

Implementación de estrategias de economía circular en el mantenimiento de maquinaria pesada: reducción de residuos y optimización de recursos

Implementation of circular economy strategies in heavy machinery maintenance: waste reduction and resource optimization

<https://doi.org/10.58299/utp.267.c952>

Manuel Ramos Ponce 

Universidad Tecnológica de Manzanillo
manuel-ramos@utem.edu.mx

Juan Ríos Hernández 

Universidad Tecnológica de Manzanillo
juan-rios@utem.edu.mx

Fredy Cortés Martínez 

Universidad Tecnológica de Manzanillo
fredy-cortez@utem.edu.mx

Perla Rubí Pizano Ferrer 

Universidad Tecnológica de Manzanillo
perla-pizano@utem.edu.mx

Resumen

El presente capítulo analiza la aplicación de los principios de la economía circular en el mantenimiento industrial de maquinaria pesada como una estrategia para reducir el impacto ambiental y optimizar el uso de recursos materiales y energéticos. A través de una revisión documental de literatura científica, normas internacionales y casos documentados en sectores como la minería, la construcción y los servicios urbanos, se identifican prácticas de reutilización, reacondicionamiento y remanufactura de componentes que permiten extender la vida útil de los activos industriales. Con base en este análisis, se propone un marco operativo de mantenimiento circular adaptable a talleres y empresas del sector. Los resultados evidencian beneficios económicos, operativos y ambientales, particularmente en la reducción de residuos peligrosos, el consumo de materias primas vírgenes y los costos asociados a la adquisición de refacciones nuevas. Se concluye que la economía circular constituye una oportunidad estratégica para fortalecer la sostenibilidad, la competitividad y la confiabilidad del mantenimiento de maquinaria pesada.

Palabras clave: desarrollo sostenible; economía; ingeniería industrial; mantenimiento; maquinaria.

Abstract

This chapter analyzes the application of circular economy principles in heavy machinery industrial maintenance as a strategy to reduce environmental impact and optimize material and energy resources. Through a documentary review of scientific literature, international standards, and documented cases in sectors such as mining and construction, practices for the reuse, reconditioning, and remanufacturing of components are identified to extend the useful life of industrial assets. Based on this analysis, an adaptable circular maintenance operational framework is proposed. The results show economic, operational, and environmental benefits, particularly in the reduction of hazardous waste, raw material consumption, and costs associated with new spare parts. It is concluded that the circular economy constitutes a strategic opportunity to strengthen sustainability and reliability in heavy machinery maintenance.

Keywords: economy; engineering industry; machinery; maintenance; sustainable development.



Introducción

Contexto del mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial desempeña un papel estratégico en la gestión de activos físicos, al garantizar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de los sistemas productivos. En sectores intensivos en capital físico, como la construcción, la minería, la agroindustria, el transporte y los servicios municipales— la maquinaria pesada constituye un activo crítico cuyo desempeño incide directamente en la eficiencia operativa y en los costos del ciclo de vida (ISO, 2014; Mobley, 2002).

Tradicionalmente, las prácticas de mantenimiento han operado bajo un modelo lineal de consumo, caracterizado por la lógica de extraer–fabricar–usar–desechar. Este enfoque, si bien permitió durante décadas el crecimiento industrial, ha demostrado ser ambientalmente insostenible y económicamente ineficiente, debido a la elevada generación de residuos, el consumo intensivo de materias primas y la dependencia de refacciones nuevas (Ghisellini et al., 2016). En la figura 1 se esquematiza este flujo tradicional de recursos.

En el mantenimiento de maquinaria pesada, este modelo se traduce en grandes volúmenes de aceites usados, filtros contaminados, componentes metálicos descartados y piezas electrónicas fuera de servicio, muchas de las cuales conservan valor funcional o material. Como señalan Lieder y Rashid (2016), la falta de estrategias de recuperación y reutilización en industrias intensivas en activos genera pérdidas económicas significativas y una presión creciente sobre los recursos naturales.

