



Universida
d de Sevilla



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



Cofinanciado por
la Unión Europea



UNIVERSIDAD DE SEVILLA
GRANT: PID2022-137748OB-C32

A2.D4.2 Procedure for incorporating the carbon and water footprint, environmental costs, and circularity indicators to the AIP tools and Apps. Milestone 2_Design

“Asset MAnagement in the new Digtal Twins environment” (AMADIT)

Date: 29/09/2025

Doc. Version: 1.0

Project Data	
REFERENCE: PID2022-137748OB-C32 TITLE: ASSET MANAGEMENT IN THE NEW DIGITAL TWIN ENVIRONMENT (AMADIT)	
Modality	Oriented research projects (type B)
Area/subarea	Main area: Industrial production, civil engineering and engineering for society / Electrical, electronic and automatic engineering. Secondary Area: Information and Communication Technologies / Computer Science and Information Technology.
Thematic priority	Digital world, industry, space and defence
IP1	Adolfo Crespo Márquez
Orcid code:	0000-0002-2027-7096
IP2	Antonio Jesús Sánchez Herguedas
Orcid code:	0000-0001-5135-3250
Beneficiary Entity	University of Seville
Centre	School of Engineering
Initial date	1/09/2023
Final date	31/08/2027
Duration	4 years
Total granted (direct costs)	192.500,00 € (154.000,00 €)

TABLE OF CONTENTS

1. RESUMEN EJECUTIVO 4

2. INTRODUCCIÓN..... 4

3. METODOLOGÍA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO..... 5

 3.1. Principios de referencia.....5

 3.2. Proceso metodológico.....6

4. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO Y DE AGUA 6

 4.1. Definiciones utilizadas en el desarrollo y alcance de las emisiones6

 4.2. Metodologías y estándares7

 4.3. Procedimiento de cálculo.....7

 4.4. Proyección futura (2030–2050).....8

5. COSTES MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS 8

 5.1. Concepto y tipología de costes ambientales.....8

 5.2. Modelos de cuantificación8

 5.3. Integración en modelos de decisión10

6. INDICADORES DE CIRCULARIDAD 10

 6.1. Conceptualización10

 6.2. Selección de indicadores aplicables11

 6.3. Procedimiento de cálculo e integración.....12

 6.4. Ejemplos de aplicación12

7. INTEGRACIÓN EN HERRAMIENTAS AIP Y APPS 12

 7.1. Arquitectura digital de referencia12

 7.2. Flujos de datos e integración con modelos AIP12

 7.3. Interfaces y usabilidad.....13

 7.4. Casos de uso demostrativos.....13

8. PROCEDIMIENTO PROPUESTO (SÍNTESIS)..... 13

9. IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS AMBIENTALES EN LA NUBE MEDIANTE GEMELO DIGITAL..... 14

 9.1. Arquitectura en la nube15

 9.2. Modelos ambientales integrados en el Gemelo Digital15

 9.3. Visualización y explotación de resultados.....16

 9.4. Beneficios de la implementación en la nube16

10.VALIDACIÓN Y RESULTADOS ESPERADOS 17

 10.1. Validación en casos de estudio17

 10.2. KPIs de seguimiento18

 10.3. Beneficios esperados18

11.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 18

 11.1. Conclusiones18

 11.2. Recomendaciones19

12.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 20

1. RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento constituye el **Entregable A2.D4.2**, cuyo objetivo es definir el procedimiento para incorporar la huella de carbono y de agua, los costes medioambientales y los indicadores de circularidad en las herramientas AIP (Asset Investment Planning) y Aplicaciones (Apps).

En el documento se desarrollan: (i) metodologías de cálculo de la huella de carbono (HC) y de la huella hídrica (HH) (ISO 14067 [1] ISO 14064-1 [2], ISO 14064-2 [3], ISO 14064-3 [4], GHG Protocol [5], ISO 14046 [6]); (ii) procedimientos de internalización de costes ambientales (incluido Green-LCC [7]); (iii) indicadores de circularidad adaptados a mantenimiento; y (iv) su integración digital en módulos AIP (IoT, gemelos digitales, AHI)[8].

Los resultados clave incluyen la formalización del enfoque Green-LCC para la toma de decisiones CAPEX y OPEX bajo criterios ambientales [7] [9], así como la integración de la huella ambiental en los gemelos digitales con el fin de monitorizar y simular diferentes escenarios [10] [11]. Además, se ha desarrollado un procedimiento metodológico estructurado en seis etapas para el cálculo, diseñado para ser replicable en distintos sectores como el transporte ferroviario, energético e infraestructuras. El impacto esperado de esta propuesta se centra en la reducción de los impactos ambientales asociados a las operaciones de mantenimiento, la optimización de costes mediante la integración de principios de circularidad y la contribución al objetivo de neutralidad climática para 2050.

2. INTRODUCCIÓN

La gestión de activos industriales y de infraestructuras se enfrenta hoy a un doble reto: garantizar la sostenibilidad ambiental y aprovechar el potencial de la digitalización. La convergencia de la transición ecológica y la transición digital abre la puerta a nuevas formas de diseñar, operar y mantener los activos, integrando criterios ambientales en el núcleo de la toma de decisiones [7].

En este contexto, el proyecto AMADIT, cuyo responsable es el grupo A2 ha identificado la necesidad de establecer un procedimiento sólido y replicable que permita integrar la huella de carbono, la huella hídrica, los costes medioambientales y los indicadores de circularidad en las herramientas AIP y Apps de los gemelos digitales diseñados para la gestión de activos y su mantenimiento. A lo largo del documento se citan las contribuciones del grupo A.2, ya publicadas, sobre este tema medioambiental y los modelos AIP.

Los modelos AIP se conciben como un ecosistema digital de soporte a la gestión inteligente de activos, compuesto por módulos de monitorización, análisis, predicción y prescripción, apoyados en IoT, big data, inteligencia artificial para ser incluidos en gemelos digitales [8]. Hasta ahora, estas herramientas están incluidas en plataformas cuyo foco principal es la optimización operativa y económica. Sin embargo, para responder a los objetivos europeos de descarbonización y economía circular, es imprescindible añadir en la plataforma una capa de sostenibilidad ambiental que se incorpore de manera nativa a las funcionalidades digitales.

El presente entregable contribuye a ese objetivo mediante la definición de un procedimiento integral que:

- Adapta las metodologías de huella ambiental (carbono y agua) al ámbito de la gestión de activos.

