

ESTUDIO INTRODUCTORIO DE LA RELACIÓN ESTRATÉGICA ENTRE FIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

INTRODUCTORY STUDY OF THE STRATEGIC RELATIONSHIP BETWEEN RELIABILITY, MAINTAINABILITY AND ENERGY EFFICIENCY

Aurora Martínez-Corral

ITM Instituto Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València. Valencia, (España).

E-mail: aumarcor@csa.upv.es ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8222-0864>

Javier Cárcel-Carrasco

ITM Instituto Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València. Valencia, (España).

E-mail: fracarcl@csa.upv.es ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2776-533X>

Fabiola Colmenero-Fonseca

ITM Instituto Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València. Valencia, (España).

E-mail: fcolmenerof@outlook.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1901-2725>

Ali Rafat Gigasari

Universitat Politècnica de València. Valencia, (España).

E-mail: arafgig@doctor.upv.es ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-4574>

Luis Palmero Iglesias

Dept. Construcciones Arquitectónicas. Universitat Politècnica de València. Valencia, (España).

E-mail: lpalmero@csa.upv.es

Recepción: 18/02/2022 **Aceptación:** 09/03/2022 **Publicación:** 14/03/2022

Citación sugerida:

Martínez-Corral, A., Cárcel-Carrasco, J., Colmenero-Fonseca, F., Rafat, A., y Palmero, L. (2022). Estudio introductorio de la relación estratégica entre fiabilidad, mantenibilidad y eficiencia energética. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 11(1), 71-87. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2022.v11n1e41.71-87>

RESUMEN

Es vital conseguir la disponibilidad adecuada para la consecución de los procesos productivos o de servicios, garantizando la fiabilidad de las instalaciones o maquinaria. Muchas veces el aspecto “eficiencia energética”, se estudia de una manera separada considerándolo principalmente como un factor económico que redundaría en la explotación de grandes instalaciones constructivas. Los factores fiabilidad, mantenibilidad y eficiencia energética, están íntimamente relacionados, y deben ser estudiados de manera conjunta para la optimización operativa de la planta industrial o edificio de servicios. Este artículo, trata de plasmar las relaciones entre los tres factores, como interactúan entre ellos, y las mejoras que pueden redundar sobre las infraestructuras.

PALABRAS CLAVE

Eficiencia energética, Mantenimiento industrial, Fiabilidad.

ABSTRACT

It is vital to achieve adequate availability for the achievement of production processes or services, guaranteeing the reliability of facilities or machinery. Many times the "energy efficiency" aspect is studied in a separate way considering it mainly as an economic factor that results in the exploitation of large construction facilities. The factors reliability, maintainability and energy efficiency are closely related, and must be studied together for the operational optimization of the industrial plant or service building. This article tries to capture the relationships between the three factors, how they interact with each other, and the improvements that can result in infrastructures.

KEYWORDS

Energy efficiency, Industrial maintenance, Reliability.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento para conseguir la disponibilidad requerida, parece en numerosas ocasiones llevar caminos paralelos que no interactúan con la fiabilidad operativa global y con la eficiencia energética, que suele estudiarse como procesos desligados. Sin embargo, cuando se hace un análisis conjunto, se derivan las relaciones entre ellos (Eti *et al.*, 2007), que hace una interacción mutua relacional, cuantificándose en una mejora de la eficiencia de todos los procesos, y por sinergia, una mejora en los resultados financieros de la empresa (reducción de fallos que producen pérdidas colaterales, mejora y reducción de los tiempos de mantenimiento, y un menor consumo energético).

El concepto de fiabilidad implica el funcionamiento de un sistema o equipo en las condiciones requeridas, y que depende de forma directa del MTBF (tiempo medio entre fallos). Con la utilización de modelos de gestión del conocimiento, que ayuden a captar la información relevante (Sing, 2008) y el conocimiento en base a la experiencia de los operarios, la fiabilidad operativa debe incrementarse por diversas razones ligadas a la mejora de la actividad de mantenimiento.

Con un adecuado estudio de las acciones a realizar que redunden conjuntamente sobre la fiabilidad, la eficiencia energética y las propuestas de acciones de mantenimiento (figura 1), el MTBF se incrementa, lo que incide directamente en un aumento de la fiabilidad operativa (Cárcel *et al.*, 2020; Cárcel *et al.*, 2021; 2021a, 2021b).