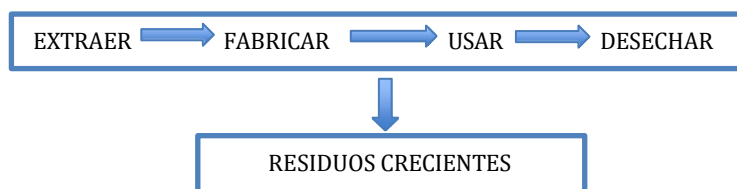




Si bien la incorporación de tecnologías como la sensorización, la telemetría y el mantenimiento predictivo ha mejorado la gestión técnica de los equipos, persiste el desafío de integrar estas herramientas dentro de un marco que priorice no solo la confiabilidad operativa, sino también la sostenibilidad ambiental y la eficiencia en el uso de recursos.

En este contexto, la economía circular emerge como un paradigma transformador capaz de redefinir las prácticas tradicionales de mantenimiento industrial.

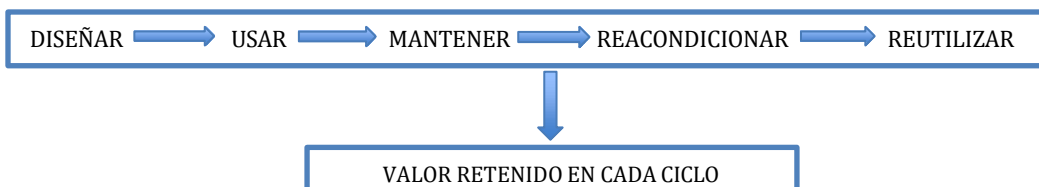
Figura 1. Modelo de economía lineal en el mantenimiento.



Fuente: elaboración propia.

Por el contrario, la adopción de una economía circular en la gestión de activos industriales propone un cambio de paradigma donde el valor de los componentes se preserva el mayor tiempo posible. En este sentido, el mantenimiento deja de ser una actividad reactiva de reparación para convertirse en un pilar estratégico que facilita el rediseño y la extensión de la vida útil de los equipos. Como se detalla en la figura 2, este modelo sustituye la disposición final por ciclos de reacondicionamiento y reutilización, permitiendo que el valor económico y material permanezca retenido dentro del sistema productivo en cada etapa del ciclo de vida.

Figura 2. Ciclo de gestión circular en el mantenimiento de activos.



Fuente: elaboración propia.





Enfoque hacia la sostenibilidad

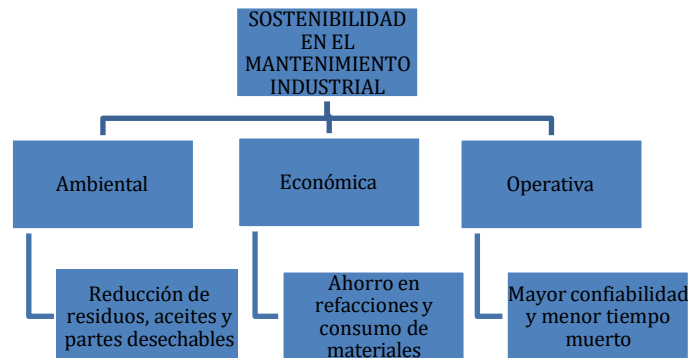
La sostenibilidad se ha consolidado como un eje transversal en la gestión industrial, impulsada por regulaciones ambientales más estrictas, acuerdos internacionales y una creciente presión social y de mercado. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2019), las industrias deben transitar hacia modelos productivos que desacoplen el crecimiento económico del consumo de recursos y la generación de residuos.

