ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.670

Reliability-Centered Maintenance to reduce economic losses in the milling area of a sugar company

Mary Esthefany Martinez Jimenez, Industrial Engineer[1], Joselito Sánchez Pérez, Master's Degree[2]
[1,2] *Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, Perú,* 77701389@usat.edu.*pe*, jsanchez@usat.edu.pe

Abstract–This research focused on proposing a maintenance management focused on reliability to reduce economic losses in the milling area of a sugar company. Likewise, the maintenance process was diagnosed through interviews, documentary analysis and audits, identifying problems such as the increase in corrective maintenance and the deficient maintenance management. In response, a maintenance management proposal focused on reliability was developed, using tools such as Failure Modes and Effects Analysis and Criticality Analysis, which resulted in significant improvements in maintenance indicators. Reliability increased from 5,54 hours to 37,22 hours, reflecting an increase of 84,01%, while maintainability decreased by 95,38%, from 2,18 hours to 0,1 hours. In addition, equipment availability increased by 20,75%. These improvements contributed to a 33,61% reduction in economic losses, from S/. 19 768 419,07 to S/. 13 715 776,62. In addition, the economic and financial evaluation demonstrated the viability of the project, with a Net Present Value of S/ 1 726 129,54 and an Internal Rate of Return of 24,71%. Finally, a cost-benefit ratio of 1,75 was determined, which was higher than the unit, that is, the benefit was greater than the investment cost, which represented a recovery period of 5 months, and meant that the project was viable for the company.

Keywords-- Maintenance management, economic losses, RCM, preventive maintenance, corrective maintenance.

Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para reducir pérdidas económicas en el área de molienda de una empresa azucarera

Mary Esthefany Martinez Jimenez, Industrial Engineer[1], Joselito Sánchez Pérez, Master's Degree[2]
[1,2] Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, 77701389@usat.edu.pe, jsanchez@usat.edu.pe

Resumen*– Esta investigación se enfocó en proponer una gestión de mantenimiento centrada en la confiabilidad para reducir las pérdidas económicas en el área de molienda de una empresa azucarera. Asimismo, se diagnosticó el proceso de mantenimiento mediante entrevistas, análisis documental y auditorías, identificando problemas como el aumento del mantenimiento correctivo y la deficiente gestión de mantenimiento que se tuvo. Ante ello, se desarrolló una propuesta de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad, utilizando herramientas como el Análisis de Modos y Efectos de Fallas y el Análisis de Criticidad, lo que resultó en mejoras significativas en los indicadores de mantenimiento. La confiabilidad aumentó de 5,54 horas a 37,22 horas, lo que reflejó un aumento del 84,01%, mientras que la mantenibilidad disminuyó en un 95,38%, de 2,18 horas a 0,1 horas. Además, la disponibilidad de los equipos aumentó en un 20,75%. Estas mejoras contribuyeron a una reducción del 33,61% en las pérdidas económicas, de S/ 19 768 419,07 a S/ 13 715 776,62. Además, la evaluación económica y financiera demostró la viabilidad del proyecto, con un Valor Actual Neto de S/ 1 726 129,54 y una Tasa Interna de Retorno del 24,71%. Finalmente, se determinó el costo-beneficio de 1,75, el cual fue superior a la unidad, es decir, el beneficio fue mayor al costo de inversión, lo que representó un periodo de recuperación de 5 meses, y significó que el proyecto fue viable para la empresa.

Palabras clave- Gestión de mantenimiento, pérdidas económicas, RCM, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo.

I. Introducción

La continuidad y éxito de las empresas dependen de todas las áreas o departamentos que la componen y es ahí donde la gestión de mantenimiento juega un rol muy importante. Sin embargo, las empresas a nivel mundial aún se limitan solo a hacer uso del mantenimiento correctivo o disponen de un plan que por sí solo no basta para gestionar el mantenimiento de manera adecuada. Según un estudio de 2018 por BearingPoint, el 84% de las empresas en Alemania, Suiza y Austria implementan medidas básicas de mantenimiento preventivo, pero solo el 25% logra concretar proyectos [1]. En muchas empresas peruanas, el mantenimiento es un área crítica que no recibe la atención adecuada. En el Perú, un estudio realizado a diversas empresas revela que gran parte de ellas, especialmente en sectores como la manufactura, no cuentan con un programa de mantenimiento preventivo eficiente, lo que lleva a un alto porcentaje de fallos en maquinaria. Este deficiente manejo del mantenimiento genera paradas no planificadas, incrementando los costos operativos y reduciendo la productividad. Además, en algunos casos, solo se aplican acciones correctivas o engrasado básico, lo cual no cubre las necesidades reales de las empresas [2].

La empresa de estudio enfrentó problemas en la gestión de mantenimiento, ya que el 25,96% de actividades planificadas no se realizaron en 2023 y no se registraron los motivos. No se utilizan formatos adecuados para los mantenimientos correctivo y preventivo, y este último se asigna de forma aleatoria según disponibilidad del operario, basándose en experiencia más que en la evaluación de las máquinas. Esto generó sobrecostos, reflejados en 930 fallas que sumaron 438,85 horas de inactividad, causando pérdidas por S/ 19 768 419,07 entre marzo 2023 y febrero 2024. Por ello, surgió la pregunta: ¿En cuánto se reducirán las pérdidas económicas al implementar Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en el área de molienda de una empresa azucarera?

Por lo tanto, se tuvo como objetivo general proponer la gestión de mantenimiento basado en RCM del área de molienda de una empresa azucarera para reducir las pérdidas económicas, y como objetivos específicos se tuvieron: primero, diagnosticar el proceso de gestión de mantenimiento del área de molienda de la empresa azucarera; segundo, elaborar una propuesta de gestión de mantenimiento basado en RCM para reducir pérdidas económicas, y tercero, evaluar económica y financieramente la propuesta de gestión de mantenimiento. Este estudio se justificó al evaluar indicadores de mantenibilidad y proponer soluciones para reducir interrupciones en la producción, disminuyendo pérdidas económicas y mejorando la eficiencia. Además, buscó fortalecer la seguridad laboral, garantizó el bienestar de los empleados y optimizó la calidad de los productos mediante una gestión de mantenimiento eficaz, basada en Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), que asegura la fiabilidad y el rendimiento óptimo de los equipos.

