

Aramis Alfonso-Llanes; Gustavo Martínez-Castro

<https://doi.org/10.35381/i.p.v7i12.4405>

**Análisis envolvente de datos para la criticidad del equipamiento productivo en
empresa textil**

**Data envelopment analysis for the criticality of production equipment in a textile
company**

Aramis Alfonso-Llanes

alfonsazo@gmail.com

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara
Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-8984-5864>

Gustavo Martínez-Castro

gustavitomc@gmail.com

Empresa de Mantenimiento a Centrales Eléctricas, Marianao, La Habana
Cuba

<https://orcid.org/0009-0006-5300-6977>

Recibido: 16 de agosto 2024
Revisado: 12 de octubre 2024
Aprobado: 07 de diciembre 2024
Publicado: 01 de enero 2025

RESUMEN

La gestión efectiva del mantenimiento industrial requiere una precisa determinación de la criticidad del equipamiento productivo, constituyéndose en un factor fundamental para optimizar los recursos y maximizar la eficiencia operacional. En este contexto, la presente investigación se centra en el análisis de criticidad del equipamiento productivo en la Planta de Tejeduría de una empresa textil, mediante una metodología innovadora que integra los métodos tradicionales de clasificación con el Análisis envolvente de datos. La aplicación práctica del Análisis envolvente de datos para evaluar el equipamiento productivo, se realizó utilizando como fuentes primarias la documentación técnica de la empresa, entrevistas con personal especializado y consultas con expertos en el área. Esta aproximación metodológica permitió obtener una evaluación integral y objetiva de la criticidad del equipamiento, proporcionando una base sólida para la optimización de las estrategias de mantenimiento en la planta textil.

Descriptores: Análisis de datos; mantenimiento; industria textil. (Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

The effective management of industrial maintenance requires an accurate determination of the criticality of the productive equipment, which is a fundamental factor to optimize resources and maximize operational efficiency. In this context, the present research focuses on the analysis of criticality of the productive equipment in the Weaving Plant of the textile company, through an innovative methodology that integrates the traditional methods of classification with the Data Envelopment Analysis. The practical application of the Data Envelopment Analysis method to evaluate the productive equipment was carried out using as primary sources the company's technical documentation, interviews with specialized personnel and consultations with experts in the area. This methodological approach allowed obtaining an integral and objective evaluation of the criticality of the equipment, providing a solid basis for the optimization of maintenance strategies in the textile plant.

Descriptors: Data analysis; maintenance; textile industry. (UNESCO Thesaurus).

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de producción Just-in-Time (JIT) y la creciente demanda de una producción flexible y ágil, es vital que la gestión del mantenimiento esté integrada con las estrategias empresariales para asegurar la disponibilidad del equipamiento, la calidad del producto, la entrega oportuna, el precio competitivo y el cumplimiento de las normas de seguridad (Bakri et al., 2021; Chávez Cabanillas y La Torre Alejos, 2023). Las decisiones estratégicas en mantenimiento requieren evaluar detalladamente la pertinencia de invertir recursos financieros en actividades innovadoras y en la actualización tecnológica de los equipos productivos, con el objetivo de apoyar de manera efectiva la competitividad de la empresa (Esquivel Guerrero et al., 2021; Alvarado Figueroa, 2022; Martínez Pérez y Ruiz González, 2023).

Factores como alta confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y seguridad, además de un bajo costo de mantenimiento y alta calidad de los productos elaborados, pueden tener un impacto fundamental en la competitividad empresarial (Feal Cuevas et al., 2022; Jakkula et al., 2022; Singh & Tewari, 2023). En la actualidad, el éxito de cualquier empresa se ha convertido en un desafío permanente, obligando a las organizaciones a racionalizar recursos, redefinir operaciones y adoptar estructuras más flexibles para adaptarse rápidamente a nuevas herramientas de gestión. Esta situación también afecta a las empresas cubanas, que han buscado introducir procesos de cambio a través del nuevo modelo económico para mantenerse competitivas (Alfonso Llanes et al., 2022; Feal Cuevas et al., 2022).