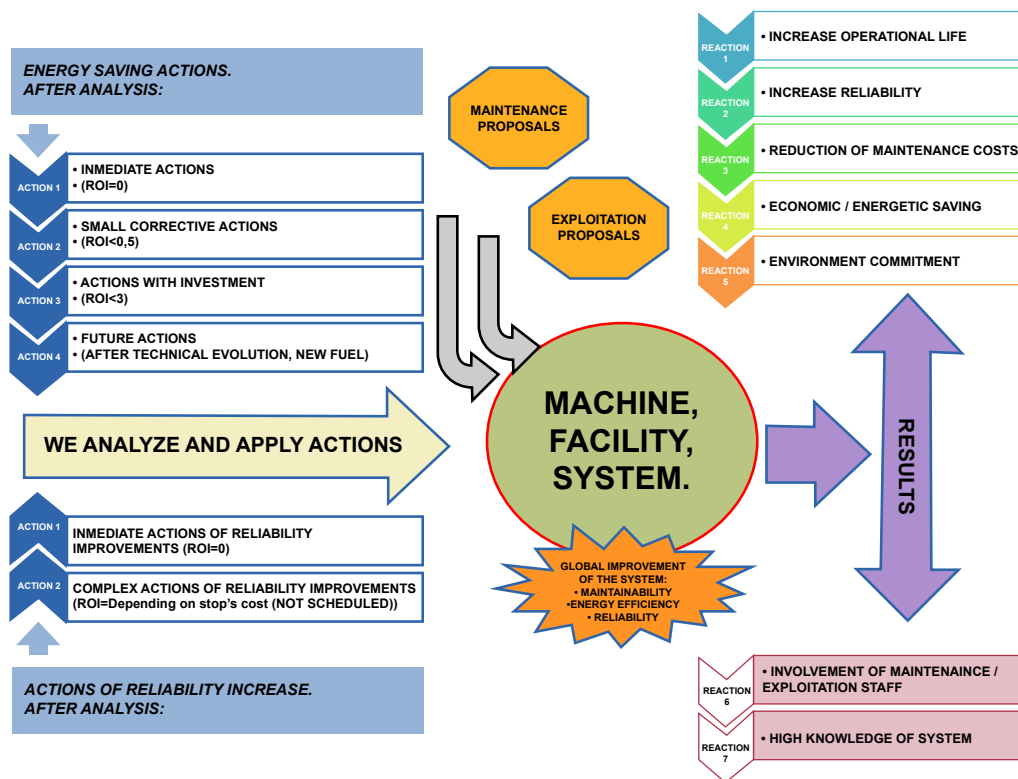


Figura 1. Ciclo de acciones conjuntas orientadas a la mejora operativa de una instalación o sistema.

Fuente: elaboración propia

2. FIABILIDAD, MANTENIBILIDAD, EFICIENCIA ENERGÉTICA, Y SU RELACIÓN EN BASE A LA INFORMACIÓN Y EL CONOCIMIENTO.

Sin entrar en normas UNE sobre confiabilidad, equipos, fiabilidad, etc., que afectan directamente a la funcionalidad de las técnicas de mantenimiento, las normas generales que inciden sobre la información y datos que afectan a la actividad de mantenimiento, se podrían indicar las UNE-EN 13306, UNE-EN 13460, UNE-EN 15341, UNE-EN 200001-3-11, UNE-EN 20464, UNE-EN 60706-2.

Con ello se pretende alcanzar lo que tradicionalmente se ha denominado como garantía de funcionamiento, concepto dependiente de cuatro magnitudes inter-relacionadas:

- Fiabilidad: probabilidad que el sistema no se averíe durante $[0, t]$.
- Mantenibilidad: probabilidad que el sistema sea reparado durante $[0, t]$.
- Disponibilidad: probabilidad que el sistema funcione en el instante t .
- Seguridad: probabilidad de evitar un suceso catastrófico.

Y en los últimos años, tras la relevancia económica del factor energético para los servicios a prestar, ha tomado especial interés el factor eficiencia energética:

- Eficiencia energética: Relación entre la cantidad de energía requerida para la realización de las actividades de una organización, sus equipos, sus sistemas, sus productos y sus servicios y la cantidad de energía real usada (UNE 216501:2009).

