sostenibilidad, ω_i es el peso del i-ésimo indicador, e I_i es la puntuación normalizada del i-ésimo indicador. En este caso de estudio, se seleccionó este método de agregación para incluir las contribuciones de los indicadores ilustrados en la Tabla~\ref{tab:indicators} para la evaluación del índice eCO2-eq.

Dado que los recursos consumidos en las actividades de mantenimiento se convirtieron en kg-CO2-eq (sección 2.3), se asignó un peso igual a los indicadores, considerándolos igualmente importantes y cuantificados en la misma unidad funcional (es decir, kg-CO2-eq). El peso igual se calcula de la siguiente manera [23]:

$$\omega_i = \omega \quad i = 1, \dots, n$$

donde ω_i representa el peso del i-ésimo indicador, y ω es una constante utilizada como peso para todos los indicadores. En este caso de estudio, ω se asumió igual a 1 ya que todos los recursos se cuantificaron en kg-CO2-eq. En resumen, el eCO2-eq se calculó como la suma de los indicadores ambientales cuantificados en kg-CO2-eq.

2.2 Flujo de trabajo para el análisis RAM

Definir el alcance del modelo. El primer paso en el flujo de trabajo de RAM implica definir el objetivo del modelo, establecer los límites del sistema y determinar el marco temporal de la simulación. Además, se recopila información relacionada con el mantenimiento del sistema seleccionado, formando la base para las etapas posteriores del análisis de RAM.

Para el caso de estudio, el modelo debía permitir la simulación de diversas estrategias de mantenimiento y la estimación de los datos necesarios para evaluar su impacto ambiental y económico. El sistema considerado constaba de dos bombas de lodo Atlas 80SPL-A521, con solo dos modos significativos de falla analizados: i) desgaste de la paleta que lleva a vibraciones del eje; ii) fugas de sello que provocan goteo de aceite. Para simular el comportamiento del sistema, se eligió un período de 25 años, asumiendo que las bombas se reemplazarían después de este período. Como estudio de caso conceptual, la información relacionada con el mantenimiento se derivó de conjuntos de datos disponibles, y se asignaron valores plausibles en ausencia de datos específicos.

Es importante destacar que el consumo de energía asociado con las operaciones de mantenimiento (por ejemplo, el uso de herramientas eléctricas, etc.) se omitió de la consideración debido a su costo y impacto insignificantes en términos de kg-CO2-eq en comparación con otros factores. Además, solo se simuló la sostenibilidad ambiental del mantenimiento, mientras que no se consideró el impacto de la operación del sistema.

Modelo del sistema a través de RBD. En este paso, el sistema se modeló utilizando la representación RBD, como se ilustra en la Figura 1. Para el análisis de RAM, se seleccionó RAPTOR 7.0 como herramienta de software [24]. En RAPTOR, los modos de falla se representan mediante bloques (símbolos cuadrados en la figura), mientras que los nodos (símbolos circulares) y los enlaces (líneas) conectan los bloques para definir la lógica de falla del sistema. Los nodos $Pump_iNode_1$ y $Pump_iNode_2$ identifican la i -ésima bomba, mientras que los nodos $SystemNode_1$ y $SystemNode_2$ representan la información de redundancia que define la subestructura paralela del sistema. Específicamente, el símbolo 1/2 encima de $SystemNode_2$ indica una configuración de 1-de-2, lo que significa que una bomba debe funcionar correctamente para que el sistema opere con éxito.

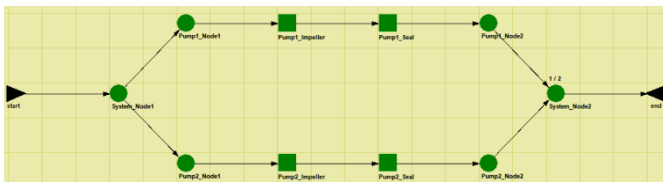


Figure 1: diagrama RBD del caso de estudio.

Establecer parámetros y restricciones. En este paso, se definieron parámetros y restricciones para cada bloque. El MTTF del impulsor se estableció en 48 meses (es decir, 35040 horas) considerando una velocidad de eje de 1375 rpm; ver \citep{Clark03}. El MTTF del sello de 44300 horas se implementó según lo definido en [25]. Ambos modos de falla se modelaron con una distribución exponencial, asumiendo una tasa de falla constante.

