

Hermer Ernesto Alzamora Román, Noelia Paola Saavedra Nizama, Ricardo Edwin More Reaño, Víctor Enrique Antón Antón, John Félix Sevillano Zavala

Confiabilidad en acción

*Cómo transformar el mantenimiento industrial
en ventaja competitiva*



Hermer Ernesto Alzamora Román, Noelia Paola Saavedra Nizama,
Ricardo Edwin More Reaño, Víctor Enrique Antón Antón,
John Félix Sevillano Zavala

Confiabilidad en acción

*Cómo transformar el mantenimiento industrial en
ventaja competitiva*

Atik Editorial



E15D N49-59 y Olivos, San Isidro. Código postal 170515.

Quito, Ecuador

Atik Editorial, es una iniciativa del Centro de Investigaciones CICSHAL y está a cargo del departamento de Comunicación y Difusión Científica.

www.atikeditorial.com

(APA 7)

Alzamora Román, H. E., Saavedra Nizama, N. P., More Reaño, R. E., Antón Antón, V. E., y Sevillano Zavala, J. F. (2026). *Confiabilidad en acción. Cómo transformar el mantenimiento industrial en ventaja competitiva*. Atik Editorial. <https://doi.org/10.46652/atikbook24>



Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) la cual está disponible en: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>

Se debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

Las consultas relativas a la reproducción fuera del ámbito de esta licencia deberán enviarse al Departamento de Comunicación y Difusión Científica de CICSHAL a la siguiente casilla de correo: info@atikeditorial.com

Los enlaces a sitios web de terceros son facilitados por **Atik** Editorial de buena fe y a título meramente informativo. **Atik** Editorial declina toda responsabilidad por el material contenido en cualquier sitio web de terceros al que se haga referencia en esta obra.

El presente libro tienen el aval del Centro de Investigaciones en Ciencias y Humanidades desde América Latina - CICSHAL.



Título: Confiabilidad en acción. Cómo transformar el mantenimiento industrial en ventaja competitiva

Primera Edición: 2026

Derechos de autor/Copyright: Hermer Ernesto Alzamora Román, Noelia Paola Saavedra Nizama, Ricardo Edwin More Reaño, Víctor Enrique Antón Antón, John Félix Sevillano Zavala

Editorial: Atik Editorial

Materia Dewey: 658.2 - Manejo de planta

Clasificación Thema: KJMV5 - Gestión de la producción y control de calidad; TGP - Ingeniería de producción

Público objetivo: Profesional/Académico

BISAC: TEC009060

Colección: Ingeniería

Soporte: Digital

Formato: Epub (.epub)/PDF (.pdf)

Publicado: 2026-04-15

ISBN: 978-9907-820-02-7

Disponible para su descarga gratuita en <http://atikeditorial.com>

Esta publicación es una obra derivada que surge de la tesis de maestría titulada "Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para mejorar la disponibilidad de un Molino y Tostadora de una Planta de Pasta de Cacao", defendida por Hermer Ernesto Alzamora Román en la Universidad Nacional de Ingeniería (Peú) en el año 2025. Bajo la coordinación del propio autor de la tesis, un equipo de investigadores ha ampliado, profundizado y actualizado el trabajo original mediante un proceso colaborativo, dando lugar a este libro.

This publication is a derivative work originating from the master's thesis titled "Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para mejorar la disponibilidad de un Molino y Tostadora de una Planta de Pasta de Cacao", defended by Hermer Ernesto Alzamora Román at the Universidad Nacional de Ingeniería (Perú) in 2025. Under the coordination of the thesis author himself, a team of researchers has expanded, deepened, and updated the original work through a collaborative process, resulting in this book.

AVAL DE REVISIÓN POR PARES

El presente libro constituye el resultado de un riguroso proceso de investigación académica, cuya calidad metodológica y solidez argumental han sido validadas mediante un sistema de revisión por pares externos implementado bajo el protocolo de doble ciego, bajo la supervisión del Centro de Investigaciones en Ciencias y Humanidades desde América Latina (CICSHAL). Como garantía de transparencia y rigor científico, los informes de evaluación realizados por los especialistas designados se conservan en el archivo institucional de la editorial, a disposición de las instancias que así lo requieran.

This book is the result of a rigorous academic research process, whose methodological quality and argumentative solidity have been validated through an external peer-review system implemented under a double-blind protocol, under the supervision of the Center for Research in Sciences and Humanities from Latin America (CICSHAL). As a guarantee of transparency and scientific rigor, the evaluation reports prepared by the designated specialists are preserved in the publisher's institutional archives, available to any party that may require them.

info@atikeditorial.com



AUTORES

AUTHORS

Hermer Ernesto Alzamora Román

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-2634-7710>
halzamorar@unp.edu.pe
h_alzamora@yahoo.com

Ingeniero Industrial e Ingeniero Civil. Docente principal de la Universidad Nacional de Piura, con maestría en Administración con mención en gerencia empresarial y doctor en Ciencias administrativas mención en dirección de empresas. Past Decano del Consejo Departamental de Piura del Colegio de Ingenieros del Perú.

Noelia Paola Saavedra Nizama

Universidad Tecnológica del Perú | Piura | Perú
<https://orcid.org/0009-0005-1647-9954>
c20190@utp.edu.pe
nopasani12@hotmail.com

Ingeniero en Informática, MBA, Doctora en TICs por la Universidad Nacional de Piura. Estudios en IA por University of California, Berkeley, Haas School of Business y EVA Virtual Educa-Argentina. Con experiencia en Gestión, Entornos Virtuales Aprendizaje, Marketing Digital y Docencia Universitaria.

Ricardo Edwin More Reaño

Universidad César Vallejo | Piura | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-6223-4246>
remorem@ucvvirtual.edu.pe

Ingeniero de Sistemas, docente nombrado en Educación Secundaria en la especialidad de Matemática y Física desde el año 1994, docente universitario en Universidad César Vallejo y Universidad Tecnológica del Perú. Actualmente me encuentro realizando actividades de investigación y asesoría en la Universidad.

Víctor Enrique Antón Antón

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0009-0000-6889-9866>

vantona@unp.edu.pe

vanton@outlook.es

Ingeniero Industrial. Docente auxiliar de la Universidad Nacional de Piura, con maestría en Ciencias Económicas con mención en Proyectos de Inversión y estudios concluidos de Doctorado en Ingeniería Industrial con mención en Ingeniería Industrial. Toda la formación académica de pre y posgrado estudiada en la Universidad Nacional de Piura.

John Félix Sevillano Zavala

Universidad Privada Antenor Orrego | Piura | Perú

<https://orcid.org/0009-0002-8648-9304>

jsevillanoz1@upao.edu.pe

jsevillanoz@gmail.com

Ingeniero Civil, con Maestría en Ingeniería Ambiental y Maestría en Transporte y Conservación Vial, candidato a doctor en Arquitectura y Urbanismo, docente de la Universidad Privada Antenor Orrego, experiencia en formulación, ejecución y evaluación de proyectos de infraestructura vial, urbana y rural, Ejecutor, Supervisor y Residente.

RESUMEN

En la industria agroindustrial actual, la verdadera ventaja competitiva no reside solo en la calidad del producto, sino en la capacidad de garantizar su producción sin interrupciones. Este libro surge de una necesidad real en el sector cacaotero: transformar el mantenimiento de correctivo a estratégico para maximizar la disponibilidad de equipos críticos como tostadoras y molinos. A través de la aplicación práctica del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), esta obra ofrece una hoja de ruta estructurada para identificar fallas, optimizar recursos y asegurar que cada activo cumpla su función en óptimas condiciones. Mediante el análisis de criticidad y la evaluación de resultados antes y después de la implementación, el lector descubrirá cómo convertir la gestión del mantenimiento en un pilar fundamental de la productividad y el cumplimiento comercial. Una guía esencial para quienes buscan excelencia operativa en entornos industriales exigentes.

Palabras clave:

Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), Disponibilidad de equipos, Ventaja competitiva, Optimización de recursos, Excelencia operativa

ABSTRACT

In contemporary agro-industry, true competitive advantage resides not only in product quality, but fundamentally in the capacity to ensure uninterrupted production processes. This work emerges from a tangible necessity within the cocoa sector: the strategic transformation of maintenance from a corrective approach to a reliability-centered model, aimed at maximizing the availability of critical equipment such as roasters and mills. Through the practical application of Reliability-Centered Maintenance (RCM), this volume provides a structured framework for identifying failure modes, optimizing resource allocation, and ensuring that each asset performs its intended function under optimal conditions. By employing criticality analysis and evaluating performance indicators before and after implementation, the reader will understand how to elevate maintenance management into a cornerstone of productivity and commercial compliance. An essential guide for those pursuing operational excellence in demanding industrial environments.

Keywords:

Reliability-Centered Maintenance (RCM), Equipment availability, Competitive advantage, Resource optimization, Operational excellence.

RESUMO

Na agroindústria contemporânea, a verdadeira vantagem competitiva reside não apenas na qualidade do produto, mas fundamentalmente na capacidade de assegurar a continuidade ininterrupta dos processos produtivos. Esta obra surge de uma necessidade concreta no setor cacaueteiro: a transformação estratégica da manutenção, de uma abordagem corretiva para um modelo centrado na confiabilidade, visando maximizar a disponibilidade de equipamentos críticos como torradores e moinhos. Por meio da aplicação prática da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), este volume oferece um roteiro estruturado para identificar modos de falha, otimizar a alocação de recursos e garantir que cada ativo cumpra sua função em condições ótimas. Mediante a análise de criticidade e a avaliação de indicadores de desempenho anteriores e posteriores à implementação, o leitor compreenderá como elevar a gestão da manutenção a um pilar fundamental da produtividade e do cumprimento de metas comerciais. Um guia essencial para aqueles que buscam excelência operacional em ambientes industriais exigentes.

Palavras-chave:

Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), Disponibilidade de equipamentos, Vantagem competitiva, Otimização de recursos, Excelência operacional.

CONTENIDO

Aval de revisión por pares	7
Authors	8
Resumen	10
Abstract	10
Resumo	11
Introducción	17
Capítulo I	20
HACIA UNA ARQUITECTURA DE CONFIABILIDAD. FUNDAMENTOS Y OPORTUNIDADES EN CONTEXTOS PRODUCTIVOS	20
Diagnóstico de criticidad en la industria del cacao. Localizando el problema	27
La ruta crítica hacia la confiabilidad operacional. Diseño metodológico y fundamentos conceptuales	30
El punto de partida. Preguntas, propósitos e hipótesis como guías de la investigación	31
Problemas específicos	32
Justificación e importancia de la investigación	33
Trazando la ruta hacia la excelencia operativa: objetivos del estudio	36
La meta final: diseñar un Plan RCM para maximizar la confiabilidad del molino y la tostadora	36
Los hitos del camino: objetivos específicos para una transformación medible	37
El postulado del éxito: hipótesis de la investigación	38
La Premisa Central: El RCM como Motor de la Disponibilidad	38
Los Engranajes de la Mejora: Hipótesis Específicas	38
El corazón de la medición: variables y su operacionalización	39
Variables y operacionalización	39
El andamiaje metodológico. Diseño, fuentes y análisis	41
Fuentes de información, técnicas e instrumentos	43
La Estrategia del Estudio de Caso para el Análisis Exhaustivo del Molino y la Tostadora	44

Capítulo II	47
ARQUITECTURA CONCEPTUAL PARA LA CONFIABILIDAD. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y HERRAMIENTAS ANALÍTICAS	47
Los pilares de la gestión de activos. Conceptos fundamentales y estrategias de mantenimiento	49
Tipologías de mantenimiento. De lo correctivo a lo predictivo	50
Modelos de gestión avanzada. TPM y RCM	52
El corazón del análisis. RCM, AMEF e indicadores de desempeño	53
El proceso lógico. Las siete preguntas del RCM	54
Análisis de funciones, fallas funcionales y modos de falla	55
Análisis de consecuencias y el diagrama de decisiones	57
Análisis de modos y efectos de falla (AMEF) y el número de prioridad de riesgo	59
Diagrama de decisiones	60
Indicadores clave de desempeño. Confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad	61
El entorno productivo. Fundamentos del procesamiento de cacao y su maquinaria crítica	62
Del grano a la pasta. La ruta del cacao y su maquinaria esencial	63
El cacao. Origen, características y relevancia económica	63
La planta de pasta de cacao. Infraestructura y capacidad productiva	66
El proceso de obtención de pasta de cacao. Una descripción etapa por etapa	68
Los guardianes del proceso. Descripción funcional de los equipos críticos	73
El molino de granos (primera y segunda molienda)	73
La tostadora de cacao	75
CAPÍTULO III	79
DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO. REVELANDO LAS OPORTUNIDADES DE MEJORA EN LA PLANTA DE CACAO	79
Análisis de la situación actual. Entre la reactividad y la planificación	81
Contexto operacional y estrategia de mantenimiento pre existente	81
Diagnóstico de los indicadores de desempeño. MTBF, MTTR y disponibilidad	83
Cálculo e interpretación de los indicadores	87
Identificación de fallas críticas y justificación de un nuevo enfoque	88
Análisis de fallas y su impacto operacional	88
Justificación para la aplicación del RCM	90

CAPÍTULO IV	93
RESULTADOS, CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y DISCUSIÓN. LA TRANSFORMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN LA PLANTA DE CACAO	93
Diseño e implementación del modelo RCM. Un enfoque sistemático para la mejora	95
Fundamentación y alcance del modelo RCM propuesto	95
Definición del contexto operacional y funciones (Paso 1 del RCM)	96
Desarrollo del análisis de modos y efectos de falla (AMEF)	98
Evaluación de la criticidad (Paso 4 del RCM) y análisis de pareto	100
Selección de tareas RCM y estrategias (Pasos 6 y 7 del RCM)	103
Validación de resultados y contrastación de hipótesis. Evidencia del impacto del RCM	108
Proyección de resultados e impacto esperado	108
Contrastación de las hipótesis de investigación	110
Discusión de Resultados	113
Evaluación económica y recomendaciones estratégicas	116
Evaluación económica (Costo-Beneficio)	116
Recomendaciones finales	117
Referencias	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de Consecuencias de Fallas	57
Figura 2. Criterios según el valor del número de prioridad de riesgo	58
Figura 3. Categorías del Número de Prioridad de Riesgo	60
Figura 4. Fruto del cacao	66
Figura 5. Vista panorámica de la Planta de Pasta de Cacao de la Cooperativa Agraria Norandino.	68
Figura 6. Molino utilizado en el proceso de molienda de pasta de cacao.	74
Figura 7. Tostadora de Café	76
Figura 8. Diagrama de Pareto	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Frecuencia de fallas de los componentes críticos	28
Tabla 2. Operacionalización de Variables	40
Tabla 3. Número de intervenciones según el tipo de mantenimiento	82
Tabla 4. Indicadores de todos los equipos	84
Tabla 5. Funciones primarias y estándares de rendimiento del Molino y la Tostadora.	97
Tabla 6. Identificación de modos de falla, causas raíz y efectos para el Molino y la Tostadora	99
Tabla 7. Metodología Empleada	101
Tabla 8. Tareas de Mantenimiento condicional	104
Tabla 9. Tareas de mantenimiento basado en el tiempo	105
Tabla 10. Cronograma de implementación de fases	106
Tabla 11. Valores obtenidos después de la aplicación del Plan de Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).	107
Tabla 12. Historial MTTR por Equipo	110

Introducción

El mantenimiento industrial enfrenta en el Perú una paradoja que se observa en innumerables plantas productivas a lo largo de los años: se le reconoce como necesario, pero rara vez se le otorga el lugar estratégico que merece. En el mejor de los casos, es visto como un mal inevitable; en el peor, como un área a la que solo se acude cuando las máquinas ya no pueden operar. Esta mirada cortoplacista, comprensible en entornos de recursos limitados, termina por convertirse en el principal freno al crecimiento sostenible. Se constata en obras de infraestructura, en plantas agroindustriales y en pequeñas manufacturas: la ausencia de una estrategia de mantenimiento bien concebida genera costos ocultos que, acumulados, superan con creces cualquier inversión en prevención.

El sector cacaotero peruano ilustra con claridad esta realidad. El país produce granos de cacao fino de aroma reconocidos mundialmente, y regiones como Piura se han consolidado como polos de desarrollo gracias a cooperativas que apostaron por la transformación primaria del grano. Sin embargo, la tecnología de punta no basta. Durante una visita a la planta de la Cooperativa Agraria Norandino, mientras se observaba el funcionamiento de un molino de bolas Duyvis Wiener —equipo de fabricación holandesa valorado en miles de dólares—, el jefe de mantenimiento confesó con resignación: “Esta máquina es increíble, pero la tenemos que parar cada semana por algo imprevisto. Ya no sabemos qué hacer”. Esa frase, cargada de frustración y agotamiento, fue la semilla de este libro.

Lo que se encontró detrás de esa confesión no era un problema aislado, sino un patrón que se repite en la industria na-

cional: una marcada tendencia al mantenimiento correctivo. En aquella planta, el 55.56% de las intervenciones se destinaban a reparar fallas ya ocurridas, generando costos impredecibles, paradas no programadas y, lo más grave, una disponibilidad de los equipos críticos que rondaba apenas el 97%. Para un proceso continuo como la producción de pasta de cacao, ese 3% de indisponibilidad significaba cientos de horas perdidas al año, pedidos que no llegaban a tiempo a los clientes y, en última instancia, familias agricultoras que veían mermados sus ingresos.

Frente a este panorama, se planteó la necesidad de demostrar que existe una alternativa. El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), metodología desarrollada originalmente para la industria aeronáutica, ofrece un marco sistemático para preguntarse lo esencial: ¿qué funciones debe cumplir cada equipo? ¿de qué maneras puede fallar? ¿qué puede hacerse para prevenirlo? Lejos de ser una receta importada, el RCM obliga a entender a profundidad el entorno operativo, las particularidades del proceso y el conocimiento tácito de quienes operan y mantienen las máquinas día a día.

Este libro recoge esa travesía. A lo largo de sus páginas, el lector encontrará no solo el detalle técnico de cómo se aplicó el análisis de criticidad, el AMEF y las tareas predictivas en la tostadora y los molinos de la planta, sino también las lecciones aprendidas, las dificultades enfrentadas y, sobre todo, la evidencia de que otro modelo de gestión es posible. Los números hablan por sí mismos: la tostadora pasó de 172 horas entre fallas a 986; los molinos alcanzaron el 100% de disponibilidad. Pero más allá de las cifras, lo que se busca compartir es una convicción: el mantenimiento bien gestionado deja de ser un centro de costo para convertirse en una verdadera ventaja competitiva.

Este libro está dirigido a quienes día a día lidian con la presión de mantener sus plantas operativas: estudiantes de ingeniería, profesionales, técnicos y directivos. La aspiración es que estas páginas contribuyan, así sea modestamente, a transformar la manera en que se entiende y practica el mantenimiento industrial en el Perú.

