



Modelo técnico para la transición de mantenimiento convencional a sostenible implementado en la industria.

Grupo de investigación en diseño y manufactura – Dima, Universidad Industrial de Santander -UIS.
Carrera 27 Calle 9.

E.mail: jorge2202327@correo.uis.edu.co - diana2203113@correo.uis.edu.co -
laura2194095@correo.uis.edu.co - pacuevel@uis.edu.co

Bucaramanga – Colombia

Resumen

Las normativas actuales para la gestión de mantenimiento carecen de lineamientos técnicos/prácticos claros para aplicación de sostenibilidad. Este trabajo da cuenta de esta problemática actual, y plantea que se debe diseñar un modelo técnico que integre las estrategias sostenibles y que éstas puedan ser medibles mediante indicadores que relacionen análisis del ciclo de vida, sostenibilidad, economía circular con los indicadores actuales de mantenimiento.

Introducción

El mantenimiento industrial ha evolucionado desde enfoques correctivos hacia modelos más avanzados de predicción impulsados por tecnologías de la Industria 4.0 y 5.0. Sin embargo, la necesidad de transitar hacia una la industria sostenible [1], [2], [3] el mantenimiento desde la sostenibilidad se ha vuelto crucial ante los retos globales de sostenibilidad [4] y las crecientes demandas regulatorias.

Este documento propone que debe realizarse un modelo técnico para facilitar esta transición, alineando las prácticas actuales con objetivos de sostenibilidad y economía circular. Se analizan las bases conceptuales del mantenimiento, su situación actual en la industria, y los pasos necesarios para superar las limitaciones hacia la sostenibilidad. Asimismo, se presentan herramientas como indicadores clave de desempeño (KPI) y el análisis de ciclo de vida de activos, junto con una hoja de ruta práctica para implementar un mantenimiento sostenible que mejore la gestión de activos y contribuya a

un futuro más responsable con el medio ambiente.

1. Mantenimiento en la industria

La digitalización junto con avances en robótica, tecnología 5G e inteligencia artificial (IA), están transformando el mantenimiento industrial, al permitir el monitoreo en tiempo real, la predicción de fallas y la optimización de recursos, logrando una reducción de tiempos de inactividad [5]

Aunque en la práctica la industria no a la vanguardia con este avance tanto en Europa como en Estados Unidos y Colombia, aún se realiza mucho correctivo, menos del 50% es preventivo o predictivo, hay pocas empresas con software de mantenimiento, que nos conduce a que en al práctica aún estamos en la generación 2 de mantenimiento, aunque se tengas tecnologías 5.0, no se ha tenido una buena integración, debido a una mala evolución en las prácticas de mantenimiento porque se ha pretendido pasar de la generación 1 a la 5 sin hacer correctamente las anteriores[6], [7], [8].

1.1. Mantenimiento desde el Plan Nacional de Desarrollo.

En el PND 2022 – 2026 se encuentra entre sus objetivos la búsqueda de energías limpias y sostenibilidad en las industrias nacionales, como se observa en el capítulo de: una economía extractivista a una sostenible y productiva para una política de Reindustrialización, hacia una economía del conocimiento, incluyente y sostenible [9].

Sin embargo, en el PND no se mencionan lineamientos para aplicar en el mantenimiento en la industria, pero al realizar la transición de mantenimiento convencional a uno sostenible por medio de un modelo se puede cumplir dicho objetivo abordado en el Plan Nacional de Desarrollo. Además de alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en lo que respecta a la gestión de recursos, la reducción de emisiones y la gestión eficiente de residuos.