Para los parámetros de reparación (es decir, mantenimiento correctivo), se estableció un Tiempo Medio de Reparación (MTTR) de 15 horas para el impulsor y 10 horas para el sello. Ambos modos de falla se modelaron con una distribución log-normal, utilizando una desviación estándar de 2 horas. Cada bloque reparado se restauró al estado de "Tan Bueno Como Nuevo", ya que tanto el impulsor como el sello se asumieron reemplazados después de una falla.

En el caso del impulsor, se consideró un escenario en el que un inspector ubicado en Bogotá debía evaluar los efectos de las vibraciones de la paleta para asegurarse de que no hubieran causado fallas adicionales. La operación de reparación solo comenzaría después de esta inspección. Para dar cabida al tiempo de espera del inspector, se estableció un tiempo fijo de demora logística previa a la reparación de 48 horas para cada falla del impulsor.

Un resumen de los parámetros de falla y reparación definidos se proporciona en la Tabla 2.

	Impulsor	Sello
Distribución de fallas	Exponencial	Exponencial
MTTF (horas)	35040	44300
Distribución de reparación	Log-normal	Log-normal
MTTR (horas)	15	10
Desviación estándar (horas)	2	2
Tiempo de demora logística previo a la reparación (horas)	48	0

Tabla 2: Resumen de los parámetros de falla y reparación de los modos de falla del impulsor y el sello.

Luego, se definieron los costos de las actividades de reparación. El costo del repuesto del impulsor se fijó en 500 USD, mientras que el del sello fue de 200 USD. Se requería un técnico para la operación de reemplazo con un salario de 15 USD por hora.

El inspector responsable de la verificación de la bomba tuvo que viajar desde Bogotá. El costo de transporte se estableció en 85 USD para el transporte en avión y 125 USD para el autobús. El mayor costo de la opción de autobús se debe a la mayor duración del viaje de trabajo, que duplica el tiempo del inspector en comparación con la opción de vuelo.

Por último, en caso de una interrupción del sistema, se asumió un costo de penalización de 6000 USD por hora considerando la tasa de flujo de aceite de $\$100m^3/h$ y el funcionamiento continuo del sistema.

Un resumen de los costos definidos se proporciona en la Tabla 3.

	Impulsor	Sello
Costo del repuesto (USD)	500	200
Técnico local (USD/hora)	15	15
Inspector desde Bogotá mediante transporte aéreo (USD)	85	/
Inspector desde Bogotá mediante transporte terrestre (USD)	125	/
Tiempo de inactividad del sistema (USD/hora)	6000	

Tabla 3: Resumen de los costos para el mantenimiento correctivo de los modos de falla del impulsor y el sello.

Después de definir los parámetros, se establecieron restricciones. Se implementó una dependencia local, lo que significa que cuando fallaba el impulsor, el sello también dejaba de operar, y viceversa. Además, se definió una funcionalidad de reserva, donde la bomba redundante no acumulaba tiempo de vida mientras actuaba como alternativa; es decir, 'reserva en frío'.

Insertar políticas relacionadas con el mantenimiento. En esta fase, se incorporaron políticas relacionadas con el mantenimiento en RAPTOR 7.0. Estas políticas incluyen el establecimiento del plan de mantenimiento, la formulación de la estrategia de inventario y la gestión de recursos.

Respecto a la estrategia de inventario, se estableció un stock de un repuesto tanto para el impulsor como para el sello, y se asumió un retraso logístico en su suministro de 168 horas. Esto significa que tan pronto como el stock de repuestos alcanzara 0, se ordenaba un nuevo repuesto para reponer el stock. Aunque se podría haber explorado una estrategia de inventario alternativa para mejorar la sostenibilidad ambiental, este PoC se centró exclusivamente en evaluar estrategias de mantenimiento.

Después de establecer la estrategia de inventario, se formularon los escenarios de mantenimiento a evaluar mediante el análisis de RAM. Estos escenarios incluyeron:

1. *CM-flight*: mantenimiento correctivo (CM) se aplica a los dos elementos mantenibles, con la condición de que en cada evento de falla del impulsor, el inspector viaje desde Bogotá en avión.

