

# Innovación Tecnológica y Gestión de Activos en la Industria Cementera: Mantenimiento Inteligente

Nelson Condorena Avila\*  
Carla Kaune Sarabia\*\*  
Efrain Santalla\*\*\*

## Resumen

La industria cementera, en su constante búsqueda de mayor eficiencia y calidad, se enfrenta al reto de adaptarse a la creciente demanda global de materiales de construcción. En este contexto, la innovación tecnológica emerge como un recurso fundamental para asegurar la competitividad y rentabilidad de estas empresas en un mercado en constante evolución. Un aspecto crítico en la gestión de esta industria es el mantenimiento de activos, que tradicionalmente se ha basado en enfoques convencionales como el mantenimiento preventivo y correctivo, fundamentados principalmente en parámetros de tiempo y desgaste. Sin embargo, estas prácticas han evidenciado limitaciones considerables en términos de costos, eficiencia operativa y tiempos de inactividad no programados. Por contraste, la adopción del mantenimiento inteligente, que incorpora tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT) y el análisis de datos, habilita una supervisión constante y una gestión predictiva de activos en tiempo real. A pesar

---

### Palabras clave:

*Innovación, gestión, activos, mantenimiento, industria cementera.*

### Keywords:

*Innovation, management, assets, maintenance, cement industry.*

### Palavras chave:

*Inovação, gestão, ativos, manutenção, indústria de cimento.*

\* Profesor de la Universidad Mayor de San Andrés - Bolivia. Correo: nelsoncondorenaavila@gmail.com | <https://orcid.org/0000-0002-2415-8932>

\*\* Profesor de la Universidad Mayor de San Andrés - Bolivia. Correo: ckaune@hotmail.com | <https://orcid.org/0000-0002-2589-6734>

\*\*\* Profesor de la Universidad Mayor de San Andrés - Bolivia. Correo: esantalla@umsa.bo | <https://orcid.org/0000-0002-8934-4859>

de los innegables beneficios del mantenimiento inteligente, su implementación plantea desafíos considerables, incluyendo una inversión inicial significativa en tecnología y capacitación especializada en análisis de datos. La seguridad de los datos también constituye una preocupación constante. Además, la optimización de las actividades de mantenimiento mediante sistemas de gestión de activos computarizados (CMMS) se ha revelado como una estrategia efectiva, facilitando una planificación más precisa y una asignación eficaz de recursos. La industria del cemento, al abrazar estas innovaciones tecnológicas en su gestión de activos y mantenimiento, se encuentra en una posición óptima para cosechar beneficios sustanciales en términos de eficiencia y rentabilidad. Se plantea como objetivo del presente trabajo analizar la implementación y efectividad del mantenimiento inteligente en la industria del cemento, con un enfoque en la optimización de la eficiencia operativa y la reducción de costos, manteniendo al mismo tiempo una producción sostenible y de alta calidad.

### **Abstract**

The cement industry, in its constant search for greater efficiency and quality, faces the challenge of adapting to the growing global demand for construction materials. In this context, technological innovation emerges as a fundamental resource to ensure the competitiveness and profitability of these companies in a constantly evolving market. A critical aspect in the management of this industry is asset maintenance, which has traditionally been based on conventional approaches such as preventive and corrective maintenance, based mainly on time and wear parameters. However, these practices have shown considerable limitations in terms of costs, operational efficiency and unscheduled downtime. In contrast, the adoption of smart maintenance, which incorporates advanced technologies such as the Internet of Things (IoT) and data analytics, enables constant monitoring and predictive management of assets in real time. Despite the undeniable benefits of smart maintenance, its implementation poses considerable challenges, including a significant initial investment in technology and specialized training in data analysis. Data security is also a constant concern. Furthermore, the optimization of maintenance activities through computerized asset management systems (CMMS) has been revealed as an effective strategy, facilitating more precise planning and efficient resource allocation. The cement industry, by embracing these technological innovations

in its asset management and maintenance, is optimally positioned to reap substantial benefits in terms of efficiency and profitability. The objective of this work is to analyze the implementation and effectiveness of intelligent maintenance in the cement industry, with a focus on optimizing operational efficiency and reducing costs, while maintaining sustainable and high-quality production.

## **Resumo**

A indústria cimenteira, na sua constante procura por maior eficiência e qualidade, enfrenta o desafio de se adaptar à crescente procura mundial de materiais de construção. Neste contexto, a inovação tecnológica surge como um recurso fundamental para garantir a competitividade e rentabilidade destas empresas num mercado em constante evolução. Um aspecto crítico na gestão desta indústria é a manutenção de ativos, que tradicionalmente tem sido baseada em abordagens convencionais como a manutenção preventiva e corretiva, baseada principalmente em parâmetros de tempo e desgaste. No entanto, estas práticas têm apresentado limitações consideráveis em termos de custos, eficiência operacional e paragens não programadas. Em contrapartida, a adoção da manutenção inteligente, que incorpora tecnologias avançadas como a Internet das Coisas (IoT) e a análise de dados, permite o monitoramento constante e a gestão preditiva dos ativos em tempo real. Apesar dos benefícios inegáveis da manutenção inteligente, a sua implementação coloca desafios consideráveis, incluindo um investimento inicial significativo em tecnologia e formação especializada em análise de dados. A segurança dos dados também é uma preocupação constante. Além disso, a otimização das atividades de manutenção através de sistemas informatizados de gestão de ativos (CMMS) tem-se revelado uma estratégia eficaz, facilitando um planeamento mais preciso e uma alocação eficiente de recursos. A indústria do cimento, ao abraçar estas inovações tecnológicas na sua gestão e manutenção de ativos, está idealmente posicionada para colher benefícios substanciais em termos de eficiência e rentabilidade. O objetivo deste trabalho é analisar a implementação e eficácia da manutenção inteligente na indústria cimenteira, com foco na otimização da eficiência operacional e na redução de custos, mantendo uma produção sustentável e de alta qualidade.