Las empresas no pueden adquirir constantemente equipos nuevos debido a los altos costos, por lo que es esencial mantener un buen estado de funcionalidad de su parque industrial a mediano y largo plazo para mantener precios competitivos. El desgaste natural de los equipos puede generar interrupciones considerables en la producción, implicando grandes pérdidas económicas. Por ello, es crucial definir correctamente las características y el mantenimiento de cada equipo (Barry, 2023; Xue, 2024).

En el siglo XXI, el mantenimiento ha sido reconocido como un elemento clave para incrementar la competitividad industrial. Ha evolucionado desde una actividad reactiva a una disciplina proactiva y sofisticada, que combina técnicas de gestión, organización y planificación con aplicaciones ingenieriles avanzadas (Indrawan et al., 2019; Pinciroli et al., 2023). El objetivo del mantenimiento es incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción mediante la planificación, organización, control y ejecución de métodos de conservación de los equipos (Costa Ferreira & de Souza, 2021; Martínez Pérez y Ruiz González, 2023).

El análisis de criticidad de los activos fijos es una herramienta crucial para valorar el funcionamiento de estos y guiar los recursos de la organización hacia los activos con mayor criticidad. Este análisis permite definir el tipo y periodicidad del mantenimiento, así como predeterminedar cursos de acción ante posibles fallos (Pirbalouti et al., 2023; Priyanta, 2024). Los principios de la "Gestión de Activos basada en Ingeniería de la Confiabilidad Operacional" representan una vía efectiva para que las empresas enfrenten los retos actuales, utilizando herramientas como el Análisis de Criticidad, el Análisis de Modos de Fallo y Efectos (FMEA), el Análisis de Causa Raíz (RCA) y la Inspección Basada en el Riesgo (RBI).

El escenario práctico considerado en esta investigación es la Planta de Tejeduría de una empresa textil. A pesar de las numerosas investigaciones realizadas en esta planta, no existe documentación referente a la clasificación del equipamiento ni a la relación entre criticidad y eficiencia del equipamiento productivo. Esta carencia de información plantea una problemática que fundamenta la presente investigación. A partir de esta problemática, se establece como objetivo principal de la investigación determinar la criticidad del equipamiento productivo en la Planta de Tejeduría de la empresa textil objeto de estudio, utilizando la relación entre el método DEA y métodos tradicionales de clasificación.

MÉTODO

La investigación se basa en una metodología de investigación descriptiva y explicativa, que se centra en evaluar la eficiencia de una empresa textil mediante el Análisis Envolvente de Datos (DEA). Esta investigación, de diseño no experimental y enfoque cuantitativo, utiliza datos históricos sobre el desempeño de los equipos (entradas como el tiempo de operación, fallos, costos de mantenimiento, etc.) para analizar y comparar la eficiencia de cada equipo con una "frontera eficiente" formada por los equipos más eficientes. El objetivo es describir las características y comportamiento del equipamiento productivo, así como explicar las razones detrás de la criticidad de ciertos equipos, identificando aquellos cuya falla tendría un impacto significativo en la producción. A través del análisis comparativo, se valida la consistencia de los resultados obtenidos con el DEA, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en la Gestión del mantenimiento y la optimización de recursos en la empresa textil.

Para dar cumplimiento al objetivo de la investigación, se propone un procedimiento (Figura 1) que permite determinar la criticidad del equipamiento productivo en la entidad objeto de estudio, mediante la combinación de un método tradicional de clasificación con la metodología de Análisis Envolvente de Datos (DEA).

Etapas 1. Determinar eficiencia por el método DEA

La determinación de la eficiencia por el método DEA presupone realizar tres acciones fundamentales (Krejnus, 2023; Lu et al., 2022): definir variables de entrada y salida, determinar los pesos de las variables de entrada y salida, y, finalmente, calcular la eficiencia.

- **Paso 1.1. Definir variables de entrada y salida**

Para definir las variables de entrada y salida del procedimiento, se empleará el método de consulta a expertos, con el fin de asegurar decisiones basadas en conocimientos especializados, experiencia práctica y validación rigurosa.