2. *CM-bus*: mantenimiento correctivo (CM) se aplica a los dos elementos mantenibles, con la condición de que en cada evento de falla del impulsor, el inspector viaje desde Bogotá en autobús. La lógica detrás de esta estrategia es mitigar el impacto ambiental alterando el método de transporte del inspector.
3. *PM-bus*: mantenimiento correctivo (CM) se aplica a los dos elementos mantenibles, con la condición de que en cada evento de falla del impulsor, el inspector viaje desde Bogotá en autobús. Además, el mantenimiento preventivo (PM) se programa solo para el impulsor a las 29000 horas; es decir, el 85% de su MTTF. En PM, se reemplaza el impulsor. El objetivo principal de este escenario es reducir la frecuencia de viaje del inspector al introducir el PM para el impulsor. Cabe destacar que el reemplazo implementado durante el PM no requiere al inspector, ya que el impulsor aún no ha experimentado fallas.
4. *PM-bus-reuse*: mantenimiento correctivo (CM) se aplica a los dos elementos mantenibles, con la condición de que en cada evento de falla del impulsor, el inspector viaje desde Bogotá en autobús. El PM se programa solo para el impulsor a las 29000 horas. En comparación con la estrategia anterior, el impulsor se equilibra y se reutiliza después de una falla. Se asume que la vida útil del elemento se reduce un 15% con cada reutilización y que se necesita un reemplazo después de 2 reutilizaciones (es decir, 3 fallas). Este escenario tiene como objetivo examinar los impactos de reutilizar el impulsor tanto en la sostenibilidad ambiental como en la económica.

Es importante señalar que las diversas estrategias de mantenimiento se desarrollaron después de una simulación del escenario CM-flight; ver Figura 2. Dado que el transporte del inspector y del impulsor surgieron como los principales contribuyentes a las emisiones de kg-CO2-eq, las estrategias restantes se formularon con el objetivo de mitigar el impacto de estos dos factores.

Desde una perspectiva técnica, el PM se modeló utilizando una distribución log-normal con un MTTR de 7 horas y una desviación estándar de 2 horas. La operación de equilibrado, implementada para permitir la reutilización, se asumió que tenía la misma duración que el reemplazo.

En cuanto a los recursos, cada actividad de mantenimiento (es decir, CM con reemplazo, CM con equilibrio de impulsor y PM) requería la presencia de un técnico, junto con el requisito adicional de una visita del inspector en el caso de actividades de CM que involucraran tanto el reemplazo como el equilibrio.

Un resumen de las estrategias de mantenimiento definidas se proporciona en la Tabla 4.

	CM-aéreo	CM-terrestre	PM-terrestre	PM-terrestre-reutilización
Mantenimiento del sello	MC	MC	MC	MC
Mantenimiento del impulsor	MC	MC	MC & MP	MC & MP
Transporte del inspector	Aéreo	Terrestre	Terrestre	Terrestre
Reutilización del impulsor	No	No	No	Sí

Tabla 4: Resumen de las estrategias de mantenimiento investigadas en la prueba de concepto de transporte de petróleo.

2.3 Factores de conversión de análisis RAM a indicadores

En esta sección, se ilustra el proceso de cálculo de los indicadores presentados en la Tabla 1 basándose en los resultados del análisis RAM. Como se describe en la sección 2.1, se excluyó el consumo de energía vinculado a las operaciones de mantenimiento (como el uso de herramientas eléctricas, etc.) debido a su mínimo impacto en términos de costo y kg-CO2-eq en comparación con otros factores contribuyentes.

Siguiendo el orden presentado en la Tabla 1, primero se considera la evaluación del uso del agua. En este contexto, se asumió que se necesitaban 10,000 litros (2,642 galones) de agua para limpiar el derrame de petróleo resultante de la falla del sello. Para convertir este volumen a kg-CO2-eq, consideramos las emisiones de dióxido de carbono asociadas con las etapas de extracción de agua, distribución, tratamiento de aguas residuales después del proceso de limpieza y descarga. En línea con [26], el impacto calculado fue de 775 kg-CO2-eq por Mgal. Como resultado, cada falla del sello contribuyó a la emisión de 2 kg-CO2-eq.

En cuanto a la influencia de los materiales (es decir, repuestos en el PoC), se empleó la técnica de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA). Para determinar el kg-CO2-eq asociado al impulsor y al sello, se realizó un análisis de LCA utilizando el software GRANTA EduPack. Este software facilita la evaluación de impactos ambientales en todo el ciclo de vida de un producto, que abarca desde la extracción y procesamiento de materias primas (cuna) hasta la fabricación, distribución, uso y disposición final o reciclaje (sepulcro). Para calcular kg-CO2-eq, el análisis consideró los siguientes factores:

- *Material y su masa*: una masa de 5 kg de acero maraging para el impulsor y 0.35 kg de acero maraging para el sello.
- *Procesos de fabricación*: tanto el impulsor como el sello se fabrican con un proceso de forja y un mecanizado fino posterior responsable de la eliminación del 10% del material.
- *Transporte*: transporte desde China a Colombia, que incluye 100 km en autobús desde la empresa china hasta el aeropuerto, 15,500 km en avión desde China a Colombia y 430 km en autobús desde Bogotá hasta Barrancabermeja.
- *Disposición*: se asumió vertido en vertedero sin reciclaje.