II. Revisión De Literatura

Para el primer objetivo, se consideró el diagnóstico de diversas investigaciones [3], donde se reportaron fallos cada 40 horas de funcionamiento en el motor principal de un generador hidráulico de fabricación de botellas de vidrio, con tiempos de inactividad significativos; el generador hidráulico

mostró una mantenibilidad de 70,94 horas, y el compresor de refrigeración tuvo una disponibilidad del 54,3%. Por su parte, en el estudio de [4], realizado en una planta de alimentos evidenció que la máquina de envasado presento 54 fallas, reflejando el impacto negativo de los tiempos de inactividad. La pérdida de ingresos se reflejó en el estudio de [5], que estimó un total de S/ 42 975,5 por cada hora de parada de producción en equipos mecánicos, lo que, al año, representaba S/ 19 338 975.

Para el segundo objetivo, diversos estudios han reportado resultados positivos tras la implementación de RCM. En el estudio de [6], se encontró que la implementación de RCM en una industria textil aumentó la confiabilidad de los equipos en un 28,15% y redujo los costos de mantenimiento en un 20,32%. Asimismo, [7] hallaron una reducción del 30% en las pérdidas económicas al aplicar este enfoque. Por otro lado, [5] destacó que la mejora en el mantenimiento redujo las pérdidas de producción en $ 160 082,65 (S/ 42 975,5) por hora de parada, mientras que en el estudio de [8], se observó una disminución del 20,23% en las fallas de maquinaria y del 37% en pérdidas económicas. Además, [9] añadieron que la confiabilidad mejoró un 25%, y [10] corroboró que la aplicación de RCM optimizó el tiempo de funcionamiento de las máquinas, mejoró la eficiencia y obtuvo una reducción de pérdidas por fallos. En cuanto a la aplicación del RCM, [11] demostraron una mejora del OEE del 18%-22%, una reducción del 30% en fallas no programadas y un 15% en la calidad del producto final.

Para la evaluación económica y financiera, se tomaron en cuenta los resultados de [6], que destacó la importancia de analizar estos aspectos para demostrar la viabilidad de los proyectos. Este análisis fue respaldado por los estudios de [12] y [13], que subrayan la necesidad de tomar decisiones informadas sobre las inversiones en mantenimiento, resaltando el retorno positivo obtenido al implementar RCM en diferentes industrias.

III. Materiales y Métodos

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo y no experimental, con el fin de obtener datos numéricos sobre la situación actual del proceso de mantenimiento en la empresa azucarera. La población y muestra se centraron en el área de molienda, donde se evidenció una gestión deficiente que generaba frecuentes paradas en la producción. Para recolectar los datos, se utilizaron registros de la empresa, así como artículos y documentos científicos relacionados. En cuanto al primer objetivo, se recopiló información sobre la gestión de mantenimiento en el área de molienda mediante entrevistas y cuestionarios, se analizó documentación sobre fallas de máquinas, tiempos de parada y causas y se realizó una auditoría de mantenimiento para obtener un diagnóstico detallado. Asimismo, se calcularon indicadores como el tiempo medio entre fallas y el tiempo de reparación, siguiendo la metodología de RCM [7], y se aplicaron herramientas como árbol de fallas y análisis de criticidad. En el segundo objetivo, se realizó una revisión bibliográfica sobre el ciclo Deming o PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar) y se desarrolló la metodología RCM, aplicando AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Falla) para gestionar los equipos críticos. Estos métodos ayudaron a proponer una estrategia de mantenimiento que redujeron pérdidas económicas y costos operativos. Para el tercer objetivo, se revisaron artículos sobre la evaluación económica de la gestión de mantenimiento, se cotizaron los costos de capacitación y mantenimiento y se analizó la información financiera de la empresa, proyectando el impacto de la propuesta en los resultados económicos.

IV. Resultados

Para comprender la situación actual de la empresa, se identificó la gestión de mantenimiento actual, la cual incluía actividades correctivas y preventivas que buscan garantizar la operatividad de los equipos críticos durante la producción. El mantenimiento correctivo se realizó ante fallas que interrumpieron el proceso, determinando si fue necesario reparar o reemplazar los equipos según la disponibilidad de recursos, aunque esta se vio afectada por la falta de control en la salida de repuestos del almacén, lo que generó demoras significativas. En cuanto al mantenimiento preventivo, se destacaron actividades como el cambio de martillos en el desfibrador tras moler 28 000 toneladas de caña, fue supervisado por los responsables del área y documentado de manera informal debido a la ausencia de formatos estandarizados. Las actividades preventivas se programaron mensualmente considerando indicios de fallas observados por los jefes de área, utilizando un formato vigente desde 2023. Sin embargo, los registros y controles del mantenimiento se realizaron de forma verbal o a través de aplicaciones informales, limitando la trazabilidad y evaluación de los procesos.

El diagnóstico por causas reflejó deficiencias significativas en la gestión de mantenimiento de la empresa, afectando tanto a la maquinaria como a la mano de obra. La falta de mantenimiento preventivo regular e inspecciones limitó las actividades a cambios puntuales, como los martillos del desfibrador, dejando otras áreas críticas desatendidas. Esto incrementó la dependencia del mantenimiento correctivo y provocó un alto índice de fallas, registrándose 930 entre marzo de 2023 y febrero de 2024, con una duración total de 2 022,85 horas de parada de equipos, de las cuales 75,03 horas correspondieron al desfibrador como se muestra en la TABLA I, la cual detalla los principales fallos de cada equipo del área de molienda. Por ejemplo, el Molino N°01 ha tenido un total de 126 fallos, con un tiempo promedio de inactividad de 56,43 horas. Entre los problemas reportados se incluyen un "perno roto de catalina de molino" y una "suela rota", así como fallos relacionados a la operación mecánica del equipo.