## Introducción

En el contexto de una creciente demanda global de materiales de construcción, la industria del cemento se enfrenta a desafíos persistentes que requieren una mejora constante de su eficiencia operativa y la reducción de costos, mientras se asegura una producción sostenible y de alta calidad. La innovación tecnológica emerge como un factor crítico para impulsar la competitividad y la rentabilidad de las empresas en este mercado en constante evolución.

El mantenimiento de los activos industriales desempeña un papel crucial en el rendimiento y la confiabilidad de los procesos productivos en la industria cementera. La adopción de enfoques tradicionales de mantenimiento en esta industria, que históricamente se han basado en criterios de tiempo y desgaste de los equipos, ha revelado una serie de limitaciones significativas que han impactado negativamente en la operatividad y la rentabilidad de las empresas del sector (Zamora, 2022).

En primer lugar, el mantenimiento basado en el tiempo a menudo conduce a inspecciones y tareas de mantenimiento programadas de manera regular, sin tener en cuenta las condiciones reales de los activos. Esto significa que, en muchos casos, se realizan intervenciones de mantenimiento cuando podrían no ser necesarias, lo que resulta en costos innecesarios en términos de piezas de repuesto, mano de obra y tiempo de inactividad de la maquinaria. La falta de adaptabilidad a las condiciones reales de funcionamiento puede llevar a un gasto excesivo y una utilización subóptima de los recursos (Ponsot y Zambrano, 2023).

En segundo lugar, el enfoque basado en el desgaste también presenta desafíos significativos. Con este enfoque, las intervenciones de mantenimiento se realizan cuando los equipos han alcanzado un cierto nivel de desgaste predefinido. Aunque puede parecer una estrategia lógica, esto puede conducir a un mayor riesgo de fallas inesperadas (Razzeto, 2022). La maquinaria puede desgastarse de manera impredecible, y esperar hasta que se alcance un umbral de desgaste puede resultar en tiempos de inactividad no planificados costosos y reparaciones de emergencia, lo que afecta negativamente la eficiencia operativa y la rentabilidad (Zamora, 2022).

Además, estos enfoques tradicionales no aprovechan las ventajas de las tecnologías modernas y el acceso a datos en tiempo real. La falta de monitoreo continuo y análisis de datos significa que las empresas pueden perder oportunidades para detectar y abordar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas costosas (Razzeto, 2022). Esto es especialmente relevante en una industria como la del cemento,

donde la operación continua y eficiente de la maquinaria es esencial para cumplir con las demandas del mercado y mantener la competitividad.

En medio de esta disyuntiva, la transición hacia el mantenimiento inteligente, basado en tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de datos, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, plantea preguntas cruciales como: ¿Puede esta transformación tecnológica revolucionar verdaderamente la industria del cemento? ¿Puede anticipar fallos, mejorar la disponibilidad y reducir los costos de mantenimiento de manera efectiva? ¿Cuáles son los obstáculos y riesgos asociados a esta transformación? Estas interrogantes generan un debate fundamental sobre la necesidad de cambios sustanciales en la gestión de activos en la industria cementera, donde la innovación tecnológica podría ser tanto una solución como un desafío.

El objetivo del presente trabajo es analizar de manera detallada la implementación y efectividad del mantenimiento inteligente en la industria del cemento, con un enfoque en la optimización de la eficiencia operativa y la reducción de costos, manteniendo al mismo tiempo una producción sostenible y de alta calidad. Se emplea una metodología mixta que combina la recopilación y análisis de datos de fuentes primarias y secundarias, como informes de empresas del sector, registros de mantenimiento, datos operativos y estudios de caso. Además, se lleva a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con la innovación tecnológica, la gestión de activos y el mantenimiento inteligente en la industria del cemento. Este enfoque metodológico permite obtener una visión integral de la relación entre la innovación tecnológica y la gestión de activos en esta industria, así como identificar las mejores prácticas y desafíos para la implementación exitosa del mantenimiento inteligente.

### **Mantenimiento Inteligente: ¿Una respuesta emergente?**

El mantenimiento inteligente tiene la capacidad de evaluar el estado real de los activos en función de datos en tiempo real, lo que significa que las intervenciones se programan cuando realmente son necesarias, en lugar de en función de un calendario fijo (Cárdenas et al., 2022). Esto puede evitar la sustitución prematura de componentes y reducir los costos operativos a largo plazo. Además, al prever fallas potenciales, se pueden realizar reparaciones proactivas, lo que minimiza los tiempos de inactividad no planificados y mejora la eficiencia general de las operaciones. Sin embargo, la adopción del mantenimiento inteligente no es un camino único ni carente de desafíos. Algunos pueden argumentar que las inversiones iniciales en tecnologías avanzadas son costosas y que la capacitación del personal es fundamental.

Además, la seguridad de los datos y la ciberseguridad son preocupaciones cruciales cuando se trata de la implementación de sistemas de monitoreo en red y el análisis de datos en tiempo real (Cárdenas et al., 2022).

El avance de la innovación tecnológica ha transformado numerosos sectores industriales, y la industria cementera no es una excepción. En este contexto, la gestión de activos y el mantenimiento juegan un papel crucial para garantizar la eficiencia operativa, minimizar los tiempos de inactividad no planificados y maximizar la vida útil de los equipos en la industria cementera (Quispe y Sucari, 2022). Como ejemplo, en la figura 1, se muestra un dashboard con información de mantenimiento (Indicadores de rendimiento) generada en la nube de Microsoft con la herramienta Power BI.