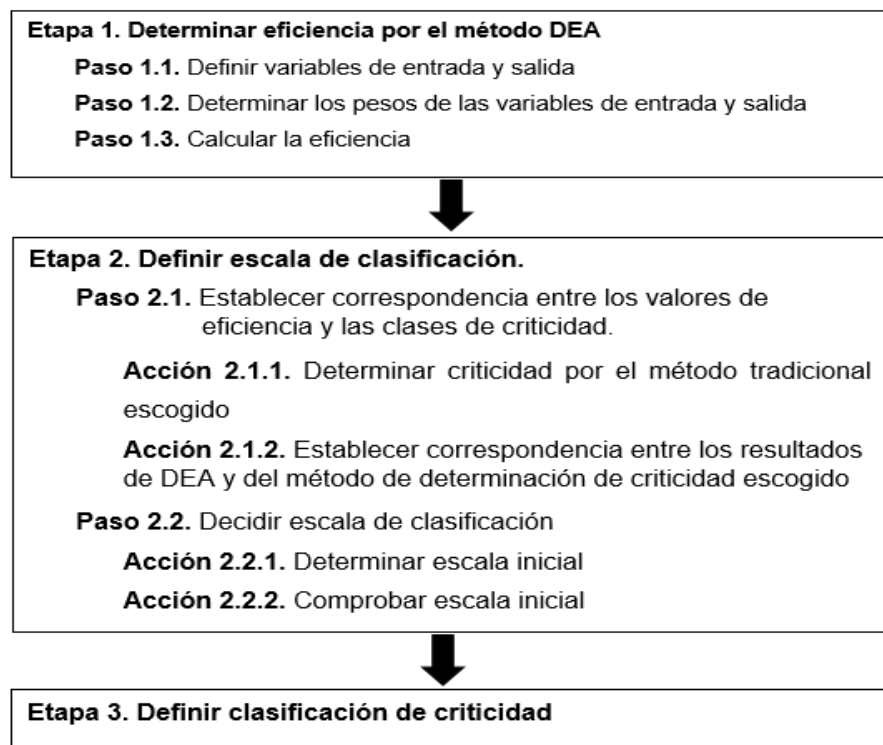


Figura 1. Procedimiento para determinar criticidad del equipamiento productivo a través del método DEA.

Elaboración: Los autores.

- **Paso 1.2. Determinar los pesos de las variables de entrada y salida**

Los pesos de las variables de entrada y salida se determinarán mediante el modelo matemático descrito en las ecuaciones 1, 2 y 3.

Modelo CCR-INPUT

$$Max \sum_{k=1}^p V_{kj} Y_{kj} \quad [1]$$

Sujeto a las restricciones siguientes:

$$\sum_{k=1}^p V_{kj} Y_{kj} - \sum_{i=1}^m U_{ij} X_{ij} \leq \theta_j X_{ij} \quad [2]$$

$j=1, 2, \dots, m$

$$\sum_{k=1}^p U_{ij} X_{ij} = 1 \quad [3]$$

$p = 1, 2, \dots, p$

La solución de este modelo matemático se obtendrá utilizando alguno de los softwares disponibles para estos fines (WINQSB, Gurobi, CPLEX, Solver de Excel, Lingo, etc.).

- **Paso 1.3. Calcular la eficiencia**

El cálculo de la eficiencia debe realizarse a través de la ecuación 4.

$$e_j = \frac{\sum_{k=1}^m v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^p u_{ij} x_{ij}} \quad [4]$$

Etapla 2. Definir escala de clasificación.

En esta etapa se procederá a determinar la escala que indicará la criticidad del equipamiento productivo, basada en la eficiencia de los mismos. Para ello, se proponen los pasos siguientes.

- **Paso 2.1. Establecer correspondencia entre los valores de eficiencia y las clases de criticidad halladas por el método tradicional**

Para el desarrollo de este paso, se proponen las acciones siguientes.

- **Acción 2.1.1. Determinar criticidad por el método tradicional escogido**

En este paso, primero se debe seleccionar el método tradicional a emplear. En esta investigación se decidió utilizar la propuesta realizada por Alfonso Llanes et al. (2008) (Figura 2), dado que este método ha sido aplicado en diversos estudios obteniendo resultados satisfactorios en todos los casos. Este método clasifica un conjunto de siete variables (seguridad, calidad, régimen de trabajo, afectaciones, frecuencia de fallo, tiempo de reparación y costo de reparación) en tres niveles: nivel 1, el más crítico; nivel 2, intermedio; y nivel 3, el de menos afectaciones. Como resultado, cada equipo se clasifica en una de tres categorías: A, B y C.