TABLA I
FRECUENCIA, DURACIÓN Y DETALLE DE FALLAS

Equipos	Frecuencia	Horas	Fallos
Molino N°01	126	56,43	Perno roto de catalina de molino
			Suela rota
			Fallo por operación mecánica
Mesa alimentadora N°01	108	66,18	Descarrilo del conductor
			Arrastrador doblado
			Fallo por operación mecánica
Conductor caña N°04	85	28,32	Atascamiento con caña
			Descarrilo del conductor
Desfibrador caña	65	75,03	Martillo dañado
			Atascamiento con caña
Conductor caña N°02	64	41,93	Descarrilo del conductor
Molino N°03	60	28,53	Suela rota
Molino N°02	58	27,32	Perno flojo de chumacera
Molino N°07	53	16,80	Perno roto de catalina de molino
Conductor caña N°03	45	13,93	Descarrilo del conductor
			Eslabón roto de cadena de arrastre
Conductor intermedio N°05	45	10,43	Plancha de intermedio rota
			Pin del intermedio salido
Molino N°04	44	34,12	Perno roto de catalina de molino
Conductor intermedio N°03	41	4,83	Plancha de intermedio rota
Conductor intermedio N°07	30	6,63	Pin del intermedio salido
Molino N°06	29	6,82	Suela destrozada
Conductor intermedio N°04	28	10,80	Plancha de intermedio rota
Conductor intermedio N°06	28	5,27	Plancha de intermedio rota
Machetero N°01	17	10,45	Machete doblado/roto
Conductor intermedio N°02	5	1,55	Arrastrador doblado
Nivelador KiKer	5	1,42	Pernos rotos
Colador vibratorio jugo N°01	4	0,50	Plancha externa rota
Colador vibratorio jugo N°02	2	0,18	Plancha externa rota
Machetero N°02	2	1,50	Machete doblado/roto
Bomba jugo imbibición N°03	1	0,10	Bomba obstruida
Bomba jugo mezclado N°01	1	0,08	Bomba obstruida

Fuente: Elaboración propia.

La selección deficiente de repuestos y la ausencia de auditorías periódicas también contribuyeron a retrasos y errores en los procedimientos, como evidenció la auditoría realizada en mayo de 2023.

RESUMEN DE RESULTADOS DE MANTENIMIENTO	
Puntos analizados con graves deficiencias	21
Puntos analizados con deficiencias importantes	22
Puntos analizados susceptibles de mejora	31
Puntos analizados con resultado excelente	31
ÍNDICE OBTENIDO EN MANTENIMIENTO	

Fig. 1 Auditoría de mantenimiento 2023.

Además, los defectos en maquinaria generaron productos no conformes, afectando parámetros clave como % de sacarosa y % Brix del azúcar. En cuanto a la mano de obra, persistió una selección arbitraria y una falta de capacitación técnica, lo que ha dificultado la gestión del mantenimiento y la implementación de mejoras. El personal carece de información técnica de los equipos, lo que generó errores en las reparaciones y falta de planificación efectiva. Según la TABLA II, que detalla las actividades programadas y realizadas, el mayor porcentaje de incumplimiento de actividades ocurrió en enero de 2023.

TABLA II
PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE ACTIVIDADES PROGRAMADAS PARA MANTENIMIENTO 2023

Mes 2023	Incumplimiento
Enero	58,62%
Febrero	-NO SE PLANIFICÓ MANTENIMIENTO-
Marzo	8,34%
Abril	2,47%
Mayo	13,68%
Julio	5,32%
Agosto	4,76%
Octubre	23,35%
Noviembre	19,34%

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, los registros fueron inadecuados, sin formatos oficiales ni controles idóneos para la entrada y salida de repuestos, lo que aumenta las demoras. En el análisis de producción de marzo de 2023 a febrero de 2024, se calculó la producción esperada, considerando las paradas de los equipos. La TABLA III muestra las horas de producción y tiempo perdido, evidenciando una pérdida económica por mano de obra improductiva (M. O. Imp.) de S/2 532,92.

TABLA III
HORAS DE PRODUCCIÓN Y TIEMPO PERDIDO (MAR 2023- FEB 2024)

Mes	Horas programadas	Horas efectivas	Horas improductivas	Pérdida por M. O. Imp.
Mar-23	566	537,85	28,32	S/ 174,28
Abr-23	526	496	30	S/ 184,62
May-23	604	561,18	42,65	S/ 262,46
Jun-23	586	553,82	31,93	S/ 196,49
Jul-23	672	633,93	38,48	S/ 236,80
Ago-23	659	623,55	35,53	S/ 218,65
Set-23	607	558,97	48,03	S/ 295,57
Oct-23	484	447,78	36,55	S/ 224,92
Nov-23	572	531,75	39,75	S/ 244,62
Dic-23	616	591,57	24,05	S/ 148,00
Ene-24	615	584,27	30,73	S/ 189,11
Feb-24	677	651,7	25,58	S/ 157,42
TOTAL	**7184**	**6 772,36**	**438,85**	**S/ 2 532,92**

Fuente: Elaboración propia en base a la empresa.

Se calcularon indicadores de producción y mantenimiento para evaluar el rendimiento del proceso. La eficiencia de producción, calculada según estudio de [14], fue del 86,58%.

En cuanto al mantenimiento, se calcularon diversos indicadores para evaluar el rendimiento de los equipos en el área de molienda. Estos indicadores son MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas), MTTR (Tiempo Medio de Reparación) y Disponibilidad, y fueron calculados con las siguientes fórmulas, cuyos resultados se muestran en la TABLA IV.

$$Confiabilidad\ (MTBF) = \frac{\text{Tiempo teórico} - \text{Tiempo de paradas}}{\text{Número de fallas}} \quad (1)$$

$$Mantenibilidad\ (MTTR) = \frac{\text{Tiempo de parada}}{\text{Número de fallas por máquina}} \quad (2)$$

$$Disponibilidad = \frac{MTBF + MTTR}{MTBF} \quad (3)$$

TABLA IV
INDICADORES DE MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS

Máquinas	MTBF (1)	MTTR (2)	Disponibilidad (3)
Desfibrador caña	85	25,52	76,91%
Conductor caña Nº 04	66	18,97	77,56%
Molino Nº02	96	27,78	77,57%
Molino Nº06	193	54,86	77,86%
Conductor intermedio Nº 03	160	45,40	77,88%
Bomba jugo mezclado 2	5600	1 584,30	77,95%
Molino Nº07	105	30,20	77,72%
Molino Nº04	126	36,78	77,48%
Conductor intermedio Nº 06	200	56,76	77,88%
Conductor caña Nº 03	136	38,97	77,76%
Molino Nº01	44	13,14	77,00%
Conductor intermedio Nº 07	187	52,96	77,89%
Mesa alimentadora Nº 01	51	15,19	77,17%
Bomba jugo mezclado 1	5 600	1 584,08	77,95%
Conductor intermedio Nº 04	200	56,96	77,80%
Bomba jugo imbibición N° 03	5 600	1 584,10	77,95%
Machetero Nº 01	329	93,79	77,81%
Conductor intermedio Nº 05	124	35,43	77,81%
Conductor caña Nº 02	87	25,41	77,37%
Molino Nº03	93	26,88	77,55%
Conductor intermedio Nº 02	1 120	317,11	77,93%
Nivelador KiKer	1 120	317,08	77,93%
Machetero Nº02	2 799	792,75	77,93%
TOTAL	**24 120**	**6 834,40**	**77,92%**

Fuente: Elaboración propia

El indicador de confiabilidad presentó un valor de 5,54 horas, lo que indica un MTBF relativamente corto. En cuanto al indicador de mantenibilidad, se determinó que las bombas de jugo poseían el mayor valor de mantenibilidad debido a su baja frecuencia de fallas, con un MTTR de 2,18 horas. Por otro lado, el indicador de disponibilidad mostró que los equipos estuvieron disponibles para operar el 78% del tiempo.