1.2. Mantenimiento convencional

Históricamente, el mantenimiento industrial ha avanzado en términos del desarrollo en la industria, evolucionando de primera a cuarta generación, en donde se ha basado en enfoques tradicionales que no siempre consideran la sostenibilidad, como se muestra en la línea de tiempo pasando en esta evolución de un mantenimiento correctivo a uno predictivo en la gestión de activos ubicando el mantenimiento de cuarta generación en una industria 4.0 [10][11] (ver Fig 1) . El enfoque tradicional de mantenimiento se refiere a mantener el activo físico sin falla en su vida útil, mantener y/o alargar su vida útil, usar técnicas y estrategias para garantizar disponibilidad requerida y minimizar mantenibilidad, entre otros, centrándose el mantenimiento convencional solo en la línea industrial.

Sin embargo, la evolución de la cuarta generación del mantenimiento 4.0 que usa las tecnologías avanzadas, como la Inteligencia Artificial (IA), el Big Data y la automatización para el mantenimiento de sus activos, hacia la quinta generación del mantenimiento, esto es mantenimiento 5.0 dado el avance hacia la industria 5.0, nos lleva a abandonar prácticas convencionales y 5.0 ha introducido nuevas tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), el Big Data, la inteligencia artificial y la automatización. Con estos enfoques de mantenimiento pueden reducir los costos y

aumentar la productividad y las condiciones de seguridad en las líneas de producción [5].

Con los datos recuperados de sensores de alta velocidad, variabilidad, veracidad, volumen y valor a través de un análisis exhaustivo- pueden generar pronósticos de producción, facilitar la gestión del mantenimiento, proporcionar información de los equipos y crear un proceso de fabricación digital, resiliente y sostenible. Las intervenciones digitales antes mencionadas, conocidas como Industria 4.0 promueven la digitalización al mejorar las innovaciones digitales, la interoperabilidad y la integración de datos [5].

Con las tecnologías facilitadoras en esta industria, se contribuye a proporcionar la información necesaria para la fabricación sostenible, y podrían convertirse en propulsores clave en la búsqueda de la gestión sostenible y del ciclo de vida de los activos [12]. Lo anterior surge con la necesidad de reorientar las industrias impulsadas por la tecnología hacia un ecosistema sostenible, resiliente, centrado en el ser humano e impulsado por el valor, lo que se entiende como Industria 5.0 [5]

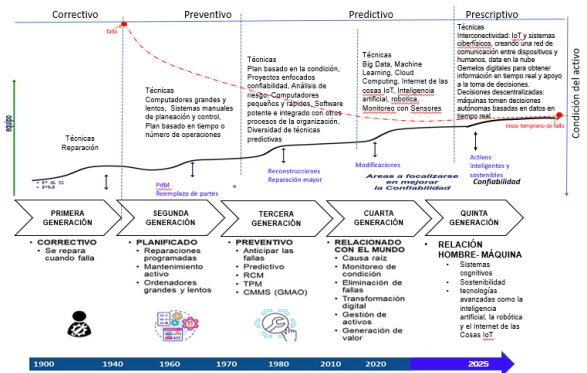


Fig 1. Evolución del mantenimiento [13], [14], [15], [16].

1.3. Estado actual del mantenimiento en la industria.

Actualmente se ha aumentado la investigación en torno al mantenimiento en la industria con respecto a años atrás [17], abordando enfoques

como mantenimiento 4.0, 5.0, sostenibilidad, entre otras.

Mediante el análisis de la literatura y las normativas relacionadas con el mantenimiento, se puede obtener una visión general sobre el estado actual del mantenimiento industrial orientado a la sostenibilidad, lo que facilita la identificación de directrices que incorporen este cambio impulsado por la Industria 5.0. Pero en la práctica la realidad es otra, hay mucha instrumentación, pero en muchos casos industriales donde la confiabilidad es prioridad, en donde el mantenimiento aún esta en primera y segunda generación, aunque se tenga sensores 5.0 [6].