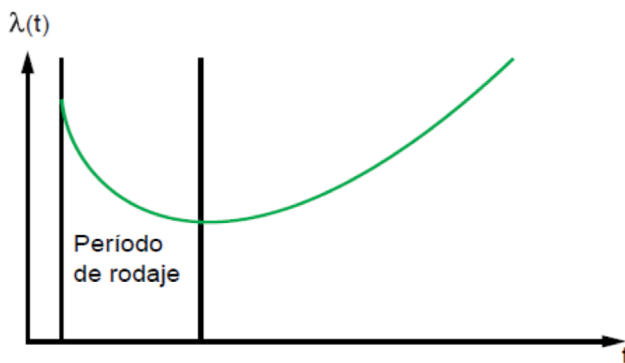
Las auditorías energéticas sirven para detectar las operaciones dentro de los procesos que pueden contribuir al ahorro y la eficiencia de la energía primaria consumida, así como para optimizar la demanda energética de la instalación, y son una buena base del conocimiento de todas las instalaciones y equipos que ayudan a tomar decisiones con respecto a la mejora de la fiabilidad así como el mantenimiento óptimo.

La relación de todos estos parámetros fundamentales en referencia a cómo afecta su adecuada extracción del conocimiento que afecta a la organización, se podría extraer observando su propia definición:

Fiabilidad: es la probabilidad de que una entidad pueda cumplir una función requerida, en las condiciones determinadas, durante un intervalo de tiempo $[t1, t2]$; y se expresa por: $R(t1, t2)$. Está íntimamente unida a la tasa de fallo de dicho sistema o instalación. El conocimiento de los diferentes fallos operativos y la acumulación y compartición de las experiencias operativas de los operarios, fomenta la prevención y

actuación ante el fallo, reduciendo en gran medida los fallos cíclicos y los tiempos de reposición, que afectan directamente a la producción de la empresa.

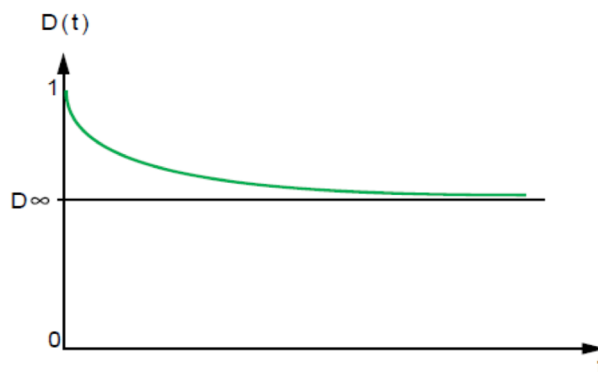
Tasa de fallo: $\lambda(t)$: La tasa de fallo en el instante t , mide la probabilidad que ocurra un suceso intempestivamente en el intervalo $[t, t+\lambda t]$ (gráfica 1). Representa el número de sucesos (fallos) por unidad de tiempo. Su inverso es el tiempo medio entre fallos.



Gráfica 1. Curva de fiabilidad con desgaste.

Fuente: (Cabau, 2000).

La disponibilidad: es la probabilidad que una entidad pueda cumplir una función requerida, en las condiciones determinadas, en un instante dado t , suponiendo que el suministro de los medios externos necesarios está asegurado. Se representa por: $D(t)$ (gráfica 2). Esta definición es igual a la de la fiabilidad pero con la diferencia fundamental en el aspecto temporal, una se refiere a un período de tiempo y la otra a un instante dado. En un sistema reparable, el funcionamiento al instante t no supone, forzosamente el funcionamiento durante $[0,t]$. Esta es la diferencia fundamental con respecto la fiabilidad. La disponibilidad tiende a un valor límite, que es por definición la disponibilidad asintótica. Este valor límite es una punta de tiempo que corresponde aproximadamente, al tiempo de reparación. La fiabilidad participa entonces en la disponibilidad por la aptitud a ser reparado rápidamente, esto es también importante, es la mantenibilidad.



Gráfica 2. Disponibilidad en función del tiempo.

Fuente: (Cabau, 2000).

La mantenibilidad: es la probabilidad de que una operación dada de mantenimiento pueda ser realizada en un intervalo tiempo dado $[t_1, t_2]$, que se expresa por: $M(t_1, t_2)$. La mantenibilidad es a la reparación como la fiabilidad es al fallo. Se define con las mismas hipótesis que para $R(t)$ la mantenibilidad $M(t)$.