**Figura 1.**  
Dashboard en POWER BI.



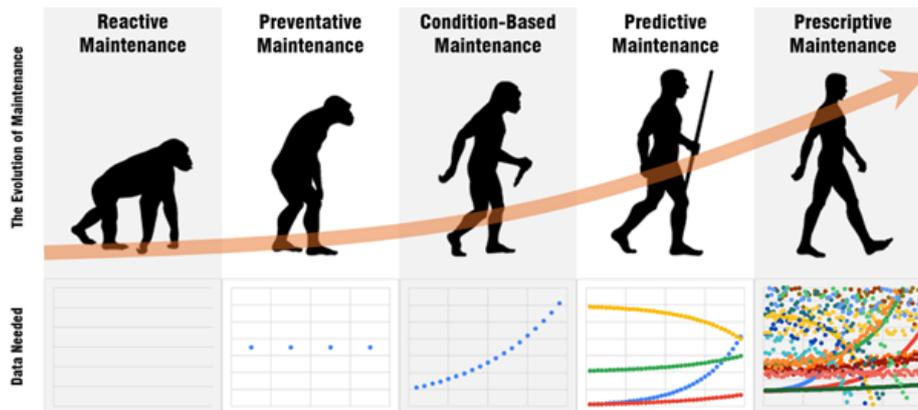
Fuente: El gráfico representa la estadística de fallas para equipos industriales, recuperado de Imágenes de Google.

*Evolución del mantenimiento hacia un Mantenimiento Inteligente*  
La evaluación de las estrategias de mantenimiento en la industria es esencial para garantizar un funcionamiento óptimo de los activos. Comprende una variedad de enfoques, desde el mantenimiento reactivo, que se centra en reparar activos después de que han fallado, hasta el mantenimiento preventivo, que se basa en la programación de inspecciones y tareas de mantenimiento periódicas (Acevedo et al., 2022). Además, el mantenimiento basado en la condición se centra en la monitorización de parámetros específicos para tomar decisiones de mantenimiento, mientras que el mantenimiento predictivo utiliza tecnologías avanzadas para prever fallas potenciales en función de datos en tiempo real. Por último, el mantenimiento prescriptivo va más allá al proporcionar recomendaciones específicas para la acción con

base en análisis avanzados. Evaluar y seleccionar la estrategia de mantenimiento más adecuada para un entorno industrial dado implica considerar factores como la criticidad de los activos, el costo operativo, la disponibilidad de datos y la tecnología disponible, con el objetivo de optimizar la confiabilidad, la eficiencia y la rentabilidad de la operación (Cortes, 2022).

**Figura 2.**

*Evolución de mantenimiento.*



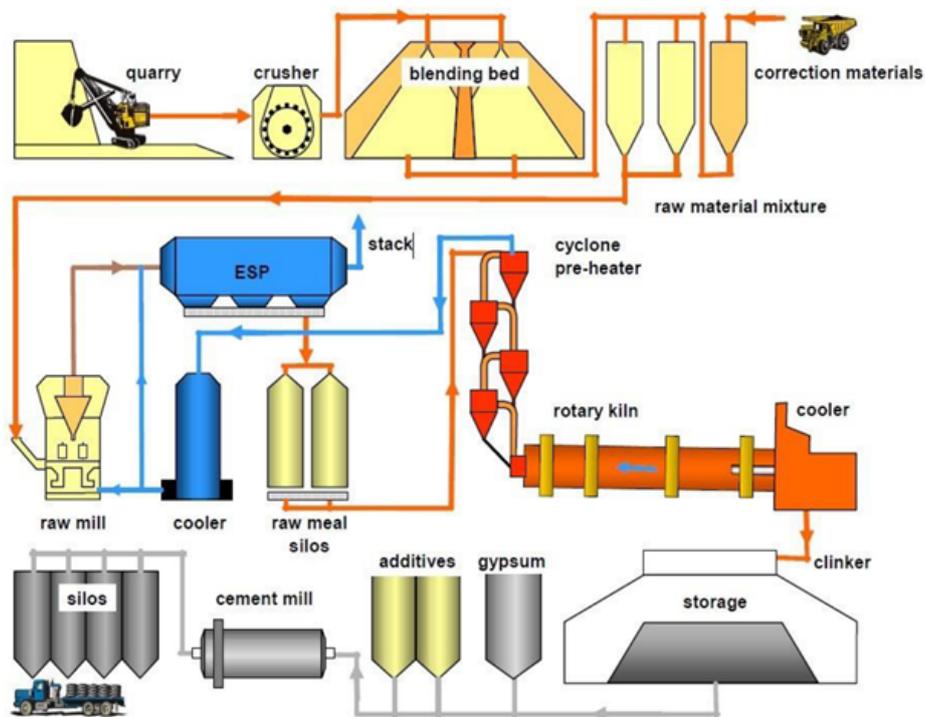
Fuente: La figura muestra la evolución del mantenimiento desde un mantenimiento reactivo hasta un mantenimiento prescriptivo, recuperado de Differences Between Condition-Based, Predictive, and Prescriptive Maintenance por Hanly, S. (2021).

La evolución hacia el mantenimiento inteligente representa un avance significativo en la gestión de activos industriales. El mantenimiento inteligente se basa en la aplicación de tecnologías de vanguardia como el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de datos, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para llevar a cabo la monitorización y la gestión predictiva de activos en tiempo real (Reyna y Romero, 2022). Esta aproximación va más allá de la detección de fallas y la programación de tareas, ya que permite prever de manera proactiva problemas potenciales, anticiparse a las fallas y, en última instancia, optimizar los costos de mantenimiento al minimizar tiempos de inactividad no planificados y maximizar la disponibilidad de activos (Magoni et al., 2018). Evaluar la transición hacia el mantenimiento inteligente implica considerar factores adicionales como la inversión en infraestructura tecnológica, la capacitación del personal en la interpretación de datos y la toma de decisiones basada en la información proporcionada por estas tecnologías avanzadas. La elección de la estrategia de mantenimiento más adecuada dependerá de la industria, el tipo de activos y los objetivos específicos de cada organización en su búsqueda de una gestión de activos eficaz y sostenible en el largo plazo (Cortes, 2022).