Y enfocándolo en elementos rotatorios, que se convierten en piezas críticas para el funcionamiento de estas. Entre estos elementos, los rodamientos son los más propensos al desgaste debido a su función clave en el movimiento, por lo cual el mantenimiento en los mismos es crucial. El mantenimiento predictivo busca anticipar fallos antes de que ocurran, y en el contexto de la Industria 4.0, se han logrado avances significativos en la recopilación y análisis de datos. En particular, las señales de vibración se han convertido en una herramienta fundamental para predecir el deterioro de los rodamientos mediante técnicas avanzadas, permitiendo una gestión más eficiente y precisa de los equipos [18]. A pesar de la creciente atención prestada a estos temas de investigación en los últimos años, los impactos relacionados con el mantenimiento sobre la sostenibilidad tienen que ser mejor investigados y considerados en la gestión del mantenimiento [12], además de que todavía algunas industrias están empezando a aplicar las nuevas tecnologías traídas con el mantenimiento 4.0 y 5.0.

2. Mantenimiento para asegurar la sostenibilidad desde la normativa.

Con base en el análisis en las normativas en torno al mantenimiento discutidas en esta

sección, es importante señalar que el mantenimiento no solo son actividades de reparación, sino también una parte integral de los sistemas de gestión de proyectos, debido a que la dirección futura del mantenimiento considera tres dimensiones de la sostenibilidad: costo, impacto ambiental y social[19].

2.1. Prácticas actuales de sostenibilidad en la industria.



Fig 2. Impacto en los ODS con las practicas sostenibles.

En el ámbito industrial, las normas internacionales desempeñan un papel clave para garantizar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de las organizaciones. Actualmente, las normas más utilizadas en las empresas para evidenciar que están cumpliendo con los requisitos de sostenibilidad planteados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [20] (ver Tabla 1), a nivel internacional es la ISO 14001, y a nivel nacional, diversas adaptaciones que refuerzan este compromiso (ver Fig 2). A su vez algunas normas de manera indirecta abordan la sostenibilidad.

La ISO 55000, centrada en la gestión de activos, busca optimizar su valor a lo largo de todo su ciclo de vida mediante un enfoque estratégico y basado en riesgos [21]. En paralelo, la gestión ambiental y la sostenibilidad son abordados por normas como la ISO 14001, que establece sistemas de gestión ambiental [22], y la ISO 14064-1:2020, que define principios y requisitos para la cuantificación y reporte de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [23]. Más recientemente, la ISO 59020:2024 ha



emergido como una herramienta para medir y evaluar el desempeño en circularidad, facilitando la transición hacia una economía circular, clave en los sistemas económicos modernos [24]. Al mismo tiempo, el aprovisionamiento adecuado de piezas de repuesto contribuye a la sostenibilidad al prolongar la vida útil de los productos, reducir residuos al optimizar el uso de recursos como se ve reflejado en la norma UNE-EN 62550:2017 [25]aborda específicamente la gestión de piezas de repuesto dentro de las actividades de soporte técnico, asegurando la continuidad de los procesos productivos.

Por otro lado, la gestión de comunidades y la sostenibilidad son consideradas en normas como la ISO 37101, que define los requisitos para promover el desarrollo sostenible en comunidades [26].

La responsabilidad social también encuentra su marco en la ISO 26000, que guía a las organizaciones en la implementación de prácticas responsables que beneficien a la sociedad y al medio ambiente [27]. Asimismo, la ISO 9001 establece los requisitos para los sistemas de gestión de calidad [28].

Aunque estas normas son diversas y abarcan aspectos fundamentales para la industria, es evidente que el mantenimiento sostenible aún carece de directrices específicas y un marco consolidado.

La revisión de la literatura muestra que, aunque hay una gran variedad de normas que regulan la industria en términos de sostenibilidad, aún no se han desarrollado directrices específicas para el mantenimiento sostenible. Existen regulaciones en áreas como el diseño, la adquisición responsable y la gestión del ciclo de vida (ver la Tabla I), entre otras más. No obstante, no se tienen lineamientos claros en lo que respecta al mantenimiento sostenible.

Tabla I. Revisión de normas que abordan la sostenibilidad.