- Integra costes ambientales en los modelos de ciclo de vida, proponiendo el Green-LCC como extensión del LCC tradicional [9] [7].
- Define indicadores de circularidad adaptados a operaciones de mantenimiento y gestión de activos.
- Establece mecanismos de integración digital para las herramientas AIP, garantizando la interoperabilidad con otros módulos (AHI, prescriptive analytics, Systemic Impact Factor (SIF), etc.) [12] [13].

Este entregable cubre operaciones de mantenimiento y gestión de activos en los casos de estudio, desarrollando un modelo para el cálculo de huella de carbono y huella hídrica. El diseño del modelo matemático prevé el desarrollo posterior de la proyección a 2030, y la determinación de reducciones necesarias hacia 2050. Incluye costes ambientales (Social Cost of Carbon (SCC), agua) y circularidad (reutilización, reciclaje, durabilidad). El estudio de las reducciones hasta 2050 presenta muchas aristas relacionadas con la duración de los activos, el diseño de nuevos equipos y su estrada en servicio.

El documento responde a la tarea A2.T4.2, que exige cálculo de huellas de carbono e hídrica, costes ambientales e indicadores de circularidad y su integración en modelos y herramientas AIP con visión 2030–2050. El Hito 2 (Diseño) se cumple al proporcionar el procedimiento detallado, la arquitectura de integración digital y los KPIs para su validación.

El entregable presenta la siguiente estructura:

- Sección 3. Metodología general del procedimiento.
- Sección 4. Cálculo de huella de carbono y de agua.
- Sección 5. Costes medioambientales asociados.
- Sección 6. Indicadores de circularidad.
- Sección 7. Integración en herramientas AIP y Apps.
- Sección 8. Procedimiento propuesto (síntesis).
- Sección 9. Implementación de herramientas ambientales en la nube mediante gemelo digital.
- Sección 10. Validación y resultados esperados.
- Sección 11. Conclusiones y recomendaciones.
- Sección 12. Referencias bibliográficas.

Este entregable, además de cumplir con el hito de diseño, proporciona un marco metodológico práctico para que las organizaciones puedan incorporar criterios de sostenibilidad en su gestión de activos, avanzando hacia modelos de Asset Management 5.0, donde la excelencia operacional, la sostenibilidad y la digitalización convergen.

3. METODOLOGÍA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO

3.1. Principios de referencia

El procedimiento propuesto se basa en un conjunto de principios metodológicos y normativos que aseguran su coherencia con las mejores prácticas internacionales:

- Gestión de activos (ISO 55000) [14]: establece la necesidad de integrar criterios ambientales, económicos y sociales en la toma de decisiones sobre activos a lo largo de su ciclo de vida.
- Gestión ambiental (familia Normas ISO 14000): en particular ISO 14064 para cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero y ISO 14046 para huella hídrica.
- Economía circular (Plan de Acción de la UE [15], Ellen MacArthur Foundation [16]): marco de referencia para la selección de indicadores de circularidad.
- Digitalización y gemelos digitales: como tecnologías facilitadoras para capturar, procesar y representar la información ambiental de los activos [8] [17].
- Modelos de coste del ciclo de vida (LCC): ampliados con costes ambientales, dando lugar al Green-LCC (G-LCC) [7].

Estos principios se articulan dentro del concepto de herramientas y modelos AIP, entendido como un ecosistema digital que soporta la gestión de activos mediante datos en tiempo real, analítica avanzada y soporte a la decisión [9].

3.2. Proceso metodológico

El procedimiento se articula en seis etapas secuenciales, aunque interconectadas:

1. Identificación de operaciones relevantes de mantenimiento y gestión de activos que generan impactos ambientales.
2. Definición de los límites del sistema y recopilación de datos (energía, materiales, agua, residuos, emisiones).
3. Cálculo de la huella de carbono e hídrica, empleando metodologías normalizadas.
4. Valoración de costes medioambientales, mediante internalización económica de emisiones y consumos.
5. Selección y cálculo de indicadores de circularidad, adaptados a los activos y operaciones en análisis.
6. Integración en el ecosistema de modelos AIP, garantizando interoperabilidad, visualización y uso en la toma de decisiones.

El carácter modular de la metodología permite que cada etapa pueda ser desplegada progresivamente, en función del grado de madurez digital y ambiental de la organización [7] [8].

4. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO Y DE AGUA

4.1. Definiciones utilizadas en el desarrollo y alcance de las emisiones

- Huella de carbono: medida de la totalidad de gases de efecto invernadero (GHG) emitidos directa o indirectamente por una actividad, expresada en toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e).
- Huella hídrica: volumen total de agua consumida, degradada o contaminada a lo largo del ciclo de vida de un producto, servicio o proceso [7].

El procedimiento considera los tres alcances definidos por el GHG Protocol:

- Alcance 1: emisiones directas (combustibles, procesos internos).

- Alcance 2: emisiones indirectas por consumo de electricidad.
- Alcance 3: emisiones indirectas asociadas a la cadena de valor (materiales, transporte, residuos).

En el caso de la huella hídrica, se distinguen las categorías:

- Agua azul (consumo directo de fuentes superficiales o subterráneas).
- Agua verde (uso de agua de lluvia almacenada en el suelo).
- Agua gris (volumen necesario para asimilar contaminantes).

4.2. Metodologías y estándares

El procedimiento se apoya en metodologías reconocidas:

- ISO 14064-1:2018: especifica principios y requisitos para cuantificación y reporte de emisiones GHG.
- ISO 14064-2:2019: especifica con orientación a nivel de proyecto la cuantificación, el seguimiento y el informe de las reducciones de emisiones o mejoras de remoción de gases de efecto invernadero.
- ISO 14064-3:2019: establece las especificaciones con orientación para la verificación y validación de las declaraciones de gases de efecto invernadero.
- ISO 14067-1:2018: establece los requisitos y directrices para la cuantificación los gases de efecto invernadero y la huella de carbono de los productos.
- GHG Protocol (Corporate Standard): ampliamente utilizado en organizaciones y proyectos.
- ISO 14046:2014: especifica principios, requisitos y directrices para la evaluación de huella hídrica.
- Life Cycle Assessment (ISO 14040 [18], ISO 14044 [19]): estas dos normas definen las fases del análisis del ciclo de vida, es decir: objetivos y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación de los resultados.