Las variables consideradas en el algoritmo son las siguientes:

- Seguridad: Capacidad del fallo para ocasionar daño a las personas que se encuentran en la zona donde opera el equipo o, en general, al medio ambiente.

Aramis Alfonso-Llanes; Gustavo Martínez-Castro

- Calidad: Nivel de afectación a la calidad del producto que conlleva el fallo del equipo.

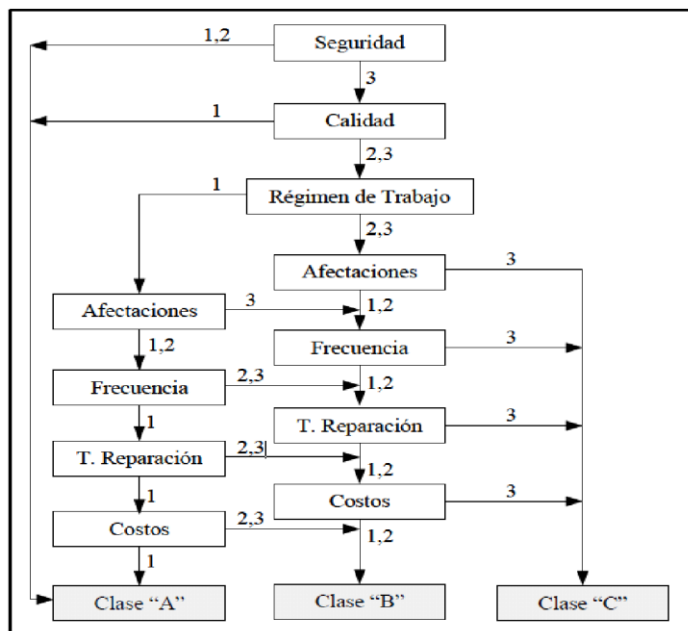


Figura 2. Procedimiento para el análisis de criticidad.

Fuente: Alfonso Llanes et al. (2008).

- Régimen de trabajo: Cantidad de tiempo que opera el equipo durante la jornada laboral.
- Afectaciones: Efecto del fallo del equipo en el proceso y su capacidad de interrumpirlo total o parcialmente.
- Frecuencia de fallos: Cantidad de fallos de cualquier componente del sistema por período de utilización (fallos/unidad de tiempo).
- Tiempo de reparación: Tiempo necesario para reparar el fallo.
- Costo de reparación: Costo asociado a la reposición del estado de funcionamiento del elemento que ha fallado.
 - **Acción 2.1.2. Establecer correspondencia entre los resultados de DEA y del método tradicional seleccionado**

En esta acción, primero se ordenan los equipos de mayor a menor eficiencia, y luego se les asigna la categoría de clasificación determinada por el método tradicional.

- **Paso 2.2. Decidir escala de clasificación**

Para el desarrollo de este paso se proponen las acciones siguientes.

- **Acción 2.2.1. Determinar escala inicial**

Una vez obtenida la correspondencia entre los resultados de ambos métodos, se establecerá la escala inicial en función de los valores de eficiencia asignados a cada clase.

- **Acción 2.2.2. Comprobar escala inicial**

La escala obtenida se verificará utilizando el método discriminante, el cual proporcionará una mayor precisión en los límites de cada categoría.

Etapas 3. Definir clasificación de criticidad

En esta etapa, finalmente se procederá a determinar la criticidad del equipamiento productivo con base en los resultados obtenidos en las etapas anteriores.

RESULTADOS

La determinación de la eficiencia se realizó a través del modelo DEA (CCR-INPUT). Primeramente, se definieron las variables de entrada y salida, para lo cual se conformó un grupo de expertos.

Las variables de salida recomendadas por los expertos fueron la disponibilidad del equipo y el costo de mantenimiento. Para definir las variables de entrada, primero se recopilaban las propuestas de los expertos y luego se determinó su nivel de correlación con las variables de salida mediante el software IBM SPSS Statistics, evaluando el coeficiente de correlación de Pearson. Las variables de entrada definidas fueron el régimen de trabajo, la frecuencia de fallo y el tiempo de reparación.