### Fallas en la Industria Cementera

La detección oportuna de fallas en equipos en la industria cementera tiene una gran importancia debido a que, si se logra anticipar a una parada forzosa, se pueden tomar acciones para evitar que exista pérdida en la producción y precautelar el estado de los equipos industriales (Aguilar et al., 2010). En la fabricación de cemento, hay múltiples equipos que se tienen que monitorear. En la Figura 3 se muestran los activos principales en un proceso de obtención de cemento.

**Figura 3.**  
Proceso de fabricación de cemento.



Fuente: La gráfica muestra los equipos principales de un proceso de fabricación de cemento. Recuperado de: An Insight into the Chemistry of Cement—A Review. Por Lavagna, L., y Nisticò, R. (2023).

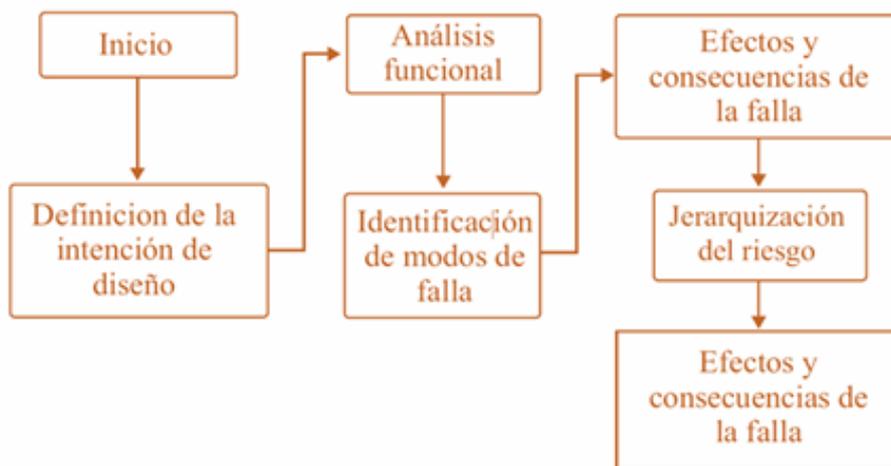
Cada falla en la industria cementera representa un riesgo potencial, entendiendo la forma en que los equipos fallan, se podrá diseñar mejores acciones correctivas o preventivas como parte del mantenimiento. Estas acciones se derivan del proceso de análisis de modos de falla, donde a cada modo de falla se le asigna una tarea específica. Un modo de falla puede definirse como la forma en que un equipo o activo experimenta una falla (Aguilar et al., 2010).

En la industria cementera, las averías ocurren cuando no existe un buen control en la detección oportuna de anomalías para prevenir que el equipo falle. Es por eso que existe en muchas fábricas el Mantenimiento Basado en Condición (MBC), que es una forma de detectar anomalías antes que ocurra la falla por medio de técnicas predictivas (Conklin et al.,2011).

Un modo de falla es la forma en la que un activo pierde la capacidad de desempeñar su función, a cada modo de falla se le asigna una acción de mitigación o prevención dentro del proceso de Administración del Riesgo. Estas acciones pueden estar dirigidas a desviaciones del proceso, factores humanos u otros aspectos relevantes. En el caso específico del FMECA (Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad), cuyo objetivo es diseñar un plan de mantenimiento, a cada modo de falla se le asignará una tarea específica relacionada con el mantenimiento (Aguilar et al., 2010).

**Figura 4.**

*Diagrama de la metodología de análisis de modos de falla y sus efectos - FMEA.*



Fuente: En la figura se muestra la secuencia para el análisis de modos de falla y efectos en equipos industriales, recuperado de Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad por Aguilar et al. (2010).

Se puede observar en la figura 4 que, la metodología para analizar los modos de falla implica definir la intención de diseño para el análisis, realizar el análisis de funciones de los equipos, identificar los modos de falla y efectos, realizar una jerarquización del riesgo y analizar las consecuencias de una determinada falla.

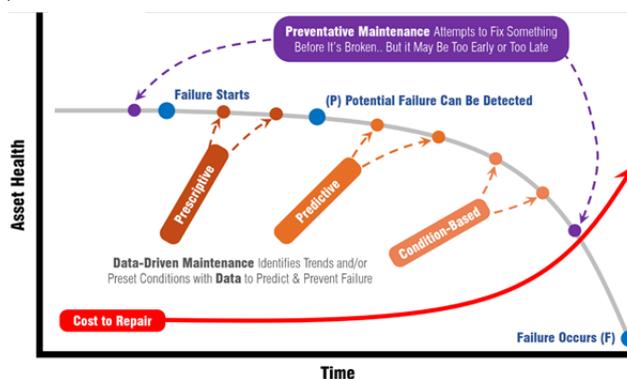
Los efectos de la falla se refieren a cómo se manifiesta el problema, es decir, cómo afecta al conjunto ante la falla del equipo o activo, ya sea localmente o en otras partes del sistema. Estas manifestaciones pueden incluir aumentos o disminuciones de nivel,

variaciones de temperatura, activación de señales, alarmas o dispositivos de seguridad, entre otras. Además, se toma en cuenta la sintomatología asociada con la falla, como ruidos o aumentos en la vibración, entre otros posibles indicadores (Aguilar et al., 2010).