Teniendo en cuenta estos elementos, se evaluó un impacto ambiental de 58 kg-CO2-eq para cada impulsor y 4 kg-CO2-eq para cada sello.

Las emisiones directas de carbono ocurren principalmente durante la fase operativa, y la logística de mantenimiento también contribuye a este aspecto. Las implicaciones ambientales relacionadas con la logística se identificaron exclusivamente durante la falla del impulsor, resultante del transporte del inspector. Los valores calculados para este indicador fueron de 320 kg-CO2-eq para el transporte en avión y 23 kg-CO2-eq para el transporte en autobús. Para mejorar la

claridad del análisis de impactos ambientales relacionados con el mantenimiento, el término "emisiones de carbono" (Tabla 1) se indicará en adelante como logístico.

Finalmente, se analizaron otras emisiones de gases de efecto invernadero. Estas emisiones ocurrieron durante el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, al compararlas con la magnitud de otros factores, se determinó que eran despreciables.

Se muestra un resumen de los impactos ambientales definidos en la Tabla 5.

	Modo de Falla	Ocurrencia	Valor	Impacto (kg-CO2-eq)
Agua	Sello	CM	2642 galones	2
Material-Imp	Impulsor	CM & PM	5 kg	58
Material-Sello	Sello	CM	0.35 kg	4
Logística-Vuelo	Impulsor	CM	270 km	320
Logística-Autobús	Impulsor	CM	430 km	23

Tabla 5: Resumen de los impactos ambientales de las actividades de mantenimiento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección, se presentan y discuten los resultados obtenidos. Primero se analiza el caso de estudio, seguida de la herramienta de mantenimiento sostenible propuesta.

Es importante señalar que todas las simulaciones se ejecutaron con 50 repeticiones, considerando un marco de tiempo de 25 años. Este número de repeticiones resultó adecuado para obtener resultados consistentemente convergentes. Además, los resultados se muestran en gráficos que solo presentan los valores promedio de los índices e indicadores, dado que se consideró que la variabilidad observada era despreciable.

3.1 Caso de estudio

En el caso de estudio, se realizó una simulación inicial para el escenario de CM-vuelo, sirviendo como referencia para identificar estrategias de mantenimiento capaces de reducir el impacto ambiental mientras se preserva la sostenibilidad económica. El impacto ambiental resultante se muestra en la Figura 2. Es importante destacar que el transporte del inspector (es decir, el indicador logístico) y el impulsor (es decir, el indicador de material) surgieron como los principales contribuyentes a las emisiones de kg-CO2-eq. Se desarrollaron estrategias posteriores para mitigar el impacto de estos dos factores.

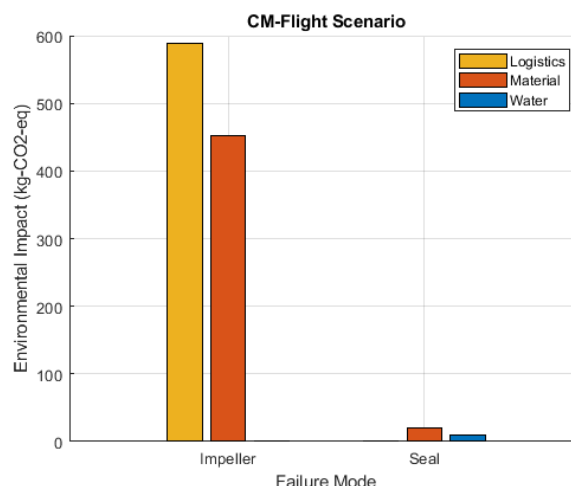


Figure 2: Impacto ambiental de la estrategia de mantenimiento CM-vuelo. El efecto insignificante del sello es evidente en comparación con el impulsor, resaltando el papel dominante de la logística del impulsor y los indicadores de material en las emisiones de kg-CO2-eq.

