

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes teóricos

Los antecedentes teóricos abordan los conceptos fundamentales del mantenimiento industrial, entendido como el conjunto de actividades destinadas a asegurar el funcionamiento eficiente y seguro de equipos y maquinaria. Este enfoque, según (Tomás, 2023), incluye tareas de revisión, reparación y monitoreo, indispensables para garantizar la productividad, la confiabilidad y la seguridad operativa. Dentro de sus principales estrategias destaca el mantenimiento preventivo, orientado a realizar intervenciones programadas para evitar fallas inesperadas. Como señala (Veloz Vargas, 2022), esta metodología reduce tiempos de inactividad, mejora la seguridad del personal y contribuye a la calidad del producto mediante acciones periódicas como lubricación, ajustes y reemplazo de piezas.

Por otra parte, el mantenimiento correctivo surge ante fallas imprevistas y, aunque puede parecer menos costoso inicialmente, genera efectos adversos en la productividad debido a paradas no planificadas y mayores costos operativos, tal como indican (Veloz Vargas, 2022) y (May Riaño, 2025). Complementariamente, el mantenimiento Lean, basado en los principios de Lean Manufacturing, busca eliminar desperdicios y promover la mejora continua. Este enfoque destacado por (May Riaño, 2025) involucra a todos los niveles de la organización en la optimización del sistema productivo, fortaleciendo la cultura de eficiencia y sostenibilidad operativa.

1.1.2. Antecedentes de campo

Un estudio relevante en el ámbito del mantenimiento industrial es el de (Ramos Loza, 2016), desarrollado en EMBOL S.A., donde la implementación de un sistema modelo de mantenimiento demostró la efectividad del enfoque preventivo para optimizar la operación de equipos críticos y reducir paradas no planificadas. La propuesta incluyó

un plan integral de mantenimiento preventivo y correctivo orientado a mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, optimizando la gestión de recursos y disminuyendo costos operativos. Entre los logros más destacados se encuentra el incremento del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), que pasó de 110,50 a 238,41 horas, evidenciando una mayor fiabilidad de los equipos. Asimismo, el proyecto logró reducir los costos de mantenimiento en un 55,90% en un periodo de 14 semanas, superando las metas iniciales. El plan incorporó además un sistema de monitoreo continuo, auditorías regulares, capacitación al personal y un registro detallado de intervenciones, lo que fortaleció la sostenibilidad de las mejoras a largo plazo y mejoró la toma de decisiones operativas.

1.1.3. Antecedentes empresariales

La empresa Áridos Cuéllar fue fundada en 2017 por el señor Claudio Cuéllar, actual gerente y propietario de la planta. Su origen surge de la necesidad de continuar con el suministro de áridos, luego de que la empresa a la que anteriormente proveía materiales para la construcción de caminos en Bermejo cesará sus operaciones. Ante esta situación, el señor Cuéllar tomó medidas inmediatas y decidió establecer su propia planta de áridos, iniciando con la producción de arena, grava, gravilla y piedra.

Con el tiempo, optimizó el proceso productivo y logró la incorporación de un quinto producto, limo o tierra vegetal, obtenido a partir del desperdicio generado en la producción de los materiales anteriores. La materia prima utilizada en la planta proviene de los ríos de los municipios cercanos, alguno de ellos La Ventolera, El Valle, etc; donde el señor Cuéllar debe gestionar y pagar los permisos correspondientes a las autoridades locales cada vez que necesita acceder para la extracción.

En cuanto a la distribución de los productos, la mayor parte se destina a pequeñas empresas del centro de la ciudad de Tarija y, más recientemente, a la constructora Alta Vida. Sin embargo, entre los meses de enero y abril, la producción disminuye considerablemente debido a la temporada de lluvias, que impide el ingreso a los ríos

para obtener materia prima. Durante los meses de mayo y junio, cuando la producción alcanza su punto más alto, se abastece también a la empresa de Soboce Ready Mix.

Además de los productos principales, la empresa comercializa los desechos de producción y suministros de aceites utilizados en la planta a otras empresas del sector.

1.2. Descripción del problema u oportunidad

La planta de áridos ubicada en la comunidad de Santa Ana la Vieja, en la ciudad de Tarija, se dedica a la extracción y procesamiento de materiales provenientes del río, como arena, grava, gravilla, piedra y tierra vegetal. Aunque cuenta con una estructura operativa establecida, actualmente enfrenta serias dificultades relacionadas con la gestión del mantenimiento de los equipos críticos, como el molino de impacto, la criba, entre otros equipos, que son esenciales para mantener la continuidad y eficiencia del proceso productivo.