Los pesos y valores de las variables de entrada y de salida fueron obtenidos a través del software WINQSB. En la tabla 1, se muestran la eficiencia calculada a través de la expresión 4 para algunos de los equipos en estudio.

Tabla 1.
Eficiencia del equipamiento productivo.

Equipos	Eficiencia	Equipos	Eficiencia
Vaporizador N°3	0.33	Telares DIANA 20	0.50
Encanilladoras 1	1.00	Telares DIANA 22	0.50
Limpiadora de canillas 5	0.62	Telares DIANA 24	1.00
Limpiadora de canillas 6	1.00	Telares DIANA 26	0.99
Enconadora duro Kamitsu 6	1.00	Telares MEDICAL 3	0.67
Enconadora duro 13 SRW	1.00	Telares MEDICAL 5	1.00
Enconadora suave Kamitsu 1	1.00	Cortadoras 5	0.84
Enconadora suave SES 12	1.00	Torundas1	0.75
Telares Sulzer P7 218	0.50	Torundas2	0.80
Telares Sulzer P7 221	0.30	Selladoras 2	0.67
Telares DIANA 10	0.50	Selladoras 3	0.67

Elaboración: Los autores.

El grupo de expertos estableció los intervalos correspondientes a cada nivel de las variables estudiadas. A continuación, se describe cada nivel correspondiente a la variable régimen de trabajo, basado en el indicador “tiempo de utilización del equipo” (t_u).

Nivel 1: el equipo es utilizado intensivamente ($t_u > 14$).

Nivel 2: el equipo es utilizado medianamente ($7 < t_u \leq 14$).

Nivel 3: el equipo es de uso ocasional o de baja utilización ($t_u \leq 7$).

A partir de los intervalos definidos para cada variable se realizó la clasificación de la criticidad de cada equipo por el método tradicional utilizado. En la figura 3 se muestra, a

modo de ejemplo, la clasificación del equipo Telar 2 de marca Diana, el cual es catalogado como de “Clase B”.

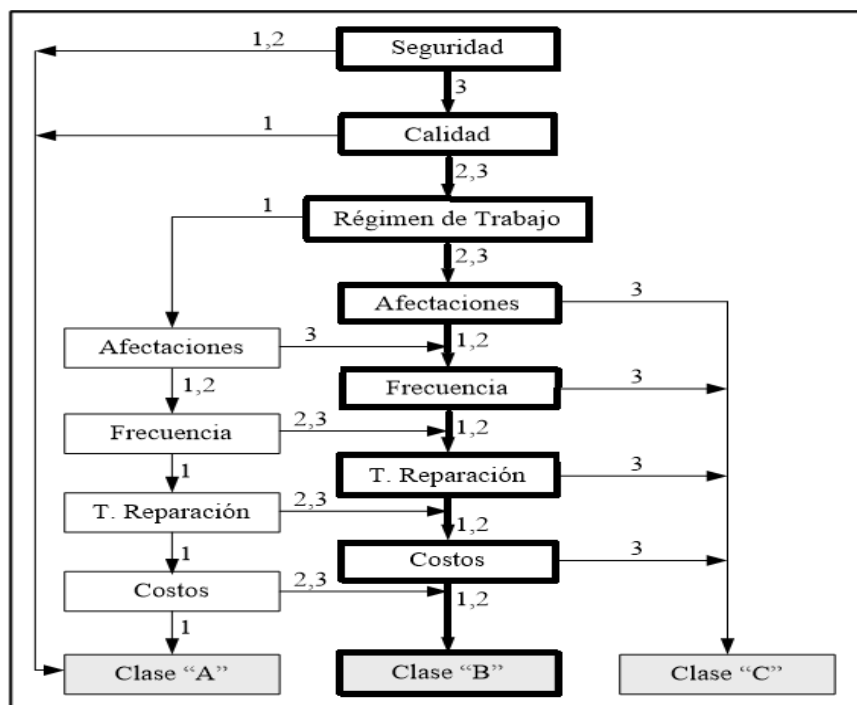


Figura 3. Representación gráfica de la determinación de la criticidad por el método tradicional del equipo Telar 2 marca Diana.