Además, se integran herramientas de modelado digital y de software abierto (ej. *openLCA*), que permiten combinar datos de ciclo de vida con huella ambiental [9].

4.3. Procedimiento de cálculo

El procedimiento consta de los siguientes pasos:

1. Inventario de datos (Life Cycle Inventory, LCI):
 - Consumos energéticos (electricidad, combustibles).
 - Consumos de agua (m³).
 - Consumo de materiales (kg).
 - Emisiones y vertidos.
 - Residuos generados.
2. Asignación de factores de emisión/consumo:
 - Factores de emisión GHG según Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) y bases de datos nacionales.
 - Factores de huella hídrica de referencia (ej. Water Footprint Network).
3. Cálculo de resultados:
 - Emisiones totales en tCO₂e = Σ (dato de actividad × factor de emisión).

- Consumo total de agua = Σ (dato de actividad \times factor hídrico).
4. Normalización y verificación:
- Comparación con valores sectoriales de referencia.
 - Validación mediante auditoría de datos o trazabilidad digital (blockchain, registros en gemelo digital) [17].
5. Integración con modelos digitales:
- Los cálculos se incorporan al gemelo digital del activo, vinculados a su Asset Health Index (AHI), de forma que el estado de salud técnico se complementa con el estado ambiental [8].

4.4. Proyección futura (2030–2050)

El procedimiento incluye el desarrollo posterior de un módulo prospectivo que permite simular escenarios de descarbonización y gestión hídrica hacia los hitos establecidos por la UE para 2050:

- 2030: reducción del 55% de emisiones respecto a 1990 (European Green Deal).
- 2050: neutralidad climática.

Para ello, se aplican modelos de predicción apoyados en:

- Tendencias de eficiencia energética y descarbonización sectorial.
- Escenarios de transición hídrica en regiones críticas.
- Algoritmos de predicción basados en IA (Machine Learning) que permiten estimar evoluciones de consumo y emisiones [11] [20].

De esta forma, los responsables de activos podrán visualizar trayectorias de huella ambiental y planificar inversiones y acciones de mantenimiento coherentes con los objetivos de neutralidad.

5. COSTES MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS

5.1. Concepto y tipología de costes ambientales

Los costes medioambientales representan el valor económico asociado a los impactos ambientales generados durante la operación, mantenimiento y gestión de activos. Tradicionalmente no han sido incluidos en la contabilidad empresarial, pero su incorporación resulta imprescindible para reflejar de forma realista el coste total de propiedad (TCO) de un activo [7].

Se distinguen tres tipos de costes. Costes directos derivados de emisiones, vertidos, residuos, consumo de agua o materiales (ej. tasas de vertido, compra de derechos de emisión). Los costes indirectos asociados a riesgos regulatorios, reputacionales, obsolescencia tecnológica o pérdida de competitividad. Y los costes evitados, debido a ahorros por implementación de medidas de eficiencia energética, reducción de residuos o economía circular.

5.2. Modelos de cuantificación

El procedimiento prevé incorporar diferentes enfoques para la internalización de costes ambientales:

1. Coste social del carbono (SCC): monetización del daño social causado por cada tonelada de CO₂ emitida. Diversas agencias internacionales lo estiman entre 50 y 100 €/tCO₂e, con tendencia creciente hacia 2050.
2. Valor económico del agua: asignación de costes al consumo hídrico considerando escasez local, estrés hídrico y calidad del recurso. Puede incluir tanto costes de suministro como externalidades por contaminación.
3. Shadow pricing: asignación de precios internos a impactos ambientales, aunque no estén gravados por impuestos, para orientar decisiones corporativas.
4. Coste marginal de reducción: valoración de la inversión necesaria para evitar o reducir una unidad adicional de impacto ambiental.

La fórmula del Green-LCC (G-LCC) integra estos costes dentro del análisis del ciclo de vida [7].

$$G - LCC = LCC + C_{CO_2} + C_{H_2O} + C_{otros}$$

Donde:

- LCC = Coste total de ciclo de vida (financiero).
- C_{CO₂} = Coste asociado a emisiones de GHG.
- C_{H₂O} = Coste asociado a consumo y contaminación de agua.
- C_{otros} = Otros costes ambientales (residuos, acidificación, smog, etc.).

Además, la metodología de cálculo de costes propuesta se apoya en la adaptación del modelo de Woodward [21], ampliamente utilizado en estudios de análisis de costes del ciclo de vida. Este modelo permite descomponer los costes totales del activo en componentes que representan su adquisición, operación, mantenimiento, fallos y valor residual, proporcionando una estructura sistemática para el cálculo económico del ciclo de vida. En el contexto de este proyecto, el modelo ha sido extendido para incluir parámetros ambientales y de salud del activo (AHI), de modo que las decisiones económicas puedan incorporar tanto los impactos ambientales como la condición técnica del sistema.

El cálculo de costes del ciclo de vida en valor presente se expresa de acuerdo con la ecuación general:

$$LCC = IC + CO + CMP + TCPF + CMM - RV$$

donde IIC representa el coste de inversión inicial, CO los costes operativos, CMP los costes de mantenimiento preventivo, TCPF el coste total por fallo, CMM los costes de mantenimiento mayor y RV el valor residual.

En la propuesta reciente del grupo AMADIT [22], este modelo se amplía para incluir una formulación de ciclo de vida extendido (LCC-Extended), que considera los costes reales, estimados y prospectivos a lo largo de toda la vida útil del activo y su posible extensión:

$$LCC_{\{Extended\}} = C_{\{Actual\}} + C_{\{Estimated\}} + C_{\{Prospective\}}$$

De esta manera, la metodología permite incorporar escenarios de extensión de vida útil, inversiones futuras y costes de desmantelamiento, integrando a su vez los efectos de la degradación técnica y la evolución del estado del activo mediante el Asset Health Index (AHI).

5.3. Integración en modelos de decisión

La inclusión de costes ambientales permite:

- Ampliar el CAPEX/OPEX tradicional hacia un enfoque de coste total sostenible.
- Evaluar alternativas de mantenimiento no solo por su coste financiero, sino por su impacto ambiental integrado [9].
- Favorecer estrategias de servitización y circularidad, en las que el valor se mide también por la reducción de impactos.

De este modo, las herramientas AIP pueden generar salidas, representadas en “dashboards” comparativos que muestren el desempeño de diferentes estrategias (ej. sustitución vs. reacondicionamiento de un componente) tanto en términos económicos como ambientales [13].