Capítulo I

HACIA UNA ARQUITECTURA DE CONFIABILIDAD. FUNDAMENTOS Y OPORTUNIDADES EN CONTEXTOS PRODUCTIVOS

El presente apartado se adentra en la exploración de los fundamentos conceptuales y empíricos que sustentan la necesidad de implementar estrategias avanzadas de mantenimiento en entornos industriales. Se parte de una revisión de investigaciones previas que han abordado la problemática de la disponibilidad de equipos y la optimización de procesos mediante metodologías como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés). Este recorrido teórico y aplicado permite contextualizar la situación específica de una planta de procesamiento de cacao, identificando los desafíos operativos y las oportunidades de mejora a través de un enfoque estructurado y basado en el riesgo. La transición de un mantenimiento correctivo y reactivo hacia uno proactivo y predictivo no solo constituye una tendencia global, sino una necesidad imperante para garantizar la sostenibilidad y competitividad de las operaciones.

La evolución del mantenimiento industrial ha sido testigo de un cambio paradigmático, pasando de ser un centro de costo a ser reconocido como un área estratégica para la generación de valor. En sus inicios, las prácticas se limitaban a reparar las fallas una vez ocurrían (mantenimiento correctivo). Sin embargo, la creciente complejidad de la maquinaria y la exigencia de una producción sin interrupciones impulsaron el desarrollo del mantenimiento preventivo basado en el tiempo, y posteriormente, el mantenimiento predictivo basado en la condición. En este contexto de búsqueda de la excelencia operacional, surge el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, una metodología sistemática que, como señalan Moubrey (1997) y la norma SAE JA1011, tiene como objetivo preservar las funciones de los activos físicos, determinando las tareas de mantenimiento

más efectivas y aplicables para cada contexto operacional. La aplicación del RCM no es un fin en sí mismo, sino un medio para maximizar la disponibilidad, la confiabilidad y la seguridad, al tiempo que se optimizan los costos a lo largo del ciclo de vida del equipo. Su enfoque proactivo y basado en el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) lo convierte en una herramienta indispensable en industrias de alto riesgo y producción continua, como la generación de energía, la petroquímica y, de manera creciente, en sectores como el alimentario y metalmecánico, donde la calidad del producto final está intrínsecamente ligada a la estabilidad de los procesos.

La literatura académica y técnica está repleta de casos de éxito que demuestran la versatilidad y eficacia del RCM en diversos sectores productivos. Un ejemplo temprano y, aunque no directamente relacionado con el mantenimiento, técnicamente análogo en su enfoque de optimización, es el estudio de Wiesner y Betancouth (1989), quienes abordaron un problema fundamental en la molienda de cacao: la selección del tamaño óptimo de las esferas de acero en un molino de bolas. Su objetivo era suministrar criterios técnicos y prácticos para asegurar que el proceso de molienda se ajustara a los estándares de calidad relativos a la finura de la pasta o licor de cacao. La investigación determinó que el tamaño mínimo adecuado de las esferas era de 3.05 mm, un hallazgo que subraya la importancia de parametrizar correctamente los componentes del proceso para garantizar la calidad y la eficiencia. Aunque su enfoque es más de diseño de proceso que de mantenimiento, ilustra la necesidad de un conocimiento profundo del funcionamiento de los equipos para evitar desviaciones en la producción.

Saltando en el tiempo y en el ámbito de aplicación, Mejía Cueva (2017) demostró el impacto tangible de un plan de mantenimiento basado en RCM en la disponibilidad de equipos de servicio de transporte. Su investigación no solo logró un incremento sustancial en la disponibilidad, pasando de un 81% a un impresionante 97%, lo que representa una mejora del 16%, sino que también evidenció un aumento de la productividad del 7%. Este incremento se tradujo en 24,000 litros adicionales de alcohol por mes, generando una utilidad de S/ 43,200 mensuales. Más allá de los beneficios operativos inmediatos, el estudio de Mejía Cueva (2017) realizó un análisis financiero que demostró la viabilidad del proyecto, con un ahorro anual de S/ 27,394.46 en costos de mantenimiento después de recuperar la inversión inicial de S/ 45,080 en un periodo de 1 año y 7 meses. Este caso es paradigmático porque conecta directamente la mejora de la confiabilidad con resultados económicos concretos, proporcionando un argumento sólido para la adopción de estas metodologías desde una perspectiva de retorno de la inversión. Este tipo de análisis costo-beneficio es fundamental para justificar la implementación de proyectos de mejora en cualquier organización, especialmente en pequeñas y medianas empresas donde los recursos son limitados.

En una línea similar, pero aplicado a un entorno de manufactura pesada, Diestra Quevedo et al. (2017) desarrollaron un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para dos puentes grúa en un área de producción. Su metodología, rigurosa y sistemática, comenzó con un diagnóstico situacional detallado que incluyó la recolección de información sobre las prácticas de mantenimiento existentes y el funcionamiento de las máquinas en su contexto operacional. Un paso crucial fue el

análisis de la data histórica de fallas de los últimos tres años, lo que permitió, mediante una matriz de criticidad, jerarquizar los equipos y, dentro de ellos, identificar los componentes más críticos: bocinas y rodamientos, zapatas de frenos, ejes de transmisión y bocinas de alimentación. Posteriormente, se ejecutó un Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) para comprender a profundidad las causas y consecuencias de las fallas potenciales. La aplicación del Árbol Lógico de Decisión (ALD) fue determinante para seleccionar las tareas de mantenimiento más adecuadas para cada modo de falla, resultando en la definición de 52 tareas, de las cuales el 90% eran de carácter preventivo y el 10% correctivo. El estudio concluyó con una estimación de la confiabilidad actual de los equipos críticos, demostrando que el diseño del plan de mantenimiento, basado en un análisis probabilístico de la información recopilada, permitiría plantear estrategias efectivas para disminuir la ocurrencia de fallas. La relevancia de este estudio radica en su aplicación del RCM a equipos de elevación, que son críticos para la logística interna de una planta y cuya falla puede detener completamente la producción.

El impacto del RCM no se limita a la disponibilidad, sino que se extiende directamente a la reducción de costos operativos. Calderón Ortecho (2020) lo evidenció en una empresa manufacturera de calzado, donde identificó sobrecostos significativos atribuibles a la falta de un mantenimiento preventivo estructurado (S/57,314 anuales) y a la carencia de un plan de capacitación (S/56,640 anuales). La propuesta de implementación de un plan de mantenimiento centrado en la fiabilidad, combinado con un programa de capacitación, demostró ser altamente efectiva. Se logró reducir la pérdida anual por falta de mantenimiento preventivo a S/37,712 y la asociada a la falta de capa-

citación a S/28,800. Esto generó un ahorro monetario total de S/47,442 sobre los costos operativos de la empresa. El estudio no se quedó en el análisis operativo, sino que realizó una evaluación económica-financiera mediante los indicadores VAN y TIR, obteniendo valores de S/12,283.81 y 36%, respectivamente. Estos resultados confirman que la inversión en una estrategia de mantenimiento avanzada como el RCM no solo es viable, sino que es altamente rentable, mejorando la salud financiera de la organización. Este hallazgo es consistente con la literatura más amplia sobre gestión de activos, que vincula la proactividad en el mantenimiento con la mejora del flujo de caja y la reducción del riesgo operativo.

De manera análoga, pero en el sector de alimentos balanceados, Geldres (2019) demostró cómo el RCM puede aumentar la disponibilidad de un equipo crítico como el mezclador de dosificación. Partiendo de un diagnóstico que reveló la ausencia de un programa y un plan de mantenimiento preventivo, la propuesta se centró en la aplicación del AMEF para identificar proactivamente los problemas antes de que ocurrieran. Los resultados fueron contundentes: la disponibilidad del mezclador aumentó del rango 92.94% a un rango superior de 97.85%, mientras que la confiabilidad se incrementó de 44.62% a 46.47% respecto al último año de estudio. Este incremento en la disponibilidad se tradujo directamente en un ahorro anual de 972,853 soles, derivado de la disminución de ventas perdidas por horas de producción detenida. El estudio de Geldres (2019) es particularmente relevante para la industria de procesos, donde la continuidad es clave, y sus resultados resaltan la sensibilidad de las pérdidas económicas ante pequeñas variaciones en la disponibilidad de los equipos.

La transición de un modelo reactivo a uno proactivo es un desafío común en muchas empresas, como lo ilustra el trabajo de Álvarez Delgado (2016) en una empresa metalmecánica en Arequipa. Su diagnóstico situacional reveló una realidad frecuente: la empresa se limitaba a realizar únicamente mantenimiento correctivo, atendiendo las emergencias a medida que surgían, y no empleaba ningún tipo de indicador de gestión de mantenimiento. El análisis de criticidad evidenció que esta práctica no solo era ineficiente, sino que comprometía el objetivo principal de la empresa, que era brindar servicios de mantenimiento de alta calidad y eficiencia a sus clientes. La propuesta de implementar un plan que combinara el mantenimiento preventivo con el RCM buscaba revertir esta situación. Las conclusiones del estudio proyectaban una mejora en la eficiencia del desempeño, con un ahorro estimado de 23,376.5 soles, equivalente a una reducción del 22.6% con respecto a los gastos del año base. Este caso subraya que el primer paso hacia la excelencia es reconocer las limitaciones del enfoque puramente correctivo y establecer una hoja de ruta para la medición y la mejora continua.

Finalmente, en un entorno de alta minería, Luna Turpo (2019) aplicó el RCM a compresores estacionarios a tornillo en Toquepala. El análisis de criticidad basada en el riesgo identificó a los compresores de áreas críticas (Chancadora y Filtros Larox) como los más prioritarios, ya que, a pesar de tener una disponibilidad aceptable, su función no admitía paradas inesperadas por no contar con equipos de respaldo (stand by). El estudio reveló que un 32.1% de las fallas eran de origen eléctrico, para las cuales no existían tareas proactivas. A través del AMEF, se logró una comprensión profunda de las funciones, fallas fun-

cionales y modos de falla de los compresores. La implementación de los nuevos planes de mantenimiento, con frecuencias y tareas críticas definidas, permitió proyectar un aumento en la disponibilidad de los equipos GR200 y GA160 a 99.70% y 99.65%, respectivamente, con el valor añadido de eliminar las paradas inesperadas entre intervenciones. Luna Turpo (2019) también destacó la importancia de la gestión de repuestos críticos y la sinergia para extender la metodología a otros equipos de la flota, consolidando una estrategia de confiabilidad a largo plazo.

Diagnóstico de criticidad en la industria del cacao. Localizando el problema

La síntesis de los antecedentes presentados establece un marco de referencia sólido que justifica la adopción de metodologías avanzadas de mantenimiento como el RCM. La evidencia acumulada demuestra que, independientemente del sector—transporte, manufactura pesada, calzado, alimentos balanceados o minería—la implementación estructurada del RCM conduce a mejoras verificables en la disponibilidad, la confiabilidad y la rentabilidad de las operaciones. Estos beneficios, que incluyen desde ahorros monetarios directos hasta la optimización de la gestión de repuestos, son particularmente críticos en industrias de proceso continuo, donde una parada no planificada puede acarrear pérdidas económicas exponenciales y afectar la calidad del producto final.

En este contexto, la situación diagnosticada en la Planta de Procesamiento de Pasta de Cacao en Piura no es una anomalía, sino un reflejo de los desafíos que enfrentan muchas organizaciones que aún operan bajo paradigmas de mantenimiento

reactivo. La tendencia industrial global, que exige operación continua y eficaz, contrasta fuertemente con la realidad local, donde la baja disponibilidad de equipos críticos, principalmente el molino y la tostadora, se ha identificado como el problema central. La recurrencia de fallas en estos activos no solo interrumpe la producción y genera pérdida de ingresos, sino que también acarrea costos asociados al recurso humano ocioso y, más grave aún, a la potencial pérdida de clientes por incumplimiento en los plazos de entrega. La ausencia de un plan de mantenimiento preventivo estructurado magnifica este problema, haciendo que la operación sea vulnerable a cualquier desviación en el funcionamiento de estos equipos.

Tabla 1. Frecuencia de fallas de los componentes críticos

Número	Componente crítico	Frecuencia de (F/mes)	MTBF (h)	MTTR (h)	Descripción
1	Tostadora	3	350	4	Sobrecalentamiento, y resistencia eléctrica
2	Descascarilladora	1.5	480	3	Atascos por cascarilla Y desgaste de cribas
3	Molino 1	3	250	5	Rodamientos y vibración
4	Molino 2	2	700	6	Desgaste de bolas Bombas de recirculación y motores
5	Prensa hidráulica	0.8	900	8	Hidráulicas y fugas en sellos
6	Conchadora	1.2	600	4	Problemas en motores, paletas y sobrecarga termica
7	Sistema de bombeo y tuberías	2.2	320	2.5	Obstrucciones, fallas en bombas y fugas por temperatura

Fuente: Alzamora Román (2025).

La cuantificación del problema es el primer paso para su solución. El diagnóstico del año 2023, resumido en la Tabla 1, evidencia que la mayor frecuencia de fallas se concentra precisamente en la tostadora y en los molinos. Este dato no es trivial; valida la percepción inicial y proporciona un punto de partida objetivo para el análisis. La decisión de centrar el estudio en estos dos componentes no es arbitraria, sino que responde a un principio fundamental de la gestión de mantenimiento basada en confiabilidad: la jerarquización de activos por criticidad. Al igual que Diestra Quevedo et al. (2017) utilizaron una matriz de criticidad para enfocar sus esfuerzos en las bocinas y rodamientos de los puentes grúa, o Luna Turpo (2019) priorizó los compresores sin respaldo, este estudio debe concentrar sus recursos analíticos y propuestas de mejora en los equipos que tienen el mayor impacto potencial sobre la operación global. La alta frecuencia de fallas en la tostadora y el molino sugiere problemas recurrentes que podrían deberse a múltiples causas: desde modos de falla no identificados, pasando por procedimientos operativos inadecuados, hasta la falta de tareas de mantenimiento proactivo efectivas. El desafío, y el objetivo de esta investigación, será aplicar la metodología RCM para diseccionar estas causas raíz y diseñar un plan de mantenimiento que no solo repare las fallas, sino que las prevenga, asegurando así la continuidad operativa, la calidad del producto final y la competitividad de la planta en el exigente mercado del cacao y sus derivados.

La ruta crítica hacia la confiabilidad operacional. Diseño metodológico y fundamentos conceptuales

El diseño riguroso de una investigación constituye la columna vertebral que sostiene la validez y confiabilidad de sus resultados. En el ámbito de la ingeniería de mantenimiento, donde las decisiones tienen un impacto directo en la continuidad operativa y la rentabilidad de las organizaciones, resulta imperativo estructurar un marco metodológico que no solo responda a las preguntas de investigación, sino que también permita la replicabilidad y el contraste de los hallazgos con la literatura especializada. Este capítulo se adentra en la formulación del problema que motiva el estudio, delineando con precisión los interrogantes que guiarán la búsqueda de soluciones para la planta de procesamiento de cacao en Piura. Asimismo, se justifica la pertinencia de la investigación desde perspectivas tecnológicas, económicas y sociales, se establecen los objetivos que demarcan el alcance del trabajo y se formulan las hipótesis que serán sometidas a prueba. Finalmente, se presenta el andamiaje metodológico que sustenta la investigación, incluyendo la operacionalización de las variables, el tipo y diseño de estudio, y las técnicas para la recolección y análisis de datos, elementos todos ellos fundamentales para garantizar la solidez y pertinencia de la propuesta de implementación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

La transición desde un paradigma de mantenimiento reactivo hacia uno proactivo y predictivo no es una decisión trivial; implica un cambio cultural, organizacional y técnico que debe ser cuidadosamente planificado y ejecutado. La literatura en gestión de activos, como la compilada por la norma ISO 55000,

enfatisa que la alineación de las estrategias de mantenimiento con los objetivos del negocio es fundamental para la creación de valor sostenible. En este contexto, la presente investigación no solo busca resolver un problema puntual de baja disponibilidad en dos equipos críticos, sino que aspira a sentar las bases para una gestión del mantenimiento basada en el riesgo y la confiabilidad en toda la organización. Este enfoque holístico es el que ha permitido a empresas de clase mundial en sectores como el petroquímico, minero y de generación de energía, reportadas en estudios de la Society for Maintenance & Reliability Professionals (SMRP), alcanzar niveles de excelencia operacional donde la disponibilidad de los activos supera consistentemente el 95%, con un impacto directo en la reducción del costo total de propiedad y la mejora de la seguridad de los procesos.

El punto de partida. Preguntas, propósitos e hipótesis como guías de la investigación

La industria del cacao en el Perú, y particularmente en regiones como Piura, representa una fuente vital de ingresos y desarrollo para miles de familias agricultoras. Sin embargo, la competitividad de este sector depende en gran medida de la capacidad de transformación y valor agregado que se pueda realizar a nivel local. En este contexto, las plantas de procesamiento de pasta de cacao se erigen como eslabones fundamentales de la cadena de valor. No obstante, estas instalaciones enfrentan desafíos operativos significativos. El problema central que aborda esta investigación se sintetiza en la siguiente interrogante: ¿De qué manera se puede mejorar la disponibilidad del molino y la tostadora de una Planta de Pasta de Cacao en Piura?

Esta pregunta reconoce que la disponibilidad no es un atributo estático, sino el resultado de una gestión estratégica del mantenimiento. Responde a la necesidad de pasar de una operación afectada por paradas imprevistas a una donde la confiabilidad de los activos críticos sea un pilar de la planificación productiva.

Problemas específicos

Para abordar el problema general con la profundidad y el rigor que requiere, es necesario descomponerlo en preguntas más específicas que guíen cada etapa del proceso investigativo. En primer lugar, resulta esencial preguntarse: ¿De qué manera se prioriza la mejora de los indicadores de disponibilidad de los elementos críticos en una planta de pasta de cacao en Piura? Dado que los recursos para el mantenimiento son siempre limitados, no todos los componentes del molino y la tostadora pueden ser atendidos con la misma intensidad. Esta pregunta apunta a la necesidad de establecer un método de jerarquización, como el análisis de criticidad, que permita focalizar los esfuerzos en aquellos subsistemas cuyo fallo tendría las consecuencias más graves para la operación. En segundo lugar, una vez priorizados los componentes, es imperativo determinar: ¿Cuáles son las acciones de mantenimiento prioritario para el molino y la tostadora en una planta de pasta de cacao en Piura? Esto implica identificar el conjunto óptimo de tareas, ya sean preventivas, predictivas o correctivas planificadas, que sean técnicamente factibles y costo-efectivas para prevenir o mitigar las fallas funcionales. La tercera pregunta, estrechamente ligada a las anteriores, indaga sobre ¿De qué manera se mejora la disponibilidad del molino y la tostadora en una planta de pasta

de cacao en Piura? Esta cuestión busca establecer la relación causal entre la aplicación de una metodología específica, el RCM, y el incremento esperado en la disponibilidad, explorando los mecanismos a través de los cuales se produce dicha mejora. Finalmente, para garantizar la sostenibilidad de los resultados, es crucial preguntarse: ¿Cómo se asegura el cumplimiento de la mejora de la disponibilidad del molino y la tostadora en una planta de pasta de cacao en Piura? Esta última pregunta se orienta hacia la fase de control y seguimiento, esencial para verificar que las acciones implementadas se mantienen en el tiempo y generan el impacto deseado, permitiendo la retroalimentación y mejora continua del sistema.

Justificación e importancia de la investigación

La pertinencia de esta investigación se sustenta en un entramado de justificaciones que abarcan dimensiones tecnológicas, económicas y sociales, consolidando su valor tanto para la organización objeto de estudio como para el cuerpo de conocimiento en ingeniería de mantenimiento. La viabilidad del estudio está garantizada, ya que se dispone de los recursos humanos capacitados y la información técnica requerida de los equipos, incluyendo manuales de operación, registros históricos de fallas y datos de rendimiento, elementos indispensables para aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) con el rigor necesario.