La economía circular se define como un enfoque que busca mantener productos, componentes y materiales en su mayor nivel de utilidad y valor durante el mayor tiempo posible (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Aplicada al mantenimiento de maquinaria pesada, esta perspectiva implica priorizar la extensión de la vida útil de los componentes, la recuperación de materiales y la reducción del consumo energético asociado a reparaciones y reemplazos. Desde una perspectiva operativa, el mantenimiento sostenible no solo responde a una responsabilidad ambiental, sino que genera beneficios directos para las organizaciones, tales como la reducción de costos de refacciones, la optimización de inventarios técnicos y la disminución de tiempos improductivos (Bocken et al., 2016). Esta integración de beneficios se articula a través de tres ejes fundamentales, como se presenta en la figura 3, donde se observa la interconexión entre las metas ambientales, el ahorro económico y la eficiencia operativa.





Figura 3. Dimensiones de la sostenibilidad en el mantenimiento industrial.



Fuente: elaboración propia.

Justificación

La implementación de estrategias de economía circular en el mantenimiento de maquinaria pesada se justifica por múltiples factores interrelacionados:

Altos niveles de residuos industriales, particularmente aceites usados, refacciones metálicas y componentes de gran volumen.

Incremento de costos operativos, asociados al reemplazo constante de piezas nuevas y a la gestión de residuos peligrosos.

Escasez y volatilidad de materias primas, como acero, aluminio y cobre, esenciales en la fabricación de maquinaria.

Normativas ambientales más exigentes, que obligan a las empresas a mejorar su gestión de residuos y emisiones (ISO, 2015).

Necesidad de mejorar la competitividad, mediante prácticas que reduzcan costos y fortalezcan la reputación institucional.





Integrar la economía circular al mantenimiento no solo es una acción ambientalmente responsable, sino una estrategia indispensable para la sostenibilidad del sector industrial moderno.

Objetivos

Objetivo general

Analizar e implementar estrategias de economía circular aplicadas al mantenimiento de maquinaria pesada para reducir residuos, optimizar recursos y mejorar la eficiencia operativa.

Objetivos específicos

1. Describir el estado actual del mantenimiento industrial y sus principales desafíos ambientales y operativos.
2. Identificar oportunidades de valorización, reutilización, reconversión y prolongación de la vida útil de componentes de maquinaria pesada.
3. Proponer modelos y técnicas basadas en economía circular que puedan integrarse en programas de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.
4. Evaluar el impacto económico, operativo y ambiental de dichas estrategias.
5. Establecer lineamientos para la adopción institucional de prácticas de mantenimiento sostenible, incluyendo capacitación técnica, gestión de residuos y rediseño de procesos.
6. Contribuir al desarrollo de metodologías replicables en entornos industriales que busquen transitar hacia modelos de producción más limpios y eficientes.





Contexto y planteamiento del problema

Panorama actual del mantenimiento en maquinaria pesada

El mantenimiento de maquinaria pesada se caracteriza por operar en condiciones severas, con cargas elevadas, ambientes abrasivos y ciclos de trabajo intensivos. A pesar de los avances tecnológicos, gran parte del sector aún depende de esquemas tradicionales de mantenimiento correctivo y preventivo, con una adopción limitada de enfoques predictivos y sostenibles (Mobley, 2002).

Diversos estudios señalan que la falta de integración entre mantenimiento basado en condición y estrategias de recuperación de componentes conduce a reemplazos prematuros, desperdicio de materiales y altos costos de operación (Jardine et al., 2006).

Problemas identificados

Los principales problemas detectados incluyen la generación excesiva de residuos, la dependencia de refacciones nuevas, la gestión ineficiente del inventario técnico, la falta de capacitación en técnicas de reacondicionamiento y una escasa cultura ambiental en la toma de decisiones de mantenimiento.

Marco teórico

Principios de la economía circular

La economía circular se concibe como un sistema económico regenerativo que reemplaza el concepto de “fin de vida” por la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales. Kirchherr et al. (2017) la definen como “un sistema económico que opera a nivel micro, meso y macro con el objetivo de lograr desarrollo sostenible mediante la creación de valor ambiental, económico y social” (p. 224).