Tasa de reparación: $\mu(t)$: La tasa de reparación en el instante t , mide la probabilidad que una entidad sea reparada en el intervalo $[t, t + \mu t]$, n° de reparaciones por unidad de tiempo. Puesto que es constante, la expresión de la mantenibilidad es una ley exponencial: $M(t) = \exp(-\mu t)$. Su inverso es el tiempo medio por reparación.

Mantenimiento: Actuaciones -procesos y operaciones tendentes a la conservación de una entidad o sistema.

Todos estos parámetros influyen en los tiempos medios utilizados como indicadores en mantenimiento y que inciden sobre la eficiencia del servicio (figura 2). La misión es aumentar el MTTF o MTFF (Mean Time To First Failure, tiempo medio de buen funcionamiento antes del primer fallo), el MTBF (Mean Time Between Failure, tiempo medio entre dos fallos de un sistema reparable), el MUT (Mean Up Time, tiempo medio de buen funcionamiento después de una reparación). De igual manera se pretende reducir

los diferentes tiempos operativos de las acciones de reparación como el MTTR (Mean Time To Repair, tiempo medio de reparación).

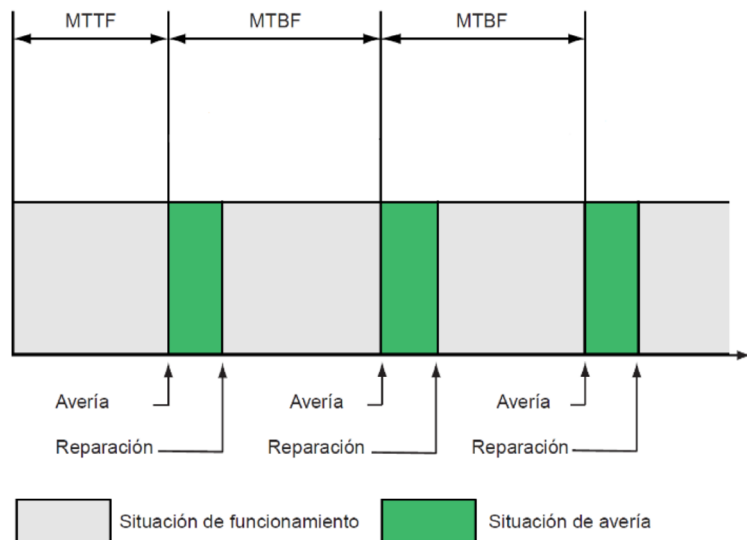


Figura 2. Diagrama de tiempos medios de un sistema que no precisa interrupción del funcionamiento para el mantenimiento preventivo.

Fuente: (Cabau, 2000).

Esencialmente hay dos tipos de mantenimiento: preventivo y correctivo, y para cada uno de éstos hay numerosos procedimientos específicos. En el mantenimiento preventivo, el objetivo es incurrir en gastos modestos de servicio del equipo, con el fin de evitar fallos potencialmente caros durante su funcionamiento (Eti *et al.*, 2006a, 2006b; Badia *et al.*, 2006; Aghezzaf *et al.*, 2007). Normalmente, el equipo deja de funcionar durante el mantenimiento preventivo, y el efecto físico de las actividades de mantenimiento es paliar los efectos del funcionamiento previo. En contraste, el mantenimiento correctivo (o reparación) es la respuesta al fallo del equipo con el fin de devolverlo a un estado de funcionamiento. Para ambas clases de mantenimiento, puede asumirse que existen varios tipos de estructuras de coste y varios tipos de patrones de comportamiento de los equipos. Es importante notar que el modelado y análisis de los

procedimientos de mantenimiento de equipos requieren a menudo considerar el sistema completo en vez de sus componentes individuales.

Por consiguiente, en base a la información y el conocimiento sobre el proceso y la cadena de fallo, permite la detección y el diagnóstico del fallo; procesos que, a su vez, permiten obtener el conocimiento necesario sobre el fallo, para proceder a su solución a través de la actuación de mantenimiento.