El molino, que debe ser revisado semanalmente para verificar el desgaste de sus chapaletas y otras piezas, presenta un desgaste constante, lo que requiere un control adecuado de los repuestos para evitar paradas prolongadas debido a la falta de planificación para la adquisición de piezas clave, especialmente con tiempos de espera de hasta un mes para ordenar repuestos desde Santa Cruz. Por lo tanto, si las piezas necesarias no están disponibles a tiempo, la planta podría detenerse durante largos períodos.

La cinta transportadora desempeña un papel fundamental dentro del proceso productivo, ya que permite la movilización y alimentación continua del material hacia las distintas etapas de la línea de producción, garantizando la fluidez del flujo operativo. No obstante, debido a su funcionamiento constante y a la exposición directa a las condiciones ambientales, este equipo presenta una vulnerabilidad considerable frente al desgaste y a las fallas mecánicas.

La principal causa de inactividad identificada corresponde al corte de las cintas, ocasionado generalmente por exceso de carga o por la presencia de cuerpos extraños, lo que provoca interrupciones frecuentes en la operación. De manera complementaria, se detectan fallas en la correa de distribución, las cuales se presentan aproximadamente una vez al año. El origen de estas averías se asocia al desgaste prematuro de las bandas, producto de la sobrecarga, la desalineación y la ruptura de las correas.

En cuanto a la criba, especialmente la de mayor tamaño, que es la encargada de procesar todos los productos de la planta, se enfrenta a algunos problemas. Esta criba tiene una correa de distribución que ayuda al equipo a mantenerse en movimiento, derivado al movimiento que genera el equipo, la correa presenta fallas en la tensión y delineación. También es importante destacar que las mallas de la criba deben ser reemplazadas cada tres meses durante los periodos de alta producción, y cada seis o siete meses cuando la producción es baja. Este proceso puede durar hasta dos días, lo que impacta directamente en la capacidad de la planta para cumplir con los plazos de producción.

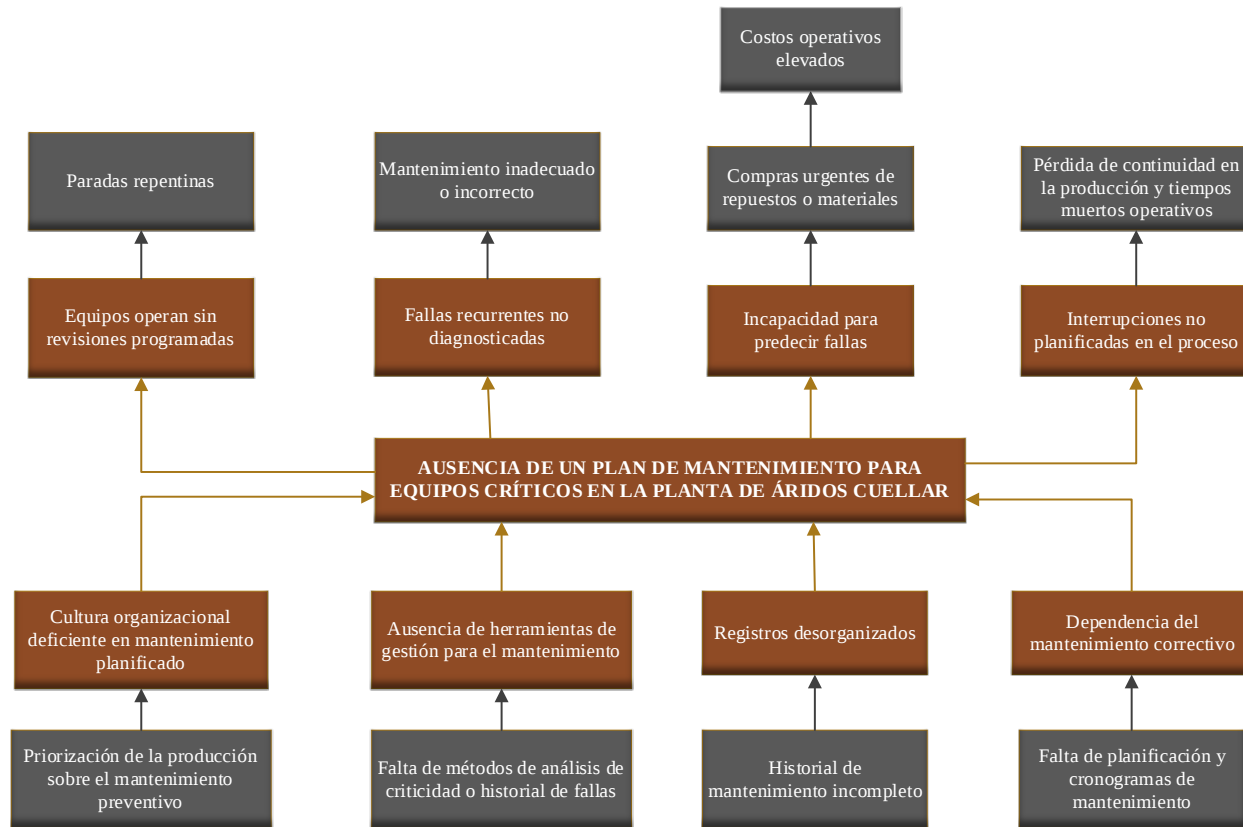
Al contar con la información de algunos equipos críticos, el funcionamiento adecuado es fundamental para evitar interrupciones inesperadas que afectan directamente la productividad y elevan los costos operativos. No obstante, la planta no cuenta con un plan de mantenimiento que permita monitorear el estado de los equipos, prevenir fallas y programar intervenciones de forma ordenada. La principal causa de esta situación es la falta de una cultura organizacional enfocada en el mantenimiento planificado, así como la ausencia de herramientas de gestión que permitan organizar, registrar y controlar las tareas de mantenimiento. Esto incluye la falta de herramientas digitales, métodos de análisis, procedimientos estandarizados e indicadores que facilitan la toma de decisiones. Por lo tanto, aunque los operarios tienen conocimientos prácticos para realizar tareas básicas, como ajustes, lubricación o cambio de piezas, dichas intervenciones no se realizan de forma oportuna ni se priorizan según la importancia de cada equipo.