Sus principios fundamentales incluyen la preservación del capital natural, la optimización del uso de recursos, el cierre de ciclos técnicos y la minimización de residuos (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Filosofías de mantenimiento y transición circular

Las filosofías de mantenimiento —correctivo, preventivo, predictivo y centrado en confiabilidad— pueden reinterpretarse bajo criterios de circularidad. El mantenimiento predictivo, en particular, permite intervenir los componentes en función de su condición real, reduciendo reemplazos innecesarios y desperdicio de materiales (Jardine et al., 2006).

Economía circular aplicada al mantenimiento industrial

La aplicación de la economía circular al mantenimiento de maquinaria pesada incluye estrategias como el reacondicionamiento, la remanufactura, la recuperación de lubricantes, la gestión circular del inventario y el uso de tecnologías de diagnóstico. Estudios indican que la remanufactura puede reducir entre 40 y 60 % los costos y hasta 80 % los residuos, en comparación con la fabricación de componentes nuevos (OECD, 2019).

Casos de estudio y evidencias

Casos documentados en minería, construcción y flotas urbanas demuestran reducciones significativas en costos, residuos y consumo energético mediante programas de remanufactura, recuperación de aceites y mantenimiento predictivo (Ellen MacArthur Foundation, 2019).





Metodología

La metodología empleada para este estudio fue diseñada con el propósito de analizar cómo las estrategias de economía circular pueden integrarse en las prácticas de mantenimiento de maquinaria pesada, permitiendo reducir residuos, optimizar recursos y mejorar los indicadores de desempeño técnico–económicos de las empresas del sector. El enfoque metodológico combina técnicas cualitativas y cuantitativas, así como revisión documental, observación directa y análisis comparativo.

Tipo y diseño de investigación

El presente estudio se clasifica como una investigación aplicada, ya que busca generar conocimientos orientados a solucionar problemas reales dentro del ámbito del mantenimiento industrial. Asimismo, presenta un enfoque mixto (cuantitativo–cualitativo), ya que integra:

- Mediciones y análisis de datos de fallas, consumos y generación de residuos (componente cuantitativo).
- Observaciones de prácticas operativas, entrevistas semiestructuradas con técnicos y supervisores, y análisis interpretativo de procesos (componente cualitativo).

El diseño de investigación es no experimental y transversal, dado que no se manipulan variables deliberadamente y la información se recolecta en un periodo específico. Dentro de este diseño, se utiliza un esquema descriptivo–correlacional, donde:





Lo descriptivo permite caracterizar el estado actual del mantenimiento en maquinaria pesada; lo correlacional ayuda a identificar la relación entre prácticas de mantenimiento y oportunidades de circularidad (reutilización de partes, extensión de vida útil, reducción de residuos, eficiencia en el uso de insumos).

Este diseño permite obtener una visión integral del fenómeno y sentar las bases para futuras implementaciones piloto.

Fuentes de información

Para garantizar solidez analítica, el estudio se basó en diversas fuentes de información:

a) Fuentes primarias

Entrevistas semiestructuradas con mecánicos, jefes de taller, responsables de compras, supervisores y especialistas en maquinaria pesada.

Observación directa de operaciones de mantenimiento preventivo, correctivo y mayor.

Registro fotográfico y documental de componentes críticos, flujos de materiales y patrones de desgaste.

Datos operativos reales, como horas de uso, cargas de trabajo, intervalos de servicio y fallas recurrentes.

b) Fuentes secundarias

Normas técnicas nacionales e internacionales (ISO 55000, ISO 14001, normativas ambientales aplicables en México).

Manuales de fabricante, catálogos de refacciones, guías de lubricación y especificaciones técnicas.





Literatura científica y académica, incluyendo artículos indexados sobre economía circular, mantenimiento industrial y gestión de activos.

Informes sectoriales del mercado de maquinaria pesada: minería, construcción, logística y transporte.

Estudios previos de casos donde se ha implementado la economía circular en sectores similares.