GTC 265:2024	Directrices para abordar la sostenibilidad en las normas técnicas colombianas
GTC 213:2011	Guía de sostenibilidad en las etapas de producción y procesamiento de biomasa en la cadena de biocombustibles en Colombia.
GTC 314:2020	Marco para la implementación de los principios de la economía circular en las organizaciones.
NTC 6611:2022	Criterios mínimos para comparar análisis del ciclo de vida de edificaciones para su uso en códigos, normas y sistemas de calificación de construcción.
GTC-ISO 20400:201	Compras sostenibles. Directrices.

2.2. Prácticas actuales de sostenibilidad - economía circular en el mantenimiento.

La responsabilidad extendida del productor (REP) surge como una estrategia de protección ambiental que tiene por objetivo alcanzar un impacto disminuido por cada producto haciendo responsable al productor por todo su ciclo de vida. Este concepto se genera de la interpretación de dos principios internacionales del derecho ambiental: (i) el principio de prevención y (ii) el principio contaminador-pagador (Dulanto, 2017). Es por esto que dicha ley en el título III, artículo del 12 al 14 (Ley 1278, 2016) anota: «*Los fabricantes, importadores, distribuidores y comerciantes se involucran activamente, según corresponda, a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida del producto, a participar de uno o más procesos del manejo de los residuos sólidos, priorizando su recuperación y valorización*». La economía circular es un fenómeno recientemente definido para las industrias ecológicas y que es fundamental para entender

y poner en marcha el mantenimiento 5.0 al igual que la responsabilidad extendida.

Al igual que otros modelos de desarrollo sostenible, la economía circular aborda el desacoplamiento, la eficiencia de los recursos, la eficiencia de la producción, flujos de materiales más lentos en lugar de modelos económicos lineales y una menor extracción de recursos sin reducir la actividad económica [29] (ver Fig 3). El fin de una economía circular se está fortaleciendo y recuperando por diseño y objetivos para mantener los productos, componentes y materiales en su máxima utilidad y valor [30] Y estas se logran si se entiende que el diseño duradero, el mantenimiento, la reparación, la reutilización, la refabricación, la restauración y el reciclaje son las formas de lograr la economía circular [31]. La evaluación del ciclo de vida es probablemente el marco metodológico más importante para medir la sostenibilidad. Sobre la base de las normas ISO 14040/14044, ha evolucionado una amplia gama de enfoques más específicos, como la huella de carbono/hídrica y la declaración ambiental del producto, u otros conceptos integrados, como la huella ambiental del producto, la economía circular y la huella ambiental organizacional.

Huella Circular se plantea para medir la reutilización y el reciclaje, ya que son las dos estrategias clave para avanzar hacia la circularidad. En este sentido, la Comisión Europea ha trabajado en estas cuestiones y ha desarrollado la llamada Fórmula de la Huella Circular (FHC).



Fig 3. Impacto en los ODS en la economía circular del mantenimiento.

3. ¿Cómo llevar a cabo una transición del mantenimiento convencional al mantenimiento sostenible en la industria?

La sostenibilidad desde los ODS en la industria es un pilar fundamental, ya que es una necesidad para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos. En este contexto, transformar las prácticas de mantenimiento convencional hacia un enfoque sostenible es un paso clave para reducir el impacto ambiental, mejorar la eficiencia operativa y garantizar un futuro más responsable [32].

Para esto es necesario una transición del mantenimiento convencional a uno sostenible, para ello se lleva a cabo los siguientes pasos ilustrados en la Fig 4.



Fig 4. Pasos para una transición de mantenimiento convencional a uno sostenible.

En el esquema se aprecia el uso del método *Kaizen*, dado que su aplicación sigue un enfoque de mejora continua en cada etapa del proceso, lo cual nos indica que las filosofías ya usadas en mantenimiento deben integrarse y no perder lo ya ganado en la evolución de la ingeniería del mantenimiento.

3.1. Limitaciones del mantenimiento hacia la sostenibilidad.

Se suele identificar una falta de formación adecuada para el personal al momento de realizar un proceso de transición, lo que puede

afectar la eficiencia y correcta adaptación a los cambios.