En la fase de observación de los síntomas y manifestaciones del fallo se trata de percibir información, a través de la observación sensorial directa, de la experiencia, de los conocimientos teóricos previos, de la información registrada, y de la medición o verificación a través de pruebas y ensayos. El análisis de esa información permite la identificación previa y con cierta inmediatez del fallo. Se perciben ya algunos accidentes del fallo; como, por ejemplo, lugar, posición o elemento que soporta el fallo.

En la fase de detección se obtienen comprobaciones pertinentes y contrastables sobre el fallo, que se completan en las dos fases siguientes: en la de delimitación se determinan básicamente los límites en el cumplimiento de la especificación y el proceso de fallo, en la de descripción se investigan las circunstancias del fallo (qué, dónde, cuándo, etc.).

Aunque podrían generarse dificultades conceptuales y de captación de la información, la consideración de determinados estados intermedios, desde funcionar adecuadamente a estar averiados (como sería el caso de tener que producir a baja capacidad, o con un consumo energético excesivo, o con alguna deficiencia de calidad) (Cárcel *et al.*, 2022), puede mejorar sensiblemente el conocimiento del comportamiento del equipo en base a la experiencia sobre variados escenarios. Esto ha de añadir necesariamente un conocimiento específico valioso sobre los diferentes modos de fallo.

Hay que tener en cuenta que todas las actuaciones deben redundar en la mejora de los sistemas de mantenimiento de la industria, que tras el estudio de diversas actuaciones, nos indiquen el beneficio energético de su ejecución así como el aumento de la fiabilidad de los sistemas e instalaciones. Debe ser un sistema abierto que integre a todos los estamentos de la empresa, con retroalimentación de

propuestas basadas en la experiencia por parte de los servicios de explotación y mantenimiento de la industria. La puesta en marcha de dichas acciones vendrá como consecuencia del retorno de la inversión detectado (ROI), o el valor intrínseco que dicha medida pueda tener como consecuencia del aumento de la fiabilidad, con reducción de cortes no programados.

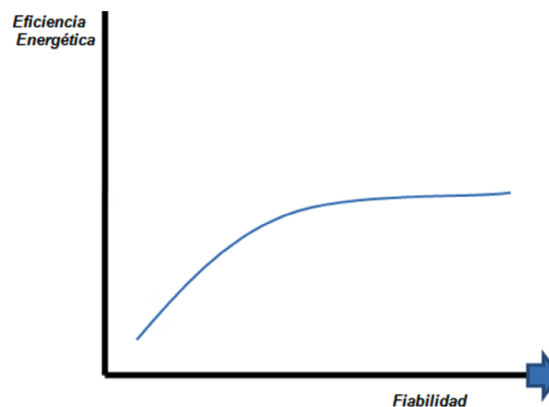
En la observación de las relaciones ante acciones de fiabilidad, mantenibilidad y eficiencia energética, se observa que cualquier acción o mejora de este tipo afecta entre ellas, pudiéndose extraer curvas relacionales que afectan a la Eficiencia energética, mantenibilidad y fiabilidad.

3. RELACIONES INFLUYENTES ANTE ACCIONES OPERATIVAS.

a) Ante acciones consistentes en aumentar la fiabilidad del sistema:

Ante la realización de acciones consistentes en aumentar la fiabilidad del sistema (gráfica 3), como regla general, y sobre todo si se trata de máquinas dinámicas, ante pequeñas acciones de aumento de la fiabilidad lleva normalmente consigo el aumento de la eficiencia energética.

Llega un punto, que para un grado muy alto de fiabilidad, no crece o se satura el proceso de ahorro energético.

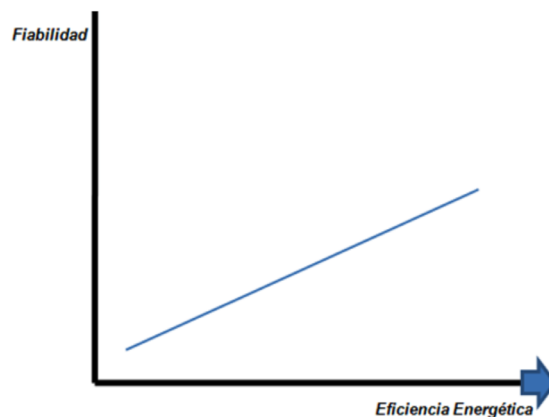


Gráfica 3. Curva ante acciones de fiabilidad.