Como resultado, muchos equipos continúan operando en condiciones poco óptimas, lo que provoca más fallas, mayor tiempo de inactividad, una reducción en la vida útil de los activos y un aumento en los costos de operación. Además, la ausencia de un plan impide organizar adecuadamente los mantenimientos preventivos y correctivos, lo que genera desorden y decisiones improvisadas. La planta actúa solamente cuando ocurre una falla, en lugar de prevenirla.

Esta situación genera incertidumbre en la operación diaria, dificulta la planificación de la producción y complica la toma de decisiones, ya que no se cuenta con registros ni información clara sobre el estado real de los equipos. Todo esto aumenta el riesgo de paradas inesperadas, afectando la eficiencia operativa y ocasionando pérdidas económicas importantes.

1.2.1. Árbol de Problemas

El siguiente árbol de problemas presentado a continuación constituye una herramienta fundamental para identificar, analizar y estructurar de manera lógica las causas y efectos derivados de la ausencia de un plan de mantenimiento formal en la planta de áridos Cuéllar. Su elaboración permite visualizar con claridad la interrelación entre los distintos factores técnicos, organizacionales y operativos que inciden negativamente en la eficiencia del sistema productivo.

Figura 1.1*Árbol de problemas***Fuente:** Elaboración propia (2025)

1.2.2. Formulación de pregunta

Debido a las problemáticas identificadas en la empresa, resulta fundamental abordar esta situación en detalle, por lo que se plantea la siguiente pregunta:

¿Cómo puede la planta de Áridos Cuellar optimizar la confiabilidad de los equipos clave, reducir los tiempos de inactividad y los costos operativos?

1.2.3. Árbol de Soluciones

El siguiente árbol de soluciones, muestra las acciones correctivas y preventivas para resolver los problemas identificados en el árbol de problemas. Este árbol ayuda a estructurar un plan de mantenimiento para reducir los tiempos de parada y optimización de costos operativos en la planta de áridos Cuéllar.