Actualmente, no se ha establecido con claridad qué Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) corresponden al mantenimiento sostenible, lo que genera desafíos en su integración estratégica. Además, esta es la necesidad de crear indicadores clave de desempeño (KPI) que cuantifiquen el impacto de manera efectiva.

En un ítem anterior se ha evidenciado que hay una carencia de lineamientos claros en el ámbito normativo, lo que genera incertidumbre y dificulta la correcta aplicación de estándares en mantenimiento sostenible.

4. Modelo práctico de implementación de mantenimiento sostenible.

En la Fig 5 se muestra el modelo propuesto que relaciona los casos para la aplicación en la industria, con el análisis de ciclo de vida e impactos del activo físico con la falla potencial en el tiempo, en donde es fundamental instrumentar con tecnologías 4.0 y 5.0 para cumplir con los retos de sostenibilidad y economía circular. Esto ofrece una solución rentable y sostenible para que las industrias conserven el rendimiento y la confiabilidad de su material y a su vez reducen su impacto en el medioambiente.

4.3. KPI's indicadores de mantenimiento sostenibles a implementar.

El Mantenimiento Sostenible debe contribuir a la minimización de los impactos ambientales y sociales de un sistema, a la reducción de los costes del ciclo de vida, ciclo de vida del activo y a la mejora de la durabilidad de los equipos y del bienestar socioeconómico.

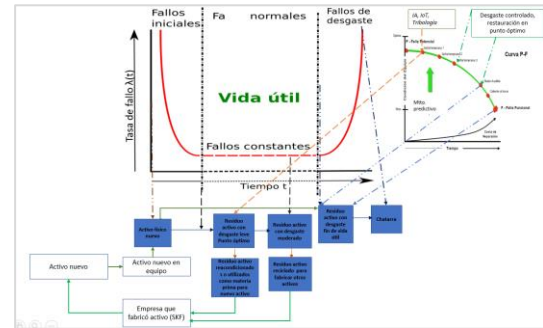


Fig 5. Esquema práctico de integración de sostenibilidad en mantenimiento.

Sin embargo, el mantenimiento todavía se centra en los KPI (indicadores clave de rendimiento) convencionales, como la productividad, la fiabilidad y la disponibilidad, pero no en los indicadores de rendimiento de sostenibilidad.

Para cambiar la visión convencional del mantenimiento, es necesario integrar los KPI sostenibles en el proceso de toma de decisiones de mantenimiento [12]. La norma GTC 265 presenta directrices para abordar la sostenibilidad en las normas técnicas colombianas teniendo en cuenta los ODS [33]. En base a lo anterior se generan indicadores clave de desempeño sostenibles (KPI's sostenibles) generales para el mantenimiento en elementos mecánicos, en los cuales se aborda los ODS con los objetivos 7 – energía asequible y no contaminante, 8 – trabajo decente y crecimiento económico, 9 – industria innovación e infraestructura, 11 – ciudades y comunidades sostenibles, y el 12 – producción y consumo responsable [32]. Se puede ver la relación directa o indirecta de estos con los KPI's planteados en el esquema de la Fig 6.

Por medio de los KPI's generales se da lugar a una base para el desarrollo de más indicadores para medir la sostenibilidad dentro del mantenimiento en otros elementos mecánicos, como el ejemplo mostrado en la Fig 7 para rodamientos [34].



Fig 6. KPI's sostenibles generales para el mantenimiento en elementos mecánicos.



Fig 7. KPI's sostenibles para el caso de un rodamiento de bolas, con lubricantes a base de litio.