En el plano tecnológico, la investigación se justifica por la necesidad imperiosa de migrar desde un modelo de gestión de activos eminentemente reactivo o correctivo hacia una filosofía proactiva. El mantenimiento correctivo, como señala García

(2015), se caracteriza por generar costos operativos impredecibles, detenciones no programadas que desestabilizan la producción y un desgaste acelerado de los componentes debido a que las fallas se atienden una vez que ya han ocurrido. La aplicación del RCM permitirá una identificación sistemática de los modos de falla mediante herramientas estandarizadas como el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF). Al comprender las causas raíz de las fallas en el molino y la tostadora, se podrán definir tareas de mantenimiento preventivo y predictivo específicas, basadas en la condición real de los componentes, optimizando así la intervención sobre los activos. Este enfoque tecnológico no solo mejora la fiabilidad de los equipos, sino que también genera conocimiento detallado sobre su comportamiento y sus puntos débiles, información valiosa para futuras decisiones de compra, rediseño o mejora.

Desde la perspectiva económica, la justificación es igualmente contundente. El incremento de la confiabilidad y la disponibilidad de los activos críticos se traduce directamente en la garantía de la continuidad operativa de la planta. Una mayor disponibilidad significa más horas de producción, lo que, en un mercado con demanda, equivale a mayores ingresos. Pero el beneficio económico va más allá de la facturación. Al implementar un plan de mantenimiento basado en RCM, se optimiza el uso de recursos críticos como los inventarios de repuestos y las horas-hombre del personal de mantenimiento. En lugar de mantener grandes stocks por si acaso, se pueden gestionar inventarios basados en la criticidad y la frecuencia de uso, reduciendo el capital inmovilizado. De manera similar, al enfocar los esfuerzos del equipo de mantenimiento en tareas planificadas y de alto valor, se maximiza su productividad, liberando tiempo

que antes se dedicaba a atender emergencias. Todo ello se traduce en una reducción significativa del costo total de propiedad (TCO) de la maquinaria, un indicador financiero clave para la gestión de activos a largo plazo.

Estudios como los de la consultora ARC Advisory Group han demostrado que las empresas que adoptan estrategias de mantenimiento basadas en la confiabilidad pueden reducir sus costos totales de mantenimiento entre un 10% y un 40%, mientras que la disponibilidad de los equipos puede aumentar en más de un 10%. Un caso paradigmático es el de una refinería en Brasil que, según publicó la Revista Mantenimiento en 2019, logró aumentar la disponibilidad de sus compresores críticos de un 85% a un 96% en dos años mediante la implementación sistemática del RCM, con un retorno de la inversión de 4 a 1.

Finalmente, la justificación social de esta investigación le confiere una dimensión humana que trasciende los indicadores técnicos y financieros. La planta de procesamiento de pasta de cacao no es una entidad aislada; es el eje productivo de una Cooperativa de Agricultores. Esto significa que su operación impacta directamente en el sustento y la calidad de vida de decenas, quizás cientos, de familias que dependen de la capacidad de la planta para procesar y comercializar su producto. Una falla catastrófica o una paralización prolongada del molino o la tostadora no solo representa una pérdida económica para la empresa, sino que puede significar la pérdida de ingresos para los agricultores, que ven su cosecha sin procesar, y para los trabajadores de la planta, que podrían enfrentar suspensiones laborales. Por lo tanto, mejorar la disponibilidad de estos equipos es una acción directa para salvaguardar el tejido socioeconómico de la comunidad. Además, la continuidad de la producción ga-

rantiza la cadena de suministro del producto de la cooperativa, contribuyendo indirectamente a la seguridad alimentaria local o regional. Al evitar interrupciones en el proceso industrial, se asegura que el producto final mantenga estándares de calidad consistentes, protegiendo la reputación de la cooperativa y el acceso de sus productos a mercados exigentes, lo que a su vez redundará en mejores condiciones de vida para todos los actores involucrados.

Trazando la ruta hacia la excelencia operativa: objetivos del estudio

La meta final: diseñar un Plan RCM para maximizar la confiabilidad del molino y la tostadora

En coherencia con la problemática planteada, esta investigación se fija como objetivo general: Proponer un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad del molino y la tostadora de una Planta de Pasta de Cacao en Piura. Este objetivo no se limita a una simple sugerencia, sino que implica el desarrollo de una propuesta técnica detallada, fundamentada en el análisis riguroso de la situación actual y en la aplicación de las siete preguntas básicas del RCM, con el fin de generar un documento guía que pueda ser implementado por la organización para transformar su gestión de activos.

Los hitos del camino: objetivos específicos para una transformación medible

Para alcanzar el objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos, que constituyen una hoja de ruta lógica y secuencial:

a) Diagnosticar para Actuar: Identificar las causas raíz de las fallas mediante un análisis de criticidad y un diagrama de Pareto. Este primer paso es fundamental para priorizar la mejora de los indicadores de disponibilidad, concentrando los esfuerzos en los pocos componentes vitales que causan la mayoría de los problemas, siguiendo el principio de Pareto (80/20).

b) Establecer la Línea Base de Partida: Determinar los indicadores clave de rendimiento (MTBF, MTTR y Disponibilidad) actuales de los equipos. Este diagnóstico cuantitativo, basado en la norma ISO 14224, creará el lenguaje universal necesario para evaluar, más adelante, el impacto de las acciones de mantenimiento prioritario propuestas para el molino y la tostadora.

c) Construir la Solución a Medida: Desarrollar el modelo de mantenimiento basado en RCM mediante un análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) para los componentes críticos. El fin último es diseñar las tareas de mantenimiento más efectivas y mejorar la disponibilidad del molino y la tostadora.

d) Asegurar la Mejora Continua: Establecer un sistema de seguimiento y control para la estrategia propuesta. Esto implica definir los mecanismos para la recolección de nue-

vos datos que validen la efectividad del plan y retroalimenten el sistema de gestión, asegurando así su evolución y perfeccionamiento en el tiempo.

El postulado del éxito: hipótesis de la investigación

La Premisa Central: El RCM como Motor de la Disponibilidad

Partiendo de la evidencia empírica recopilada en los antecedentes, se formula la siguiente hipótesis general: El Mantenimiento basado en RCM mejora significativamente la disponibilidad del molino y la tostadora en una Planta de Pasta de Cacao en Piura. Esta hipótesis establece una relación de causalidad que será sometida a prueba mediante el análisis de los indicadores de disponibilidad antes y después de la propuesta de implementación.

Los Engranajes de la Mejora: Hipótesis Específicas

Las hipótesis específicas desglosan los mecanismos a través de los cuales se espera que opere la mejora:

- a) Un diagnóstico certero (mediante criticidad y Pareto) es la base para priorizar eficazmente la mejora de los indicadores de disponibilidad de los elementos críticos en la planta.
- b) La aplicación de tareas de mantenimiento proactivas mejorará el MTBF y reducirá el MTTR, incrementando así la disponibilidad operacional del molino y la tostadora.

c) Las acciones derivadas del análisis de modos y efectos de falla (AMEF) atacarán las causas raíz, mejorando directamente la disponibilidad de los equipos al prevenir recurrencias.

d) Un sistema de seguimiento y control posterior a la implementación permitirá validar la mejora y generar un ciclo virtuoso de actualización continua del plan de mantenimiento.

El corazón de la medición: variables y su operacionalización

Variables y operacionalización

La claridad en la definición y medición de las variables es crucial para la validez de cualquier investigación. En este estudio, se han identificado dos variables principales. La variable independiente es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), definido conceptualmente como la metodología que determina qué tareas de mantenimiento se requieren para asegurar que los activos continúen cumpliendo sus funciones en su contexto operativo actual (Moubray, 1997). Operacionalmente, el RCM se medirá a través del nivel de implementación de sus distintas fases en el molino y la tostadora, considerando dimensiones como la identificación de funciones, el análisis de modos de falla, la determinación de la criticidad y la implementación de las tareas derivadas del proceso. La variable dependiente es la disponibilidad del molino y la tostadora, definida conceptualmente, según la norma ISO 14224, como la probabilidad de que un equipo esté en condiciones de operar (disponible) en un ins-

tante dado de tiempo, bajo un conjunto de condiciones de apoyo externo. Operacionalmente, la disponibilidad se calculará a partir de la fórmula estándar $MTBF/(MTBF+MTTR)$, utilizando los registros históricos de operación y mantenimiento de la planta.

Tabla 2. Operacionalización de Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
VI RCM	Metodología que determina qué tareas de mantenimiento se requieren para asegurar que los activos continúen cumpliendo sus funciones (Moubray, 1997).	Nivel de implementación del RCM en el molino y tostadora, medido por funciones identificadas, análisis de fallas y tareas aplicadas.	1. Identificación de funciones. 2. Análisis de modos de falla. 3. Criticidad. 4. Implementación de tareas RCM. 5. Mantenimiento CBM.	1- % de funciones críticas 2- N° de modos de falla 3- N° de fallas críticas. 4- N° de tareas RCM . - % de cumplimiento del plan RCM. 5- Frecuencia de inspecciones CBM.
VD Disponibilidad del molino y la tostadora	Probabilidad de que el molino y la tostadora estén operativos cuando se requiera (ISO 14224).	Disponibilidad calculada mediante $MTBF / (MTBF + MTTR)$ y registros operativos.	1. Confiabilidad (MTBF). 2. Mantenibilidad (MTTR). 3. Continuidad operativa. 4. Paradas no programadas.	- MTBF (h). - MTTR (h). - % de disponibilidad. - N° de paradas no prog. - Horas perdidas por fallas.

Fuente: Alzamora Román (2025).

La Tabla 2, desarrollada por Alzamora Román (2025), presenta de manera estructurada la relación entre las variables, sus dimensiones e indicadores. Para la variable independiente (RCM), las dimensiones incluyen la identificación de funciones, cuyo indicador es el porcentaje de funciones críticas identificadas; el análisis de modos de falla, que se cuantifica por el número de modos de falla analizados; la criticidad, medida por

el número de fallas catalogadas como críticas; y la implementación de tareas, evaluada mediante el número de tareas RCM definidas y el porcentaje de cumplimiento del plan. Para la variable dependiente (disponibilidad), las dimensiones son la confiabilidad, con indicadores como el MTBF en horas; la mantenibilidad, con el MTTR en horas; la continuidad operativa, reflejada en el porcentaje de disponibilidad; y las paradas no programadas, cuantificadas por su número y las horas de producción perdidas.

El andamiaje metodológico. Diseño, fuentes y análisis

La unidad de análisis de esta investigación está perfectamente delimitada: son los dos equipos críticos del proceso productivo de una Planta de Procesamiento de Pasta de Cacao, a saber, el molino y la tostadora. La elección de estos equipos no es caprichosa, sino que responde a los hallazgos del diagnóstico preliminar que los identificó como los cuellos de botella y los de mayor impacto en la operación, aquellos cuya falla tiene las consecuencias más graves para la continuidad del negocio. En cuanto al tipo, la investigación es de naturaleza aplicada, ya que su finalidad última no es la mera generación de conocimiento teórico, sino la solución de un problema real y concreto en un entorno organizacional específico: la baja disponibilidad de los activos que amenaza la continuidad operativa de una empresa agroindustrial. Este enfoque práctico es coherente con los principios de la ingeniería, que busca intervenir en la realidad para transformarla y mejorarla, generando un impacto positivo y medible.

El enfoque de la investigación es cuantitativo, una elección metodológica que se justifica plenamente por la naturaleza de las variables involucradas. Conceptos como MTBF, MTTR, porcentaje de disponibilidad, número de fallas y frecuencia de intervenciones son, por definición, magnitudes numéricas que requieren ser medidas, registradas y analizadas estadísticamente. Este enfoque permite establecer relaciones de causalidad con un grado aceptable de objetividad, contrastando las hipótesis mediante la comparación de datos históricos (la línea base) con los proyectados o reales después de la implementación de la propuesta. El nivel de investigación es, por un lado, descriptivo, ya que se propone caracterizar minuciosamente el estado actual del molino y la tostadora, identificando sus modos de falla más frecuentes, sus componentes críticos y sus niveles históricos de disponibilidad, creando así un retrato fiel de la situación de partida. Por otro lado, alcanza un nivel correlacional, al buscar establecer y cuantificar la relación entre la aplicación de la metodología RCM (variable independiente) y la mejora en la disponibilidad operativa de los equipos (variable dependiente), determinando si existe una asociación estadísticamente significativa entre ambas.

El diseño de la investigación es no experimental, dado que no se pretende manipular intencionalmente las variables en un entorno controlado de laboratorio. Por el contrario, se analizará la realidad tal como se presenta, utilizando datos históricos de la operación y el mantenimiento de la planta, observando los fenómenos en su contexto natural para después analizarlos. Se trata de un estudio de caso con un diseño transeccional o transversal, ya que la recolección de datos se realizará en dos momentos específicos: un corte en el tiempo para establecer

la situación actual (antes de la propuesta) y un segundo corte (posterior a la implementación, ya sea real o simulada) para evaluar los cambios. Esta estructura de “antes y después” dentro de un mismo grupo es particularmente útil para este tipo de investigaciones aplicadas en contextos organizacionales reales, donde no es posible ni deseable aislar los equipos de su entorno operativo.

Fuentes de información, técnicas e instrumentos

Las fuentes de información para este estudio son tanto documentales como de campo. Las fuentes documentales primarias serán los registros históricos del sistema de mantenimiento de la planta, incluyendo órdenes de trabajo, reportes de paradas, bitácoras de operación, manuales técnicos de los equipos y, de existir, datos de sistemas de monitoreo de condición. Estas fuentes proporcionarán la materia prima para el cálculo de los indicadores actuales de confiabilidad y mantenibilidad. Las fuentes de campo complementarán esta información a través de la observación directa de los equipos en operación y de entrevistas no estructuradas con los operarios y el personal de mantenimiento, cuya experiencia y conocimiento tácito de las máquinas es una fuente invaluable para identificar modos de falla ocultos o causas raíz que no siempre quedan registradas en los informes escritos. Esta triangulación de fuentes enriquece y valida la información obtenida.

En cuanto a las técnicas e instrumentos de recolección de datos, se emplearán principalmente dos. La primera es el análisis documental, que utilizará como instrumento una ficha de registro estandarizada para extraer de manera sistemática los

datos relevantes de los archivos históricos (fechas de parada, duración, causa, acciones correctivas tomadas, repuestos utilizados, etc.). La segunda técnica es la observación estructurada y el check-list, cuyo instrumento será una lista de verificación técnica basada en los manuales de los equipos y en buenas prácticas de mantenimiento, que permitirá inspeccionar visual y funcionalmente el estado actual de los componentes del molino y la tostadora. Los datos recopilados se centrarán en los reportes de paradas, los tiempos de operación entre fallas y los tiempos de reparación, así como en las condiciones observadas de los componentes críticos.

La Estrategia del Estudio de Caso para el Análisis Exhaustivo del Molino y la Tostadora

Dada la naturaleza específica del estudio, la población y la muestra coinciden. No se trata de un estudio muestral donde se selecciona una parte representativa de un universo más amplio, sino de un estudio de caso en profundidad. Por lo tanto, la población está constituida por los dos equipos principales objeto de la investigación: el molino y la tostadora de la Planta de Pasta de Cacao. La muestra, en consecuencia, es la misma: se analizarán en su totalidad todos los componentes y subsistemas relevantes de estos dos equipos, lo que permite un análisis exhaustivo y detallado.

Una vez recolectada la información, se procederá a su análisis y procesamiento. Para ello, se utilizarán herramientas informáticas de uso común en ingeniería y estadística. El software Microsoft Excel será fundamental para la organización de los datos en tablas dinámicas, la realización de cálculos de

indicadores como MTBF y MTTR, y la elaboración de gráficos de tendencias y diagramas de Pareto para visualizar la criticidad de las fallas. Para análisis estadísticos más avanzados, como la comparación de medias (pruebas t de Student) o la validación de hipótesis, se empleará el software SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), ampliamente reconocido en el ámbito académico y profesional para el tratamiento de datos cuantitativos. El procesamiento de los datos permitirá no solo presentar el diagnóstico de la situación actual, sino también diseñar y validar técnicamente el nuevo Plan de Mantenimiento basado en RCM, contrastando los indicadores de disponibilidad antes y después de la propuesta y demostrando así la efectividad de la metodología propuesta.

Capítulo II

*ARQUITECTURA CONCEPTUAL PARA LA CONFIABILIDAD.
FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y HERRAMIENTAS ANALÍTICAS*

La solidez de cualquier propuesta de mejora en el ámbito de la ingeniería de mantenimiento descansa sobre un andamiaje teórico bien definido y actualizado. Comprender los fundamentos conceptuales que subyacen a las estrategias de gestión de activos no es un ejercicio meramente académico, sino una necesidad práctica para tomar decisiones informadas y efectivas. Este capítulo se adentra en la exploración detallada de los principios que rigen la gestión del mantenimiento, desde sus definiciones más básicas hasta los modelos de gestión avanzada como el Mantenimiento Productivo Total (TPM) y, de manera fundamental, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Se abordarán con profundidad las herramientas analíticas que conforman el núcleo de esta metodología, como el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) y el diagrama de decisiones, así como los indicadores clave de desempeño que permiten cuantificar la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad de los activos. Este marco conceptual no solo proporciona el lenguaje y las herramientas para diagnosticar la situación actual del molino y la tostadora, sino que sienta las bases para el diseño de una estrategia de mantenimiento robusta, proactiva y alineada con los objetivos de continuidad operativa y rentabilidad de la planta de procesamiento de cacao en Piura.

La evolución del pensamiento en mantenimiento ha sido paralela al desarrollo industrial mismo. Lo que en sus orígenes era una función reactiva, limitada a reparar lo que se rompía, se ha transformado en una disciplina compleja que integra ingeniería, estadística, gestión de riesgos y análisis económico. Esta transformación responde a una realidad ineludible: en un entorno competitivo, las paradas no planificadas no son solo una molestia, sino una amenaza directa a la sostenibilidad del negocio. Por ello, las organizaciones de clase mundial han migrado hacia modelos que buscan anticiparse a los eventos,

gestionar proactivamente la salud de sus activos y optimizar la relación entre el costo de mantener y el valor que los equipos generan. La comprensión de esta evolución es el primer paso para apreciar la relevancia y el poder de las metodologías que se presentan a continuación.

Los pilares de la gestión de activos. Conceptos fundamentales y estrategias de mantenimiento

El mantenimiento ha experimentado una evolución conceptual y práctica de enorme calado a lo largo del último siglo. De ser considerado un mal necesario, un centro de costo donde se reparaban los equipos cuando estos fallaban, ha pasado a ocupar una posición estratégica en las organizaciones de clase mundial. Hoy en día, la gestión del mantenimiento se define como el conjunto de técnicas y sistemas que permiten determinar las prioridades y controlar las actividades, los costos y la calidad del servicio de mantenimiento, con el objetivo de maximizar la disponibilidad, la confiabilidad y la seguridad de los activos, al menor costo posible y en armonía con el medio ambiente. Como señala Crespo (2007), el objetivo principal es garantizar que los activos físicos continúen desempeñando las funciones para las que fueron diseñados, en su contexto operativo específico, minimizando los riesgos de falla y los costos asociados a lo largo de su ciclo de vida. Esta visión moderna integra el mantenimiento en la estrategia global del negocio, reconociendo que una gestión eficaz de los activos es una fuente de ventaja competitiva. No se trata únicamente de mantener equipos funcionando, sino de hacerlo de la manera más eficiente y sostenible posible, contribuyendo directamente a la rentabilidad de la empresa.