En este marco, el Green-LCC desarrollado en el proyecto AMADIT se concibe como una evolución del modelo clásico de Woodward [21], en la que se integran los costes ambientales (huella de carbono, huella hídrica y circularidad) dentro de las categorías económicas tradicionales (CAPEX y OPEX). De este modo, el Green-LCC proporciona una visión ampliada que combina sostenibilidad económica y ambiental, permitiendo cuantificar no solo el coste financiero del activo, sino también el impacto asociado a su desempeño medioambiental.

Para aumentar la precisión del cálculo, se ha incorporado un Factor de Corrección de Frecuencia de Fallo (FC) derivado del Asset Health Index (AHI), que ajusta las tasas de fallo y los costes de mantenimiento en función del estado de salud del activo. Este factor, introducido en la investigación presentada en ESREL 2025 [22], se calcula como:

$$FC = [1 + (C \cdot H) + (C \cdot H)^2/2! + (C \cdot H)^3/3!]$$

Donde C representa una constante que define la probabilidad de fallo en la condición más desfavorable, y H es el valor del índice de salud (AHI). Cuando el AHI supera el umbral de 4, se aplica una corrección proporcional que incrementa los costes asociados a las actividades de mantenimiento y reparación. Esta corrección dinámica mejora la representatividad del modelo LCC, vinculando directamente la condición técnica del activo con su coste total y su impacto ambiental.

6. INDICADORES DE CIRCULARIDAD

6.1. Conceptualización

La economía circular promueve mantener los materiales y productos en uso durante el mayor tiempo posible, minimizando residuos y reduciendo la presión sobre los recursos naturales. En el contexto de activos industriales, la circularidad se relaciona con la durabilidad, reutilización, reciclabilidad y eficiencia en el uso de materiales [7].

6.2. Selección de indicadores aplicables

Existen múltiples marcos de referencia para medir circularidad, como los indicadores de la Ellen MacArthur Foundation, el Material Circularity Indicator (MCI) o los indicadores del Circular Economy Monitoring Framework de la UE.

Para el caso de la gestión de activos y mantenimiento, el procedimiento propone indicadores adaptados a operaciones concretas:

1. % de materiales reciclados o reutilizados en operaciones de mantenimiento.
2. Duración media de componentes frente a su vida útil de diseño.
3. Tasa de reacondicionamiento frente a sustitución (ratio de componentes reparados + reutilizados vs. sustituidos por nuevos).
4. Eficiencia de recursos = output funcional del activo / input material y energético.
5. Tasa de valorización de residuos (material recuperado sobre total de residuos).
6. Índice de circularidad de activos (ICA): métrica compuesta que integra vida útil, reutilización y reciclaje.

Un estudio más específico fue realizado sobre el transporte ferroviario, considerando la posibilidad de utilizar ciertos indicadores:

Las locomotoras (diésel, eléctricas o híbridas) tienen impactos significativos en energía, emisiones y mantenimiento. Los indicadores recomendados:

- Huella de carbono (kg CO₂-eq), debido al consumo de combustible o electricidad durante operación.
- Consumo de energía primaria (MJ o kWh), incluyendo la energía para fabricación, operación y mantenimiento.
- Potencial de calentamiento global (GWP), para comparar tecnologías (diésel vs eléctrica).
- Emisiones de NOx y partículas (kg), especialmente relevante en locomotoras diésel.
- Huella hídrica (m³), por procesos de fabricación y limpieza.
- Tasa de reciclabilidad (%), de componentes como baterías, motores, chasis.

En vagones de pasajeros o mercancías, aunque tienen un menor impacto operativo, son relevantes en materiales y mantenimiento. Se pueden utilizar los indicadores:

- Consumo de materiales (kg), acero, aluminio, plásticos, etc.
- Huella de carbono (kg CO₂-eq), en fabricación y mantenimiento.
- Potencial de acidificación (kg SO₂-eq), por procesos industriales en la fabricación.
- Potencial de eutrofización (kg PO₄³⁻-eq), por vertidos o procesos químicos.
- Tasa de reciclabilidad (%), de estructuras, revestimientos, sistemas eléctricos.

En sistemas auxiliares (climatización, señalización, control eléctrico) instalados sobre locomotoras y vagones, el impacto es más difuso pero importante en eficiencia energética y residuos electrónicos. Se podrían considerar los siguientes indicadores:

- Consumo energético (kWh), en operación continua.
- Huella de carbono (kg CO₂-eq), por componentes electrónicos y refrigerantes.

- Potencial de toxicidad humana/ecotoxicidad, por el uso de metales pesados y sustancias peligrosas.
- Tasa de valorización energética (%), en residuos electrónicos al final de vida útil.

6.3. Procedimiento de cálculo e integración

El procedimiento para incorporar indicadores de circularidad en los modelos AIP incluye realizar:

1. Un Inventario de materiales y componentes de cada activo (estructurado en su gemelo digital).
2. Un Registro digital de operaciones de mantenimiento, identificando si implican sustitución, reacondicionamiento o reciclaje [17].
3. El Cálculo automático de ratios mediante algoritmos en las herramientas AIP.
4. La Visualización en “dashboards”, junto con indicadores de huella ambiental y costes.

6.4. Ejemplos de aplicación

- En mantenimiento ferroviario, la ratio de reacondicionamiento vs. sustitución permite medir hasta qué punto se aprovechan bogies, ruedas y sistemas auxiliares [17] [20].
- En convertidores energéticos, la duración media de condensadores o Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) frente a su vida útil de diseño refleja la eficacia de estrategias de mantenimiento preventivo [9].
- En subestaciones eléctricas, la tasa de valorización de residuos procedentes de transformadores o interruptores ayuda a evaluar la circularidad del sistema [13].

7. INTEGRACIÓN EN HERRAMIENTAS AIP Y APPS

7.1. Arquitectura digital de referencia

El Asset Investment Planning (AIP) está compuesto de modelos y/o herramientas que presentan un enfoque estructurado para planificar inversiones en activos a medio y largo plazo, considerando no solo factores financieros y técnicos, sino también ambientales, sociales y regulatorios.

Las herramientas AIP permiten:

- Priorizar proyectos de inversión en función del riesgo, la criticidad y el impacto ambiental.
- Evaluar alternativas de renovación, sustitución o reacondicionamiento de activos bajo criterios de coste del ciclo de vida (LCC y Green-LCC).
- Simular escenarios prospectivos hasta 2030–2050, alineados con objetivos de descarbonización.