5. Ruta práctica para gestión de activos.

Generar una norma con conceptos mantenimiento, ya que las normativas actuales de directrices claras tanto conceptuales como técnicas, un caso de éxito como SKF, que ha desarrollado un esquema de economía circular enfocado en el reacondicionamiento de rodamientos, con el objetivo de prolongar su vida útil y reducir el impacto ambiental. Este proceso implica restaurar los rodamientos a sus especificaciones originales mediante la

reutilización, reparación o sustitución de componentes, disminuyendo así la necesidad de fabricar nuevos productos y las emisiones de CO₂ asociadas. SKF ha desarrollado un esquema de economía circular enfocado en el reacondicionamiento de rodamientos, con el objetivo de prolongar su vida útil y reducir el impacto ambiental. Este proceso implica restaurar los rodamientos a sus especificaciones originales mediante la reutilización, reparación o sustitución de componentes, disminuyendo así la necesidad de fabricar nuevos productos y las emisiones de CO₂ asociadas, en donde los indicadores claves son medir huella de carbono y circularidad de la empresa [8], [34], [35], [36].

6. Conclusiones.

La implementación de mantenimiento sostenible implica integración de todas las generaciones de mantenimiento hasta una instrumentación hacia el mantenimiento predictivo con tecnologías 5.0 como IA, IoT, entre otros. Además, cambiar la cultura empresarial de hacer responsablemente el mantenimiento de los activos físicos, esto es que el activo cumpla su vida útil o en el mejor de los casos se alargue, y que se tome conciencia que al realizar estas prácticas reducimos el consumo de recursos no renovables y, por ende, el impacto ambiental y económico.

REFERENCIAS

- [1] Minciencias, *Transición energética, productividad y sostenibilidad. Focos de energías sostenibles. Volumen 10*. 2019.
- [2] N. M. V. Flórez-Zapata, M. A. Murcia López, y L. P. Arce Castellanos, "Bioeconomía y transiciones hacia la sostenibilidad", 2022. doi: 10.21068/26193124.1119.
- [3] M. de medio ambiente y desarrollo sostenible Colombia, "Resolucion 1407 de 2018 Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible", 2018.



- [4] M. Ghaleb y S. Taghipour, “Assessing the impact of maintenance practices on asset’s sustainability”, *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 228, núm. December 2021, p. 108810, 2022, doi: 10.1016/j.res.2022.108810.
- [5] P. Mallioris, E. Aivazidou, y D. Bechtsis, “Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic multi-sector mapping”, el 1 de junio de 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.cirpj.2024.02.003.
- [6] Infraspeak, “Estadísticas y tendencias de mantenimiento 2025 • Infraspeak Blog”. Consultado: el 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.infraspeak.com/es/mantenimiento-estadisticas-desafios-tendencias/>
- [7] Infraspeak, “Tendencias del mantenimiento industrial para 2022–2030”. Consultado: el 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.infraspeak.com/es/mantenimiento-industrial/>
- [8] ADVANCED TECHNOLOGY SERVICES, “2020-State-of-Industrial-Maintenance-Report-1”, 2020. Consultado: el 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.advancedtech.com/wp-content/uploads/2020/05/2020-State-of-Industrial-Maintenance-Report-1.pdf](https://www.advancedtech.com/wp-content/uploads/2020/05/2020-State-of-Industrial-Maintenance-Report-1.pdf)
- [9] Gobierno del cambio, *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. Colombia, 2022, pp. 195–203. [En línea]. Disponible en: www.dnp.gov.co
- [10] TRACTIAN, “El mantenimiento en la industria 4.0: el rol del software de gestión”. [En línea]. Disponible en: <https://traction.com/es/blog/mantenimiento-industria-4-rol-software-gestion>
- [11] Oficina Asesora de Planeación y Estudios Sectoriales, “Aspectos básicos de la industria 4.0”, 2019. Consultado: el 26 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-124767_recurso_1.pdf](https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-124767_recurso_1.pdf)
- [12] C. Franciosi, B. Iung, S. Miranda, y S. Riemma, “Maintenance for Sustainability in the Industry 4.0 context: a Scoping Literature Review”, vol. 51, núm. 11, pp. 903–908, ene. 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.459.
- [13] Norma Española UNE-EN, *Mantenimiento Terminología del mantenimiento UNE-EN_13306=2018*. 2018.
- [14] C. González y Aeromarine, “Gestión del mantenimiento_ caso de éxito en el sector naval – Software GMAO”. Consultado: el 16 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://software.aeromarine.es/gestion-del-mantenimiento-caso-de-exito-en-el-sector-naval/>
- [15] Fractal, “El Mantenimiento 5.0 y la era del mantenimiento inteligente”. [En línea]. Disponible en: <https://www.fractal.com/es/blog/mantenimiento-5.0>
- [16] Gonzalo Suarez y Suarez, *Evolución del mantenimiento industrial*, (2024). Consultado: el 26 de enero de 2025. [En línea Video]. Disponible en: https://www.linkedin.com/posts/gonzalosys_mantenimiento-industrial-activity-7073024744693899264-lyEY/?originalSubdomain=es
- [17] Scopus, “Análisis de documentos”, ene. 2025. Consultado: el 11 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.scopus-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=818bdb627e2408ebded7347d7b921d2d&sot=a&sdt=a&sl=56&s=%28TITLE-ABS-KEY%28maintenance%29+AND+TITLE-ABS-KEY%28industry%29%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results](https://www.scopus.com/bibliotecavirtual.uis.edu.co/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=818bdb627e2408ebded7347d7b921d2d&sot=a&sdt=a&sl=56&s=%28TITLE-ABS-KEY%28maintenance%29+AND+TITLE-ABS-KEY%28industry%29%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results)
- [18] M. Alonso-Gonzalez, V. G. Diaz, B. Lopez Perez, B. Cristina Pelayo G-Bustelo, y J. P. Anzola, “Bearing Fault Diagnosis With Envelope Analysis and Machine Learning Approaches Using CWRU Dataset”, *IEEE Access*, vol. 11, jun. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3283466.
- [19] D. A. Bouabid, H. Hadeif, y F. Innal, “Maintenance as a sustainability tool in high-risk process industries: A review and future