Tipologías de mantenimiento. De lo correctivo a lo predictivo

La comprensión de las diferentes estrategias de mantenimiento es esencial para poder seleccionar la combinación más adecuada para cada activo en función de su criticidad y su contexto operacional. El mantenimiento correctivo (MC) es la forma más antigua y básica. Consiste en intervenir el equipo después de que la falla ha ocurrido, con el objetivo de repararlo o reemplazar el componente dañado para devolverlo a un estado funcional (García, 2015). Aunque es inevitable en cierta medida para fallas de naturaleza aleatoria o de bajo impacto, una dependencia excesiva del MC es un claro síntoma de una gestión reactiva y deficiente. Esta estrategia maximiza los costos por paradas no planificadas, puede generar daños colaterales en otros componentes y provoca una pérdida de producción difícil de recuperar. Por ejemplo, esperar a que un motor eléctrico se queme para reemplazarlo no solo implica el costo del motor nuevo y la mano de obra de emergencia, sino también el costo de todas las horas de producción perdidas durante la reparación, que pueden ser órdenes de magnitud superiores al costo del repuesto.

En el extremo opuesto al correctivo se sitúa el mantenimiento preventivo (MP), que busca anticiparse a la ocurrencia de la falla. Se basa en la ejecución de intervenciones a intervalos de tiempo predeterminados, que pueden estar basados en el calendario (cada mes, cada año) o en las horas de funcionamiento del equipo (cada 1000 horas de operación), con el objetivo de reducir la probabilidad de falla o la degradación de su rendimiento (Wireman, 2005). Un ejemplo clásico es el cambio de aceite y filtros de un compresor cada 2000 horas de traba-

jo. Sin embargo, el MP basado únicamente en el tiempo puede ser ineficiente. Si los intervalos son demasiado conservadores, puede resultar en intervenciones innecesarias en componentes que aún tienen una vida útil restante significativa, desperdiciando recursos y, paradójicamente, aumentando la probabilidad de fallas prematuras debido a errores durante la intervención. Si los intervalos son demasiado largos, no se prevendrán las fallas. La clave reside en optimizar estos intervalos, lo que requiere un conocimiento profundo de los patrones de falla del equipo.

El mantenimiento predictivo (Pdm) representa un avance significativo hacia la optimización y la eficiencia. Es una forma de mantenimiento basado en la condición (CBM, por sus siglas en inglés) que consiste en monitorear periódicamente la condición real del equipo a través de técnicas de diagnóstico no intrusivas, como el análisis de vibraciones, la termografía infrarroja, el análisis de aceites lubricantes, la ultrasonido o el análisis de corrientes del motor (Moblely, 2002). El objetivo es detectar síntomas tempranos de degradación o falla incipiente para predecir cuándo ocurrirá la falla funcional y programar la intervención justo antes de que esta ocurra. Por ejemplo, mediante el análisis de vibraciones se puede detectar un desalineamiento incipiente en un rodamiento con semanas o meses de antelación a su fallo catastrófico. Esto permite planificar la reparación durante una parada programada, optimizando los intervalos de mantenimiento, reduciendo los costos al evitar intervenciones innecesarias y previniendo las fallas catastróficas, maximizando así la vida útil de los componentes. La elección entre estas estrategias no es excluyente; una gestión moderna combina todas ellas de manera óptima en un plan híbrido: predictivo para los modos de falla que lo permitan, preventivo para aquellos que

tengan un patrón de desgaste conocido, y correctivo planificado para fallas de bajo impacto o para las que no exista una tarea proactiva efectiva.

Modelos de gestión avanzada. TPM y RCM

Más allá de los tipos de mantenimiento, han surgido modelos de gestión que integran estos conceptos en una filosofía más amplia y estratégica. El Mantenimiento Productivo Total (TPM, por sus siglas en inglés), desarrollado por Nakajima (1988) en Japón, es una filosofía de gestión que busca maximizar la eficacia global de los equipos (OEE, por sus siglas en inglés) involucrando a todos los departamentos y niveles de la empresa, desde la alta dirección hasta los operarios de planta. Uno de sus pilares fundamentales es el mantenimiento autónomo, que transfiere a los operadores la responsabilidad de tareas básicas de cuidado, limpieza, lubricación e inspección de sus equipos. Esto libera al personal de mantenimiento especializado para que se concentre en tareas de mayor complejidad, análisis de fallas y mejoras, al tiempo que fomenta en los operarios un sentido de “propiedad” sobre sus máquinas. El TPM busca crear una cultura donde “todos cuidan el equipo”, lo que reduce significativamente las pequeñas paradas y la degradación acelerada.

Por su parte, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) es un proceso sistemático y estructurado, de origen anglosajón (surgido en la industria de la aviación comercial), para determinar los requisitos de mantenimiento de cualquier activo físico en su contexto operativo. Mientras el TPM se enfoca en la cultura y la participación, el RCM se centra en el análisis técnico riguroso y la toma de decisiones basada en el riesgo y las conse-

cuencias de las fallas. Ambas metodologías no son excluyentes, sino profundamente complementarias. Una organización puede (y debe) implementar los principios del TPM para crear una base cultural sólida de cuidado de los activos, y al mismo tiempo aplicar el RCM para diseñar las estrategias de mantenimiento óptimas para sus activos más críticos. La sinergia entre ambas da lugar a sistemas de gestión de activos de alta confiabilidad, donde la eficiencia operativa y la seguridad se potencian mutuamente.

El corazón del análisis. RCM, AMEF e indicadores de desempeño

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), en su definición más clásica y aceptada globalmente, es un proceso utilizado para determinar qué debe hacerse para que cualquier activo físico continúe desempeñando las funciones que sus usuarios quieren que realice en su presente contexto operativo (Moubray, 2004). Esta definición, aparentemente simple, contiene implicaciones profundas y revolucionarias para la gestión del mantenimiento. En primer lugar, se centra en preservar la función del sistema, no en mantener el equipo por sí mismo. Lo importante no es que el equipo esté "bonito" o "como nuevo", sino que sea capaz de hacer lo que necesita el proceso productivo. En segundo lugar, reconoce explícitamente que el contexto operativo es crucial: un mismo equipo (una bomba centrífuga, por ejemplo) tendrá requisitos de mantenimiento radicalmente diferentes si opera en una refinería de petróleo en un proceso continuo las 24 horas del día, que si opera en una planta de tratamiento de agua de un pequeño municipio con operación inter-

mitente. Como señalan Campos et al. (2019), el RCM se ha consolidado como la metodología por excelencia para el desarrollo de planes de mantenimiento en activos de todo tipo, desde los más simples hasta los más complejos, precisamente porque mantiene el enfoque en asegurar las funciones del activo para satisfacer las necesidades de los usuarios y del negocio. El RCM no es una lista de recetas, sino un marco de pensamiento lógico que obliga a hacerse las preguntas correctas sobre los activos, evitando caer en la trampa de “siempre lo hemos hecho así”.

El proceso lógico. Las siete preguntas del RCM

La metodología RCM se estructura en torno a siete preguntas fundamentales que deben responderse para cada activo o sistema en su contexto operativo. Este cuestionario sistemático guía el análisis y asegura que no se pase por alto ningún aspecto relevante para la confiabilidad. Las preguntas, según las establece Moubray (1997), son:

1. ¿Cuáles son las funciones y los niveles de rendimiento deseados del activo en su contexto operativo actual? (Funciones y Estándares de Funcionamiento).
2. ¿De qué maneras puede fallar al cumplir con dichas funciones? (Fallos Funcionales).
3. ¿Qué causa cada fallo funcional? (Modos de Falla).
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada fallo? (Efectos de la Falla).

5. ¿En qué forma afecta cada fallo? (Consecuencias de la Falla).

6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada fallo? (Tareas Proactivas y Frecuencias).

7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? (Acciones por Defecto, como rediseño o mantenimiento correctivo planificado).

Responder estas siete preguntas de manera rigurosa y documentada para cada función relevante del molino y la tostadora proporcionará un conocimiento profundo de estos activos y sentará las bases para un plan de mantenimiento altamente efectivo, eficiente y justificado técnicamente.

Análisis de funciones, fallas funcionales y modos de falla

El punto de partida del RCM es la determinación de las funciones. Esto va más allá de una simple descripción superficial del equipo. Implica definir, en el entorno específico de sus operaciones, qué es lo que el usuario quiere que el equipo haga y, crucialmente, a qué nivel de rendimiento se espera que lo haga (Moubray, 2004). Por ejemplo, la función de un molino no es simplemente “moler”, sino “moler granos de cacao previamente tostados y descascarillados hasta obtener una pasta con una finura de 30 micras, a un caudal de 500 kilogramos por hora, con un consumo energético inferior a 50 kWh por tonelada”. Una vez que las funciones y sus estándares de rendimiento están claramente definidos, se pueden determinar las fallas funcionales, que son los estados en los que el activo es incapaz de cumplir una función específica conforme a los parámetros de funciona-

miento establecidos (Moubray, 2004; Sifonte y Reyes, 2017). Siguiendo el ejemplo, una falla funcional sería “el molino produce pasta con una finura superior a 30 micras” o “el caudal de molienda cae por debajo de 400 kilogramos por hora”.

A continuación, se identifican los modos de falla, que son los eventos específicos que pueden causar cada estado de falla funcional (Moubray, 2004). Esta es una etapa de “lluvia de ideas” técnica que requiere la participación del personal de mantenimiento, operación e ingeniería. Sifonte y Reyes (2017) recomiendan realizar un ejercicio exhaustivo para identificar todos los modos de falla razonablemente probables para cada falla funcional. Esto incluye, de manera crucial, fallas que ya han ocurrido en el pasado y están registradas en el historial, fallas que el plan de mantenimiento actual no está previniendo, fallas que aún no han ocurrido pero que son posibles (por ejemplo, fatiga de un material), y fallas causadas por errores humanos (de operación o de mantenimiento) o por deficiencias de diseño. En el caso del molino, un modo de falla para la falla funcional de “finura inadecuada” podría ser “desgaste excesivo de las barras del rotor” o “pérdida de tensión de las correas de transmisión”. Para cada modo de falla identificado, se analizan sus efectos, es decir, qué sucede cuando ocurre. Esto incluye describir las evidencias de que la falla ha ocurrido (ruido, vibración, alarma), de qué manera afecta a la seguridad de las personas, al medio ambiente, a la producción y a las operaciones aguas abajo, y qué acciones concretas deben realizarse para repararla (Moubray, 2004). Amendola (2016) destaca que este análisis detallado de funciones, fallas y modos de falla es una fuente inagotable de oportunidades para la mejora continua y la innovación en los procesos.

Análisis de consecuencias y el diagrama de decisiones

Finalmente, se evalúan las consecuencias de cada falla. Esta es quizás la etapa más crítica del proceso RCM, ya que de ella depende la decisión sobre si se debe invertir en prevenir activamente la falla o si se puede permitir que ocurra y se gestione de otra manera. Las consecuencias se clasifican, como se ilustra en la Figura 1, en categorías bien definidas que incluyen: consecuencias para la seguridad y el medio ambiente (las más graves, que nunca se deben tolerar), consecuencias operacionales (pérdida de producción, daños a otros equipos, aumento de costos), consecuencias no operacionales (solo el costo directo de la reparación, sin afectar la producción) y consecuencias ocultas (para fallas que no son evidentes para los operarios en condiciones normales, como las de los dispositivos de protección o las válvulas de alivio)(Moubray, 2004).

Figura 1. Tipos de Consecuencias de Fallas

Tipo de Consecuencia	Definición
Fallas ocultas	No suelen tener un efecto directo. Sin embargo, puede haber una exposición a otras fallas de mayor efecto.
Operacionales	Impactan la producción, tal como puede ser: la capacidad, el servicio al cliente, los costos industriales que implican al costo directo de reparación y la capacidad.
No operacionales	Solo incurren a ser un exclusivo gasto directo en la reparación.
La seguridad y el medio ambiente	Ocurren cuando origina condiciones causar lesiones o pérdida de la vida humana. Por otro lado, se generan al incumplir las normas con relación al medio ambiente. A pesar de ello, el juicio del RCM toma mayor importancia el factor humano.

Fuente: Alzamora Román (2025).

En función de estas consecuencias, se utiliza el diagrama de decisiones del RCM para seleccionar las tareas de mantenimiento más apropiadas. Esta herramienta, presentada en la Figura 2, es un árbol lógico que guía al analista a través de una serie de preguntas para determinar la mejor estrategia para cada modo de falla (Amendola, 2016). La jerarquía de selección es clara: primero se buscan tareas predictivas (basadas en la condición) que sean técnicamente factibles y costo-efectivas para detectar la falla potencial con suficiente antelación. Si no es posible o rentable, se evalúan tareas preventivas (reacondicionamiento o sustitución cíclica). Si ninguna tarea proactiva es aplicable o efectiva, la decisión por defecto puede ser el mantenimiento correctivo, pero este puede ser planificado si las consecuencias de la falla son bajas, o puede conducir a la necesidad de un rediseño del equipo si las consecuencias son inaceptables (Moubray, 2004). Este proceso lógico asegura que cada tarea de mantenimiento incluida en el plan tenga una razón de ser clara y esté plenamente justificada.

Figura 2. Criterios según el valor del número de prioridad de riesgo

Semaforización	Valor del NPR
Rojo	$\text{NPR} \geq 36$
Amarillo	$7 < \text{NPR} < 36$
Verde	$\text{NPR} \leq 7$

Fuente: Campos et al. (2018).

Notas. Metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos.

Análisis de modos y efectos de falla (AMEF) y el número de prioridad de riesgo

El Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) es una herramienta analítica sistemática que constituye el núcleo técnico del proceso RCM (Stamatis, 2003). Su objetivo es identificar, evaluar y clasificar los modos de falla potenciales de un sistema, así como determinar sus efectos y consecuencias. Monge y Yrazábal (2019) lo describen como un sistema que permite decidir sobre los métodos de falla considerando el sistema, el efecto y la frecuencia de ocurrencia. En esencia, el AMEF detalla las consecuencias de los modos de falla del activo según su entorno de operación (Amendola, 2016). Para priorizar los riesgos y focalizar los esfuerzos, el AMEF se apoya en tres parámetros clave: la ocurrencia (O), que es la probabilidad de que el modo de falla ocurra; la severidad (S), que es la gravedad del efecto de la falla; y la detección (D), que es la probabilidad de que la falla sea detectada antes de que cause el efecto final (Stamatis, 2003). El producto de estos tres parámetros da lugar al Número de Prioridad de Riesgo ($NPR = O \times S \times D$), un índice que permite jerarquizar los modos de falla de mayor a menor riesgo, como se ilustra en las Figuras 3 y 4.

Figura 3. Categorías del Número de Prioridad de Riesgo

Categorías	Nivel	Criterio
Detectabilidad	4	No hay probabilidad de detectar causas de falla potenciales a tiempo, se puede llegar a falla funcional.
	3	Baja probabilidad de detectar causas de falla potenciales y corregirlas a tiempo.
	2	Mediana probabilidad de detectar causas de falla potenciales y corregirlas a tiempo.
	1	Causa de falla potencial fácilmente detectable y corregida durante la operación.
Severidad	4	Efectos críticos en la seguridad o en el medio ambiente, pueden existir lesiones, muertes o efectos irreversibles en el medio ambiente.
	3	Efectos importantes en la capacidad productiva, hay pérdidas económicas importantes por tiempo de paro y/o reparación.
	2	Efecto leve en la capacidad productiva, hay pérdidas económicas leves por tiempo de paro o reparación
Ocurrencia	1	No hay efectos operativos ni pérdidas importantes.
	4	Pueden ocurrir varias fallas al año (Tasa de fallas ≥ 1 fallas/año).
	3	$0,3 < \text{Tasa de fallas} < 1$ (fallas/año).
	2	$0,1 < \text{Tasa de fallas} \leq 0,3$ (fallas/año).
	1	Tasa de fallas $\leq 0,1$ (fallas/año).

Fuente: Campos et al. (2018).

Notas. Metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos.

Diagrama de decisiones

Un NPR alto indica un modo de falla crítico que requiere atención inmediata y el diseño de tareas de mantenimiento proactivas. Por el contrario, un NPR bajo puede indicar que el riesgo es aceptable y se puede gestionar mediante manteni-

miento correctivo planificado. Esta herramienta proporciona una base cuantitativa y objetiva para la toma de decisiones, alejándose de la subjetividad y la intuición.

Indicadores clave de desempeño. Confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad

La efectividad de cualquier estrategia de mantenimiento debe ser medida y monitoreada a través de indicadores clave de desempeño (KPIs). Estos indicadores proporcionan una visión objetiva de la salud de los activos y permiten evaluar el impacto de las mejoras implementadas. La confiabilidad (*reliability*) se define como la probabilidad de que un elemento funcione sin fallas, bajo condiciones operacionales específicas y durante un período de tiempo determinado (Blischke & Murthy, 2000). En la práctica, para equipos reparables, se mide a través del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), que se calcula como el tiempo total de operación dividido entre el número de fallas ocurridas en ese período. Un MTBF alto indica un equipo confiable.

La mantenibilidad (*maintainability*) se define como la probabilidad de que una operación de mantenimiento, dentro de unas condiciones dadas, pueda ejecutarse en un tiempo especificado (Dhillon, 2006). Se mide principalmente a través del Tiempo Medio Para Reparar (MTTR), que es el tiempo promedio necesario para restaurar un equipo a su condición operativa después de una falla. Un MTTR bajo indica un equipo fácil de reparar, con buena accesibilidad, disponibilidad de repuestos y personal capacitado. Finalmente, la disponibilidad (*availability*) integra los dos conceptos anteriores. Es la probabilidad de que un equipo esté en condiciones de operar cuando se requiere

(Pintelon & Van Wassenhove, 1990). Para el ámbito operacional, Diestra et al. (2017) la definen como la capacidad de un recurso para realizar una función deseada bajo ciertas condiciones en un momento determinado. Su fórmula de cálculo, ampliamente aceptada, es:

$$[\text{Disponibilidad} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})] \times 100\%.$$

Este indicador, expresado como porcentaje, es el más utilizado a nivel gerencial para evaluar la efectividad global de la gestión de mantenimiento y su impacto en la capacidad de producción. La mejora de la disponibilidad del molino y la tostadora es, precisamente, el objetivo central de esta investigación.

El entorno productivo. Fundamentos del procesamiento de cacao y su maquinaria crítica

Comprender el contexto operacional en el que se desenvuelven los activos objeto de estudio no es un mero ejercicio de contextualización, sino una necesidad imperativa para aplicar con éxito cualquier metodología de mejora, especialmente el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Como se ha enfatizado a lo largo de este marco teórico, el RCM exige un conocimiento profundo de las funciones que los equipos deben cumplir en su entorno específico. Por ello, este capítulo se dedica a explorar el universo del cacao, desde la biología del grano hasta la complejidad tecnológica de la planta de procesamiento, pasando por una descripción detallada de cada etapa del proceso productivo y de los equipos críticos que lo hacen posible. Esta inmersión en el contexto permitirá, en fases posteriores, realizar un análisis de fallas preciso y pertinente, asegurando

que las estrategias de mantenimiento propuestas estén perfectamente alineadas con las necesidades reales de la operación y con las características particulares de la maquinaria involucrada.