Fuente: elaboración propia.

b) Ante acciones consistentes en aumentar la eficiencia energética del sistema:

De los comentarios y observación de la realización de acciones de eficiencia energética (gráfica 4), como regla general, el aumento de la fiabilidad es progresivo, dado que normalmente este ahorro viene definido por un uso incorrecto, una mejora térmica, etc, que redundan automáticamente en un menor desgaste y como consecuencia una menor probabilidad de averías.

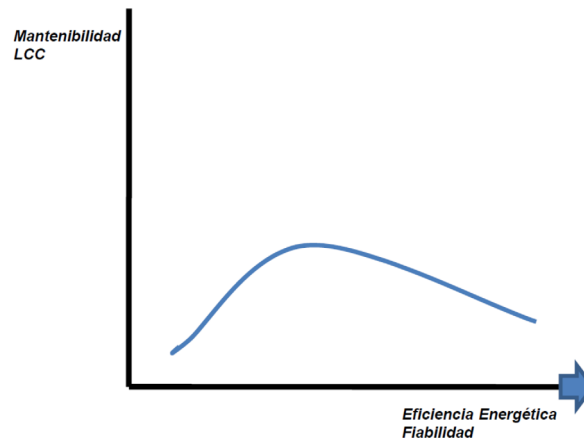


Gráfica 4. Curva ante acciones de eficiencia energética.

Fuente: elaboración propia.

c) Mantenibilidad ante acciones consistentes en aumentar la eficiencia energética o fiabilidad del sistema:

Cuando se realizan enfocadas a la mantenibilidad (gráfica 5), se produce un aumento en el ahorro en mantenimiento así como el aumento de la vida útil del equipamiento. Puede llegar un punto de inflexión si se requiere un gran aumento en la fiabilidad conlleve un aumento del equipamiento, con lo que sería preciso mayor número de horas en mantenimiento (este sería el caso cuando la fiabilidad del sistema quiere que sea máxima ante instalaciones críticas).



Gráfica 5. Curva relación con mantenibilidad.

Fuente: elaboración propia.

De una manera sucinta, se puede decir que con un conocimiento profundo de los equipos, e indagando en las relaciones y acciones para conseguir una adecuada eficiencia energética, fiabilidad y mantenibilidad;

- Mejora del conocimiento por parte de los servicios de mantenimiento de la eficiencia energética del proceso.
- Se conocerán, futuras acciones de ahorro, propuestas por los equipos de mantenimiento y sugerencias de fabricantes de la maquinaria o sector.
- Se producirá una reducción de los tiempos utilizados en mantenimiento, siendo una variable añadida de ahorro.
- Se consigue una mayor concienciación de los equipos humanos de mantenimiento.
- Dichas acciones llevan añadidas una sensibilización con la visión del respeto al medio ambiente (ahorro en la emisión de CO₂, como consecuencia del ahorro energético).

- A consecuencia de la acción de eficiencia energética, se consigue un uso más racional de la instalación, reduciéndose por ello la tasa de fallo del equipamiento y con ello el aumento de la fiabilidad de la instalación que se considera crítica.
- Al realizar el estudio energético se ha aumentado el nivel de conocimiento de la instalación, pudiéndose monitorizar otras variables que interceden en la fiabilidad final de la instalación (instalación eléctrica, fluidos, valvulería, etc.).
- Dicha relación de aumento de la fiabilidad es extrapolada al resto de la organización (en especial hacia los departamentos de explotación), consiguiéndose una mejora estratégica de la función de los servicios de mantenimiento con relación al resto de la industria.

4. CONCLUSIONES

Es importante extender el conocimiento en las acciones de mantenimiento, en base a las acciones estratégicas fundamentales tales como la fiabilidad, mantenibilidad y eficiencia energética:

- Al aunar el conocimiento de las acciones estratégicas se potencian las relaciones entre la fiabilidad, mantenibilidad y eficiencia energética, que aumentan la eficiencia de toda la organización.
- Se pueden reducir los costes de mantenimiento sin degradación de la fiabilidad.
- La mejora de la eficiencia energética, redundando en mejorar la mantenibilidad de las instalaciones y la fiabilidad de los procesos, con reducción de fallos.
- Se puede mejorar la seguridad y la disponibilidad de las instalaciones (poniendo más atención a las frecuencias y a los elementos a mantener).
- Se puede aumentar el ciclo de vida de los equipos e instalaciones, como consecuencia del menor desgaste y la observación continuada en la utilización óptima.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto CONDAP "Habilidades digitales para mentores en el lugar de trabajo en aprendizajes del sector de la construcción" financiado por la Comisión Europea dentro de la Acción Clave 2: Cooperación para la innovación e intercambio de buenas prácticas, número de referencia 2018-1-UK01-KA202-048122. Así mismo, este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del grupo de investigación PREDILAB, dentro de la investigación realizada en la Universidad de Castilla La Mancha y titulada "Metodología y sistemas para la mejora del mantenimiento y la eficiencia energética en la rehabilitación y reutilización del patrimonio industrial. Fase 1 y 2.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghezzaf, E.H., Jamali, M.A., & Ait-Kadi, D.** (2007), An integrated production and preventive maintenance planning model. *European Journal of Operational Research*, 181, 679-685.
- Badia, F.G., Berrade, M.D., & Campos, C.A.** (2002). Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures. *Reliability Engineering and System Safety*, 78(1), 157-63.
- Cabau, E.** (2000). *Introducción a la concepción de la garantía de funcionamiento*. Cuaderno Técnico Schneider nº 144. Barcelona.
- Cárcel-Carrasco, J., Pascual-Guillamón, M., & Salas-Vicente, F.** (2022). Composition of some metallic fragments found in food that are undetectable by magnetic or eddy currents equipment: A case study. *LWT*, 153, 112358.
- Cárcel-Carrasco, J., & Gómez-Gómez, C.** (2021). Qualitative analysis of the perception of company managers in knowledge management in the maintenance activity in the era of industry 4.0. *Processes*, 9(1), 121.

- Cárcel-Carrasco, J., & Cárcel-Carrasco, J. A.** (2021a). Analysis for the Knowledge Management Application in Maintenance Engineering: Perception from Maintenance Technicians. *Applied Sciences*, 11(2), 703.
- Cárcel-Carrasco, J., Pascual-Guillamón, M., & Langa-Sanchis, J.** (2021b). Analysis of the effect of COVID-19 on air pollution: perspective of the Spanish case. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(27), 36880-36893.
- Cárcel-Carrasco, J., Cárcel-Carrasco, J. A., & Peñalvo-López, E.** (2020). Factors in the relationship between maintenance engineering and knowledge management. *Applied Sciences*, 10(8), 2810.
- Eti, M.C., Ogaji, S., & Probert, S.** (2006a). Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture. *Applied Energy*, 83(2006), 1235–1248.
- Eti, M.C., Ogaji, S., & Probert, S.** (2006b). Development and implementation of preventive-maintenance practices in Nigerian industries. *Applied Energy*, 83(2006), 1163–1179.
- Eti, M.C., Ogaji, S., & Probert, S.** (2007). Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-station. *Applied Energy*, 84(2007), 202–221.
- Sing, S.** (2008). Role of leadership in knowledge management: A study. *Journal of Knowledge Management*, 12(4), 3-15. <https://doi.org/10.1108/13673270810884219>
- UNE 216501.** (2009). *Sistema de gestión energética*. Requisitos. Aenor, Mayo 2009.
- UNE-EN 13306.** (2010). *Mantenimiento: Terminología de mantenimiento*. Aenor, Marzo 2011.
- UNE-EN 13460.** (2009). *Terminología de mantenimiento*. Aenor, Diciembre 2009.
- UNE-EN 15341.** (2007). *Indicadores clave de rendimiento del mantenimiento*. Aenor, Septiembre 2008.

UNE-EN 200001-3-11. (2003). *Gestión de la confiabilidad: Parte 3-11: Guía de aplicación Mantenimiento centrado en la fiabilidad.* Aenor, Octubre 2003.

UNE-EN 20464. (2002). *Planificación del mantenimiento y de la logística de mantenimiento.* Aenor, Abril 2002.

UNE-EN 20654-4. (2002). *Guía de mantenibilidad de equipos: Parte 4-8: Planificación del mantenimiento y de la logística de mantenimiento.* Aenor, Abril 2002.

UNE-EN 60706-2. (2006). *Requisitos y estudios de mantenibilidad durante la fase de diseño y desarrollo.* Aenor, Mayo 2009.