La combinación de ambas fuentes permitió validar la información y contrastar teoría con práctica en campo.

Procedimiento analítico

El proceso de análisis se desarrolló en tres fases metodológicas:

Fase 1. Diagnóstico del estado actual.

- Revisión inicial de los procesos de mantenimiento existentes.
- Identificación de los equipos y componentes críticos con mayor rotación o demanda de insumos.

Cálculo de indicadores clave:

- Frecuencia de fallas.
- MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas).
- MTTR (Tiempo Medio de Reparación).
- Consumos de lubricantes, filtros y piezas de desgaste.
- Volúmenes de residuos sólidos generados (metales, empaques, lubricantes usados).
- Análisis de brechas entre el mantenimiento actual y un esquema circular óptimo.





Fase 2. Identificación de oportunidades de circularidad.

Mapeo de flujos de materiales y residuos.

Evaluación del potencial de:

- Reparación avanzada.
- Reacondicionamiento.
- Remanufactura.
- Reutilización de componentes.
- Sustitución de partes por opciones modulares o regenerables.
- Análisis de costo–beneficio y costo–ciclo de vida (LCC) para cada oportunidad detectada.
- Priorización mediante matriz de impacto–factibilidad.

Fase 3. Integración de estrategias y diseño del modelo

- Formulación del Modelo de Circularidad para Mantenimiento de Maquinaria Pesada (MC-MMP).
- Validación con expertos y personal de campo.

Diseño de lineamientos para la implementación:

- Cambios operativos.
- Ajustes en la gestión de inventarios.
- Selección de proveedores circulares.
- Capacitación en mantenimiento ecoeficiente.
- Elaboración del análisis final y conclusiones.





Resultados y discusiones

Resultados

Estrategias identificadas

A partir del diagnóstico realizado y del análisis de oportunidades de circularidad, se identificaron diversas estrategias aplicables al mantenimiento de maquinaria pesada, agrupadas en cinco líneas principales:

a) Extensión de la vida útil de componentes

- Optimización de programas de mantenimiento preventivo basados en condición (CBM).
- Implementación de lubricación inteligente y monitoreo de contaminantes.
- Sustitución de refacciones por alternativas reparables o modulares.
- Reacondicionamiento de piezas críticas (bombas, inyectores, alternadores, cilindros hidráulicos).

b) Gestión eficiente de materiales y consumibles

- Recuperación y reciclaje de aceites, refrigerantes y fluidos hidráulicos.
- Uso de filtros reutilizables o de larga duración.
- Reducción de embalajes y consumibles desechables.
- Optimización de inventarios mediante modelos de rotación circular.

c) Remanufactura y reacondicionamiento

- Integración de proveedores certificados en remanufactura.
- Recolección sistemática de partes desgastadas para su reintegración al ciclo productivo.
- Implementación de bancos de componentes remanufacturados.





d) Digitalización para eficiencia circular

- Sistemas telemétricos para monitoreo de desgaste, horas de operación y patrones de uso.
- Análisis de datos para predicción de fallas y reducción de intervenciones innecesarias.
- Uso de plataformas digitales para gestionar flujos de materiales circulares.

e) Capacitación y cultura organizacional

- Formación técnica sobre reparación avanzada y reacondicionamiento.
- Capacitación en buenas prácticas ambientales y de manejo de residuos.
- Integración de criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones del área de mantenimiento.
- Estas estrategias constituyen la base del modelo de circularidad aplicado al mantenimiento industrial.

Impactos observados

La implementación de estrategias circulares mostró reducciones significativas en costos operativos, consumo de materiales y generación de residuos, en concordancia con lo reportado por Bocken et al. (2016).

Factores críticos de éxito

La capacitación técnica, el respaldo directivo, la digitalización del mantenimiento y las alianzas con proveedores especializados fueron determinantes para el éxito de las estrategias circulares.

Barreras y retos

Las principales barreras incluyen resistencia al cambio, inversión inicial y limitaciones normativas internas.