Basándose en los resultados presentados en la Figura 2, se introdujeron las estrategias CM-autobús, PM-autobús y PM-reutilización-autobús para minimizar los indicadores logísticos y de material del impulsor. Como se muestra en la Figura 3, estas estrategias lograron con éxito el objetivo previsto. Sin embargo, es importante tener en cuenta que podrían surgir compensaciones, ya que las mejoras en el impacto ambiental podrían influir potencialmente en la sostenibilidad económica. Este escenario de compensación se muestra claramente en la Figura 4 para la estrategia PM-reutilización-autobús, donde la ocurrencia de paradas del sistema resultó en costos significativos de penalización. Por otro lado, las estrategias CM-autobús y PM-autobús exhibieron costos similares a la estrategia CM-vuelo.

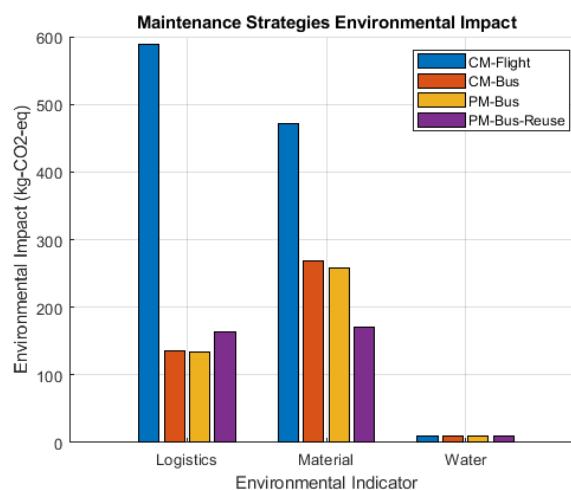


Figure 3: Impacto ambiental de las estrategias de mantenimiento implementadas. Se puede observar que las estrategias introducidas demuestran una reducción en el impacto ambiental en comparación con la estrategia CM-vuelo.

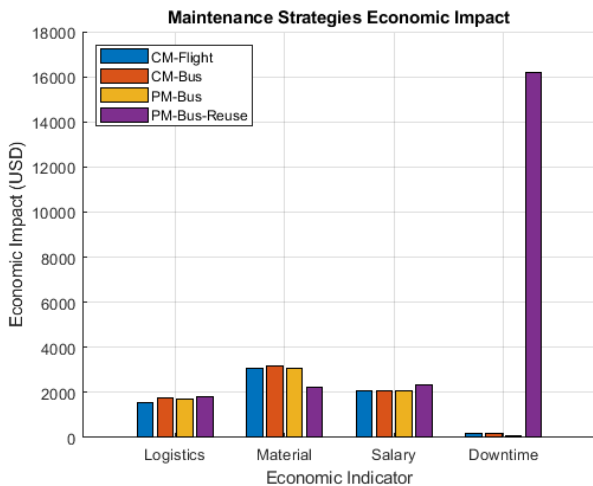


Figure 4: Impacto económico de las estrategias de mantenimiento implementadas. La estrategia PM-reutilización-autobús muestra un aumento significativo en los costos, mientras que las estrategias CM-autobús y PM-autobús demuestran costos similares a la estrategia CM-vuelo.

Un resumen de los impactos ambientales y económicos para cada estrategia de mantenimiento se presenta en la Figura 5. Es evidente que las estrategias CM-autobús y PM-autobús son preferibles, ya que mitigan eficazmente el impacto ambiental mientras mantienen la sostenibilidad económica. Por el contrario, la estrategia PM-vuelo reduce el impacto ambiental pero se realiza a expensas de la sostenibilidad económica. Es importante señalar que al tomar decisiones para cambiar estrategias de mantenimiento, también se deben tener en cuenta otros factores. Por ejemplo, el transporte en autobús, que lleva aproximadamente 7 horas a través de pistas secundarias y senderos pequeños, podría afectar potencialmente el bienestar del inspector, influyendo en los indicadores de sostenibilidad social.

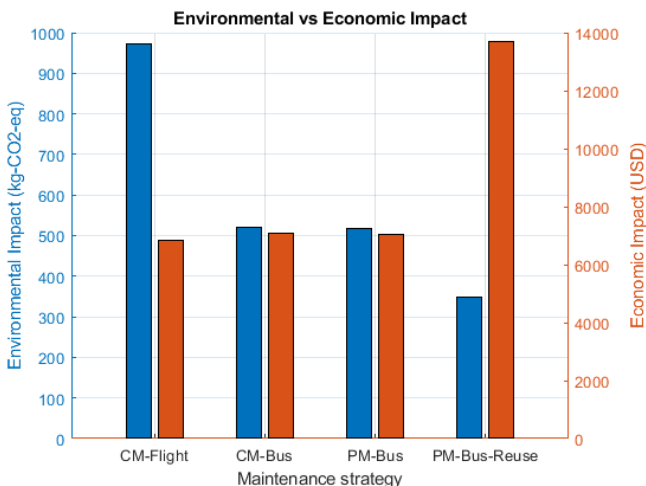


Figure 5: Resumen de los impactos ambientales y económicos para las estrategias de mantenimiento implementadas.