Por otro lado, la falla de un activo se puede analizar según la curva P-F, que es una herramienta utilizada en el mantenimiento predictivo de activos industriales para evaluar y prever el tiempo entre el punto en el que se detecta un problema potencial (P, de “Potential Failure”) y el punto en el que efectivamente ocurre una falla (F, de “Failure”) (Medina y Moreno, 2022). Esta curva es una representación gráfica que permite a los equipos de mantenimiento anticipar y planificar intervenciones antes de que ocurra una falla no planificada. El eje horizontal de la curva P-F representa el tiempo, mientras que el eje vertical representa la condición del activo. La curva comienza en el punto P, que indica el momento en el que se detecta una anomalía o un cambio en la condición del activo. A partir de este punto, se inicia un período de tiempo llamado “vida restante del activo”. Durante esta fase, el equipo de mantenimiento puede llevar a cabo inspecciones y monitoreo adicionales para determinar cuándo se acerca el punto F, que es el momento en el que se espera que ocurra la falla.

La utilidad de la curva P-F radica en la capacidad de programar las actividades de mantenimiento de manera proactiva antes de que ocurra una falla, lo que puede minimizar los tiempos de inactividad no planificados, reducir los costos de reparación y prolongar la vida útil de los activos (Contreras y Rojano, 2023). Además, al monitorear continuamente la condición de los activos y utilizar tecnologías de mantenimiento inteligente, como sensores y análisis de datos, se puede afinar la precisión de la curva P-F, permitiendo una gestión más eficiente de los activos.

**Figura 5.**  
Curva P-F para un activo industrial



Fuente: La figura muestra la curva P-F para un activo desde el inicio de la falla hasta la pérdida de función del equipo, recuperado de Differences Between Condition-Based, Predictive, and Prescriptive Maintenance por Hanly, S. (2021).

*Criterio de Disponibilidad en el Mantenimiento Industrial*

La disponibilidad, que es el objetivo principal del mantenimiento, es la confianza en que un componente o sistema que ha sido sometido a mantenimiento, sea capaz de desempeñar satisfactoriamente su función durante un período de tiempo determinado (Mesa et al., 2006). De manera práctica, la disponibilidad se expresa en términos porcentuales del tiempo en que el sistema está listo para operar o producir, es decir, su capacidad de operar de manera continua. Buscar el equilibrio entre la disponibilidad y el costo es un aspecto muy importante con la finalidad de obtener los mayores beneficios para la organización. Dependiendo de los requisitos específicos del sistema, el diseñador puede ajustar los niveles de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad para reducir el costo total del ciclo de vida (Mesa et al., 2006).

A continuación, en la tabla 1, se muestran ejemplos de equipos que necesitan tener alta confiabilidad, mientras que otros necesitan tener alta disponibilidad o alta mantenibilidad.

**Tabla 1.***Requisitos de algunos sistemas y enfoque de los indicadores*

	<b>Requisitos</b>	<b>Ejemplos</b>
1	Alta confiabilidad	Generación de electricidad
	Poca disponibilidad	Tratamiento de agua
2	Alta disponibilidad	Refinerías de petróleo
		Acerías
3	Alta confiabilidad	Incineradores hospitalarios
	Alta mantenibilidad	
4	Disponibilidad basada en buena práctica	Procesamiento por etapas
5	Alta disponibilidad	Sistemas de emergencia
	Alta confiabilidad	Plataformas petroleras

Nota. Esta tabla muestra categorías de disponibilidad para diferentes ejemplos, recuperado de La Confiabilidad, la Disponibilidad y la Mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al Mantenimiento por Mesa et al. (2006)

Matemáticamente la disponibilidad  $D(t)$  es la relación entre el tiempo en que el equipo o instalación quedó disponible para producir TMEF (Tiempo Medio Entre Fallas) y el tiempo total de reparación TMPR (Tiempo Medio Para Reparaciones) (Mesa et al., 2006).

Primera forma

$$D(t) = \frac{\sum \text{tiempos disponibles para la producción}}{\sum \text{tiempos disponibles para la producción} + \sum \text{tiempos en mantenimiento}}$$

Primera forma

$$D(t) = \frac{TMEF}{TMEF + TMPR}$$

El Tiempo Medio de Reparación (TMPR) depende, en general, de varios factores, como la facilidad con la que se puede realizar el mantenimiento en el equipo o sistema, el nivel de capacitación profesional de quienes realizan la intervención, así como de las características organizacionales y la eficiencia en la planificación del mantenimiento (Mesa et al., 2006).

Asimismo, la disponibilidad está expuesta a condiciones de entorno humano operacional. El uso de tecnologías avanzadas y servicios personalizados, podría mejorar las interacciones entre el operador y el sistema que controla (Bajic et al., 2008). En la industria del cemento, la reducción de gastos está estrechamente vinculada a lograr que los equipos funcionen de manera más prolongada y eficiente. Esto disminuye el riesgo de averías inesperadas y optimiza las operaciones de mantenimiento preventivo (Bigares et al., 2022). Esto se traduce en una producción continua y eficiente, la minimización de tiempos de inactividad no planificados, una mayor confiabilidad de los activos y la optimización de costos de mantenimiento. En un mercado altamente competitivo, la capacidad de mantener activos disponibles y en condiciones óptimas es esencial para impulsar la rentabilidad y la competitividad de las empresas industriales (Pérez, 2022).

### **Implementación de Mantenimiento Inteligente: Industria Cementera**

La implementación exitosa del mantenimiento inteligente en la industria cementera ha demostrado numerosos beneficios. En primer lugar, se logra una mayor disponibilidad y confiabilidad de los activos, ya que las fallas se detectan y abordan de manera proactiva. Esto se traduce en una reducción significativa de los costos asociados con los tiempos de inactividad no planificados y las reparaciones de emergencia (Bigares et al., 2022). Además, el mantenimiento inteligente permite una mayor eficiencia operativa al optimizar las tareas de mantenimiento y reducir los tiempos de inactividad planificados. Esto se traduce en un aumento de la productividad y la rentabilidad en la industria cementera (Ponsot y Zambrano, 2023).