En este marco, la integración de huellas ambientales, costes medioambientales e indicadores de circularidad se convierte en un componente clave para que los planes de inversión respondan tanto a objetivos de rentabilidad como de sostenibilidad.

7.2. Flujos de datos e integración con modelos AIP

El procedimiento define la incorporación de la capa ambiental a los modelos de AIP tradicionales, mediante:

1. Datos técnicos y operativos de los activos (fiabilidad, disponibilidad, estado físico).
2. Datos ambientales (huella de carbono, huella hídrica, indicadores de circularidad).
3. Conversión económica de impactos ambientales en costes (SCC, coste del agua, etc.).
4. Integración en modelos de decisión de inversión: Green-LCC, TCO ampliado, análisis multicriterio.

De esta forma, cada modelo AIP evoluciona desde una herramienta de priorización financiera/técnica hacia un modelo integral de planificación sostenible de inversiones en activos [7] [9].

7.3. Interfaces y usabilidad

Los modelos, herramientas o aplicaciones AIP deben facilitar la interpretación sencilla de información compleja. Para ello se proponen:

- Dashboards integrados: visualización de KPIs económicos, técnicos y ambientales en un mismo entorno.
- Alertas prescriptivas: notificaciones cuando un indicador ambiental supera un umbral definido (ej. huella de carbono excesiva de un componente, ratio de sustitución superior a lo planificado).
- Simulación de escenarios: capacidad de evaluar alternativas de mantenimiento bajo criterios de Green-LCC [7].
- Reporting automatizado: generación de informes conforme a estándares (ej. EU Taxonomy, Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)).

7.4. Casos de uso demostrativos

1. Ferrocarril. Mantenimiento de vía y material rodante.
 - Integración de sensores y algoritmos de predicción de la corrugación en la superficie del carril [20].
 - Visualización de la huella de carbono asociada a operaciones de esmerilado, sustitución de carriles y reacondicionamiento.
 - Dashboards que comparan coste financiero vs. coste ambiental en sustitución de componentes [17].
2. Energía. Subestaciones eléctricas.
 - Aplicación del Systemic Impact Factor (SIF) para priorizar activos críticos considerando impacto ambiental [13].
 - Integración de indicadores de circularidad en transformadores y aparataje.
3. Infraestructuras. Puentes y carreteras.
 - Uso del Asset Health Index (AHI) extendido con huella de carbono y circularidad [8].
 - Planificación de mantenimiento predictivo minimizando costes ambientales a largo plazo.

8. PROCEDIMIENTO PROPUESTO (SÍNTESIS)

Se ha diseñado un procedimiento para incorporar la huella de carbono y de agua, los costes ambientales y los indicadores de circularidad en las herramientas AIP. A continuación, se resume el procedimiento en seis fases:

Fase 1. Identificación y modelado del activo.

- Descripción del activo en su gemelo digital (estructura jerárquica, componentes, materiales).
- Determinación de operaciones críticas de mantenimiento.

Fase 2. Captura de datos ambientales

- Recogida de datos primarios (energía, agua, materiales, residuos).
- Integración con fuentes secundarias (factores de emisión, bases de datos LCA).

Fase 3. Cálculo de huellas ambientales

- Aplicación de ISO 14064 (CO₂) y 14046 (agua).
- Cálculo automatizado mediante algoritmos implementados en la AIP.

Fase 4. Internalización de costes ambientales

- Monetización de emisiones y consumos mediante SCC y shadow pricing [7].
- Cálculo de Green-LCC (G-LCC).

Fase 5. Cálculo de indicadores de circularidad

- Definición de indicadores (durabilidad, ratio de reacondicionamiento, reciclaje).
- Cálculo automático a partir de registros digitales de mantenimiento [17].

Fase 6. Integración en AIP y soporte a la decisión

- Incorporación de KPIs en “dashboards”.
- Emisión de recomendaciones prescriptivas basadas en SIF y AHI extendidos [13].
- Reporting alineado con taxonomía UE y ODS.

Roles y responsabilidades

- Responsable de activos: define límites y objetivos ambientales.
- Equipo de mantenimiento: recopila y valida datos de operación.
- Equipo ambiental: asegura consistencia metodológica en huellas y costes.
- Equipo digital: integra algoritmos y visualizaciones en AIP.

9. IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS AMBIENTALES EN LA NUBE MEDIANTE GEMELO DIGITAL

La integración de los cálculos de huella de carbono, huella hídrica, costes medioambientales e indicadores de circularidad en herramientas Asset Investment Planning (AIP) requiere no solo metodologías de cálculo, sino también un soporte digital robusto que permita su

despliegue operativo y escalable. Para ello, el proyecto ha implementado estas herramientas dentro de una plataforma en la nube basada en Gemelo Digital, desplegada en Azure IoT Central.

Este enfoque convierte al Gemelo Digital en el núcleo donde confluyen los datos físicos, los modelos técnicos y los indicadores ambientales, asegurando una visión integrada y dinámica del activo. De este modo, se garantiza que las métricas ambientales no queden como un ejercicio teórico, sino que se utilicen en la operación real y en la planificación de inversiones.

9.1. Arquitectura en la nube

La arquitectura del Gemelo Digital se ha estructurado siguiendo marcos de referencia internacionales (RAMI 4.0 [23], ISO 23247 [24]) y se ha materializado en un sistema jerárquico de dispositivos digitales en Azure IoT Central, caracterizado por estar compuesto por 4 niveles o estructuras:

- Nivel físico: activo real (por ejemplo: convertidores de potencia en uno de los casos de uso desarrollado).
- Nivel 1. Ingesta de datos: a partir de sensores y sistemas de monitorización. Esta ingesta puede ser directa en un proceso más avanzada o simulada (al no disponer aún de un equipo físico que suministre su información).
- Nivel 2. Reestructuración de datos: organización en estructuras virtuales (equipo completo, subsistema, componente).
- Nivel 3. Modelos y algoritmos: ejecución de modelos de activos de monitorización (AMM), comportamiento (ABM), aprendizaje automático (AML), fiabilidad (RAMS), índice de salud (AHI) y coste de ciclo de vida (LCC). Aquí se han incorporado también los módulos ambientales.
- Nivel 4. Interfaces y visualización: dashboards interactivos, salidas exportables en JSON y conexión con herramientas Business Intelligent como Power BI.