3.2 Herramienta para el mantenimiento sostenible

La herramienta de mantenimiento sostenible propuesta en este estudio se examina ahora en base a los resultados obtenidos

del caso de estudio. La herramienta tuvo como objetivo lograr dos objetivos principales:

- Enfoque holístico: mientras gran parte de la literatura existente se ha centrado en dimensiones individuales de sostenibilidad ambiental (por ejemplo, energía, emisiones, residuos, etc.), la herramienta fue diseñada para abarcar múltiples factores simultáneamente.
- Enfoque sistémico: a diferencia de estudios que a menudo se enfocaban únicamente en componentes individuales dentro de modelos de optimización, esta herramienta tuvo como objetivo integrar el impacto ambiental de los equipos a nivel del sistema para abordar mejor los objetivos de sostenibilidad de la empresa.

A continuación, se describe cómo la herramienta propuesta cumple con los objetivos mencionados.

Enfoque holístico. En el ámbito de los estudios de sostenibilidad, se pueden emplear numerosos indicadores para el proceso de evaluación. Presentar demasiados indicadores puede ser un problema al crear más confusión que comprensión, especialmente cuando los indicadores difieren tanto en magnitud como en dirección de cambio. Los tomadores de decisiones necesitan información sintética que muestre el resultado de la evaluación de manera agregada y, al mismo tiempo, permita la descomposición a niveles inferiores que demuestren el impacto de cada uno de los criterios evaluados en el resultado final [27].

Para abordar estos desafíos, se propone la creación de índices de sostenibilidad mediante la ponderación y agregación de indicadores, en línea con la literatura existente sobre sostenibilidad. Como se muestra en la Figura 5, la utilización de índices ofrece a los tomadores de decisiones una vista consolidada que simplifica el proceso de toma de decisiones y facilita la comunicación con la alta dirección y las partes interesadas. Además, la descomposición del índice en indicadores individuales facilita la definición de dimensiones ambientales que necesitan mejoras, como se ejemplifica en el impacto ambiental de la estrategia CM-vuelo en la Figura 2. Además, el enfoque propuesto en este trabajo permite la identificación de compensaciones en diversas dimensiones de sostenibilidad (Figura 5), proporcionando una herramienta valiosa para abordar los desafíos intrínsecamente complicados y multifacéticos de la toma de decisiones en sostenibilidad.

Enfoque sistémico Numerosas empresas carecen de conocimiento sobre los impactos ambientales a nivel de los equipos. Aunque las acciones de mantenimiento pueden dirigirse al nivel del componente, estas acciones influyen inherentemente en la salud general del sistema. Dado que los sistemas están compuestos por componentes interconectados, cuantificar los efectos de la toma de decisiones a nivel de componentes en el rendimiento de sostenibilidad de sistemas enteros se vuelve crucial. En el contexto de este trabajo, se propuso el uso del análisis RAM como una solución para abordar este desafío.

Al igual que los índices pueden descomponerse en indicadores para evaluar la mejora en dimensiones ambientales, el análisis RAM facilitó la descomposición del impacto ambiental a nivel del sistema en contribuciones individuales de los componentes. En el PoC, esta descomposición a nivel de componente se implementó para la estrategia CM-vuelo, lo que llevó a la priorización de mejorar la sostenibilidad ambiental del impulsor en comparación con la del sello, como se muestra en la Figura 2. Por lo tanto, el análisis RAM demostró su eficacia para evaluar los impactos ambientales a un nivel de componente más detallado, proporcionando una herramienta valiosa para orientar la toma de decisiones sobre cómo asignar de manera óptima los recursos internos para lograr los objetivos de mitigación de impacto de la empresa.

En conclusión, la herramienta propuesta logra un enfoque holístico y sistémico para facilitar la toma de decisiones en mantenimiento sostenible. Esto se logra abordando simultáneamente diversas dimensiones ambientales a través de la aplicación de índices de sostenibilidad e integrando el impacto ambiental de los equipos a nivel del sistema mediante la utilización del análisis RAM.

4. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

El *mantenimiento sostenible* representa la vanguardia de la gestión moderna del mantenimiento. Cumple un doble propósito: primero, como un proceso capaz de mantener activos/equipos durante su operación mientras reduce sus impactos industriales en la economía, sociedad y entorno circundante. En segundo lugar, el mantenimiento sostenible en sí mismo debe funcionar como una práctica comercial sostenible, con el objetivo de mitigar cualquier consecuencia negativa derivada de las actividades de mantenimiento. Lograr una integración integral de consideraciones de sostenibilidad en la gestión del mantenimiento requiere un monitoreo cercano y la medición del impacto del mantenimiento en el TBL a través de: i) índices apropiados capaces de presentar el resultado de la evaluación de manera agregada y sintética; ii) herramientas de toma de decisiones racionales capaces de simular diferentes alternativas de mantenimiento considerando diversas dimensiones de sostenibilidad.

En este contexto, el presente trabajo de investigación introduce una *herramienta de mantenimiento sostenible* diseñada para respaldar la toma de decisiones en mantenimiento con un enfoque en sostenibilidad ambiental. La herramienta emplea índices de sostenibilidad para proporcionar una visión general consolidada de los resultados de la evaluación ambiental, al tiempo que ofrece la capacidad de deconstruir estos resultados a niveles más finos. El proceso de deconstrucción permite identificar dimensiones ambientales específicas que necesitan mejoras. Además, se incorpora el análisis RAM por su capacidad para desglosar el impacto ambiental a nivel del sistema en contribuciones discretas de componentes individuales. Esto permite la toma de decisiones informada sobre la asignación óptima de recursos internos para realizar efectivamente los objetivos de mitigación de impacto de la empresa.

Al aplicar la herramienta en un *caso de estudio*, se ha establecido que logra de manera efectiva un enfoque holístico y sistémico para respaldar la toma de decisiones en el mantenimiento sostenible. El enfoque holístico se realiza abordando simultáneamente diversas dimensiones ambientales mediante el uso de índices de sostenibilidad, mientras que el enfoque sistémico implica incorporar el impacto ambiental de los equipos a nivel del sistema mediante la aplicación del análisis RAM.

Cabe destacar que la herramienta propuesta constituye un concepto preliminar que en el futuro debería validarse y mejorarse aún más. Algunos *trabajos futuros* identificados son:

- *Estudio de caso industrial*: si bien el análisis RAM es un enfoque de vanguardia en la industria, la aplicabilidad efectiva de los índices de sostenibilidad en este contexto requiere una validación adicional. En consecuencia, se debe realizar un estudio de caso industrial para verificar la efectividad de la metodología de mantenimiento sostenible propuesta.
- *Operaciones*: este trabajo se centró únicamente en evaluar la sostenibilidad ambiental de las actividades de mantenimiento y no aborda su impacto en el rendimiento de los activos mantenidos a lo largo del TBL. Dado que las operaciones tienen un impacto ambiental sustancial, es esencial incorporar la influencia del mantenimiento en las operaciones del sistema para una evaluación integral de la sostenibilidad.
- *Sostenibilidad social*: el análisis de este trabajo se limitó a los ámbitos de la sostenibilidad ambiental y económica, pasando por alto la inclusión de aspectos de sostenibilidad social. Para garantizar una toma de decisiones integral, es necesario incorporar índices de sostenibilidad social en el marco de la metodología propuesta.

REFERENCIAS

- [1] WCED. Our Common Future. Technical report, World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, 1987.
- [2] Elkington, J. Accounting for the triple bottom line. Measuring business excellence 1998.
- [3] Epstein, M.J.; Roy, M.J. Sustainability in action: Identifying and measuring the key performance drivers. Long range planning 2001, 34, 585–604.
- [4] EN13306. Maintenance - Maintenance terminology. Standard, British Standards Institution, London, England, 2017.
- [5] Franciosi, C.; Lambiase, A.; Miranda, S. Sustainable maintenance: a periodic preventive maintenance model with sustainable spare parts management. IFAC-PapersOnLine 2017, 50, 13692–13697.
- [6] Liyanage, J.P.; Badurdeen, F. Strategies for integrating maintenance for sustainable manufacturing. In Proceedings of the Engineering Asset Lifecycle Management: Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2009), 28-30 September 2009. Springer, 2010, pp. 308–315.