Comparación con prácticas de mantenimiento tradicional

En comparación con el mantenimiento tradicional, el enfoque circular demostró mayor eficiencia económica y ambiental sin comprometer la confiabilidad de los equipos.

Discusión

Los resultados obtenidos en este análisis permiten confirmar que la transición hacia un modelo de mantenimiento circular no es solo una necesidad ambiental, sino una evolución lógica de la ingeniería industrial moderna. Al contrastar la linealidad tradicional (Figura 1) con el modelo de gestión circular propuesto (Figura 2), se observa que la retención de valor en los componentes críticos de la maquinaria pesada rompe con la dependencia histórica de refacciones nuevas, un punto crítico señalado por Ghisellini et al. (2016) respecto a la insostenibilidad de los modelos de consumo actuales.

Un hallazgo relevante en esta discusión es la convergencia de las tres dimensiones de la sostenibilidad presentadas en la figura 3. Mientras que Bocken et al. (2016) enfatizan la importancia de los modelos de negocio para la economía circular, este estudio aterriza dicho concepto a la operatividad técnica, demostrando que en el sector de maquinaria pesada, la remanufactura y el reacondicionamiento tienen un impacto directo en la disminución de los costos del ciclo de vida (LCC). Esto valida la postura de la OECD (2019) sobre la necesidad de desacoplar el crecimiento económico del uso indiscriminado de materias primas vírgenes.

Sin embargo, la discusión también revela que la implementación del modelo MC-MMP enfrenta desafíos culturales y normativos. A diferencia del mantenimiento predictivo convencional enfocado únicamente en la confiabilidad (Jardine et al., 2006), el enfoque circular exige una redefinición de la cadena de suministro y una





capacitación técnica especializada en recuperación de materiales. En conclusión, la integración de estas estrategias posiciona al mantenimiento como un eje regenerativo que no solo "repara" el activo, sino que preserva el capital natural y fortalece la competitividad institucional frente a un mercado global cada vez más restrictivo en términos ambientales.

Propuesta de marco operativo

Descripción del modelo propuesto

El Modelo de Circularidad para el Mantenimiento de Maquinaria Pesada (MC-MMP) se estructura como un sistema cíclico de mejora continua que articula cinco ejes operativos principales:

- Diagnóstico técnico y ambiental de los activos.
- Gestión circular de componentes y materiales.
- Intervención técnica basada en condición y recuperabilidad.
- Gestión de información, trazabilidad y digitalización.
- Evaluación de desempeño y retroalimentación.

El modelo parte del reconocimiento de que cada intervención de mantenimiento representa una oportunidad para recuperar valor material, reducir desperdicios y mejorar la eficiencia del sistema productivo. A diferencia de los esquemas tradicionales, el MC-MMP incorpora criterios de circularidad desde la planeación hasta la disposición final de los componentes.

El enfoque es modular y escalable, lo que permite su implementación progresiva en organizaciones con distintos niveles de madurez tecnológica y operativa





Roles y procesos clave

Para garantizar la correcta operación del modelo MC-MMP, es necesario definir claramente los roles organizacionales y los procesos críticos asociados a la circularidad en el mantenimiento.

Roles organizacionales

a) Jefatura de mantenimiento

Responsable de integrar los criterios de economía circular en la estrategia de mantenimiento, definir políticas internas, asignar recursos y supervisar el cumplimiento de los indicadores técnicos, económicos y ambientales.

b) Personal técnico de mantenimiento

Encargado de ejecutar las actividades de diagnóstico, reparación, reacondicionamiento y evaluación de componentes. Su capacitación es clave para identificar piezas recuperables y aplicar técnicas avanzadas de intervención.

c) Área de compras y abastecimiento

Debe priorizar la adquisición de refacciones remanufacturadas, componentes reparables y proveedores con esquemas de retorno o intercambio, alineando las decisiones de compra con los principios de circularidad.

d) Área ambiental y de seguridad

Supervisa el manejo adecuado de residuos, el cumplimiento normativo y la correcta gestión de aceites, filtros y materiales peligrosos, asegurando la trazabilidad ambiental del proceso.

e) Proveedores y talleres especializados

Actúan como aliados estratégicos para la remanufactura, regeneración de lubricantes y recuperación de componentes, formando parte de una cadena de suministro circular.