Esta arquitectura modular permite escalabilidad (extender el Gemelos digitales a flotas completas), interoperabilidad (con ERP, CMMS, SCADA) y flexibilidad para integrar nuevos modelos ambientales sin alterar la estructura global.

9.2. Modelos ambientales integrados en el Gemelo Digital

El Gemelo Digital no se limita a indicadores técnicos de salud y fiabilidad, sino que al incorporar en el diseño una capa ambiental se integra en los modelos existentes, permitiendo el cálculo de:

- La huella de carbono (CO₂): cálculo en tiempo real a partir de consumos energéticos, materiales y operaciones de mantenimiento. Se vincula al LCC ambiental (Green-LCC), internalizando el coste social del carbono (SCC).
- La huella hídrica: integración de consumos directos e indirectos de agua, normalizados con factores internacionales (Water Footprint Network, ISO 14046).
- Los costes medioambientales: monetización de impactos mediante precios sombra y metodologías de internalización (SCC, coste del agua). Estos datos se conectan con el módulo LCC & Corr_Cost de IoT Central, de manera que la degradación técnica se traduce en coste ambiental proyectado.

- Los indicadores de circularidad: ratio de reacondicionamiento frente a sustitución, porcentaje de materiales reciclados y duración efectiva de componentes. Estos indicadores se incorporan en la configuración del Asset Health Index (AHI), de forma que el estado ambiental complementa al estado técnico.

Con esta integración, el Gemelo digital se convierte en un sistema integral de análisis técnico-económico-ambiental.

La implementación práctica de este modelo en la plataforma en la nube se ha realizado siguiendo las directrices metodológicas definidas en González-Prida et al. [22], integrando el cálculo LCC–AHI–ambiental dentro del módulo LCC & Corr_Cost del Gemelo Digital. Gracias a esta integración, la plataforma Azure IoT Central permite calcular y actualizar de forma automática los parámetros económicos y ambientales de cada activo, basándose en los datos en tiempo real procedentes de sensores y registros de mantenimiento.

Este modelo digitalizado incluye la actualización automática de los costes de repuestos, mano de obra y energía, así como la estimación de pérdidas de producción y disponibilidad asociadas a cada evento de fallo. De igual modo, el AHI se utiliza para ajustar los factores de corrección de frecuencia de fallo, lo que permite actualizar las proyecciones del ciclo de vida y los costes ambientales en función del estado operativo del equipo.

Asimismo, la integración en la nube posibilita la automatización del proceso de servitización, permitiendo que las organizaciones adopten modelos de negocio basados en servicios y desempeño ambiental, donde las decisiones de mantenimiento e inversión se fundamentan en la combinación de indicadores técnicos, económicos y de sostenibilidad.

9.3. Visualización y explotación de resultados

La plataforma Azure ofrece diferentes interfaces que permiten la explotación práctica de los indicadores ambientales:

- **Online_View:** visualización en vivo de consumos, emisiones y huellas ambientales, junto con indicadores de salud técnica y modos de fallo.
- **AHI_LCC_Corr_View:** cuadro de mando integrado que relaciona el estado de salud del activo (AHI) con el coste total de ciclo de vida (LCC) y los costes ambientales internalizados. Permite observar cómo la degradación técnica incrementa simultáneamente costes financieros y ambientales.
- **PM & MM_View:** vista consolidada del Plan de Mantenimiento Inteligente, que incluye escenarios comparativos de impacto económico y ambiental para diferentes estrategias de mantenimiento (preventivo, correctivo, predictivo).
- **Exportación de datos (JSON):** los resultados se generan en formato estándar y se integran en herramientas corporativas de Business Intelligence (Power BI), facilitando la toma de decisiones de inversión en el marco del AIP.

De este modo, las herramientas ambientales se convierten en KPIs operativos dentro del mismo entorno digital que ya usan los equipos de operación y mantenimiento.

9.4. Beneficios de la implementación en la nube

La implementación de los módulos ambientales en un Gemelo Digital basado en nube proporciona beneficios concretos:

- Centralización: todos los indicadores técnicos, económicos y ambientales se gestionan en un único entorno digital.
- Escalabilidad: la arquitectura permite ampliar fácilmente la cobertura a más equipos, plantas o infraestructuras.
- Retroalimentación bidireccional: los datos del activo real alimentan al gemelo digital y las simulaciones generan recomendaciones ambientales que pueden retroalimentar la operación.
- Reducción de incertidumbre: gracias al uso de Hardware-in-the-Loop (HIL) y simulaciones, es posible calcular huellas ambientales incluso en ausencia de datos reales iniciales.
- Alineamiento estratégico: el uso de nube e interfaces BI facilita la integración con políticas corporativas de sostenibilidad y reporting normativo (CSRD, Taxonomía UE).

El despliegue en Azure IoT Central demuestra que la incorporación de herramientas ambientales AIP no es un concepto teórico, sino una realidad práctica. El Gemelo Digital se convierte en el espacio donde convergen la información técnica, económica y ambiental, habilitando decisiones de inversión alineadas con los objetivos de sostenibilidad y digitalización.

En definitiva, esta implementación constituye un hito del proyecto, ya que materializa en la nube la propuesta metodológica desarrollada en este entregable, asegurando su aplicabilidad real en entornos industriales y de infraestructuras.

10. VALIDACIÓN Y RESULTADOS ESPERADOS

10.1. Validación en casos de estudio

El procedimiento ha sido contrastado en tres contextos sectoriales representativos:

1. Sector ferroviario
 - Aplicación en el mantenimiento de maquinaria ferroviaria de reparación de vías (bateadoras y perfiladoras en proyecto DFMAS).
 - Desarrollo de un gemelo digital que integra huella de carbono de operaciones de esmerilado y sustitución de carriles [17] [20].
 - Validación mediante comparación de escenarios: sustitución completa vs. Reacondicionamiento, considerando el ahorro al mejorar la huella de carbono y la reducción del Green-LCC.
2. Sector energético (subestaciones eléctricas y convertidores)
 - Inclusión del Systemic Impact Factor (SIF) para priorizar fallos considerando factores de seguridad, fiabilidad y medioambientales [13].
 - Resultados: mejor focalización de recursos en equipos cuya criticidad combinada técnica-ambiental es mayor, reduciendo riesgos de interrupciones y emisiones asociadas.
 - El modelo LCC-AHI-ambiental [22], se ha aplicado en el caso de los convertidores de potencia utilizados en sistemas de almacenamiento energético. La aplicación práctica de esta metodología ha permitido demostrar la viabilidad de integrar datos de fiabilidad, salud del activo y costes ambientales en un mismo entorno digital, validando el enfoque combinado de análisis económico y sostenibilidad. Los resultados obtenidos evidencian mejoras significativas en la precisión del

cálculo del coste del ciclo de vida, así como en la toma de decisiones de inversión orientadas a sostenibilidad.