La implementación del mantenimiento inteligente, si bien ofrece un conjunto impresionante de beneficios, no es un proceso exento de obstáculos y desafíos. Uno de los desafíos más destacados es la inversión inicial necesaria para adoptar estas tecnologías y sistemas. Esto implica la adquisición de equipos de monitoreo avanzados, la implementación de sensores en activos, la configuración de infraestructura de red adecuada y el desarrollo o adquisición de software especializado (Cárdenas et al., 2022). Este gasto inicial puede ser una barrera significativa para muchas empresas, especialmente las más pequeñas o aquellas que ya están operando con márgenes ajustados.

Además de la inversión financiera, la implementación exitosa del mantenimiento inteligente requiere una inversión considerable en la capacitación del personal. Los empleados deben estar preparados para operar y mantener la nueva tecnología, así como para comprender y analizar los datos generados (Cárdenas et al., 2022). Esto incluye la formación en la configuración de sensores, la interpretación de los resultados y la toma de decisiones basada en datos. La capacitación es un proceso continuo a medida que evolucionan las tecnologías y las mejores prácticas, lo que significa que las empresas deben comprometerse con la educación continua de su personal.

La recopilación masiva de datos en tiempo real y su posterior análisis requieren habilidades específicas que a menudo no están presentes en las organizaciones (Butala et al., 2020). La falta de expertos en análisis de datos puede obstaculizar la capacidad de una empresa para aprovechar al máximo el potencial del mantenimiento. Por lo tanto, las empresas deben considerar la contratación de profesionales con experiencia en este campo o proporcionar formación adicional a su personal existente. Además, es fundamental destacar que la seguridad de los datos es una preocupación constante en la implementación del mantenimiento inteligente. A medida que se recopilan grandes cantidades de datos relacionados con la operación de los activos, se deben implementar sólidas medidas de ciberseguridad para proteger estos datos de posibles amenazas. La pérdida de datos o la exposición a ciberataques pueden tener consecuencias significativas en términos de pérdida de competitividad y confianza del cliente (Butala et al., 2020).

### **Mejora de la disponibilidad y confiabilidad de los activos**

La mejora de la disponibilidad y confiabilidad de los activos en la industria del cemento a través del mantenimiento inteligente es un proceso que abarca múltiples aspectos clave. En primer lugar, el monitoreo en tiempo real proporciona una visibilidad constante sobre el estado de los activos (Apostolov, 2006). Esto significa que

cualquier cambio inusual en la temperatura, la vibración, la presión u otros parámetros críticos puede ser detectado instantáneamente, permitiendo una respuesta inmediata para abordar cualquier problema emergente antes de que se convierta en una falla costosa.

Además, el análisis de datos desempeña un papel fundamental al aprovechar algoritmos avanzados y técnicas de inteligencia artificial para identificar patrones y tendencias en los datos de los activos. Esto va más allá de la simple detección de problemas evidentes, ya que puede revelar indicadores tempranos de desgaste o deterioro que podrían no ser apreciables de manera inmediata (Hart, 2005). Como resultado, las acciones de mantenimiento preventivo o predictivo pueden llevarse a cabo en el momento óptimo para evitar problemas mayores.

La combinación de monitoreo en tiempo real y análisis de datos no solo reduce los tiempos de inactividad no planificados, sino que también mejora la confiabilidad de los activos al garantizar que estén operando dentro de parámetros seguros y eficientes en todo momento (Parejo, 2021). Esto no solo aumenta la productividad, sino que también contribuye a la seguridad de las operaciones y a la calidad del producto final, factores cruciales en la industria del cemento. En última instancia, la mejora de la disponibilidad y confiabilidad de los activos a través del mantenimiento inteligente se traduce en un aumento significativo de la eficiencia operativa y la rentabilidad de las empresas cementeras.

### **Reducción de los costos de mantenimiento**

La reducción de los costos de mantenimiento mediante la implementación del mantenimiento inteligente en la industria cementera es un aspecto clave que merece una ampliación detallada. Esta estrategia permite un enfoque proactivo hacia el cuidado de los activos, lo que significa que las reparaciones o reemplazos de piezas se realizan antes de que ocurran fallas catastróficas (Suarez y Paredes, 2022). Esto evita los costosos tiempos de inactividad no planificados, ya que las interrupciones en la producción pueden resultar en pérdida de ingresos significativos.

Además, el mantenimiento inteligente se beneficia de la recopilación y análisis de datos a lo largo del tiempo. Los algoritmos avanzados pueden identificar patrones de desgaste y desempeño de activos, lo que permite una programación precisa de las intervenciones de mantenimiento (Contreras y Rojano, 2023). Esto se traduce en un uso más eficiente de los recursos y una reducción de los costos asociados con el mantenimiento preventivo, ya que las acciones se toman en función de la necesidad real en lugar de una programación fija.

Otro aspecto importante es la prolongación de la vida útil de los activos. Al detectar y abordar problemas tempranos, el mantenimiento inteligente permite que los activos funcionen en condiciones óptimas durante más tiempo antes de requerir reemplazo (Velez de Villa, 2022). Esto no solo ahorra en costos de reemplazo de activos, sino que también maximiza el retorno de la inversión en equipos y maquinaria.