En cuanto a la calidad, la producción (Prod.) de azúcar se calculó usando (4), obteniendo un valor de 98,82% de conformidad, lo que refleja una baja cantidad de productos defectuosos.

$$Calidad = \frac{\text{Prod. Real} - \text{Prod. Defectuosos}}{\text{Prod. Total}} \times 100 \quad (4)$$

$$Calidad = \frac{2\,108\,406 \text{ bolsas de 50 kg} - 24\,817 \text{ bolsas de 50 kg}}{2\,108\,406 \text{ bolsas de 50 kg}} \times 100$$

$$Calidad = 98{,}82\%$$

Finalmente, se determinó el indicador OEE usando (5), que combina disponibilidad, eficiencia y calidad, y dio como resultado 66,67%, lo que señala una efectividad global regular de los equipos y la necesidad de mejorar para reducir las pérdidas económicas.

$$OEE = \text{Disponibilidad} \times \text{Eficiencia} \times \text{Calidad} \quad (5)$$

$$OEE = 77{,}92\% \times 86{,}58\% \times 98{,}82\% = 66{,}67\%$$

Para calcular las pérdidas económicas, se determinaron los días laborados y el precio de venta del azúcar, el cual varía mensualmente, lo que resultó en pérdidas por utilidades no percibidas de S/ 17 737 888 debido a las paradas causadas por fallas en los equipos. Además, los costos de mantenimiento correctivo incluyeron mano de obra, repuestos y alquiler de máquinas. Se calculó también una pérdida económica de S/ 2 532,92 por mano de obra improductiva, considerando solo a los operadores de producción. Las pérdidas por productos defectuosos alcanzaron S/ 1 596 920 (evidenciadas en la TABLA V) debido a bolsas de azúcar fuera de los parámetros de calidad establecidos.

TABLA V
SEGMENTACIÓN DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS

Indicador	Motivo	Valor Actual
Pérdidas económicas	Detención del proceso por fallas en las máquinas	S/ 17 737 888
Costos de mantenimiento actual	Reparación y reposición	S/ 431 078,15
Pérdida económica por mano de obra improductiva	Personal de producción en parada	S/ 2 532,92
Pérdidas económicas por productos defectuosos	Productos defectuosos	S/ 1 596 920
Total pérdidas		**S/ 19 768 419,10**

Fuente: Elaboración propia en base a la empresa

Asimismo, se realizó la segmentación por niveles de análisis de criticidad de las máquinas, la cual se muestra en la TABLA VI. Dicha clasificación se basó en el método ABC, permitiendo agrupar los equipos según su impacto en la operación y considerando su puntaje acumulado. De esta manera, se definieron tres niveles: A, B y C, con el propósito de facilitar la toma de decisiones estratégicas en la gestión de mantenimiento, optimizar la planificación de intervenciones y mejorar la asignación de recursos disponibles.

TABLA VI
SEGMENTACIÓN POR NIVELES DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Equipo	Puntaje	%	%Acumulado	80-20	Nivel
Desfibrador caña	37 800	34,5%	34,5%	0,8	A
Molino 1	7 850	7,2%	41,7%	0,8	
Molino 2	7 850	7,2%	48,9%	0,8	
Molino 3	7 850	7,2%	56,1%	0,8	
Molino 7	7 850	7,2%	63,2%	0,8	
Molino 4	6 280	5,7%	69,0%	0,8	
Conductor caña 2	4 825	4,4%	73,4%	0,8	
Conductor caña 4	4 825	4,4%	79,8%	0,8	
Molino 6	4 710	4,3%	82,1%	0,8	B
Conductor caña 3	3 860	3,5%	85,6%	0,8	
Mesa alimentadora	1 700	1,6%	87,2%	0,8	
Ventilador molino 1	910	0,8%	88,0%	0,8	
Bomba 1° jugo 1	780	0,7%	88,7%	00,8	
Bomba 1° jugo 2	780	0,7%	89,4%	0,8	
Bomba jugo imbibición 2	780	0,7%	90,1%	0,8	
Bomba jugo imbibición 3	780	0,7%	90,9%	0,8	
Bomba jugo imbibición 4	780	0,7%	91,6%	0,8	
Bomba jugo imbibición 5	780	0,7%	92,3%	0,8	
Bomba jugo mezclado 1	780	0,7%	93,0%	0,8	
Bomba jugo mezclado 2	780	0,7%	93,7%	0,8	
Bomba caña	775	0,7%	94,4%	0,8	
Bomba aceite Pomini 1	775	0,7%	95,1%	0,8	
Conductor 3	660	0,6%	95,7%	0,8	C
Conductor 5	660	0,6%	96,3%	0,8	
Conductor 7	660	0,6%	96,9%	0,8	
Machetero 1	630	0,6%	97,5%	0,8	
Conductor 4	495	0,5%	98,0%	0,8	
Conductor 6	495	0,5%	98,4%	0,8	
Machetero 2	420	0,4%	98,8%	0,8	
Conductor 2	330	0,3%	99,1%	0,8	
Colador vibratorio jugo 1	316	0,3%	99,4%	0,8	
Colador jugo 2	316	0,3%	99,7%	0,8	
Nivelador KiKer	175	0,2%	99,8%	0,8	
Bomba Pomini 2	25	0,0%	99,9%	0,8	
Bomba Pomini 3	25	0,0%	99,9%	0,8	
Bomba Pomini 4	25	0,0%	99,9%	0,8	
Bomba Pomini 6	25	0,0%	99,9%	0,8	
Bomba Pomini 7	25	0,0%	100,0%	0,8	
Ventilador molino 2	10	0,0%	100,0%	0,8	
Ventilador molino 3	10	0,0%	100,0%	0,8	
Ventilador molino 4	10	0,0%	100,0%	0,8	
Ventilador molino 6	10	0,0%	100,0%	0,8	
Ventilador molino 7	10	0,0%	100,0%	0,8	

Fuente: Elaboración propia

En el análisis de las máquinas críticas, se observó que el 80% del puntaje de criticidad provenía de ocho máquinas que son clave para la producción: desfibrador de caña, 5 molinos, y 2 conductores.