- directions”, *J Loss Prev Process Ind*, vol. 89, jul. 2024, doi: 10.1016/j.jlp.2024.105318.
- [20] ONU, “Objetivos de Desarrollo Sostenible Manual de referencia Sindical sobre la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”. Consultado: el 29 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pactomundial.org/noticia/agenda-2030-de-la-onu-hacia-donde-vamos/>
- [21] ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *Gestión de activos. Vocabulario, visión general y principios. NTC-ISO 55000:2024*. 2024, pp. 1–14.
- [22] ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso. NTC-ISO 14001:2015*. 2021, pp. 1–40.
- [23] ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. NTC-ISO 14064-1:2020*. 2020, pp. 1–55.
- [24] ISO - International Standards Organization, *Circular economy — Measuring and assessing circularity performance. ISO 59020:2024*. 2024, pp. 1–78.
- [25] IEC - International Electrotechnical Commission, *Spare parts provisioning. IEC 62550:2017*. International Electrotechnical Commission, 2017, p. 113.
- [26] ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *Desarrollo sostenible en las comunidades. Sistema de gestión para el desarrollo sostenible. Requisitos con orientación para su uso. NTC-ISO 37101:2016*. 2024, pp. 1–38.
- [27] ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *Guía de responsabilidad social. GTC-ISO 26000:2019*. 2019, pp. 1–137.
- [28] ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos. NTC-ISO 9001:2015*. 2015, pp. 1–33.
- [29] A. McCarthy, R. Dellink, y R. Bibas, “The Macroeconomics of the Circular Economy Transition”, abr. 2018. doi: 10.1787/af983f9a-en.
- [30] P. Europeo - www.europarl.europa.eu, “¿Cómo quiere la UE lograr una economía circular para 2050? | Noticias | Parlamento Europeo”, 2050.
- [31] M. A. Camilleri, “Case Study 5: Closing the Loop of the Circular Economy for Corporate Sustainability and Responsibility”, en *Corporate Sustainability, Social Responsibility and Environmental Management*, Springer International Publishing, 2017, pp. 175–190. doi: 10.1007/978-3-319-46849-5_10.
- [32] ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *GTC-ISO 26000:2019*. p. 13. Consultado: el 22 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=76038>
- [33] ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, *Directrices para abordar la sostenibilidad en las normas técnicas colombianas. GTC 265:2024*. 2024, pp. 1–31.
- [34] SKF, “Dar nueva vida a los rodamientos _ SKF”. Consultado: el 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.skf.com/co/industries/railways/delivering-for-sustainable-railway/railvolutionary-updates/breathing-new-life-into-bearings>
- [35] SKF, “Reacondicionar rodamientos reduce costos y emisiones. _ Evolution”. Consultado: el 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://evolution.skf.com/es/el-reacondicionamiento-de-rodamientos-reduce-costos-y-emisiones-de-co2/>
- [36] SKF, “Crece la demanda de rodamientos reacondicionados por SKF _ Evolution”. Consultado: el 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://evolution.skf.com/es/el-reacondicionamiento-una-tendencia-creciente/>