### **Optimización de las actividades de mantenimiento**

La optimización de las actividades de mantenimiento en la industria cementera es un proceso que abarca diversas dimensiones cruciales para su éxito. Los sistemas de gestión de activos computarizados (CMMS) son un componente fundamental en esta optimización. Estos sistemas no solo centralizan y gestionan toda la información relacionada con los activos, sino que también ofrecen una variedad de beneficios:

En primer lugar, los CMMS permiten una planificación precisa de las tareas de mantenimiento. Los calendarios de mantenimiento se pueden configurar de manera que las inspecciones, revisiones y reparaciones se realicen en el momento más oportuno, teniendo en cuenta factores como la carga de trabajo, la disponibilidad de piezas de repuesto y la programación de producción (Acevedo et al., 2022). Esto evita la interrupción innecesaria de las operaciones y contribuye a una producción más fluida. Además, los CMMS brindan una mayor visibilidad y trazabilidad de las actividades de mantenimiento. Los registros de mantenimiento son detallados y se mantienen de manera organizada, lo que facilita la supervisión y el seguimiento del estado de los activos. Esto es especialmente valioso en la industria cementera, donde la seguridad y la calidad son de suma importancia.

Otra ventaja importante es la asignación eficiente de recursos. Los CMMS ayudan a programar las tareas de mantenimiento de acuerdo con la disponibilidad de técnicos, herramientas y repuestos. Esto significa que los recursos se utilizan de manera más efectiva y que no se desperdician en esperas innecesarias o tareas duplicadas. Por último, los CMMS generan informes y análisis que respaldan la toma de decisiones estratégicas. Los datos recopilados a lo largo del tiempo permiten identificar tendencias y áreas de mejora en el proceso de mantenimiento (Acevedo et al., 2022). Esto es esencial para la mejora continua y la optimización de las operaciones en la industria del cemento.

## Resultados y discusiones

La aplicación del mantenimiento inteligente ha demostrado tener un impacto positivo en la disponibilidad y confiabilidad de los activos en la industria del cemento. Gracias al monitoreo en tiempo real y al análisis de datos, es posible detectar y abordar problemas potenciales de manera anticipada, evitando tiempos de inactividad no planificados y mejorando la productividad de las instalaciones de manera significativa.

El mantenimiento inteligente ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir los costos asociados con el mantenimiento en la industria cementera. La capacidad de detectar fallas tempranas y tomar medidas preventivas permite minimizar los costos de reparaciones de emergencia y los tiempos de inactividad, lo que se traduce en ahorros significativos a largo plazo. La implementación de tecnologías como los sistemas de gestión de activos computarizados (CMMS) ha facilitado la planificación y programación de las tareas de mantenimiento en la industria cementera. Esto permite una asignación más eficiente de los recursos, una mayor coordinación entre los equipos de mantenimiento y una reducción de los tiempos de inactividad planificados.

La implementación de estas estrategias ha demostrado ser altamente beneficiosa para mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad de las empresas en este sector. Sin embargo, es importante tener en cuenta algunos aspectos discutibles en relación con el mantenimiento inteligente en la industria cementera. Por ejemplo, se debe considerar la inversión inicial requerida para implementar las tecnologías y sistemas necesarios. Esto puede representar un desafío para algunas empresas, especialmente para aquellas de menor tamaño o con recursos limitados. Es esencial evaluar cuidadosamente los costos y beneficios antes de tomar decisiones de implementación.

Además, la capacitación y el desarrollo de habilidades del personal son fundamentales para el éxito del mantenimiento inteligente. Es necesario contar con profesionales capacitados en análisis de datos y en el uso de las tecnologías utilizadas en el mantenimiento inteligente. La falta de personal con preparación puede limitar la efectividad de la implementación y reducir los beneficios esperados. Otro punto a considerar es la seguridad de los datos recopilados y analizados en el mantenimiento inteligente. Las empresas deben asegurarse de implementar medidas de seguridad adecuadas para proteger la información sensible y garantizar la confidencialidad de los datos. Finalmente, es importante destacar que el mantenimiento inteligente en la industria cementera es un campo en constante evolución. A medida que

nuevas tecnologías y enfoques surgen, es necesario continuar investigando y adaptándose a los avances tecnológicos para mantenerse al día y maximizar los beneficios de la innovación tecnológica en la gestión.

## Conclusiones

El mantenimiento inteligente, basado en tecnologías como el IoT, el Machine Learning y la IA, tiene un impacto significativo en la industria cementera, permitiendo mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los activos, reducir los costos de mantenimiento y optimizar las actividades de mantenimiento. El monitoreo en tiempo real y el análisis de datos son herramientas clave en el mantenimiento inteligente, ya que proporcionan información en tiempo real sobre el estado de los activos, permitiendo una detección temprana de problemas y una toma de decisiones proactiva.

La implementación de sistemas de gestión de activos computarizados (CMMS) facilita la planificación y programación de las tareas de mantenimiento, mejorando la eficiencia y la coordinación entre los equipos. La inversión inicial y la capacitación del personal son aspectos críticos en la implementación exitosa del mantenimiento inteligente, ya que se requiere un compromiso financiero y recursos humanos adecuados para aprovechar al máximo las tecnologías y maximizar los beneficios. El mantenimiento inteligente en la industria cementera tiene el potencial de generar ahorros significativos a largo plazo al reducir los tiempos de inactividad no planificados, minimizar los costos de reparaciones de emergencia y optimizar la productividad de las instalaciones.

En resumen, la adopción de tecnologías de mantenimiento inteligente en la industria cementera es una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad. Sin embargo, es necesario evaluar cuidadosamente los costos y beneficios, garantizar la capacitación adecuada del personal y asegurar la seguridad de los datos. La industria cementera puede beneficiarse en gran medida de la implementación de estas innovaciones tecnológicas en su gestión de activos y mantenimiento.