Elaboración: Los autores.

Como resultado de la clasificación por el método tradicional empleado se obtuvieron ocho equipos catalogados como Clase A, 10 de Clase B y 38 de Clase C.

Acción 2.1.2. Establecer correspondencia entre los resultados del DEA y del método tradicional seleccionado.

Luego de determinar la eficiencia y criticidad de cada equipo utilizando el método tradicional, se procedió a correlacionar ambos resultados. Para ello, los datos de eficiencia fueron ordenados de mayor a menor, observándose una relación inversamente

proporcional: a mayor eficiencia, menor criticidad. La escala de clasificación para la eficiencia se presenta en la tabla 2 inciso a. Posteriormente, se verificó la escala definida mediante el Análisis Discriminante, utilizando el software IBM SPSS Statistics. La escala final se muestra en la tabla 2 inciso b.

Tabla 2.
Escala de clasificación a partir de la eficiencia.

a) Escala de clasificación inicial		b) Escala de clasificación inicial comprobada	
Clase	Escala	Clase	Escala
A	$0 \leq e_j \leq 0.34$	A	$0 \leq e_j \leq 0.35$
B	$0.34 < e_j < 0.60$	B	$0.35 < e_j \leq 0.51$
C	$0.62 \leq e_j \leq 1.00$	C	$0.51 < e_j \leq 1.00$

Elaboración: Los autores.

Utilizando los valores de eficiencia obtenidos mediante el método DEA y la escala definida, se determinó la criticidad del equipamiento productivo. En la tabla 3 se presenta la cantidad de equipos clasificados en cada una de las clases, observándose que la mayoría del equipamiento se distribuye entre las clases C (73 %) y A (20 %), mientras que la clase B representa la minoría (7 %).

Tabla 3.
Cantidad de equipos por cada clase.

Clase	Escala inicial	Escala final
A	8	11
B	10	4
C	38	41

Elaboración: Los autores.

La investigación demostró la efectividad de combinar un método tradicional con el Análisis Envolvente de Datos (DEA) para clasificar la criticidad del equipamiento productivo. Esta integración facilitó una clasificación más precisa y útil, contribuyendo a la optimización de la gestión de recursos y el mantenimiento.

CONCLUSIONES

La investigación confirma la existencia de una amplia base conceptual sobre la clasificación del equipamiento y sus aplicaciones en el sector industrial, específicamente en la Gestión del mantenimiento. Sin embargo, se identificaron pocos estudios en la literatura científica consultada sobre la aplicación del método de Análisis Envolvente de Datos en este sector empresarial, lo que resalta la actualidad y pertinencia del problema formulado. Además, el análisis de la situación problemática demostró la necesidad de implementar un accionar metodológico que sirva de soporte al proceso de clasificación del equipamiento productivo utilizando el método de Análisis Envolvente de Datos.

La efectividad del accionar metodológico desarrollado para la clasificación del equipamiento productivo a partir del método de Análisis Envolvente de Datos, tomando como referencia un método tradicional, quedó corroborada mediante su aplicación en la entidad objeto de estudio. Esto se evidencia en la clasificación del equipamiento mediante el método tradicional seleccionado, la definición de una escala de clasificación numérica basada en la eficiencia técnica resultante del método de Análisis Envolvente de Datos, y finalmente la clasificación del equipamiento utilizando este método.