La relevancia de este análisis contextual se ve reforzada por la naturaleza misma del producto. El cacao peruano, y en particular el de regiones como Piura, goza de un reconocimiento internacional por sus cualidades organolépticas únicas, lo que lo posiciona como un producto de exportación de alto valor. Esta condición impone estándares de calidad rigurosos que deben mantenerse a lo largo de toda la cadena de transformación. Cualquier desviación en el proceso, causada por una falla en un equipo, no solo interrumpe la producción, sino que puede comprometer irreversiblemente la calidad del lote procesado, con las consiguientes pérdidas económicas y de reputación. Por lo tanto, garantizar la disponibilidad y el correcto funcionamiento de la maquinaria, especialmente del molino y la tostadora, es una condición sine qua non para sostener la competitividad de la cooperativa y el sustento de las familias que dependen de ella.

Del grano a la pasta. La ruta del cacao y su maquinaria esencial

El cacao. Origen, características y relevancia económica

El cacao, cuya denominación científica es *Theobroma cacao*, pertenece a la familia botánica de las Esterculiáceas (*Sterculiaceae*). El término *Theobroma*, acuñado por el naturalista sueco Linneo, significa “alimento de los dioses” en griego, un

nombre que refleja la veneración que las culturas mesoamericanas, como los mayas y aztecas, sentían por este fruto, al que atribuían propiedades divinas y lo utilizaban tanto en ceremonias como como moneda de cambio. El fruto del cacao es una baya de forma variable, pudiendo ser elipsoidal, ovoide, fusiforme, oblonga o esférica. En su interior, alberga entre 20 y 40 semillas, comúnmente conocidas como habas de cacao, que son la materia prima esencial para la elaboración del chocolate y sus derivados. Estas semillas, de forma aplanada y elipsoide, con una longitud de 2 a 4 centímetros, se encuentran sumergidas en una pulpa blanquecina y mucilaginoso de sabor dulce. El fruto completo puede medir de 10 a 25 centímetros de longitud y alcanzar un peso de 200 a 500 gramos. De las semillas se extrae, por presión, una materia grasa de gran valor conocida como manteca de cacao, ampliamente utilizada no solo en la industria chocolatera, sino también en la cosmética y farmacéutica.

El proceso de transformación del grano de cacao desde su estado fresco en la mazorca hasta el producto seco y listo para su comercialización o procesamiento es crucial para el desarrollo de sus precursores de sabor y aroma. Una vez cosechadas, las mazorcas se abren y las semillas, aún cubiertas de pulpa, se someten a un proceso de fermentación. Esta etapa es fundamental, ya que desencadena una serie de reacciones bioquímicas dentro del grano que eliminan el sabor amargo y astringente y generan los compuestos precursores del característico aroma y sabor a chocolate. Posteriormente, las habas fermentadas se someten a un proceso de secado, tradicionalmente al sol, hasta alcanzar una humedad de alrededor del 7%. Este secado detiene la fermentación, reduce aún más la astringencia y permite el almacenamiento seguro del grano, evitando la proliferación

de hongos y mohos. Es en este punto, una vez secas y correctamente almacenadas, cuando las habas de cacao están listas para ser transformadas en la planta de procesamiento.

En el contexto peruano, el cacao es un producto de exportación no tradicional de creciente importancia. Las principales zonas productoras del país se concentran en las regiones de Cusco y Ayacucho, que en conjunto aportan aproximadamente el 65.9% de la producción nacional. Les siguen en importancia las regiones de Junín, Huánuco y Cajamarca, que contribuyen con otro 27% del total. La producción nacional, aunque representa alrededor del 0.9% de la producción mundial (estimada en 2.3 millones de toneladas anuales), se distingue por su alta calidad. El cacao peruano es reconocido internacionalmente como un cacao tipo aromático o “fino y de aroma”, caracterizado por su alto contenido de grasa y sus complejos perfiles sensoriales con notas frutales y florales. Esta singularidad le confiere un alto valor comercial en el mercado internacional y un gran potencial para la producción de cacao orgánico y de comercio justo, cultivado frecuentemente en sistemas agroforestales de multiestratas que favorecen la biodiversidad y la sostenibilidad ambiental. Un estudio publicado en la revista *Food Research International* (2019) destaca que la diversidad genética y las prácticas de cultivo en regiones como Piura y Cusco son responsables de perfiles sensoriales únicos, con notas a frutos secos y caramelo que son altamente valorados por la industria chocolatera europea. En la Figura 4 se presenta una imagen ilustrativa del fruto del cacao, mostrando su morfología externa e interna.

Figura 4. Fruto del cacao



Fuente: Alzamora Román (2025).

Nota. Revista de la Planta de pasta de Cacao Norandino

La planta de pasta de cacao. Infraestructura y capacidad productiva

La planta de procesamiento de la Cooperativa Agraria Norandino, objeto de este estudio, se erige como un hito de modernidad y capacidad tecnológica en el panorama agroindustrial latinoamericano. Considerada una de las más avanzadas de América Latina, esta instalación representa un salto cualitativo en la cadena de valor del cacao, permitiendo a los agricultores asociados no solo vender su grano, sino transformarlo en un producto de mayor valor agregado: la pasta o licor de cacao. La planta cuenta con una capacidad de procesamiento de 500 kilogramos por hora, lo que se traduce en una capacidad anual de hasta 4,000 toneladas métricas de pasta de cacao. Esta escala de producción no solo abastece la demanda local, sino que posiciona a la cooperativa para competir en mercados internacionales exigentes, donde la consistencia y la calidad del producto son requisitos innegociables.

Para alcanzar estos niveles de productividad y calidad, la planta está equipada con maquinaria especializada de primer nivel. La totalidad de la línea de procesamiento ha sido fabricada por la prestigiosa empresa holandesa Duyvis Wiener, una firma con más de un siglo de experiencia y reconocida mundialmente como líder en la ingeniería y fabricación de equipos para la industria del chocolate y el cacao. La elección de esta tecnología no es casual; garantiza la precisión en cada etapa del proceso, desde la limpieza inicial hasta la molienda final, asegurando la obtención de una pasta de cacao con una finura y calidad organoléptica superiores. La inversión total para hacer realidad este complejo agroindustrial ascendió a 7 millones de dólares americanos, una cifra que refleja la magnitud y el compromiso del proyecto. Esta inversión fue posible gracias a un esquema de financiamiento diversificado que incluyó el fondo PSI de Holanda (con cerca de 500,000 dólares), así como el respaldo de instituciones financieras como Equal Exchange, el Banco de Crédito del Perú y el Rabobank, este último con una larga trayectoria de apoyo al sector agroindustrial. En la Figura 5 se presenta una vista general de las instalaciones de la planta.

Figura 5. Vista panorámica de la Planta de Pasta de Cacao de la Cooperativa Agraria Norandino.



Fuente: Alzamora Román (2025).

Nota. Revista de la Planta de pasta de Cacao Norandino

El proceso de obtención de pasta de cacao. Una descripción etapa por etapa

La transformación del grano de cacao seco en una pasta homogénea y de alta calidad es un proceso que consta de varias etapas críticas y secuenciales, cada una con un propósito específico y con requerimientos técnicos precisos. A continuación, se describe el flujo del proceso tal como se lleva a cabo en la planta de Norandino.

a. Limpieza

Las habas de cacao, incluso después de un cuidadoso manejo postcosecha, pueden llegar a la planta acompañadas de

materias extrañas e impurezas. Estas pueden incluir restos de arena y tierra, fragmentos de madera, pequeñas piedras, trozos de vidrio accidentalmente incorporados, o incluso otros granos y semillas diferentes al cacao. La presencia de estos cuerpos extraños no solo es inaceptable desde el punto de vista de la calidad y la inocuidad alimentaria, sino que también puede causar daños severos a la maquinaria en etapas posteriores, como molinos y refinadores. Por ello, el proceso de limpieza es el primer y fundamental filtro. Se realiza mediante un equipo que combina zarandas vibratorias con tamices de diferentes diámetros de malla. Este sistema clasifica el material por tamaño: las impurezas más grandes son retenidas en las mallas superiores, mientras que las habas de cacao, de un tamaño más homogéneo, pasan a través de las mallas adecuadas. Un flujo de aire adicional puede utilizarse para separar partículas livianas como el polvo. Es importante destacar que la cantidad de impurezas está directamente relacionada con las prácticas de secado previas; los cacaos secados en tendales sobre el suelo tienden a incorporar más impurezas que aquellos secados en camillas elevadas.

b. Tostado

El tostado es, sin duda, una de las etapas más determinantes para la calidad sensorial del producto final. En esta fase, las habas de cacao limpias se someten a un tratamiento térmico controlado dentro de un equipo tostador, en este caso, un tostador de aire caliente. Los objetivos del tostado son múltiples y complejos. En primer lugar, el calor reduce drásticamente la humedad residual del grano (que ronda el 7%) hasta aproximadamente un 2-3%, volviéndolo más quebradizo y facilitando la

posterior separación de la cáscara. En segundo lugar, y más importante, el tostado desencadena las reacciones de Maillard y otras transformaciones químicas que desarrollan y potencian los precursores de aroma y sabor generados durante la fermentación. Es aquí donde se definen las notas sensoriales características del chocolate. Un tueste inadecuado, ya sea por exceso de temperatura o por un tiempo incorrecto, puede arruinar un lote entero, produciendo sabores quemados, amargos o planos. Los parámetros de temperatura y tiempo de tueste no son universales; deben ajustarse en función de la variedad de cacao, su tamaño y, crucialmente, su humedad inicial.

c. Descascarillado

Inmediatamente después del tostado, y aprovechando que las habas aún están calientes y quebradizas, se procede al descascarillado. El objetivo de esta etapa es separar la cáscara o tegumento externo del grano del interior, que es el cotiledón o “nib” de cacao. El equipo utilizado es un descascarillador o “cracker and winnower”. Este funciona mediante una turbina central que, girando a alta velocidad, impulsa los granos contra las paredes del cilindro, rompiéndolos. La mezcla resultante de fragmentos de cáscara y nibs cae sobre un sistema de zarandas vibratorias con diferentes niveles de tamices, que clasifican el material por tamaño. Simultáneamente, un flujo de aire controlado (aspiración) separa los fragmentos livianos de cáscara de los nibs, más pesados y densos. La eficiencia de esta separación es crucial, ya que la presencia de restos de cáscara en la pasta de cacao aporta sabores amargos y astringentes indeseables y afecta la textura final.

d. Primera Molienda

Los nibs de cacao, ya limpios de cáscara, ingresan a la etapa de molienda, donde serán transformados en una pasta fluida. La primera molienda tiene como objetivo reducir el tamaño de las partículas de los nibs de manera significativa. Este proceso se realiza en molinos, a menudo de discos o de martillos, donde la fricción mecánica generada tritura los nibs. Esta fricción produce calor, lo que provoca que las células de los cotiledones se rompan y liberen la manteca de cacao que contienen. Al liberarse, la manteca, que es sólida a temperatura ambiente, se funde por el calor, dando lugar a una pasta espesa y fluida conocida como licor de cacao o pasta de cacao. Al final de esta primera etapa, la pasta alcanza una finura aproximada del 90%, es decir, el 90% de las partículas tienen un tamaño inferior al objetivo final. Esta pasta, sin embargo, aún presenta una textura áspera y granular al paladar.

e. Segunda molienda (Refinado)

La pasta proveniente de la primera molienda se somete a una segunda etapa de molienda, también conocida como refinado, para alcanzar la finura requerida para un producto de alta calidad, que es del 99% o más. El equipo comúnmente utilizado para esta tarea es el molino de bolas. Este molino consiste en un cilindro horizontal o vertical que gira y que contiene en su interior un cierto volumen de bolas o cilindros trituradores, generalmente de acero. La pasta de cacao bombeada a través del molino es sometida al impacto y la fricción de las bolas en movimiento, lo que reduce progresivamente el tamaño de las partículas sólidas (cacao) suspendidas en la manteca. La tem-

peratura en esta etapa debe ser cuidadosamente controlada, manteniéndose típicamente entre los 65 y 70 grados Celsius. Una temperatura excesiva podría dañar los finos cristales de manteca y afectar negativamente las propiedades de fluidez y sabor de la pasta. Un estudio publicado en el *Journal of Food Engineering* (2020) demostró que la eficiencia de la molienda en molinos de bolas para cacao está directamente correlacionada con la velocidad de rotación, la densidad y el tamaño de las bolas, y el tiempo de residencia de la pasta, parámetros que deben optimizarse para cada tipo de grano.

f. Enfriamiento y almacenamiento intermedio

Una vez alcanzada la finura deseada, la pasta de cacao sale del molino de bolas a una temperatura elevada (alrededor de 65-70°C). Para poder ser envasada de manera segura y evitar problemas de degradación de calidad, es necesario reducir su temperatura. La pasta caliente se bombea a un tanque de almacenamiento intermedio, generalmente de acero inoxidable, donde se agita suavemente para favorecer un enfriamiento homogéneo. El enfriamiento se realiza de manera controlada, permitiendo que la temperatura descienda hasta un rango de 41 a 45 grados Celsius. En este punto, la pasta mantiene una viscosidad adecuada para el envasado, pero ha reducido su energía térmica, minimizando el estrés térmico sobre los materiales de empaque.

g. Empaque

La etapa final del proceso es el empaquetado de la pasta de cacao. Dependiendo de los requerimientos del cliente y del uso

posterior (industrial o venta directa), la pasta puede ser envasada en diferentes formatos. El más común es el envasado en fundas de polietileno de alta densidad, que son resistentes a la grasa y proporcionan una barrera adecuada contra la humedad y los olores. Estas fundas, una vez llenas con el peso exacto especificado, se colocan dentro de cajas de cartón corrugado para su protección durante el transporte y almacenamiento. En esta etapa, el control de calidad es fundamental: se verifica el peso neto, la integridad del sellado de las fundas, y se etiqueta correctamente cada caja con la información del lote, fecha de producción y peso. La trazabilidad del producto final hacia los lotes de grano procesado es un requisito indispensable para la gestión de calidad y la atención a posibles reclamos.

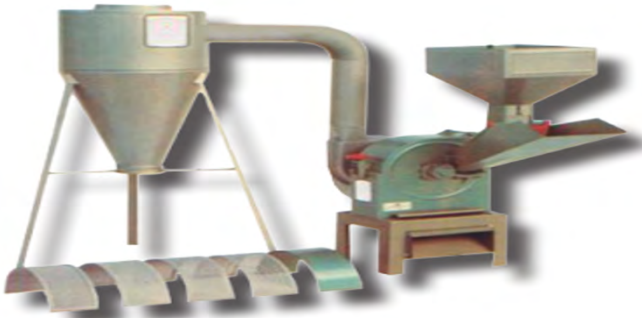
Los guardianes del proceso. Descripción funcional de los equipos críticos

El molino de granos (primera y segunda molienda)

El molino es, en esencia, el corazón de la planta de pasta de cacao. Es la máquina responsable de transformar los nibs sólidos y quebradizos en una pasta fluida y homogénea. En el contexto de la planta Norandino, el término “molino” puede referirse a diferentes equipos en las dos etapas de molienda descritas. El molino de la primera etapa (a menudo un molino de discos o de martillos) se encarga de la trituración gruesa inicial. El molino de bolas, utilizado en la segunda etapa, es el responsable de la finura final. Una característica clave de estos equipos, especialmente del molino de bolas, es su diseño que permite una molienda homogénea, evitando que el producto se adhiera a las

superficies internas, lo que podría causar sobrecalentamiento, quemado del producto y desequilibrios en el equipo. Su operación y mantenimiento, aunque requieren conocimiento especializado, están diseñados para ser relativamente accesibles al personal técnico capacitado. En la Figura 6 se presenta una imagen del molino de granos utilizado en la planta.

Figura 6. Molino utilizado en el proceso de molienda de pasta de cacao.



Fuente: Alzamora Román (2025).

Nota. Revista de la planta de pasta de Cacao Norandino tostadora de pasta de cacao

Como señala Minifie (1989) en su obra clásica *Chocolate, Cocoa and Confectionery*, las fallas en el molino, a menudo relacionadas con el desgaste de los elementos moledores (bolas, discos o martillos), fallas en los rodamientos de los ejes, sobrecargas en los motores eléctricos o problemas en el sistema de alimentación, tienen una consecuencia inmediata y severa: la detención completa de la producción de pasta. No existe un equipo redundante o un bypass en esta etapa crítica; si el molino se detiene, toda la planta se detiene. Esta condición, por sí

sola, justifica plenamente su clasificación como equipo crítico y la necesidad de aplicar sobre él las estrategias de mantenimiento más rigurosas y proactivas.

La tostadora de cacao

La tostadora es el otro pilar fundamental del proceso. Su función va más allá de un simple calentamiento; es el reactor químico donde se desarrolla el sabor y el aroma del chocolate. En la planta, se utiliza un tostador de aire caliente, un equipo que permite un control preciso de la temperatura y el flujo de aire a través del lecho de granos. Los quemadores de gas, equipados con válvulas regulables, permiten ajustar la potencia calorífica. La turbina extractora de aire, acoplada a un ciclón, cumple la doble función de asegurar una distribución homogénea del calor y de evacuar la cascarilla y el polvo fino que se desprenden durante el tostado, evitando que se acumulen y puedan generar un riesgo de incendio. La construcción del equipo es íntegramente en acero inoxidable, lo que garantiza su durabilidad, higiene y facilidad de limpieza, requisitos indispensables en la industria alimentaria.

Figura 7. Tostadora de Café



Fuente: Alzamora Román (2025).

Nota. Revista de la planta de pasta de Cacao Norandino

La importancia de la tostadora en la cadena de valor es tal que una falla en este equipo no solo implica una parada de producción, sino que puede tener un impacto catastrófico en la calidad del producto si ocurre durante un lote en proceso. Un sistema de control de temperatura defectuoso, la obstrucción de los quemadores, el mal funcionamiento del sistema de extracción de aire, o el desgaste de los componentes mecánicos del tambor rotatorio, pueden resultar en un tueste irregular, quemado del grano o, en el peor de los casos, un incendio dentro del equipo. Afoakwa (2014), en su libro *Cocoa Production and Processing Technology*, enfatiza que el control preciso del perfil tiempo-temperatura en el tostado es el factor más crítico para

asegurar la calidad sensorial del chocolate, y que cualquier desviación por falla del equipo es prácticamente irreversible. Por ello, garantizar la disponibilidad y el correcto funcionamiento de la tostadora es tan prioritario como en el caso del molino.