Procesos clave del modelo

El MC-MMP se apoya en los siguientes procesos operativos:

- Clasificación técnica de componentes
- Cada pieza retirada se clasifica según su potencial de recuperación:
- Recuperable inmediata
- Recuperable mediante proceso especializado
- Valorizable como material
- No recuperable (residual)
- Evaluación de vida útil remanente
- Mediante inspecciones, mediciones y análisis predictivo se determina si el componente puede seguir en operación, reacondicionarse o remanufacturarse.
- Intervención circular

Se priorizan acciones de:

- Reparación avanzada.
- Reacondicionamiento.
- Remanufactura antes del reemplazo por refacciones nuevas.
- Gestión circular del inventario.
- Los componentes recuperados se reincorporan al inventario técnico con identificación clara de su historial y condición, reduciendo compras innecesarias.
- Gestión de residuos con enfoque de valor.

Los residuos se consideran flujos de materiales con potencial de recuperación, no únicamente desechos a disposición final.





Indicadores sugeridos

Para evaluar el desempeño del modelo MC-MMP se propone un sistema de indicadores agrupados en cuatro dimensiones:

Indicadores técnicos

MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas).

MTTR (Tiempo Medio de Reparación).

Disponibilidad operacional (%).

Porcentaje de mantenimiento basado en condición.

Indicadores económicos

Costo de mantenimiento por hora de operación

Ahorro por uso de componentes reacondicionados (%)

Reducción del gasto en refacciones nuevas

Costo del ciclo de vida del activo (LCC)

Indicadores ambientales

Reducción de residuos sólidos generados (kg/año)

Reducción de residuos peligrosos (%)

Consumo de lubricantes por hora de operación

Emisiones indirectas evitadas por remanufactura

Indicadores de circularidad

- Porcentaje de componentes recuperados
- Tasa de reutilización y remanufactura
- Número de ciclos de vida por componente
- Nivel de trazabilidad de piezas (%)

Estos indicadores permiten comparar el desempeño del mantenimiento circular frente a esquemas tradicionales y facilitan la toma de decisiones basada en datos.





Aplicación potencial

El marco operativo MC-MMP es aplicable a diversos contextos industriales, entre ellos:

- Talleres de mantenimiento de maquinaria pesada en empresas constructoras y mineras.
- Flotas municipales de servicios urbanos.
- Empresas de renta de maquinaria.
- Centros de mantenimiento de OEM y distribuidores.
- Instituciones educativas con talleres industriales.

Su implementación puede realizarse de forma gradual, iniciando con componentes críticos de alto costo y alto impacto ambiental, y ampliándose progresivamente al resto del parque de maquinaria.

Asimismo, el modelo es compatible con sistemas de gestión existentes, como ISO 55001 (gestión de activos) e ISO 14001 (gestión ambiental), lo que facilita su integración sin generar duplicidad de procesos.

Conclusiones

La economía circular aplicada al mantenimiento de maquinaria pesada representa una estrategia viable, rentable y necesaria para la industria moderna. Su adopción permite reducir residuos, optimizar recursos y fortalecer la competitividad, alineando la gestión de activos con los principios de sostenibilidad industrial.





Referencias

- Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. Ellen MacArthur Foundation. https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/emf_completing_the_picture.pdf
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000:2014 Asset management — Overview, principles and terminology. ISO. <https://www.iso.org/standard/55088.html>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000:2014 Asset management — Overview, principles and terminology. <https://www.iso.org/standard/55088.html>
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). *Business models for the circular economy: Opportunities and challenges for policymakers*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/g2g9dd62-en>