De la misma manera, con base en el diagnóstico, se elaboraron árboles de fallos para cada una de las máquinas críticas. En la Fig. 2 se muestra el árbol de fallos del desfibrador de caña.

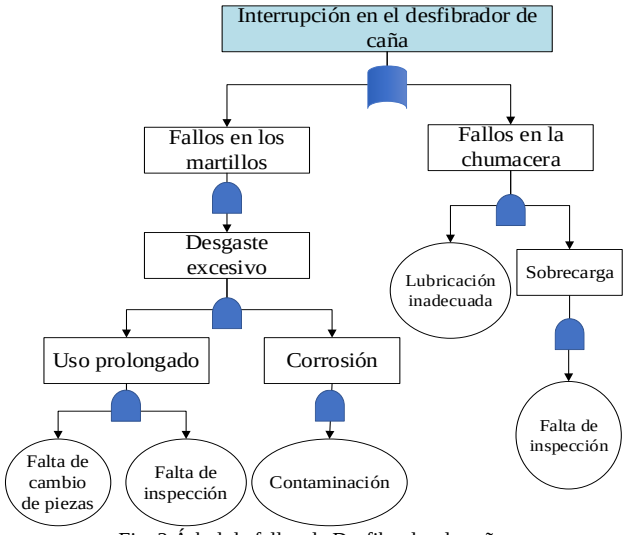

Fig. 2 Árbol de fallos de Desfibrador de caña.

La propuesta de gestión de mantenimiento se centró en aplicar PHVA, con énfasis en optimizar la confiabilidad de las máquinas. En la fase Planificar se establecieron los objetivos y la política de mantenimiento, las cuales buscaban maximizar la disponibilidad de los equipos, mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos de reparación. Además, se propuso un nuevo organigrama para el área de molienda incluyendo un puesto de operario de mantenimiento, y se definieron registros y documentos necesarios para mejorar la planificación y seguimiento de las actividades.

Por su parte, en la fase Hacer, se implementó RCM, utilizando AMEF para evaluar las fallas potenciales en los equipos, así como la hoja de decisión para evaluar las consecuencias de los modos de falla. En la TABLA VII se muestra el AMEF del desfibrador de caña, que incluye descripción y función del componente, falla funcional, modo y efecto de falla, y los factores de severidad, ocurrencia y detección, para calcular el Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Asimismo, en la TABLA VIII se detalla la hoja de decisión, evaluando el tipo de consecuencia (H: falla oculta S: seguridad y medio ambiente, E: operacionales y O: no operacionales), además del tipo de tareas a realizar (a condición: H1/S1/O1/N1), reacondicionamiento: H2/S2/O2/N2, sustitución: H3/S3/O3/N3, búsqueda de fallas: H4, rediseño: S4 y combinación o no mantenimiento: H5). También se desarrollaron un plan de mantenimiento y un cronograma detallado para todas las máquinas críticas, considerando la frecuencia de fallos, la disponibilidad de repuestos y los recursos humanos necesarios.

TABLA VII
ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLAS (AMEF)

AMEF N°1				ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLAS (AMEF)						Código			
Máquina:				DESFIBRADOR DE CAÑA					Fecha:	24/10/2023	Revisado por:		
Descripción	Componente	Función que desempeña (F)		Falla funcional (FF)		Modo de Falla (MF)		Efecto de falla		SITUACIÓN ACTUAL			
										Severidad	Ocurrencia	Detección	NPR	Prioridad del Riesgo
Martillos	Martillos	1	Trituran en pedazos más reducidos la caña.	A	Pérdida de la capacidad para desgarrar la caña de azúcar.	1	Desgaste excesivo	1	Desgaste prematuro	7	5	6	210	Inaceptable
						2	Corrosión	1	Descentramiento de martillo					
						3	Falta de inspección en el proceso de la máquina	1	Desgaste prematuro de los martillos y componentes cercanos					
Chumacera	Chumacera	1	Permite el soporte para la rotación de eje del desfibrador.	B	Pérdida para soportar y mantener la carga.	1	Sobrecarga por superar capacidad.	1	Desalineación de componentes de la máquina	9	3	6	162	Reducción deseable
						2	Atascamiento de los elementos rodantes.	1	Desgaste prematuro o daño en la chumacera					

Fuente: Elaboración propia

TABLA VIII
HOJA DE DECISIÓN DEL DESFIBRADOR

HOJA DE DECISIÓN RCM															
Máquina:			DESFIBRADOR DE CAÑA									Función:	Desmenuzar o triturar en pedazos más reducidos la caña de azúcar,		
Referencias			Referencias de Información				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Intervalo	A realizarse por
							S1	S2	S3						
F	FF	MF	H	S	E	O	O1	O2	O3	H4	H5	S4			
							N1	N2	N3						
1	A	1	S	N	S	N	N	N	S	-	-	-	Cambiar los martillos del desfibrador	Semanal	Mecánico
1	A	2	S	S	S	N	S	N	N	-	-	-	Limpieza completa de los martillos para quitar el material corroído	2 veces a la semana	Mecánico
1	A	3	S	N	S	N	S	N	N	-	-	-	Inspección de los martillos durante el proceso de la máquina	Semanal	Ingeniero
1	B	1	S	N	S	N	S	N	N	-	-	-	Inspección de la cantidad de caña que ingresa al desfibrador para evitar sobrecarga	Diario	Ingeniero Integral
1	B	2	S	N	S	N	S	N	N	-	-	-	Lubricación de la chumacera y sus elementos rodantes	Cada 2 semanas	Mecánico
1	C	1	N	N	S	N	N	N	S	-	-	-	Cambio de rodamientos acoplados al rotor	Cada 8 meses	Mecánico electricista
2	D	1	N	N	S	N	S	N	N	-	-	-	Limpieza y barnizado	Cada 8 meses	Mecánico electricista

Fuente: Elaboración propia

En la fase Verificar, se monitorearon los resultados obtenidos y se verificó la efectividad de las acciones implementadas. Finalmente, en la fase Actuar, se ajustaron las prácticas de mantenimiento para asegurar la mejora continua. El uso de registros detallados permitió el seguimiento adecuado de las actividades y contribuyó a la optimización de los recursos y la reducción de pérdidas económicas derivadas de fallas y paradas no programadas.