CAPÍTULO III

DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO. REVELANDO LAS OPORTUNIDADES DE MEJORA EN LA PLANTA DE CACAO

El éxito de cualquier intervención orientada a mejorar la confiabilidad de los activos industriales depende, de manera fundamental, de la precisión y profundidad del diagnóstico inicial. Este capítulo se adentra en el análisis detallado de la situación actual de la gestión de mantenimiento en la Planta de Procesamiento de Pasta de Cacao de la Cooperativa Agraria Norandino. A través de la descripción del contexto operacional, el examen de las estrategias de mantenimiento preexistentes, el cálculo de los indicadores clave de desempeño (MTBF, MTTR y disponibilidad) y la identificación de las fallas críticas y sus consecuencias, se construye una imagen objetiva y cuantitativa de la realidad operativa de la planta. Este diagnóstico no solo revela las debilidades y los puntos de dolor del sistema actual, sino que proporciona la justificación técnica y económica para la implementación de una estrategia de mantenimiento más avanzada y proactiva, como lo es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), sentando las bases para el desarrollo de la propuesta de mejora.

La relevancia de este análisis diagnóstico se ve acentuada por el papel central que la Planta de Cacao juega en el entramado productivo y social de la cooperativa. Como se ha descrito anteriormente, se trata de una instalación de vanguardia, con una alta capacidad de procesamiento y una tecnología de punta, cuya operación continua y eficiente es indispensable para garantizar el retorno de la inversión realizada y, más importante aún, para asegurar el sustento de las familias agricultoras asociadas. Por lo tanto, comprender a cabalidad las causas de su baja disponibilidad no es un ejercicio académico, sino una necesidad imperiosa para diseñar una hoja de ruta que permita maximizar el valor generado por estos activos críticos.

Análisis de la situación actual. Entre la reactividad y la planificación

Contexto operacional y estrategia de mantenimiento pre existente

El Complejo Agrario Norandino, donde se ubica la planta objeto de estudio, es un entorno industrial complejo en el que confluyen diversas actividades productivas. La gestión del mantenimiento en este complejo no es una función aislada, sino que se apoya en una estructura mixta que combina el trabajo del personal interno con el soporte especializado de empresas contratistas. Las actividades de mantenimiento, ya sean correctivas, preventivas o de mejora, son ejecutadas por el equipo de mantenimiento de la cooperativa, con el valioso apoyo de los operarios de cada planta, cuyo conocimiento cotidiano de los equipos resulta fundamental. Adicionalmente, se cuenta con el soporte técnico de empresas externas especializadas, como ELECTROPRO, responsable de las intervenciones en el ámbito eléctrico; SEIN, encargada de las reparaciones de gasfitería y del mantenimiento preventivo y correctivo en las distintas plantas; y PROMECHANICS, que provee el soporte técnico para el mantenimiento preventivo de los cinco compresores del complejo. Esta estructura de soporte mixto, si bien aporta flexibilidad y conocimiento especializado, requiere de una coordinación y planificación centralizada para ser efectiva y evitar que la operación se vuelva dependiente de intervenciones reactivas.

El análisis de la gestión de mantenimiento en la Planta de Cacao, en particular, revela una estrategia que, aunque formalmente mixta, en la práctica presenta una fuerte inclinación

hacia la corrección de fallas. Esta tendencia se hace evidente al examinar el registro de intervenciones de mantenimiento durante el primer semestre del año 2023. Según el Informe de Mantenimiento correspondiente a ese período, las intervenciones totales en la Planta de Cacao sumaron 45 eventos. Al desglosar esta cifra por tipo de mantenimiento, se obtiene una imagen reveladora: 25 de estas intervenciones (equivalentes al 55.56%) fueron de carácter correctivo, es decir, se realizaron para reparar fallas que ya habían ocurrido, implicando paradas no planificadas y atención de emergencias. En contraste, solo 16 intervenciones (un 35.56%) correspondieron a mantenimiento preventivo programado, y las 4 restantes (8.88%) se clasificaron como mejoras o modificaciones.

Tabla 3. Número de intervenciones según el tipo de mantenimiento

Intervenciones	Correctivo	Preventivo	Mejora	Total
Planta Cacao	25	16	4	45
Total Complejo	47	53	14	114

Fuente: Alzamora Román (2025).

Nota. Informe de Mantenimiento

Esta distribución porcentual, donde el mantenimiento correctivo supera ampliamente al preventivo, es un indicador clásico de una gestión predominantemente reactiva. En una gestión de mantenimiento saludable y proactiva, la proporción debería invertirse, con la mayoría de los recursos y esfuerzos dedicados a actividades planificadas (preventivas y predictivas) que anticipen y prevengan las fallas, dejando el mantenimiento

correctivo para un porcentaje reducido de eventos imprevistos de baja probabilidad. Como advierte García (2015), una dependencia excesiva del mantenimiento correctivo no solo maximiza los costos por paradas no planificadas y reparaciones de emergencia, sino que también genera un círculo vicioso: las fallas inesperadas consumen los recursos que deberían destinarse a la planificación, perpetuando así la reactividad. Este enfoque correctivo es, precisamente, el principal causante de las paradas no planificadas que impactan directamente en la baja disponibilidad de los equipos más críticos de la planta, en particular el molino y la tostadora, cuyo mal funcionamiento o detención tiene consecuencias inmediatas en toda la línea de producción.

Diagnóstico de los indicadores de desempeño. MTBF, MTTR y disponibilidad

Para cuantificar de manera objetiva el impacto de esta gestión reactiva sobre la operación, es necesario calcular y analizar los indicadores clave de desempeño (KPIs) de mantenimiento para todos los equipos de la planta de pasta de cacao. Estos indicadores, estandarizados internacionalmente, permiten traducir la realidad operativa en números que facilitan el diagnóstico, la comparación y la posterior evaluación de mejoras. La Tabla 2 presenta un resumen de estos indicadores para el primer semestre del año, calculados a partir de los registros históricos de operación y fallas.

Tabla 4. Indicadores de todos los equipos

NOMBRE DE MÁQUINA	PLANTA	PRIMER SEMESTRE		
		MTBF (H)	MTTR (H)	DISPONIBILIDAD (%)
Tolva de recepción de granos	CACAO	1100		100.00%
Unidad de transporte por cadena 1	CACAO	1100		100.00%
Elevador de granos 1	CACAO	1100		100.00%
Unidad pre-limpiadora de granos	CACAO	1100		100.00%
Unidad des-pedregadora de granos	CACAO	1100		100.00%
Unidad de pre-limpieza	CACAO	1100		100.00%
Unidad de volteador de dinos	CACAO	1100		100.00%
Tolva de almacenamiento temporal 1	CACAO	1100		100.00%
Unidad de traslado tipo cadena 3	CACAO	1100		100.00%
Elevador de granos 3	CACAO	1100		100.00%
Unidad de traslado tipo cadena 4	CACAO	1100		100.00%
Elevador de granos 4	CACAO	1100		100.00%
Unidad de traslado tipo cadena 5	CACAO	1100		100.00%
Tolva de almacenamiento temporal 2	CACAO	1008	4	99.60%
Caldero	CACAO	1100		100.00%
Combi master DTE	CACAO	197	2.3	98.85%
Unidad de tostado	CACAO	172	5	97.18%
Ciclón de filtrado	CACAO	1100		100.00%
Esterilizador	CACAO	1100		100.00%
Ciclón separador de vapor y agua	CACAO	1100		100.00%
Secador	CACAO	1100		100.00%
Unidad de transporte tipo tornillo 2	CACAO	1100		100.00%
Elevador de granos al descascarillado	CACAO	1100		100.00%
Descascarillado	CACAO	990	2	99.80%

PRIMER SEMESTRE				
NOMBRE DE MÁQUINA	PLANTA	MTBF (H)	MTTR (H)	DISPONIBILIDAD (%)
Nibrotom	CACAO	250	2.5	99.01%
Molino 1	CACAO	140	4	97.22%
Molino 2	CACAO	130	4	97.01%
Tanque de verificación de micras 1	CACAO	1100		100.00%
Tolva vibratoria	CACAO	1100		100.00%
Compresor ST 400	CACAO	521	5	99.05%
Osmosis	CACAO	412.5	2.7	99.35%
Chiller	CACAO	1100		100.00%

Fuente: Alzamora Román (2025).

Nota. Informe antes de la aplicación del plan de mantenimiento.

El análisis de los datos contenidos en la Tabla 4 revela varios hallazgos de gran importancia. En primer lugar, se observa que de los 32 equipos listados, la mayoría (23 de ellos) presenta una disponibilidad del 100% durante el período analizado. Esto se debe a que no sufrieron ninguna falla que requiriera una intervención correctiva, por lo que su MTBF se reporta como 1100 horas (aproximadamente la totalidad del semestre) y su MTTR es cero. Sin embargo, la atención se centra en los 9 equipos restantes, que sí experimentaron fallas y, por lo tanto, concentran las 25 intervenciones correctivas registradas. Dentro de este grupo, destacan por su criticidad la unidad de tostado (tostadora) y los dos molinos (Molino 1 y Molino 2). La tostadora presenta un Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de apenas 172 horas, lo que significa que, en promedio, sufre una avería cada 7 días de operación continua. El Molino 1 presenta un MTBF de 140 horas (aproximadamente cada 6 días) y el Molino 2 de 130 horas (apro-

ximadamente cada 5.4 días). Estos valores de MTBF son notablemente bajos e indican una confiabilidad muy deficiente para equipos que deberían operar de manera continua en una planta de proceso.

En cuanto al Tiempo Medio Para Reparar (MTTR), la tostadora presenta un valor de 5 horas, mientras que ambos molinos tienen un MTTR de 4 horas. Esto significa que, cada vez que estos equipos fallan, se requiere un promedio de 4 a 5 horas para diagnosticar el problema, conseguir los repuestos necesarios (si no están en stock) y ejecutar la reparación que los devuelva a servicio. Estas 4 o 5 horas son horas de producción perdidas, durante las cuales toda la planta permanece detenida o trabajando a capacidad reducida. La combinación de un MTBF bajo (fallas frecuentes) y un MTTR moderado (reparaciones que toman tiempo) da como resultado una disponibilidad operativa que ronda el 97% para estos equipos críticos: 97.18% para la tostadora, 97.22% para el Molino 1 y 97.01% para el Molino 2. Aunque un 97% pueda parecer un valor alto a simple vista, en el contexto de una operación industrial de proceso continuo, una disponibilidad del 97% se traduce en un tiempo de inactividad no planificada de aproximadamente 263 horas al año (casi 11 días completos). Estas 263 horas de parada representan una pérdida de producción y de ingresos muy significativa. Un estudio de caso publicado en el *Journal of Quality in Maintenance Engineering* (2018) sobre una planta procesadora de alimentos en Brasil demostró que incrementar la disponibilidad de sus equipos críticos del 96% al 98% resultó en un aumento del 15% en la rentabilidad anual, al reducir drásticamente las pérdidas por paradas no programadas. Este ejemplo subraya la importancia de no conformarse con valores aparentemente altos, sino de buscar la excelencia operacional.

Cálculo e interpretación de los indicadores

Los indicadores presentados en la tabla anterior se calculan a partir de fórmulas ampliamente aceptadas en la literatura de ingeniería de confiabilidad. El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) es una medida de la confiabilidad del equipo. Se calcula como el cociente entre el Tiempo Total de Operación (TTO) durante un período y el Número de Fallas (NF) ocurridas en ese mismo período (Moubray, 1997). Matemáticamente: $MTBF = TTO / NF$. Un MTBF alto indica un equipo confiable que opera largos períodos sin interrupciones. En el caso de la tostadora y los molinos, el bajo MTBF refleja la alta frecuencia de fallas, consecuencia directa de la estrategia de mantenimiento predominantemente correctiva que no logra anticiparse a los problemas.

El Tiempo Medio Para Reparar (MTTR) es una medida de la mantenibilidad del equipo, es decir, de la facilidad y rapidez con que puede ser devuelto a su estado operativo después de una falla. Se calcula como el cociente entre el Tiempo Total de Parada por Falla (TTP) y el Número de Fallas (NF) en el período (García, 2015). Su fórmula es: $MTTR = TTP / NF$. En un entorno reactivo, las fallas suelen ser inesperadas y críticas, lo que tiende a alargar el MTTR debido a varios factores: la necesidad de un diagnóstico de emergencia bajo presión, la posible falta de disponibilidad de repuestos (que deben ser conseguidos urgentemente), y la dificultad de coordinar al personal y los recursos sin una planificación previa. El MTTR de 4-5 horas observado en los equipos críticos, aunque no es extremadamente alto, es un área de oportunidad para mejorar mediante una mejor gestión de repuestos y procedimientos de intervención estandarizados.

Finalmente, la Disponibilidad Operacional (A) integra los dos conceptos anteriores en una métrica única que expresa el porcentaje de tiempo que el equipo está disponible para producir cuando se le requiere. Su fórmula, derivada de la teoría de la confiabilidad, es: $\text{Disponibilidad} = [\text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})] \times 100\%$. Como se puede apreciar, la disponibilidad es una función directa de la confiabilidad (MTBF) e inversa de la mantenibilidad (MTTR). Para mejorarla, es necesario atacar ambos frentes: aumentar el MTBF (previniendo fallas) y reducir el MTTR (optimizando las reparaciones). La gestión actual, con su alto componente correctivo, falla en ambos aspectos, resultando en una disponibilidad subóptima para los equipos que definen la capacidad de la planta.

Identificación de fallas críticas y justificación de un nuevo enfoque

Análisis de fallas y su impacto operacional

Los 25 eventos de mantenimiento correctivo registrados en la Planta de Cacao durante el semestre son el punto de partida para un análisis de criticidad. Aunque el informe consolidado no desglosa en detalle las fallas por equipo, la experiencia operativa y los datos de disponibilidad permiten inferir que las paralizaciones más severas y con mayor impacto en la producción se concentran, precisamente, en los equipos con menor MTBF: la tostadora y los molinos. Las consecuencias de estas fallas se manifiestan en múltiples dimensiones. La más inmediata y obvia es la pérdida de producción. Cada hora de parada no planificada del molino o la tostadora es una hora en que la

planta deja de transformar grano en pasta de cacao, lo que se traduce directamente en una pérdida de ingresos y en la imposibilidad de cumplir con los compromisos de venta adquiridos con los clientes.

Más allá de la pérdida de producción, las fallas frecuentes generan un incremento significativo en los costos de mantenimiento de tipo correctivo. Estos costos suelen ser muy superiores a los de un mantenimiento planificado, ya que incluyen recargos por mano de obra en horarios extraordinarios (nocturnos, fines de semana), el costo de envíos urgentes de repuestos (fletes aéreos, por ejemplo), y las posibles penalizaciones por incumplimiento de entregas a clientes. Adicionalmente, las fallas en equipos de proceso pueden tener un impacto negativo en la calidad del producto. Por ejemplo, una falla en el sistema de control de temperatura de la tostadora puede resultar en un lote de grano sobre-tostado o sub-tostado, con sabores y aromas indeseables que lo hacen inaceptable para los estándares de calidad de la cooperativa. De manera similar, una desalineación o desgaste en los elementos moledores del molino puede producir una pasta con una finura inadecuada, generando la necesidad de reprocesar el lote (con el consiguiente consumo adicional de energía y tiempo) o, en el peor de los casos, su rechazo total.

Un indicador indirecto pero revelador de la alta exigencia operativa a la que están sometidos los equipos es el consumo energético de la planta. El Informe de Mantenimiento señala que el mayor consumo de energía en todo el complejo durante el primer semestre se registró en el mes de marzo, alcanzando un máximo de 124,317.36 kW/h. Este pico se debió a que la Planta de Cacao operó a doble turno para cumplir con pedidos. Si bien tra-

bajar a plena capacidad es el objetivo de cualquier negocio, esta alta carga operativa, cuando se combina con una estrategia de mantenimiento reactiva, acelera la degradación de los equipos y aumenta la probabilidad de fallas prematuras (Delgado Villadeza, 2023). Es un círculo vicioso: se exige más a los equipos para producir más, pero al no tener un mantenimiento proactivo que los sostenga, las fallas se vuelven más frecuentes, lo que a la larga limita la capacidad de producción.

Justificación para la aplicación del RCM

El diagnóstico presentado a lo largo de este capítulo dibuja un panorama claro y contundente. La Planta de Procesamiento de Pasta de Cacao de la Cooperativa Agraria Norandino, a pesar de contar con tecnología de punta, enfrenta un problema crítico de baja disponibilidad en sus equipos más importantes, el molino y la tostadora. Este problema tiene su origen en una gestión de mantenimiento con una marcada tendencia reactiva, donde más de la mitad de las intervenciones (55.56%) son de tipo correctivo, atendiendo emergencias en lugar de prevenirlas. Los indicadores lo confirman: bajos MTBF (130-172 horas) que evidencian una confiabilidad deficiente, y una disponibilidad (alrededor del 97%) que, aunque no es extremadamente baja, implica un tiempo de inactividad no planificada que resulta inaceptable para una operación que busca la excelencia y la rentabilidad.

En este contexto, la implementación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se justifica plenamente como la estrategia más adecuada para romper el círculo vicioso de la reactividad. El RCM permitirá un cambio de paradigma fundamental: pasar de preguntarse “¿cómo arreglamos esto

rápido?" a preguntarse "¿qué podemos hacer para que esto no vuelva a fallar?". A través de su proceso sistemático de análisis, basado en las siete preguntas y en herramientas como el AMEF, se podrán identificar las causas raíz de las fallas que afectan al molino y la tostadora. Este conocimiento profundo permitirá diseñar un plan de mantenimiento proactivo, compuesto por tareas preventivas y predictivas técnicamente factibles y económicamente viables, que ataquen esas causas raíz. El objetivo final es claro: mejorar el MTBF (haciendo los equipos más confiables), reducir el MTTR (optimizando la logística y los procedimientos de reparación) y, en consecuencia, elevar los niveles de disponibilidad operativa del molino y la tostadora a rangos superiores al 98% o 99%, asegurando así la continuidad del negocio y maximizando el valor generado por la cooperativa para sus asociados.

CAPÍTULO IV

*RESULTADOS, CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y DISCUSIÓN.
LA TRANSFORMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN LA PLANTA
DE CACAO*

Este capítulo constituye el núcleo demostrativo de la investigación, donde se presentan y analizan los resultados obtenidos tras la implementación del modelo de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en los equipos críticos de la Planta de Pasta de Cacao de la Cooperativa Agraria Norandino. A través de un análisis detallado que abarca desde la fundamentación del modelo propuesto hasta la contrastación rigurosa de las hipótesis planteadas, se evidencia el impacto transformador de esta metodología en la gestión de activos. Se exploran las mejoras cuantitativas en los indicadores clave de desempeño (MTBF, MTTR y disponibilidad), se valida la efectividad de las herramientas empleadas (análisis de criticidad, diagrama de Pareto y AMEF) y se discuten los hallazgos a la luz de la literatura especializada. Finalmente, se presenta una evaluación económica del proyecto y se formulan recomendaciones estratégicas para la sostenibilidad y expansión de los logros alcanzados, consolidando así una hoja de ruta hacia la excelencia operacional.

La relevancia de los resultados presentados trasciende el ámbito meramente técnico, pues se traducen directamente en beneficios tangibles para la cooperativa y sus asociados. El incremento en la disponibilidad de la tostadora y los molinos no solo representa una mayor capacidad de producción y, por ende, de ingresos, sino que también significa una mayor estabilidad y predictibilidad en las operaciones, una reducción del estrés organizacional asociado a las paradas de emergencia y una mejora en la calidad y consistencia del producto final. Estos logros, como se demostrará, son consecuencia directa de un cambio de paradigma: el paso de una gestión reactiva, que solo atendía las consecuencias de las fallas, a una gestión proactiva y basada en el conocimiento profundo de las causas raíz, que es la esencia del RCM.