Hoja de Vida

Paula Cuervo Velásquez, PhD. más de 10 años de experiencia en la supervisión y ejecución de proyectos investigación aplicada en mantenimiento y tribología, para la resolución de problemas industriales, tanto a nivel nacional como internacional, las instituciones con las que ha colaborado son Universidad Nacional de Colombia, Metro de Medellín, Procopal, Instituto de Investigación y Capacitación del Plástico y del Caucho–ICIPC, (Colombia); Universidad de Sheffield, RAEng (Reino Unido); Instituto Politécnico Nacional (México); Universidad de São Paulo, Amsted Macion-VALE, Universidad Federal de Tecnología–UTFPR (Brasil); EURECA (España), entre otras.

Diana Carolina Pardo López. Ingeniera Mecánica finalizando estudios, perteneciente al grupo de investigación DIMA (Grupo de investigación en diseño y manufactura), con participación en el semillero de mantenimiento y en el semillero de energías renovables con una ponencia en el evento científico internacional U24 FEST. Con un acercamiento a la industria de inspección y mantenimiento con una pasantía en la empresa INFRAER S.A.S. en Barrancabermeja.

Laura Sofía Monroy Morales. Estudiante de último semestre de Ingeniería Mecánica. Ha sido miembro activo del Semillero de Energías Renovables y Descarbonización, donde colaboró en la elaboración de un documento presentado en el evento científico internacional U24 Fest. También forma parte del Grupo de Investigación en Diseño y Manufactura

(DIMA). Y actualmente, se desempeña como practicante en el área de Mantenimiento en Enel, Codensa.

Jorge Esteban León Rincón. Estudiante de ingeniería mecánica (finalizando estudios), integrante actual del grupo de investigación de diseño y manufactura (DIMA) con participación en el semillero de mantenimiento, auxiliar académico en la asignatura de Ingeniería de mantenimiento dirigiendo los laboratorios de ensayos no destructivos.

<p>Jorge Esteban León Rincón Oficina: UIS Celular: 3118377778 E. mail: jorge2202327@correo.uis.edu.co Ciudad: Bucaramanga País: Colombia</p>
<p>Diana Carolina Pardo López Oficina: UIS Celular: 3209337615 Residencia: Carrera 25, 8-16 E. mail: diana2203113@correo.uis.edu.co Ciudad: Bucaramanga País: Colombia</p>
<p>Laura Sofía Monroy Morales Oficina: UIS Celular: 3138095199 E. mail: laura2194095@correo.uis.edu.co Ciudad: Bucaramanga País: Colombia</p>
<p>Paula Andrea Cuervo Velásquez Oficina: UIS Celular: 3042913381 E. mail: pacuevel@uis.edu.co Ciudad: Bucaramanga País: Colombia</p>