Por consiguiente, la nueva eficiencia de producción se calculó considerando la nueva producción tras la propuesta de mejora y la producción esperada como pronóstico, tal como se observa en la TABLA IX. En ella se evidencia una reducción significativa del tiempo de parada, pasando de 2 022,85 horas a 1 316,08 horas. Esta disminución permitió aumentar considerablemente la eficiencia de producción.

TABLA IX
NUEVA EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN

Tiempo de parada (horas)	Producción esperada	Producción real	Eficiencia de producción
2 022,85	2 435 295	2 108 406,0	86,58%
1 316,08	2 629 514	2 622 857,6	99,75%

Fuente: Elaboración propia

Teóricamente la aplicación de RCM en el área de molienda reduce al 100% las fallas. Sin embargo, [6] demostraron que la reducción de fallas se encontraba entre el 20% y el 50%. También, un estudio de la Universidad de Idaho analizó la efectividad de RCM en una planta de azúcar, donde se encontró que la metodología redujo las fallas en un 75%. Finalmente, una investigación en empresas manufactureras, donde se implementó RCM, obtuvo una reducción de las fallas en un 85% [15]. Considerando el promedio de las mejoras, se puede afirmar que RCM reduce las fallas en un 57,5%, por lo que los indicadores de mantenimiento cambiaron en función a la reducción de fallas de los equipos. Así, se calcularon los nuevos indicadores de mantenimiento luego de la aplicación de la metodología, los cuales se muestran en la TABLA X, evidenciando la mejora de los indicadores de las máquinas más críticas de la empresa, es decir, aquellas que generaron mayores pérdidas económicas.

TABLA X
NUEVOS INDICADORES DE MANTENIMIENTO

Máquinas	Confiabilidad (horas) MTBF	Mantenibilidad (horas) MTTR	Disponibilidad
Desfibrador caña	244,57	12,00	95,32%
Molino 1	185,33	8,83	95,45%
Molino 2	278,57	8,79	96,94%
Molino 3	536,77	15,85	97,13%
Molino 4	470,94	8,00	98,33%
Molino 7	7 090,07	94,00	98,69%
Conductor caña 2	307,71	4,64	98,52%
Conductor caña 4	368,00	10,11	97,33%
TOTAL	**34,68**	**0,10**	**98,32%**

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, el análisis del impacto de RCM en la producción de azúcar en una fábrica mexicana reveló una significativa mejora en la calidad del azúcar, reduciendo los defectos en un 15% [21]. Con base en ello, se calculó el nuevo índice de calidad de la empresa azucarera usando (6).

$$Calidad = \frac{\text{Prod. Real} - \text{Prod. Defectuosos}}{\text{Prod. Total}} \times 100 \quad (6)$$

$$Calidad = \frac{2\,108\,406 \text{ bolsas de 50 kg} - 21\,094 \text{ bolsas de 50 kg}}{2\,108\,406 \text{ bolsas de 50 kg}} \times 100$$

$$Calidad = 99\%$$

Con estos cálculos, el indicador OEE fue de 96,92%, lo que indica que el proceso fue excelente. Por ello, se presenta el resumen de los nuevos indicadores tras la aplicación del mantenimiento basado en RCM a las ocho máquinas críticas.

TABLA XI
NUEVOS INDICADORES DE MÁQUINAS CRITICAS

Descripción	Antes	Después
Indicadores		
Eficiencia de producción	86,58 %	99,75%
MTBF Confiabilidad	5,54 h	37,22 h
MTTR – Mantenibilidad	2,18 h	0,10 h
Disponibilidad	77,92%	98,32%
Calidad	98,82%	99%
OEE	66,67%	96,92%
Número de fallas	554	235
Tiempo de parada de equipos	2 022,85 h	1 330,08 h
Pérdidas económicas		
Utilidades no percibidas	S/ 17 737 888	S/ 11 964 100
Costos de mantenimiento actual	S/ 431 078,15	S/ 392 516,00
Mano de obra improductiva	S/ 2 532,92	S/ 1 778,62
Productos defectuosos	S/ 1 596 920	S/ 1 357 382
Total de pérdidas	**S/ 19 768 419,07**	**S/ 13 715 776,62**

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se generó una disminución del 29,78% en el tiempo de parada de equipos y una reducción del 33,61% en las pérdidas económicas. Estas mejoras no solo incrementaron la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, asegurando un proceso de producción más estable, sino que también redujeron las pérdidas económicas y fortalecieron la eficiencia operativa, contribuyendo al desempeño global de la empresa.

En la TABLA XII se muestran los costos de la propuesta.

TABLA XII
COSTOS DE LA PROPUESTA

Material (especificación)	Unidad	Cantidad	Costo mensual
Tablas de apuntes	l	3	S/ 2,50
Papel x 500 unidades	Unidad	10	S/ 15,00
Lapiceros Pilot BP	Unidad	10	S/ 1 ,25
Kit Tinta Epson	Unidad	12	S/ 268,00
Aceite Draula h 68	Galones	55	S/ 160,42
Solución desengrasante CRC	Unidad	101	S/ 1 770,11
Lubricante Protector Anticorrosivo para Metales	Unidad	101	S/ 2 297,75
Rodamiento 6319/C3	Unidad	10	S/ 0,00
Barniz 1 gl	Unidad	5	S/ 58,33
Esponja	Unidad	26	S/ 126,71
LGEP	Unidad	101	S/ 2 398,75
Soldadura Supercito	20 kg	300	S/ 8 750,00
Soldadura nazca	kg	181	S/ 2 156,92
Pernos de la chumacera	Unidad	40	S/ 1 371,23
Pernos de la chumacera (Diámetro 80 mm)	Unidad	40	S/ 833,33
Rodamientos de acero inoxidable NU 319	Unidad	10	S/ 0,00
Cepillos de cerdas metálicas y cepillos de alambre	Unidad	20	S/ 25,00
Trapo industrial	Unidad	20	S/ 53,33
Suela de molino	m	20	S/ 83,33
Chaveta de catalina del molino	Unidad	5	S/ 59,06