FINANCIAMIENTO

No monetario

AGRADECIMIENTO

A todos los actores sociales involucrados en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Alfonso Llanes, A., Granela Martín, H., y Hernández Pascual, K. (2008). Propuesta de procedimiento para determinar la política de mantenimiento a partir de análisis de criticidad del equipamiento productivo de los centrales azucareros. *Revista Centro Azúcar*, 35(1). <https://n9.cl/bvkqkz>
- Alfonso Llanes, A., González Magán, D. R., y Borroto Pentón, Y. (2022). Aplicación del Mantenimiento Basado en el Riesgo a equipos de la Empresa Agroindustrial Azucarera José María Pérez Capote. *Revista Centro Azúcar*, 49(2), 112-121. <https://n9.cl/x9rjl>
- Alvarado Figueroa, Y. K. (2022). *Planificación estratégica y su relación con la gestión del mantenimiento en una Unidad de Gestión Educativa Local de Trujillo*. [Tesis de Maestría, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://n9.cl/aapv8>
- Bakri, A., Alkbir, M. F. M., Awang, N., Januddi, F., Ismail, M. A., Ahmad, A. N. A., & Zakaria, I. H. (2021). Addressing the issues of maintenance management in SMEs: towards sustainable and lean maintenance approach. *Emerging Science Journal*, 5(3), 367-379. <https://doi.org/10.28991/esj-2021-01283>
- Barry, D. M. (2023). *Maintenance Parts Management Excellence. A Holistic Anatomy*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003344674>
- Barry, D. M., Campbell, J. D., Jardine, A. K. S., y McGlynn, J. (2024). *Asset Management Excellence. Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781032679600>
- Costa Ferreira, F. M., & de Souza, H. A. (2021). Management for maintenance of public education. *Gestão & Produção*, 28, e4894. <https://doi.org/10.1590/1806-9649.2020v28e4894>
- Chávez Cabanillas, D. L., y La Torre Alejos, M. G. (2023). *Aplicación del Lean Manufacturing para mejorar el proceso de mantenimiento de máquinas en una empresa del rubro de la construcción*. [Título de grado, Universidad Ricardo Palma, Perú]. Repositorio Institucional de la Universidad Ricardo Palma. <https://n9.cl/j7ioey>

- Esquivel Guerrero, M. P., Sánchez Cruz, M. L., y Zapuche Moreno, C. O. (2021). La importancia del mantenimiento como una estrategia de competitividad en las empresas del sector minero. *Revista Entorno Académico*, 17(2 3), 46-51. <https://n9.cl/29ni3>
- Feal Cuevas, N., González Suárez, E., y Santos Herrero, R. F. (2022). Procedimiento para la evaluación y mejora de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en la industria química cubana. *Revista Centro Azúcar*, 49(1), 41-50. <https://n9.cl/x9rjl>
- Indrawan, H., Cahyo, N., Simaremare, A., Aisyah, S., & Tauviqirrahman, M. (2019, October). Readiness index for Indonesian power plant toward industry 4.0. In *2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF48524.2019.9102606>
- Jakkula, B., Mandela, G., & Chivukula, S. (2022). Reliability, availability and maintainability (RAM) investigation of Load Haul Dumpers (LHDs): a case study. *Int J Syst Assur Eng Manag*, 13, 504-515. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01154-3>
- Krejnus, M., Stofkova, J., Stofkova, K. R., & Binasova, V. (2023). The Use of the DEA Method for Measuring the Efficiency of Electronic Public Administration as Part of the Digitization of the Economy and Society. *Applied Sciences*, 13(6), 3672. <https://doi.org/10.3390/app13063672>
- Lu, M., Li, S., y Wen, M. (2022). Types of Maintenance Based on Uncertain Data Envelope Analysis. *Symmetry*, 14, 1429. <https://doi.org/10.3390/sym14071429>
- Martínez Pérez, F., y Ruiz González, M. L. (2023). Una estrategia de mantenimiento. *Revista Ingeniería Agrícola*, 13(2), 42-47. <https://n9.cl/92n3kk>
- Pincirolì, L., Baraldi, P., y Zio, E. (2023). Maintenance optimization in industry 4.0. *Reliability Engineering and System Safety*, 234, 109204. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109204>
- Pirbalouti, R. G., Behnam, B., y Dehkordi, M. K. (2023). A risk-based approach to identify safety-critical equipment in process industries. *Results in Engineering*, 20, 101448. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101448>
- Priyanta, D., Zaman, M. B., y Semin. (2024). Maintenance priority: A literature review of equipment criticality analysis in the oil and gas industries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1423(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1423/1/012010>

Singh, A. K., & Tewari, P. C. (2023). An overview of reliability, availability, maintainability, and safety strategies for complex systems in various process industries. *International Journal of Performability Engineering*, 19(12), 788. <https://doi.org/10.23940/ijpe.23.12.p3.788796>

Xue, S. (2024). *Repair and Maintenance Methods of Mechanical Equipment*. [Trabajo de Grado, Savonia University of Applied Science]. <https://n9.cl/9r4iaz>