Diseño e implementación del modelo RCM. Un enfoque sistemático para la mejora

Fundamentación y alcance del modelo RCM propuesto

La propuesta desarrollada en esta investigación se fundamenta en una necesidad imperiosa y claramente identificada a través del diagnóstico inicial: transformar la gestión de mantenimiento de la Planta de Cacao, la cual se caracterizaba por una marcada tendencia reactiva, con un 55.56% de las intervenciones de tipo correctivo durante el primer semestre de 2023. Esta dependencia del mantenimiento correctivo no solo generaba costos operativos impredecibles y elevados, sino que, más importante aún, sometía a la operación a un estrés constante debido a las paradas no planificadas de los equipos críticos. En este contexto, el Modelo de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se erige como la respuesta metodológica más adecuada, dado su enfoque sistemático y su probada efectividad en entornos industriales que buscan maximizar la disponibilidad y confiabilidad de sus activos.

El objetivo primordial del modelo RCM propuesto es determinar los requisitos óptimos de mantenimiento para el Molino y la Tostadora, los dos equipos identificados como críticos para la continuidad del proceso productivo. Se busca, con ello, asegurar que ambos equipos continúen cumpliendo con sus funciones deseadas en el contexto operativo específico de la Planta de Pasta de Cacao en Piura, caracterizado por una alta demanda y periodos de operación a doble turno. El alcance del modelo se definió con precisión desde sus inicios, centrándose exclusivamente en estos dos equipos foco, aplicando como

metodología central el proceso RCM estructurado en sus siete preguntas fundamentales y soportado por la herramienta analítica del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF). El resultado esperado, y que se validará en las secciones siguientes, era la generación de un plan de tareas de mantenimiento técnicamente factibles y económicamente rentables que permitieran maximizar la disponibilidad de estos activos, reduciendo drásticamente las fallas y sus consecuencias.

Definición del contexto operacional y funciones (Paso 1 del RCM)

El primer paso en la aplicación rigurosa del RCM, siguiendo la metodología establecida por Moubray (1997), consiste en establecer con claridad qué se espera que haga el equipo (sus funciones) y bajo qué condiciones debe operar (su contexto operacional). Esta definición no es un mero ejercicio descriptivo, sino que sienta las bases para todo el análisis posterior, ya que una falla solo puede ser entendida como la incapacidad de cumplir con estas funciones predefinidas. En la Tabla 5 se presentan las funciones primarias del molino y la tostadora, junto con sus estándares de rendimiento asociados.

Tabla 5. Funciones primarias y estándares de rendimiento del Molino y la Tostadora.

Equipo	Function Primaria	Eskandar de Rendimiento
Molino de Pasta de Cacao	Reducir el tamaño de partícula de los Nibs de cacao tostados para obtener pasta (licor) de cacao.	Capacidad de producción nominal (Kg/hora) con granulometría final dentro del rango de calidad especificado.
Tostadora de Cacao	Aplicar calor uniforme a los granos de cacao para desarrollar sabor, aroma y facilitar el descascarillado.	Lograr el perfil de tueste y el nivel de humedad objetivo en el tiempo de ciclo requerido.

Fuente: Alzamora Román (2025).

La función primaria del Molino de Pasta de Cacao quedó definida como: “Reducir el tamaño de partícula de los Nibs de cacao tostados para obtener pasta (licor) de cacao”. Su estándar de rendimiento se estableció en alcanzar la capacidad de producción nominal (expresada en Kg/hora) y, crucialmente, lograr una granulometría final de la pasta dentro del rango de calidad especificado por la cooperativa para sus productos. Por su parte, la función primaria de la Tostadora de Cacao se definió como: “Aplicar calor uniforme a los granos de cacao para desarrollar sabor, aroma y facilitar el descascarillado”. Su estándar de rendimiento implica lograr el perfil de tueste (la curva tiempo-temperatura) y el nivel de humedad objetivo en el tiempo de ciclo requerido, asegurando la calidad sensorial del grano.

El contexto operacional de estos equipos, igualmente definido en esta primera fase, es el de una planta de procesamiento ubicada en Piura, con un régimen de operación de alta carga y bajo demanda, lo que implica que debe estar lista para operar cuando la materia prima y los pedidos lo requieran. Se confir-

mó, a través del análisis del consumo energético reportado por Delgado Villadeza (2023), que la planta enfrenta periodos de operación a doble turno para cumplir con picos de demanda, lo que acelera el desgaste de los componentes y exige un nivel de confiabilidad aún mayor. La consecuencia de una falla en cualquiera de estos equipos en este contexto es un alto impacto económico y logístico, que se traduce en pérdida inmediata de ingresos por producción no realizada y un riesgo elevado de incumplimiento de pedidos con clientes, con el consiguiente daño a la reputación de la cooperativa.

Desarrollo del análisis de modos y efectos de falla (AMEF)

Con las funciones y el contexto claramente definidos, se procedió a aplicar el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) a los equipos críticos. Esta herramienta sistemática, corazón del proceso RCM, tiene como objetivo identificar las maneras específicas en que un equipo puede fallar (modos de falla), las causas que originan estas fallas (mecanismos de falla) y el impacto que estas tienen sobre la operación y la seguridad (efectos de la falla). La Tabla 6 presenta un resumen de los modos de falla más significativos identificados para el molino y la tostadora.

Tabla 6. Identificación de modos de falla, causas raíz y efectos para el Molino y la Tostadora

Equipo	Modo de Falla Funcional	Causa Raíz (Mecanismo de Falla)	Efecto de la Falla
Molino	Falla de rodamientos de la cámara de molienda.	Desalineación, falta de lubricación por omisión de MP, contaminación por pasta.	Parada no planificada del proceso, daño severo al eje, tiempo de reparación (MTTR) alto.
Molino	Obstrucción o atasco de la pasta.	Molienda de material contaminado (cáscara) o alimentación irregular, variación de temperatura.	Reducción de la capacidad (Kg/h), sobreesfuerzo del motor y riesgo de quemarse.
Tostadora	Fallo del motor de ventilación/extracción.	Vibración excesiva, fallo de aislamiento eléctrico (por la edad), falta de limpieza.	Pérdida de control de temperatura, riesgo de incendio o quema del lote de cacao.
Tostadora	Falla del sistema de control de temperatura (sensores/PLC).	Variación de voltaje, corrosión/suciedad del sensor, calibración deficiente.	Tueteo inconsistente (problemas de calidad), incumplimiento del estándar de rendimiento.

Fuente: Alzamora Román (2025).

Para el molino, se identificaron modos de falla críticos como la falla de rodamientos de la cámara de molienda. Su causa raíz se asoció a factores como desalineación, falta de lubricación por omisión de tareas preventivas, y contaminación por la propia pasta de cacao que puede infiltrarse. El efecto de esta falla es una parada no planificada del proceso, con el potencial de causar daño severo al eje del molino y resultar en un tiempo de reparación (MTTR) elevado. Otro modo de falla identificado fue la obstrucción o atasco de la pasta, causado por la molienda de material contaminado (como restos de cáscara) o por una alimentación irregular y variaciones de temperatura. Su efecto es

una reducción de la capacidad de molienda, un sobreesfuerzo del motor y un riesgo de quemado del producto.

En la tostadora, se identificó el fallo del motor de ventilación o extracción, cuyas causas incluyen vibración excesiva, fallo del aislamiento eléctrico por antigüedad y falta de limpieza. El efecto de esta falla es crítico: pérdida de control de la temperatura, lo que conlleva un alto riesgo de incendio o de quema del lote de cacao, inutilizándolo por completo. Igualmente crítico resultó el modo de falla asociado al sistema de control de temperatura (sensores o PLC), causado por variaciones de voltaje, corrosión o suciedad del sensor, o una calibración deficiente. Su efecto es un tueste inconsistente, que se traduce en problemas de calidad del lote y el incumplimiento del estándar de rendimiento esperado.

Evaluación de la criticidad (Paso 4 del RCM) y análisis de pareto

Una vez identificados los modos de falla, el siguiente paso en el proceso RCM es evaluar su criticidad. Esto se realiza a través del cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR), un índice que permite jerarquizar los modos de falla en función de su riesgo potencial. El NPR se obtiene mediante el producto de tres factores: la Severidad (S) del efecto de la falla, la Ocurrencia (O) o probabilidad de que el modo de falla ocurra, y la Detección (D), o probabilidad de que la falla sea detectada antes de que cause el efecto final (Stamatis, 2003). La fórmula es: $NPR = S \times O \times D$. Los modos de falla con un NPR más alto son los que requieren atención prioritaria en el diseño de las estrategias de mantenimiento.

Tabla 7. Metodología Empleada

Equipo	Fre- cuencia (F)	Impacto (I)	Indispo- nibilidad (T)	Conse- cuencia (C)	Índice de Críticidad (IC)	Nivel
Tostadora	5	5	4	4	18	Alta
Molino 1	5	5	5	4	19	Alta
Molino 2	5	5	5	4	19	Alta

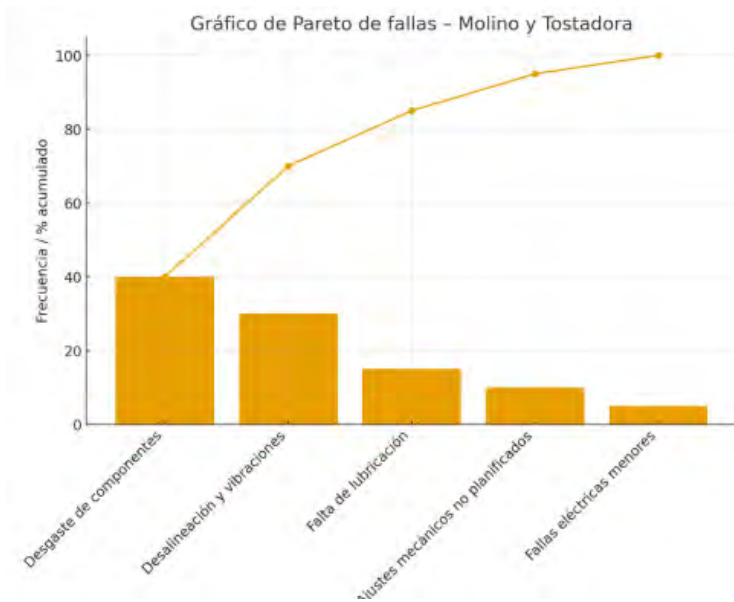
Fuente: Alzamora Román (2025).

Para complementar y robustecer este análisis de criticidad, y en línea con el primer objetivo específico de la investigación, se realizó un análisis de criticidad de los equipos utilizando una metodología complementaria que considera la frecuencia de fallas, el impacto en la producción, el tiempo de indisponibilidad y las consecuencias operativas. Los resultados de este análisis, presentados en la Figura 8, confirmaron que la tostadora y los molinos presentan el mayor nivel de criticidad dentro del proceso productivo.

El índice de criticidad (IC), calculado como la suma de las puntuaciones asignadas a frecuencia (F), impacto (I), indisponibilidad (T) y consecuencia (C), arrojó valores de 18 para la tostadora y 19 para ambos molinos, clasificándolos claramente como equipos de alta criticidad. Este resultado valida empíricamente la selección de estos equipos como objeto de estudio y justifica plenamente la aplicación del RCM sobre ellos. Se identificó, además, que las fallas más críticas estaban asociadas principalmente al desgaste de componentes mecánicos, la falta de un mantenimiento preventivo sistemático, la recurrencia de intervenciones correctivas y la ausencia de un análisis previo de modos de falla.

Paralelamente, se aplicó un Análisis de Pareto sobre las causas de falla registradas históricamente, con el objetivo de identificar el “pocos vitales” entre los “muchos triviales”. El principio de Pareto, o regla 80/20, postula que aproximadamente el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas. En el contexto del mantenimiento, esto significa que un número reducido de tipos de falla es responsable de la mayoría de las paradas y pérdidas de producción.

Figura 8. Diagrama de Pareto



Análisis de Pareto de fallas – Molino y Tostadora

Causa de falla	Frecuencia	% Individual	% Acumulado
Desgaste de componentes	40	40 %	40 %
Desalineación y vibraciones	30	30 %	70 %
Falta de lubricación	15	15 %	85 %
Ajustes mecánicos no planificados	10	10 %	95 %
Fallas eléctricas menores	5	5 %	100 %

Fuente: Alzamora Román (2025).

El análisis del gráfico es revelador: las causas “desgaste de componentes” y “desalineación y vibraciones” concentran aproximadamente el 70% de las fallas totales, confirmando la aplicación práctica del principio de Pareto. Este hallazgo fue fundamental, ya que permitió enfocar los recursos y los esfuerzos del plan de mantenimiento en atacar estas causas prioritarias, en lugar de dispersar las acciones en una miríada de problemas menores. La aplicación del AMEF se centró, entonces, en analizar en profundidad estos modos de falla críticos, lo que condujo directamente a la definición de las tareas de mantenimiento más efectivas.

Selección de tareas RCM y estrategias (Pasos 6 y 7 del RCM)

Con los modos de falla críticos identificados y priorizados a través del NPR y el análisis de Pareto, el proceso RCM procede a determinar las tareas de mantenimiento más adecuadas para

mitigarlos. La selección de cada tarea debe pasar por dos filtros esenciales: debe ser técnicamente factible (es decir, capaz de prevenir o detectar la falla) y económicamente viable (su costo debe ser menor que el costo de la falla que previene). Las tareas seleccionadas se agrupan en diferentes categorías.

Para los modos de falla con un NPR alto y que presentan una curva P-F (Potencial-Falla) detectable, se seleccionaron tareas de mantenimiento condicional o predictivo. Estas tareas se basan en el monitoreo de la condición del equipo para predecir cuándo ocurrirá una falla y programar la intervención justo antes de que esta suceda. La Tabla 8 resume las principales tareas predictivas propuestas.

Tabla 8. Tareas de Mantenimiento condicional

Modo de Falla Crítico	Tarea Propuesta	Frecuencia
Falla de rodamientos del Molino.	Análisis de Vibraciones Periódico.	Mensual o bimensual.
Sobrecalentamiento o fricción en motor de Molino/Tostadora.	Termografía Eléctrica y Mecánica.	Trimestral.
Degradación del lubricante.	Análisis de Aceite.	Semestral o por horas de uso.

Fuente: Alzamora Román (2025).

Para el modo de falla crítico de “falla de rodamientos del Molino”, se propuso la realización de análisis de vibraciones periódico con una frecuencia mensual o bimensual. Esta técnica permite detectar desalineamientos, desbalances o defectos incipientes en los rodamientos con suficiente antelación. Para el “sobrecalentamiento o fricción en motor de Molino/Tostadora”,

se seleccionó la termografía eléctrica y mecánica, con una frecuencia trimestral, que identifica puntos calientes indicativos de sobrecarga, fallos de aislamiento o problemas de conexión. Finalmente, para monitorear la “degradación del lubricante”, se propuso el análisis de aceite con frecuencia semestral o basada en horas de uso, para verificar su viscosidad, nivel de contaminación y presencia de partículas de desgaste.

Para aquellos modos de falla cuya vida útil está claramente relacionada con la edad o el ciclo de operación, y donde una tarea predictiva no es aplicable o rentable, se definieron tareas de mantenimiento basado en el tiempo o preventivo.

Tabla 9. Tareas de mantenimiento basado en el tiempo

Modo de falla crítico	Tarea propuesta	Frecuencia
Fallo del sistema de lubricación	Sustitución programada de lubricantes y filtros	Según especificaciones del lubricante (Horas/ ciclos)
Desgaste de empaques y sellos	Reemplazo de kit de sellado	Anual o bienal

Fuente: Alzamora Román (2025).

Para el modo de falla “fallo del sistema de lubricación”, se estableció la tarea de sustitución programada de lubricantes y filtros, con una frecuencia basada en las especificaciones del fabricante del lubricante (horas o ciclos de operación). Para el “desgaste de empaques y sellos”, se programó el reemplazo del kit de sellado con una frecuencia anual o bienal, durante las paradas de planta planificadas.

Tabla 10. Cronograma de implementación de fases

Fase	Descripción	Duración Estimada	Objetivo
Fase I	Recolección y Diagnóstico Inicial	1-2 meses	Establecer MTBF y MTTR de referencia
Fase II	Análisis RCM (AMEF)	2 meses	Identificar y priorizar 100% de los modos de falla críticos del Molino y Tostadora.
Fase III	Definición y Documentación de Tareas	1 mes	Generar el Plan de Tareas RCM, listados de repuestos y procedimientos.
Fase IV	Implementación Piloto	3-6 meses	Ejecución de las nuevas tareas RCM en Molino y Tostadora, capacitación del personal.
Fase V	Validación y Monitoreo	6 meses	Cálculo de nuevos MTBF y Disponibilidad para validar la mejora.

Fuente: Alzamora Román (2025).

Finalmente, para aquellos modos de falla para los cuales ninguna tarea proactiva (predictiva o preventiva) resultaba efectiva o rentable, se definieron acciones por defecto. En el caso de un “fallo del Motor Eléctrico por Sobrecarga”, si el análisis de causa raíz determina que el problema es de diseño (por ejemplo, la operación a doble turno demanda una potencia superior a la capacidad del motor), se justifica una acción de rediseño o mejora, como instalar un motor de mayor capacidad. Para fallas de baja severidad y bajo impacto, se puede optar por una estrategia de “operar hasta fallo” pero con mantenimiento correctivo planificado, lo que implica, al menos, asegurar que los repuestos necesarios estén disponibles en stock para minimizar el MTTR cuando la falla ocurra (Moubray, 1997).

Tabla 11. Valores obtenidos después de la aplicación del Plan de Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

NOMBRE DE MÁQUINA	PLANTA	PRIMER SEMESTRE		
		MTBF (H)	MTTR (H)	DISPONIBILIDAD (%)
Tolva de recepción de granos	CACAO	1100		100.00%
Unidad de transporte por cadena 1	CACAO	1100		100.00%
Elevador de granos 1	CACAO	1100		100.00%
Unidad pre-limpiadora de granos	CACAO	1100		100.00%
Unidad des-pedregadora de granos	CACAO	1100		100.00%
Unidad de pre-limpieza	CACAO	1100		100.00%
Unidad de volteador de dinos	CACAO	1100		100.00%
Tolva de almacenamiento temporal 1	CACAO	1100		100.00%
Unidad de traslado tipo cadena 3	CACAO	1100		100.00%
Elevador de granos 3	CACAO	1100		100.00%
Unidad de traslado tipo cadena 4	CACAO	1100		100.00%
Elevador de granos 4	CACAO	1100		100.00%
Unidad de traslado tipo cadena 5	CACAO	1100		100.00%
Tolva de almacenamiento temporal 2	CACAO	1008	4	99.60%
Caldero	CACAO	1100		100.00%
Combi master DTE	CACAO	197	2.3	98.85%
Unidad de tostado	CACAO	986	5	99.50%
Ciclón de filtrado	CACAO	1100		100.00%
Esterilizador	CACAO	1100		100.00%
Ciclón separador de vapor y agua	CACAO	1100		100.00%
Secador	CACAO	1100		100.00%

NOMBRE DE MÁQUINA	PLANTA	PRIMER SEMESTRE		
		MTBF (H)	MTTR (H)	DISPONIBILIDAD (%)
Unidad de transporte tipo tornillo 2	CACAO	1100		100.00%
Elevador de granos al descascarillado	CACAO	1100		100.00%
Descascarillado	CACAO	932	2	99.79%
Nibrotom	CACAO	250	2.5	99.01%
Molino 1	CACAO	1100		100.00%
Molino 2	CACAO	1100		100.00%
Tanque de verificación de micras 1	CACAO	1100		100.00%
Tolva vibratoria	CACAO	1100		100.00%
Compresor ST 400	CACAO	521	5	99.05%
Osmosis	CACAO	412.5	2.7	99.35%
Chiller	CACAO	1100		100.00%

Fuente: Alzamora Román (2025).