Material (especificación)	Unidad	Cantidad	Costo mensual
Pernos catalina molino extracción	Unidad	240	S/ 2 000,00
Empaquetadura Garlot para brida molino extracción	Unidad	2	S/ 165,83
Rodamiento rodillos esféricos NSK	Unidad	10	S/ 711,67
TOTAL			**S/ 23 308,53**

Fuente: Promart, NSK

La propuesta de mejora implicó una inversión total de S/ 969 012,71, considerando la elaboración de la propuesta, adquisición de herramientas y equipos, fabricación de componentes, transporte, instalación, y capacitaciones. Con la implementación de RCM, los beneficios económicos se reflejaron en un aumento significativo de la producción y utilidades, con un total de S/ 4 590,10 de beneficios proyectados en un año, debido al incremento de la producción y al precio de venta optimizado. Además, se logró un ahorro anual de S/ 38 562 en costos de mantenimiento gracias a la optimización de actividades correctivas y preventivas, una disminución del 29,78% en el tiempo de parada de equipos que generó un ahorro de S/ 754,30 en mano de obra improductiva, y una reducción del 15% en productos defectuosos, representando un ahorro adicional de S/ 239,538 al año. Estas medidas consolidaron la eficiencia operativa y contribuyeron a la rentabilidad global de la empresa.

El Gerente General estuvo dispuesto a invertir en el proyecto con capital propio con una TMAR (Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento) de 2,26% basada en la tasa de inflación mensual de 1,01% del Banco Central de Reserva del Perú. El análisis financiero mostró un VAN (Valor Actual Neto) de S/ 1 726 129,54, una TIR (Tasa Interna de Retorno) del 22,41%, un coeficiente Beneficio/Costo de 1,75 y un PRI (Período de Retorno de Inversión) de 4,14 meses, confirmando su viabilidad y rentabilidad. Finalmente, en la TABLA XIII se presenta el flujo de caja, donde se detallaron los beneficios obtenidos a partir de estas mejoras y los costos de inversión.

TABLA XIII
FLUJO DE CAJA

Mes	0	1	2	…	12
Ingresos		S/359 611,03	S/321 975,75		S/501 411,75
Costos operativos		S/ 50 072,17	S/ 32 372,17		S/ 34 397,17
% de imprevistos (5%)		S/ 2 503,61	S/ 1 618,61		S/ 1 719,86
Depreciación		S/ 10 828,37	S/ 10 828,37		S/ 10 828,37
Utilidad antes de impuestos		**S/296 206,88**	**S/277 156,60**		**S/454 466,35**
Impuestos (29.5%)		S/ 87 381,03	S/ 81 761,20		S/134 067,57
Utilidad después de impuestos		**S/208 825,85**	**S/195 395,40**		**S/320 398,78**

Mes	0	1	2	..	12
Utilidad Final		S/208 825,85	S/195 395,40		S/320 398
Depreciación		S/ 10 828,37	S/10 828,37		S/10 828
Inversión	**S/910 012,72**	S/219 654,22	S/206 223,78		S/331 227

Fuente: Elaboración propia

V. DISCUSIONES

En cuanto al diagnóstico del proceso de gestión de mantenimiento del área de molienda de la empresa azucarera, los resultados de la investigación mostraron que los indicadores de mantenimiento son bajos. El desfibrador de caña, por ejemplo, solo estuvo funcionando correctamente durante 80 horas, el molino 6 tuvo un tiempo para ser reparado de 54,86 horas y se registró una disponibilidad de los equipos en promedio de 77,92%. Estos resultados son similares a los encontrados en [3], quien detalla que el motor principal fallaba cada 40 horas, el generador hidráulico tenía una mantenibilidad de 70,94 horas y el compresor de refrigeración tenía una disponibilidad de 54,3%. Asimismo, en la presente investigación, la máquina que más falló fue el Molino 1 con 125 fallos y un tiempo de parada de 58,22 horas, comparados con los datos obtenidos por [4]: la máquina envasadora presentó 54 fallas. Por otro lado, en la presente investigación se calculó un total de pérdidas económicas de S/ 19 768 419,07 en el año estudiado, mientras que [5], en su investigación estimó una pérdida de ingresos de S/ 42 975,5 por cada hora de parada de producción, siendo al año S/ 19 338 975,00, lo que representa un 2,17% menor a las pérdidas de la empresa analizada.

La propuesta de gestión de mantenimiento basado en RCM demostró mejoras significativas en los indicadores clave de rendimiento, los resultados muestran que la disponibilidad de los equipos aumentó en 20,75%, y la confiabilidad aumentó en 84,01%. Asimismo, la mantenibilidad disminuyó en 95,38%, lo cual significa que los equipos son más fáciles de reparar y volver a funcionar. Dichos hallazgos son consistentes con investigaciones previas, por ejemplo, en [6] evidenciaron un aumento de 28,15% en la confiabilidad al implementar RCM, ahorrando 20,32% en costos de mantenimiento anualmente. Asimismo, en la presente investigación, al implementar la propuesta, las pérdidas económicas disminuyeron en 33,61%, porcentaje mayor al obtenido por [7] al aplicar la misma metodología: 30%. Además, en [9] se logró una reducción en pérdidas económicas de 5 700 000 rupias indonesias, lo que significa el 39%. Por su parte, en [8] se evidenció una reducción de 20,23% en fallas de maquinaria, con una disminución de 37% en pérdidas económicas, porcentajes similares a los obtenidos en esta investigación. También, se evidenció una mejora en el OEE de 30,25%, valor mayor en 8,25% al evidenciado en [11].

Respecto a la evaluación económica y financiera de la propuesta se obtuvo que el proyecto es viable. Asimismo, en [6] se mencionó una TIR mensual de 23.76% y un VAN de S/1 742 231,54. En el caso de la empresa de investigación, donde se logró una TIR mensual del 24,71%, aunque aparentemente superior que la del estudio mencionado, demostró un rendimiento favorable en términos económicos. Otro estudio realizado por [12] obtiene como indicadores

económicos una TIR de 12% mensual y un B/C de 1,91, dicho porcentaje fue menor debido a que los ingresos de su propuesta fueron proporcionales a sus costos. Además, [13], en su investigación en una empresa agroindustrial obtuvo como indicadores un VAN de S/. 426 029,35, una TIR de 117% anual y una TIR de 7,25% mensual. Finalmente, se obtuvo un ahorro de S/ 38 562, 15 en los costos de mantenimiento total, valor que supera en 52,8% a la reducción registrada en [10], el cual obtuvo un ahorro de S/ 18 479,05. Obteniéndose un VAN de S/1 726 129,54, y una TIR de 24,71%. En comparación a los resultados de la presente investigación se sustentó que el aumento de los indicadores económicos se justificó en el mejor aprovechamiento de los recursos y aumento de beneficios por la variación de la producción luego de la mejora.