3. Infraestructuras civiles (puentes y carreteras)

- Uso del Asset Health Index (AHI) extendido con parámetros ambientales [8].
- Se comprobaron reducciones en emisiones anuales y en consumo de agua mediante decisiones basadas en mantenimiento predictivo optimizado.

10.2. KPIs de seguimiento

El procedimiento define un conjunto de Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) que permiten evaluar su impacto:

- tCO₂e evitadas por año.
- m³ de agua ahorrados por año.
- % de costes ambientales internalizados en el Green-LCC.
- % de componentes reacondicionados frente a sustituidos.
- Índice o tasa de circularidad de activos (ICA).
- Cumplimiento de objetivos de reducción alineados con las metas europeas y españolas para 2030 y 2050.

10.3. Beneficios esperados

La aplicación del procedimiento definido en este entregable no se limita a la obtención de indicadores ambientales o a la generación de nuevos módulos dentro de las herramientas AIP. Su verdadero valor reside en los beneficios que aporta a las organizaciones, tanto en el corto como en el largo plazo, al integrar sostenibilidad, eficiencia y digitalización en la gestión de activos. Estos beneficios se manifiestan en varias dimensiones complementarias que abarcan aspectos ambientales, económicos, sociales y tecnológicos, garantizando que las decisiones de inversión y mantenimiento se alineen con los objetivos de transición ecológica y digital. Estos beneficios se pueden catalogar en cuatro categorías:

- Ambientales: reducción de emisiones y consumo de agua, alineación con neutralidad climática.
- Económicos: optimización del ciclo de vida mediante reducción de costes ocultos, incremento de eficiencia de recursos [7].
- Sociales: aumento de transparencia y rendición de cuentas frente a stakeholders.
- Digitales: incorporación de nuevas capas de inteligencia ambiental en las plataformas, mediante el uso de herramientas AIP, reforzando su rol del gemelo digital como herramienta de mantenimiento 5.0.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1. Conclusiones

En primer lugar, el documento se ha definido un procedimiento estandarizado para integrar de manera coherente la huella de carbono, la huella hídrica, los costes medioambientales y los indicadores de circularidad en los modelos y herramientas AIP y Apps. Este procedimiento se apoya en metodologías internacionales reconocidas, lo que asegura su robustez y aplicabilidad en distintos sectores.

En segundo lugar, la propuesta metodológica combina de forma complementaria enfoques normativos, económicos y digitales. Por un lado, se han incorporado estándares internacionales como ISO 14040, ISO 14044, ISO 14046, ISO 14064, ISO 14067 y el GHG Protocol. Por otro, se ha integrado la valoración económica de los impactos a través del Green-LCC, que extiende el análisis de ciclo de vida tradicional con la internalización de costes ambientales. Finalmente, se han introducido tecnologías digitales avanzadas como gemelos digitales, IoT e inteligencia artificial, que facilitan el cálculo, la monitorización y la integración de la información ambiental en los procesos de planificación de inversiones.

En tercer lugar, la validación del procedimiento en casos de estudio reales (ferrocarril, energía e infraestructuras) demuestra no solo su viabilidad técnica, sino también su utilidad práctica. Los resultados obtenidos reflejan beneficios concretos, como la reducción significativa de emisiones de CO₂, el ahorro de agua y la mejora en la circularidad de materiales, así como la optimización del coste total de propiedad. Esto confirma que la metodología no se limita a un marco teórico, sino que puede aplicarse en entornos operativos reales con resultados tangibles.

Finalmente, el enfoque propuesto supone un avance importante hacia la convergencia de la transición ecológica y la transición digital en la gestión de activos. Al incorporar indicadores ambientales dentro de los modelos AIP, las organizaciones no solo refuerzan su capacidad de tomar decisiones de inversión más eficientes, sino que también alinean dichas decisiones con los objetivos de descarbonización y economía circular fijados para 2030 y 2050. Este paso representa un hito hacia la evolución del Asset Management 5.0, donde la sostenibilidad, la eficiencia económica y la digitalización confluyen en un mismo marco estratégico.

Con este documento, el proyecto cumple con el Entregable A2.D4.2, proporcionando un procedimiento completo, detallado y validado para la incorporación de criterios ambientales en las herramientas AIP y Apps, asegurando su alineación con los objetivos de sostenibilidad, eficiencia y digitalización de la gestión de activos.

11.2. Recomendaciones

Tras el desarrollo del procedimiento y su validación en distintos casos de estudio, resulta necesario ofrecer una serie de recomendaciones que orienten la implantación práctica de este marco en organizaciones que gestionan activos. Estas recomendaciones no solo buscan facilitar la adopción progresiva de la metodología, sino también asegurar que la integración de criterios ambientales en los modelos AIP se realice con rigor, continuidad y visión de largo plazo. Además, se pretende que las entidades puedan maximizar el valor obtenido, tanto en términos de eficiencia económica como de sostenibilidad, alineando sus estrategias de inversión con los objetivos de neutralidad climática y economía circular marcados por la Unión Europea para 2030 y 2050. Estas recomendaciones las hemos dividido en seis grupos:

- Escalar progresivamente la implantación del procedimiento, comenzando por activos críticos y extendiendo posteriormente al conjunto de la organización.
- Fortalecer la calidad de los datos mediante estrategias de sensorización, trazabilidad y auditoría digital.
- Adoptar políticas de precios sombra internos para sensibilizar a la organización sobre el coste real de las emisiones y consumos.

- Incorporar formación y capacitación en sostenibilidad digital para equipos de mantenimiento y gestión de activos.
- Promover la interoperabilidad con otros estándares de reporte (CSRD, EU Taxonomy, ODS) para maximizar la utilidad de la información ambiental.
- Desarrollar simulaciones prospectivas hacia 2050, que permitan evaluar la contribución de las operaciones de mantenimiento a los objetivos de neutralidad climática.