## Referencias

**Acevedo, L., Acuña, M., Bazán, A., Grijalba, E., Guarderas, M., Huaila, C., y Lázaro, D. (2022).** La Implementación de un Sistema ERP en las PYMES de Manufactura. *Gestión De Operaciones Industriales*, 1(1), 61-72. <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2022.04>

- Aguilar, J., Magaña, D, y Torres, R. (2010).** Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(1), 15–26. <https://bit.ly/3NCL7lq>
- Apostolov, A. (2006).** Automatic Fault Analysis and User Notification for Predictive Maintenance. *AREVA T&D Energy Automation & Information*. <https://doi.org/10.1109/citcon.2006.1635705>
- Bajic, E., Dobre, D., Morel, G., y Petin, J.-F. (2008).** Improving digital interaction for operator-driven process-plant operation. *Centre de Recherche En Automatique de Nancy (CRAN)*. <https://bit.ly/44oUCuK>
- Bigares, F., Guitiss, H., y Fernandes, D. (2022).** Propuesta de un Sistema de Gestión de Mantenimiento con Base en la Filosofía Lean e Industria 4.0. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 8(587), 1-16. <https://doi.org/10.32358/rpd.2022.v8.587>
- Butala, A., Daji, D., Ghule, K., Gagdani, S., Kamat, H., y Talele, P. (2020).** Cloud-Based Asset Monitoring and Predictive Maintenance in an Industrial IoT System. *International Conference for Emerging Technology (INCET)*. <https://doi.org/10.1109/INCET49848.2020.9154148>
- Cárdenas, A., Cardona, A., Cardona, C., y Ñañez, A. (2022).** Propuesta de un modelo de uso de elementos de la industria 4.0 en industrias intensivas en activos. *20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.11.412>
- Conklin, C., Kurosky, J., y Stewart, C., (2011).** Incorporating an Advanced Maintenance Strategy Improves Equipment Reliability and Reduces Cement Plant Costs. *53rd Cement Industry Technical Conference*. <https://doi.org/10.1109/citcon.2011.5934564>
- Contreras, S. y Rojano, X. (2023).** Sistema Inteligente De Monitoreo Y Control Para La Planta de Tratamiento de Agua Potable “El Carrizal-Salcedo” Basado en IoT e Inteligencia Artificial. *Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador*. <https://bit.ly/44T7NnJ>
- Cortes, G. (2022).** Metodología Building Information Modeling (BIM) en proyectos de construcción. *Universidad Cooperativa De Colombia*. <https://bit.ly/3LoZr0e>
- Hanly, S. (2021).** Differences Between Condition-Based, Predictive, and Prescriptive Maintenance. <https://bit.ly/3PHQC4n>

- Hart, D. (2005).** Linking Equipment Reliability & Optimum Repair Practices: A Business-Based Maintenance Approach. *Record Cement Industry Technical Conference*. <https://doi.org/10.1109/citcon.2005.1516355>
- Lavagna, L., y Nistico, R. (2023).** An Insight into the Chemistry of Cement—A Review. *Appl. Sci.* 2023, 13, 203. <https://doi.org/10.3390/app13010203>
- Magoni, S., Riva, M., y Scarpellini, M., Testa, M. (2018).** Asset Assessment Method in a MV Predictive Model to Estimate the Asset Status. *Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe)*. <https://doi.org/10.23919/pciceurope.2018.8491417>
- Medina, L., y Moreno, C. (2022).** Identificación de Factores Relevantes que Afectan el Desempeño Organizacional en Empresas con Tecnología del Internet de las Cosas (IoT): Un Estudio Multicaso en Colombia. *Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia*. <https://bit.ly/44T6Lln>
- Mesa, D., Ortiz, Y., y Pinzón, M. (2006).** La Confiabilidad, la Disponibilidad y la Mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al Mantenimiento. *Scientia et Technica Año XII*, 30, 155-160. <https://bit.ly/3CShCH2>
- Parejo, M. (2021).** Desarrollo Metodológico para la Optimización del coste eléctrico en fábricas de Cemento mediante el uso de Inteligencia Artificial. *Universidad de Sevilla, Sevilla, España*. <https://bit.ly/3PoUaa6>
- Pérez, V. (2022).** Metodología para administración de falla, desgaste y obsolescencia en gestión de activos industriales. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 34(4), 99-119. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n4.925>
- Ponsot, E., y Zambrano, T. (2023).** Aplicación de un modelo estocástico para el Análisis RAM de Máquinas Rotatorias en la Industria 4.0. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 5818-5851. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.5756](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5756)
- Quispe, U., y Sucari, Y. (2022).** Tecnologías Convergentes en la Industria 4.0 (I4.0). *Revista de Ciencias Sociales Aplicadas Waynarroque*, 64-74. <https://bit.ly/3pzwAhU>
- Razzeto, J. (2022).** Mantenimiento RCM y disponibilidad de equipos de la sección de embolsado y despacho de una empresa cementera. *Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, Peru*. <https://bit.ly/3r8kkpH>
- Reyna, A., y Romero, C. (2022).** Propuesta de mejora para aumentar la disponibilidad mecánica de las maquinarias de construcción, en una empresa constructora aplicando RCM y TPM. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú*. <https://bit.ly/3PFyfvJ>

- Suárez, J. y Paredes, S. (2022).** El factor humano y su rol en la transición a Industria 5.0: una revisión sistemática y perspectivas futuras. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 10(24), 1-18. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81727>
- Velez de Villa, C. (2022).** Valorización de la Empresa YURA S.A. *Universidad del Pacifico, Escuela de posgrado, Lima, Peru.* <https://bit.ly/438lXiX>
- Zamora, I. (2022).** Desarrollo de un sistema mantenimiento basado en condición con incorporación de indicadores de sostenibilidad energética para el proceso productivo de fibrocemento en la empresa Plycem bajo el concepto IoT. *Instituto Tecnológico De Costa Rica.* <https://bit.ly/3Pl0fE>