VI. Conclusión

En conclusión, se logró cumplir el objetivo general de implementar una gestión de mantenimiento basada en RCM en el área de molienda, contribuyendo a la reducción de pérdidas económicas. En cuanto a los objetivos específicos, se diagnosticó efectivamente el proceso de mantenimiento, evidenciando un predominio del mantenimiento correctivo y deficiencias en la planificación. A partir de este diagnóstico, se elaboró una propuesta basada en herramientas como el AMEF y el análisis de criticidad, lo cual permitió mejorar significativamente los indicadores de mantenimiento: aumento de la confiabilidad, reducción del tiempo medio de reparación y mayor disponibilidad de los equipos. Finalmente, la evaluación económica y financiera demostró la viabilidad del proyecto, generando un beneficio superior al costo, con un período de recuperación corto. Estos resultados evidencian que la estrategia propuesta es aplicable y beneficiosa para la empresa.

Agradecimiento

Agradezco profundamente a la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación, destacando la calidad educativa y los recursos proporcionados, que fueron esenciales para alcanzar los objetivos propuestos. También agradezco a los docentes y al personal administrativo de la Facultad de Ingeniería Industrial, cuya orientación y disposición fueron clave para el éxito de este trabajo. De igual manera, expreso mi sincero agradecimiento a la empresa que facilitó los datos y procesos necesarios para realizar este análisis, contribuyendo al diagnóstico detallado y a la propuesta de mejoras en la gestión de mantenimiento. Su colaboración ha sido fundamental para la realización de esta investigación, que busca generar un impacto positivo en los procesos productivos.

Referencias

[1] S. Zhai y G. Reinhart, «Predictive Maintenance als Wegbereiter fur die instandhaltungs-gerechte Produktionssteuerung,» *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb,* vol. 113, nº 5, pp. 1-4, 2018, doi: 10.3139/104.111912.

[2] T. D. Garcia Zapata y C. S. Sancho Dávila , «Modelo de mejora de la competitividad basada en indicadores críticos de gestión en las pequeñas empresas de servicios de mantenimiento de equipos pesados,» *Industrial Data,* vol. 16, nº 1, pp. 1-14, 2013.

[3] S. Okwuobi, F. Ishola, O. Ajayi, E. Salawu, A. Aworinde, O. Olatunji y S. Akinlabi, «A Reliability-Centered Maintenance Study for an Individual Section-Forming Machine,» *Machines,* vol. 6, nº 4, pp. 1-17, 2018, doi: 10.3390/machines6040050.

[4] O. Yavuz, E. Doğan1, E. Carus y A. Görgülü, «Reliability Centered Maintenance Practices in Food Industry,» *Procedia Computer Science,* vol. 158, pp. 227-234, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.09.046.

[5] Y. Liu, Y. Tang, P. Wang, X. Song y M. Wen, «Reliability-Centered Preventive Maintenance Optimization for a Single-Component Mechanical Equipment,» *Symmetry,* vol. 16, nº 1, pp. 1-11, 2023, doi: 10.3390/sym16010016.

[6] S. Patil, A. Bewoor, R. Kumar, M. Hossein Ahmadi, M. Sharifpur y S. PraveenKumar, «Development of optimized maintenance program for a steam boiler system using reliability-centered maintenance approach,» *Sustainability,* vol. 14, pp. 1-20, 2022, doi: 10.3390/su141610073.

[7] G. Pinto, F. Silva, N. Fernandez, R. Casais, A. Baptista y C. Carvalho, «Implementing a maintenance strategic plan using TPM methodology,» *International Journal of Industrial Engineering and Management,* vol. 11, nº 3, pp. 1-13, 2020, doi: 10.24867/IJIEM-2020-3-264.

[8] I. H. Afefy, A. Mohiba, A. M. El-kamash y M. A. Mahmoud, «A New Framework of Reliability Centered Maintenance,» *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering,* vol. 13, nº 3, pp. 1-16, 2019.

[9] W. N. Cahyo, F. W. Hasibuan y A. P. Hendradewa, «Proposing a More Efficient Maintenance Scheduling for an Overhaul Maintenance Project in Engineering Asset Management,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 722, pp. 1-12, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/722/1/012071.

[10] X. Yang, Y. He, R. Liao y W. Dai, «Mission reliability-centered opportunistic maintenance approach for multistate manufacturing systems,» *Reliability Engineering & System Safety,* vol. 241, nº 109693, 2024, doi: 10.1016/j.ress.2023.109693.

[11] J. C. Rodríguez Pérez, A. L. Hernández Gutiérrez y J. L. Méndez López , «Análisis del Impacto del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en la mejora del OEE en una planta de molienda de azúcar,» *Scielo,* pp. 14-15, 2021.

[12] Y. Pei, Z. Liu, J. Xu, B. Qi y Q. Cheng, «Grouping preventive maintenance strategy of flexible manufacturing systems and its optimization based on reliability and cost,» *Machines,* vol. 1, nº 11, pp. 1-21, 2023, doi: 10.3390/machines11010074.

[13] C. Ketkaew, O. Noohawm y D. Rerkpreedapong, «Rice Mill Industry Maintenance Planning using Reliability Centered Maintenance (RCM),» *Power and Energy Systems,* vol. 37, pp. 1-8, 2013, doi: 10.2316/P.2013.800-112.

[14] N. Castro Perdomo y O. N. Rajadel Acosta, «Sistema para el cálculo de la efectividad y la eficiencia del proceso de integración de la gestión de la ciencia, la innovación tecnológica y el medio ambiente a escala territorial,» *Ciencia y Sociedad,* vol. 35, nº 3, pp. 386-406, 2010.

[15] Z. Sajaradj, L. Nurul Huda y S. Sinulingga, «The Application of Reliability Centered Maintenance (RCM) Methods to Design Maintenance System in Manufacturing (Journal Review),» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 505, nº 1, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/505/1/012058.