- [7] Jasiulewicz-Kaczmarek, M. The role and contribution of maintenance in sustainable manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes* 2013, 46, 1146–1151.
- [8] Jasiulewicz-Kaczmarek, M.; Gola, A. Maintenance 4.0 technologies for sustainable manufacturing—an overview. *IFAC-PapersOnLine* 2019, 52, 91–96.
- [9] Ajukumar, V.; Gandhi, O. Evaluation of green maintenance initiatives in design and development of mechanical systems using an integrated approach. *Journal of cleaner production* 2013, 51, 34–46.
- [10] Franciosi, C.; Voisin, A.; Miranda, S.; Riemma, S.; Iung, B. Measuring maintenance impacts on sustainability of manufacturing industries: from a systematic literature review to a framework proposal. *Journal of Cleaner Production* 2020, 260, 121065.
- [11] Karevan, A.; Vasili, M. Sustainable reliability centered maintenance optimization considering risk attitude. *Journal of applied research on industrial engineering* 2018, 5, 205–222.
- [12] Franciosi, C.; Iung, B.; Miranda, S.; Riemma, S. Maintenance for sustainability in the industry 4.0 context: A scoping literature review. *IFAC-PapersOnLine* 2018, 51, 903–908.
- [13] Van Horenbeek, A.; Pintelon, L.; Muchiri, P. Maintenance optimization models and criteria. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 2010, 1, 189–200.
- [14] Saihi, A.; Ben-Daya, M.; Asad, R.A. Maintenance and sustainability: a systematic review of modeling-based literature. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 2022.
- [15] Wu, J. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape ecology* 2013, 28, 999–1023.
- [16] Özdemir, E.D.; Härdtlein, M.; Jenssen, T.; Zech, D.; Eltrop, L. A confusion of tongues or the art of aggregating indicators—Reflections on four projective methodologies on sustainability measurement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011, 15, 2385–2396.
- [17] Wu, J.; Wu, T. Sustainability indicators and indices: an overview. *Handbook of sustainability management* 2012, pp. 65–86.
- [18] Böhringer, C.; Jochem, P.E. Measuring the immeasurable—A survey of sustainability indices. *Ecological economics* 2007, 63, 1–8.
- [19] Sharma, R.K.; Kumar, S. Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 2008, 93, 913–919.
- [20] Morales, J.M.; Barbieri, G.; Vargas, H.I.; Villegas, J.S.; Parra, C. Integration of BIM Modeling and RAM Analysis: a Proof of Concept. *IFAC-PapersOnLine* 2022, 55, 205–210.
- [21] Ghaleb, M.; Taghipour, S. Evidence-based study of the impacts of maintenance practices on asset sustainability. *International Journal of Production Research* 2022, pp. 1–32.
- [22] EEA. Glossary, Eurostat—Statistic Explained. European Environment Agency, 2018.
- [23] Nardo, M.; Saisana, M.; Saltelli, A.; Tarantola, S. Tools for composite indicators building. European Commission, Ispra 2005, 15, 19–20.
- [24] Murphy, K.E.; Carter, C.M.; Grimes, E.A.; Malerich, A.W. *RAPTOR 7.0. Tutorial workbook*, ARINC, 2007.
- [25] OREDA. *Offshore reliability data handbook*; Sintef, 2015.
- [26] Griffiths-Sattenspiel, B.; Wilson, W. *The carbon footprint of water*. River Network, Portland 2009.
- [27] Jasiulewicz-Kaczmarek, M.; Z' ywica, P. The concept of maintenance sustainability performance assessment by integrating balanced scorecard with non-additive fuzzy integral. *Eksploracja i Niezawodno's'c* 2018, 20, 650–661.

BIBLIOGRAFÍA

Giacomo Barbieri es profesor asociado del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de los Andes. Tiene pregrado y maestría en ingeniería mecánica (respectivamente, 2010 y 2012), y Ph.D. en Ingeniería de la Innovación Industrial (2016) de la Universidad de Módena y Reggio Emilia. Desde junio de 2016, se unió a la Universidad de los Andes. Investigador senior según la Convocatoria de Reconocimiento de Grupos 2021 (MinCiencias). Hace parte del Grupo de Investigación en Automatización para la Producción GIAP (COL0005539), categoría A1. Miembro del comité técnico de IFAC (International Federation of Automatic Control) en 'Manufacturing Plant Control' (TC5.1). Su área de investigación es el mantenimiento, la gestión de activos y la automatización aplicada a la agricultura en ambiente controlado.