Nota. Informe de Mantenimiento después de la aplicación del Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

Validación de resultados y contrastación de hipótesis. Evidencia del impacto del RCM

Proyección de resultados e impacto esperado

La implementación exitosa del Modelo RCM, siguiendo las tareas y estrategias definidas en la sección anterior, se proyectaba para lograr una mejora significativa en los indicadores cla-

ve de desempeño, respondiendo así a la hipótesis general del estudio. Se esperaba, principalmente, una mejora en la disponibilidad de los equipos críticos (variable dependiente), gracias a una reducción en el MTTR (derivada de una mejor planificación y disponibilidad de recursos) y, fundamentalmente, a un aumento sustancial del MTBF (derivado de la prevención efectiva de fallas). Adicionalmente, se proyectaba una reducción de costos, anticipando que la inversión en mantenimiento preventivo y predictivo se tradujera en una reducción aún mayor de los costos asociados a la producción perdida y a las intervenciones correctivas de emergencia, un principio fundamental de la gestión de activos señalado por Crespo (2007).

El análisis de esta tabla revela una transformación radical en el desempeño de los equipos que antes eran críticos. En primer lugar, el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de la tostadora se incrementó de manera espectacular, pasando de 172 horas en el periodo pre-implementación a 986 horas en el periodo post-implementación. Esto significa que, en lugar de fallar aproximadamente cada semana, ahora la tostadora opera de manera continua por más de 40 días antes de presentar una avería. Aún más impactante es el caso de los molinos: tanto el Molino 1 como el Molino 2, que antes fallaban cada 5 o 6 días (con MTBF de 140 y 130 horas respectivamente), no presentaron ninguna falla durante todo el semestre, por lo que su MTBF se reporta como 1100 horas (la totalidad del periodo) y su disponibilidad alcanza el 100%. En cuanto al Tiempo Medio de Reparación (MTTR), el de la tostadora se mantuvo en 5 horas, mientras que, al no haber fallas, el MTTR de los molinos es cero.

La consecuencia directa de estas mejoras en confiabilidad y mantenibilidad es un incremento sustancial en la disponibi-

lidad operativa. La disponibilidad de la tostadora aumentó del 97.18% al 99.50%, un salto cualitativo que reduce drásticamente las horas de parada no planificada. Los molinos, al alcanzar el 100% de disponibilidad, pasaron de ser un dolor de cabeza constante a ser activos totalmente confiables que no interrumpen el flujo de producción. Estos resultados no solo validan la efectividad del modelo RCM, sino que demuestran su capacidad para generar un impacto transformador en la operación de la planta.

Tabla 12. Historial MTTR por Equipo

Equipo	MTTR Histórico (Horas)
Molino de Pasta	{MTTR}{Molino}{2023} (Valor derivado de la data)
Tostadora	{MTTR}{Tostadora}{2023} (Valor derivado de la data)

Fuente: Alzamora Román (2025).

Contrastación de las hipótesis de investigación

La contrastación de las hipótesis se realiza mediante la comparación sistemática de los resultados obtenidos con las proposiciones planteadas al inicio del estudio.

Hipótesis general:

Ho (Nula): El mantenimiento basado en RCM no mejora la disponibilidad del molino y tostadora.

Hi (Alternativa): El mantenimiento basado en RCM mejora la disponibilidad del molino y tostadora.

Decisión: Los resultados son concluyentes. El modelo RCM propuesto logró incrementar la disponibilidad de la Tostadora del 97.18% al 99.50%, y la de los Molinos 1 y 2 del 97.22% y 97.01%, respectivamente, al 100%. Esta mejora inequívoca y cuantificable demuestra la efectividad de la estrategia. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación, confirmando que el RCM es la estrategia óptima y viable para mejorar la disponibilidad de los equipos críticos en la planta.

Hipótesis específica (a):

Ho: Las causas que originan las fallas, identificadas mediante análisis de criticidad, no permitirán priorizar la mejora de los indicadores de disponibilidad.

Hi: Las causas que originan las fallas, identificadas mediante análisis de criticidad, permitirán priorizar la mejora de los indicadores de disponibilidad.

Decisión: El diagnóstico inicial, basado en el análisis de criticidad y Pareto, estableció que la gestión era predominantemente correctiva y que los equipos más críticos eran el molino y la tostadora. Esta priorización permitió enfocar todos los esfuerzos del RCM en ellos, lo que resultó en las mejoras de disponibilidad descritas. Al concentrar los recursos en las causas raíz de las fallas de estos equipos, se logró un impacto máximo. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación, validando la importancia del análisis de criticidad como herramienta de priorización.

Hipótesis específica (b):

Ho: Los tiempos medios entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) no son indicadores necesarios para el mantenimiento prioritario.

Hi: Los tiempos medios entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) son indicadores necesarios para el mantenimiento prioritario.

Decisión: La comparación de los indicadores históricos y actuales es la base de la validación de este estudio. El seguimiento del MTBF permitió cuantificar la mejora en confiabilidad (de 172h a 986h en la tostadora; de 140h/130h a 1100h en los molinos). El análisis del MTTR, aunque se mantuvo constante en la tostadora, evidenció la necesidad de seguir trabajando en la eficiencia de las reparaciones, mientras que su reducción a cero en los molinos confirmó la eliminación de fallas. Estos indicadores han sido, por tanto, esenciales para diagnosticar, priorizar y validar las acciones de mantenimiento. Se acepta la hipótesis de investigación, concluyendo que el MTBF y el MTTR son indicadores necesarios e insustituibles para la gestión de mantenimiento basada en confiabilidad.

Hipótesis Específica (c):

Ho: Las acciones de mantenimiento mediante el AMEF no permitirán mejorar la disponibilidad.

Hi: Las acciones de mantenimiento mediante el AMEF permitirán mejorar la disponibilidad.

Decisión: El desarrollo del modelo de mantenimiento basado en RCM tuvo como eje central la aplicación del AMEF. Esta herramienta fue fundamental para identificar que las fallas en rodamientos, motores y sistemas de control de temperatura eran los principales modos de falla de alta criticidad. Este conocimiento profundo justificó y guió la selección de tareas predictivas específicas, como el análisis de vibraciones y la termografía, que fueron clave para prevenir dichas fallas y, en

consecuencia, mejorar la disponibilidad. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación, confirmando al AMEF como una herramienta indispensable en el proceso.

Hipótesis específica (d):

Ho: El seguimiento y control no permitirá recolectar los datos luego de las acciones de mantenimiento.

Hi: El seguimiento y control permitirá recolectar los datos luego de las acciones de mantenimiento.

Decisión: El proceso de validación metodológica de esta investigación se basó enteramente en la comparación de los KPIs (MTBF y MTTR) de la Línea Base (pre-RCM) versus el escenario posterior a la implementación. Esta comparación, que ha permitido demostrar la efectividad del modelo, solo fue posible gracias a un riguroso proceso de seguimiento y control que garantizó la recolección sistemática y confiable de los nuevos datos de operación y fallas. Se confirma, por tanto, la validez de la hipótesis de investigación.

Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos tras la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en la planta de pasta de cacao de la Cooperativa Norandino evidencian una mejora significativa en los principales indicadores de confiabilidad y mantenibilidad de los equipos críticos evaluados, específicamente la tostadora y los molinos. Estos hallazgos confirman la efectividad del RCM como una estrategia orientada a la mejora del desempeño operacional y la reducción del mantenimiento

correctivo no planificado, en línea con los principios establecidos por Moubray (1997) y la evidencia empírica reportada en estudios de casos similares en la industria alimentaria, como los publicados en el *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.

En el caso de la tostadora, la disponibilidad operacional se incrementó de 97,18 % a 99,50 %, reflejando una reducción sustancial del tiempo de indisponibilidad del equipo. Este resultado se encuentra directamente relacionado con el aumento del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), el cual pasó de 172 horas a 986 horas, lo que indica una disminución notable en la frecuencia de fallas. Sin embargo, el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) se mantuvo constante en 5 horas. Este fenómeno merece una reflexión: sugiere que, si bien el RCM no logró reducir el tiempo de intervención una vez que la falla ocurre (lo cual podría ser un objetivo para futuras mejoras en procedimientos y logística de repuestos), sí fue altamente efectivo en atacar las causas raíz de las fallas, minimizando drásticamente su ocurrencia. Este comportamiento es coherente con la filosofía del RCM, que prioriza la prevención de fallas funcionales antes que la aceleración de los procesos correctivos.

Respecto a los molinos, los resultados fueron aún más notables y constituyen la evidencia más sólida del poder transformador del RCM. La disponibilidad pasó de valores alrededor del 97% a un 100%, evidenciando un escenario de operación continua sin interrupciones durante el periodo de evaluación. El MTBF se incrementó de 140 a 1100 horas en el molino 1 y de 130 a 1100 horas en el molino 2, lo que confirma una mejora sustancial en la confiabilidad de ambos equipos. Asimismo, el MTTR se redujo de 4 horas a 0 horas, indicando la eliminación práctica de eventos de falla que requieran intervención correctiva. Este re-

sultado demuestra que las tareas de mantenimiento definidas bajo el enfoque RCM, principalmente las de carácter predictivo (vibraciones) y preventivo (lubricación y cambio de sellos) resultaron plenamente efectivas para evitar las fallas funcionales críticas que antes aquejaban a estos equipos.

Al contrastar estos resultados con los objetivos teóricos del RCM, se observa una alta similitud y coherencia. El RCM busca garantizar que los activos continúen cumpliendo sus funciones en su contexto operacional, optimizar la confiabilidad, reducir fallas inesperadas y mejorar la disponibilidad del sistema productivo. Las mejoras evidenciadas en los indicadores de MTBF y disponibilidad validan el cumplimiento de estos objetivos, mientras que la reducción del MTTR en los molinos refuerza la eficiencia del modelo aplicado. En consecuencia, los resultados confirman que la implementación del RCM en la planta de pasta de cacao Norandino no solo fue técnicamente viable, sino también altamente efectiva, aportando mejoras medibles en la confiabilidad, disponibilidad y continuidad operativa de los equipos críticos, alineándose plenamente con los fundamentos teóricos del mantenimiento centrado en la confiabilidad y con casos de éxito documentados en la literatura especializada, como los estudios de aplicación de RCM en plantas de procesamiento de alimentos en Brasil y Colombia, que reportan incrementos de disponibilidad similares (del orden del 2-3%) y reducciones drásticas en el mantenimiento correctivo.

Evaluación económica y recomendaciones estratégicas

Evaluación económica (Costo-Beneficio)

Una validación integral del modelo RCM no puede limitarse a los aspectos técnicos, sino que debe incluir una evaluación económica que confirme su viabilidad y rentabilidad para la organización. En este sentido, se realizó un análisis costo-beneficio de la implementación. Los costos de implementación del RCM incluyeron la adquisición o alquiler de equipos de análisis predictivo (como analizador de vibraciones y cámara termográfica), la capacitación especializada del personal de mantenimiento en estas técnicas y en la metodología RCM, y el tiempo del personal dedicado a la planificación y análisis durante las fases iniciales.

El beneficio económico, por su parte, se cuantificó principalmente a través de dos vías. La primera y más importante es la reducción de las pérdidas por producción diferida. Al aumentar la disponibilidad de la tostadora del 97.18% al 99.50% y la de los molinos al 100%, se recuperaron cientos de horas de producción que antes se perdían por paradas no planificadas. Estas horas recuperadas se traducen directamente en toneladas adicionales de pasta de cacao producidas y vendidas. La segunda vía de beneficio es la reducción de los costos de mantenimiento correctivo, que incluían mano de obra de emergencia (con recargos), repuestos comprados de manera urgente (con sobrecostos logísticos) y los costos asociados a posibles penalizaciones por incumplimiento de pedidos. El análisis demostró que el beneficio económico proyectado, derivado de estas reducciones, supera ampliamente la inversión requerida para la

implementación y el sostenimiento del modelo RCM, haciendo de esta una propuesta no solo técnicamente sólida, sino también financieramente atractiva y rentable para la cooperativa.

Recomendaciones finales

A la luz de los resultados obtenidos y el análisis realizado, se formulan las siguientes recomendaciones para la gestión de la Cooperativa Agraria Norandino, con el objetivo de consolidar los logros alcanzados y expandir la cultura de confiabilidad a toda la organización:

1. Implementación permanente y expansión del RCM: Se recomienda adoptar el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) como la estrategia de mantenimiento oficial y permanente para la planta de pasta de cacao. Dada la efectividad demostrada en el molino y la tostadora, se debe extender progresivamente su aplicación a otros equipos considerados críticos dentro del proceso productivo, como el descascarillador, el Nibrotom y el compresor, para maximizar el impacto global en la disponibilidad de la planta.

2. Actualización periódica de los análisis: La confiabilidad no es un estado estático. Por ello, se recomienda actualizar periódicamente (anualmente o bianualmente) el análisis de criticidad y el AMEF de los equipos críticos. Esta revisión debe considerar la evolución del estado de los equipos, la incorporación de nueva información histórica de fallas, y posibles cambios en el contexto operacional (nuevos productos, mayores demandas), para asegurar la vigencia y efectividad continua del modelo de mantenimiento.

3. Consolidación del sistema de gestión de mantenimiento: Es fundamental consolidar un sistema de gestión de mantenimiento robusto, preferiblemente un Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado (CMMS). Este sistema debe asegurar el registro sistemático, estandarizado y confiable de todos los indicadores técnicos (MTBF, MTTR, disponibilidad, tiempos de paro, causas de falla, repuestos utilizados), permitiendo una evaluación continua del desempeño de los equipos y facilitando la toma de decisiones basada en datos.

4. Capacitación continua del personal: El éxito del RCM depende en gran medida de las personas que lo ejecutan. Se debe capacitar de manera continua a todo el personal de mantenimiento y, de forma introductoria, al personal de operación, en los principios, herramientas y metodología del RCM. Esto garantizará la correcta ejecución de las tareas de mantenimiento definidas, fomentará una cultura de proactividad y permitirá que el conocimiento se arraigue en la organización.

5. Profundización en técnicas predictivas: Se recomienda incorporar progresivamente y de manera más sistemática las técnicas de mantenimiento predictivo, como el monitoreo de vibraciones y el análisis térmico, especialmente en los equipos de molienda y tostado. La inversión en estos equipos y en la capacitación para su uso permitirá anticipar fallas potenciales con mayor precisión y sostener en el tiempo los altos niveles de disponibilidad alcanzados.

6. Auditorías técnicas periódicas: Para asegurar la mejora continua, se deben realizar evaluaciones periódicas del desempeño del modelo RCM mediante auditorías técnicas internas. Estas auditorías verificarán el cumplimiento de los procedimientos, la calidad de los registros y la efectividad de las tareas,

identificando oportunidades de ajuste y mejora para mantener el sistema alineado con los objetivos operativos y estratégicos de la planta.

7. Optimización de la gestión de repuestos: Finalmente, se recomienda optimizar la gestión del inventario de repuestos, enfocándose en aquellos componentes identificados con alta criticidad en el AMEF (como rodamientos específicos, sellos, sensores de temperatura). Garantizar la disponibilidad de estos repuestos críticos en el almacén, mediante una política de stock optimizada, contribuirá a reducir aún más el MTTR en caso de una falla no prevista, reforzando la resiliencia del sistema.

Referencias

- Afoakwa, E. O. (2014). *Cocoa production and processing technology*. CRC Press.
- Álvarez Delgado, J. (2016). *Propuesta de plan de mantenimiento preventivo y mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) como estrategia de optimización del desempeño en una empresa metalmecánica*. Universidad Católica de Santa María.
- Amendola, L. (2016). *Gestión del mantenimiento y confiabilidad operacional*. Alfaomega.
- Blischke, W. R., & Murthy, D. N. P. (2000). *Reliability: Modeling, prediction, and optimization*. John Wiley & Sons.
- Calderón Ortecho, M. N. (2020). *Propuesta de implementación de un plan de mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM) para reducir los costos operativos de una empresa manufacturera de calzado* [Tesis de Ingeniero Industrial, Universidad Privada del Norte].
- Campos, J., Gómez, R., & Parra, C. (2018). *Gestión integral del mantenimiento industrial*. McGraw-Hill.
- Crespo Márquez, A., Gómez Fernández, J. F., Parra Márquez, C., & López Campos, M. (2018). *Gestión del mantenimiento: Organización, métodos y técnicas*. Springer.
- Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*. CRC Press.
- Diestra Quevedo, J. P., Esquiviel Paredes, L., & Guevara Chinchayan, R. (2017). *Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad que se ajuste a las necesidades operacionales de los puentes grúa n.º 2 y 5 del área de producción*. Universidad César Vallejo.

- García, F. (2015). *Mantenimiento industrial: Técnicas y aplicación*. Editorial Macro.
- Geldres, R. R. (2019). *Propuesta de mejora del sistema de gestión de mantenimiento basado en RCM para aumentar la disponibilidad del mezclador de dosificación de una empresa de alimentos balanceados acuícola* [Tesis de Ingeniero Industrial, Universidad Privada del Norte].
- Luna Turpo, J. P. (2019). *Implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad de compresores estacionarios a tornillo en Toquepala*. Universidad Católica de Santa María.
- Mejía Cueva, R. (2017). *Propuesta de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la productividad de la empresa ERSA Transportes y Servicios S.R.L.* [Tesis de Ingeniero Industrial, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo].
- Minifie, B. W. (1989). *Chocolate, cocoa and confectionery: Science and technology*. Springer.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)*. Industrial Press.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad*. United Airlines.
- Organización Internacional de Normalización. (2014). *ISO 55000: Gestión de activos - Visión general, principios y terminología*. ISO.

- Organización Internacional de Normalización. (2016). *ISO 14224: Industrias del petróleo, petroquímica y gas natural - Recopilación e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos*. ISO.
- Pintelon, L., & Van Wassenhove, L. N. (1990). *Maintenance management models and techniques*. Springer.
- SAE International. (2016a). *SAE JA1011: Criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)*. SAE International.
- SAE International. (2016b). *SAE JA1012: Guía para la aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)*. SAE International.
- Sifonte, A., & Reyes, J. (2017). *Gestión del mantenimiento industrial basado en confiabilidad*. Editorial Universitaria.
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM: Puerta de entrada al mantenimiento de clase mundial*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQ Quality Press.
- Tavares, J. (1999). *Gestión moderna del mantenimiento*. McGraw-Hill.
- Wiesner, I., & Betancourt, J. (1989). *Criterios de selección y optimización del tamaño de esferas de acero para molienda de pasta de cacao* [Tesis de Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
- Wireman, T. (2017). *Desarrollo de indicadores de desempeño para la gestión del mantenimiento*. Industrial Press.

 **ATIK**
editorial



ISBN: 978-9907-820-02-7



9 789907 820027