Tras resultados obtenidos en los estudio realizados, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a mejorar el desempeño ambiental del sistema como el ferroviario y a facilitar la integración de criterios de sostenibilidad en el diseño, operación y planificación de maquinaria ferroviaria:

1. Incorporar el G-LCC como herramienta de apoyo en la toma de decisiones técnicas y estratégicas, tanto en la fase de diseño como en la evaluación de alternativas tecnológicas, con el fin de identificar oportunidades de reducción de impactos ambientales desde una perspectiva integral.
2. Priorizar el uso de materiales reciclables y de bajo impacto ambiental en la fabricación de locomotoras y vagones, fomentando el ecodiseño y la selección de proveedores que cumplan con criterios de sostenibilidad y trazabilidad de emisiones.
3. Optimizar el consumo energético durante la operación, mediante la electrificación progresiva del parque ferroviario, la mejora de la eficiencia de los sistemas de tracción y la integración de fuentes de energía renovable en la infraestructura de suministro.
4. Reducir la huella hídrica asociada a procesos de mantenimiento y limpieza, mediante la implementación de tecnologías de reutilización de agua, sistemas de lavado en seco y gestión eficiente de recursos hídricos en instalaciones ferroviarias.
5. Establecer sistemas de monitoreo ambiental continuo, que permitan registrar y analizar indicadores clave como emisiones de GEI, consumo energético, generación de residuos y uso de agua, facilitando la trazabilidad y mejora continua del desempeño ambiental.
6. Fomentar la colaboración entre administraciones públicas, operadores ferroviarios, fabricantes y centros de investigación, con el objetivo de desarrollar metodologías estandarizadas, bases de datos sectoriales y herramientas digitales que faciliten la aplicación del G-LCC en el sector ferroviario.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Management" I 207 "Environmental. ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. 2018.
- [2] ISO/TC 207 “Environmental management.” ISO 14064-1:2018 Greenhouse gases -- Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. 2018.
- [3] ISO/TC 207 “Environmental management.” ISO 14064-2 - Greenhouse gases -- Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements. 2019.
- [4] ISO/TC 207 “Environmental management.” ISO 16064-3 - Greenhouse gases - Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements. 2019.
- [5] WBCSD, WRI. The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting

- Standard. 2012.
- [6] ISO/TC 207 “Environmental management.” ISO 14046:2014. Management environmental. Water footprint. Principles, requirements and guidelines. 2014.
- [7] González-Prida V, Sánchez-Herguedas A, Mena-Nieto Á. Exploring the Carbon Footprint ’s Effect on Life Cycle Costs with Digitalization’s Support. CongrEGA 2024. Sustain. Digit. Innov. Eng. Asset Manag. Ref., Lisbon: 2024, p. 1–6.
- [8] Candón Fernández E, Crespo Márquez A, López AJG, Fort EH. Framework for Asset Digitalization: IoT Platforms and Asset Health Index in Maintenance Applications. Appl Sci 2025;15. <https://doi.org/10.3390/app15031524>.
- [9] González-Prida V, de la Fuente Carmona A, Guillén López AJ, Gómez Fernández JF, Crespo Márquez A. Integrating Digitalization and Asset Health Index for Strategic Life Cycle Cost Analysis of Power Converters. Inf 2024;15. <https://doi.org/10.3390/info15120749>.
- [10] Galán-Cano L, Cámara-Aceituno J, Terrados-Cepeda J, Hermoso-Orzáez MJ, Barragán-Escandón EA, Mena-Nieto Á. Exploring energy scenarios and driving forces of CO2 emissions of regions: The case of a southern region of Spain through LEAP analysis. Energy Reports 2025;13:4563–85. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.03.065>.
- [11] Ordieres-Meré J, Sánchez-Herguedas A, Mena-Nieto Á. A Data-Driven Monitoring System for a Prescriptive Maintenance Approach: Supporting Reinforcement Learning Strategies. Appl Sci 2025;15:1–26. <https://doi.org/10.3390/app15126917>.
- [12] Gómez Fernández JF, Candón Fernández E, Márquez AC. A Structured Data Model for Asset Health Index Integration in Digital Twins of Energy Converters. Energies 2025;18. <https://doi.org/10.3390/en18123148>.
- [13] Rodríguez M, Crespo A, González-Prida V. Enhancing Prescriptive Capabilities in Electrical Substations: A Systemic Impact Factor Approach for Failure Impact Analysis. Energies 2024;17. <https://doi.org/10.3390/en17040770>.
- [14] ISO/TC 251 “Asset Management.” ISO 55000. Asset management. Vocabulary, overview and principles. 2024.
- [15] EUROPEAN, COMMISSION. A new Circular Economy Action Plan. vol. COM(2020). 2020.
- [16] Ellen MacArthur Foundation. Improving climate emissions accounting to accelerate the circular economy transition. 2025.
- [17] Sánchez-Herguedas A, Guillén-López A, Wideberg J. Development of a digital twin for the certification of railway machinery under Regulation (EU) 2019/779. Transp Res Procedia 2025;86:305–12. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.04.039>.
- [18] ISO/TC 207 “Environmental management.” ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. 2006.
- [19] ISO/TC 207 “Environmental management.” ISO 14044:2006. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines. 2006.
- [20] Haghbin M, Chiachío J, Muñoz S, Escalona Franco JL, Guillén AJ, Crespo Marquez A, et al. Predicting Rail Corrugation Based on Convolutional Neural Networks Using Vehicle’s Acceleration Measurements. Sensors 2024;24. <https://doi.org/10.3390/s24144627>.
- [21] Woodward DG. Life cycle costing - Theory, information acquisition and application. Int J Proj Manag 1997;15:335–44. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00089-0](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00089-0).

- [22] González-Prida V, de la Fuente A, Gómez JF, Crespo A. A Practical Approach to Service-Oriented Life Cycle Cost considering Asset Health Index and Digitalization in Power Converters. Proc. of the 33rd Eur. Saf. Reliab. 33th Soc. Risk Anal. Eur. Conf., 2025, p. P4281. https://doi.org/10.3850/978-981-94-3281-3_ESREL-SRA-E2025-P4281-cd.
- [23] DIN. DIN SPEC 91345:2016-04 Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). 2016. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.31030/2436156>.
- [24] ISO/TC 184/SC 4 - Industrial data. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. 2021.