Figura 1.2*Árbol de soluciones***Fuente:** Elaboración propia (2025)

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento con enfoque preventivo, correctivo y Lean para los equipos críticos de la planta de Áridos Cuellar, con el fin de reducir los tiempos de inactividad, optimizar el rendimiento y minimizar los costos operativos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar la situación actual del mantenimiento y los equipos críticos para el proceso en la planta, con el fin de identificar las principales fallas, causas y niveles de criticidad.
- Diseñar un sistema de gestión de repuestos y materiales para el mantenimiento de equipos críticos, a partir de la evaluación de fallas recurrentes y tiempos de parada por falta de insumos.
- Determinar los indicadores clave de desempeño y rendimiento, con el propósito de analizar la efectividad del plan de mantenimiento.
- Realizar un análisis económico de la propuesta.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación Académica

Desde el punto de vista académico, este proyecto de grado tiene como objetivo aplicar los conocimientos y habilidades adquiridos en la carrera de Ingeniería Industrial al diseño y propuesta de un plan de mantenimiento. A través de la estructuración de un plan que integre estrategias de mantenimiento preventivo, correctivo y principios de mantenimiento Lean, se busca optimizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos. La elaboración de este plan permitirá fortalecer las competencias en análisis

de fallas, planificación de actividades y toma de decisiones estratégicas en mantenimiento, consolidando así la formación académica y técnica.

1.4.2. Justificación Técnica

En el ámbito técnico, este proyecto responde a la necesidad de resolver problemas críticos en la planta de áridos, donde la ausencia de un plan de mantenimiento estructurado ha generado elevados tiempos de inactividad, paradas imprevistas y altos costos operativos. La propuesta de un plan de mantenimiento adecuado permitirá mejorar la fiabilidad y disponibilidad de los equipos más críticos. A través de la aplicación de herramientas avanzadas como el mantenimiento Lean, instructivos para el mantenimiento de los equipos más críticos, entre otras, se optimizarán la eficiencia global de equipos, el tiempo medio entre fallas y tiempo medio para reparar, lo que tendrá un impacto directo en la eficiencia operativa y en la competitividad de la planta.

1.4.3. Justificación Legal

Desde el punto de vista legal, la propuesta de este proyecto se alinea con las normativas y regulaciones vigentes relacionadas con el medio ambiente y la optimización de procesos industriales. El cumplimiento de las leyes locales y las normativas industriales es esencial para garantizar la viabilidad legal de las acciones propuestas. Además, la creación de un plan de mantenimiento contribuye a la responsabilidad social empresarial al minimizar los riesgos de sanciones y asegurarse de que las actividades operativas no infringen las disposiciones legales relacionadas con la seguridad y el medio ambiente.

1.4.4. Justificación Económica

Desde una perspectiva económica, el proyecto plan de mantenimiento aportará beneficios tangibles a la planta de áridos, contribuyendo a la reducción de costos operativos y a la optimización de recursos. La propuesta del diseño de un plan de mantenimiento preventivo, correctivo y Lean eficiente permitirá reducir los tiempos de

inactividad, lo que a su vez incrementará la productividad y mejorará la competitividad de la planta. La disminución de paradas imprevistas y los tiempos muertos por paradas reducirán significativamente los costos asociados, reparaciones de emergencia y adquisición de repuestos urgentes.

1.4.5. Justificación Personal

A nivel personal, este proyecto proporciona una oportunidad significativa para el desarrollo profesional y personal. La resolución de problemas reales en un entorno industrial permitirá aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería Industrial a situaciones prácticas, mejorando habilidades analíticas, de planificación y de toma de decisiones. Además, este proyecto permitirá adquirir la experiencia en la gestión de proyectos, el trabajo en equipo y la comunicación efectiva, habilidades clave para la futura carrera profesional. La propuesta de este proyecto también fortalecerá la confianza en la capacidad para abordar desafíos complejos, mientras que el trabajo autónomo y la toma de decisiones en un contexto industrial contribuirán al crecimiento personal y al desarrollo del perfil profesional.

1.5. Metodología

1.5.1. Enfoque y tipo de investigación

El enfoque de investigación seleccionado para este proyecto es mixto, el cual según (Ortega, 2025) es un enfoque que combina elementos de la investigación cualitativa y la cuantitativa en un solo estudio. Desde el enfoque cuantitativo, se recopilan y analizan datos operativos como frecuencia de fallas, tiempos de parada y costos asociados, lo que permite medir objetivamente el desempeño de los equipos. No obstante, debido a la ausencia de registros formales en la planta, se incorporan técnicas cualitativas como entrevistas y observación directa, las cuales permiten reconstruir la información operativa y validar los datos mediante el conocimiento del personal clave.

El estudio se fundamenta en los principios del mantenimiento preventivo, correctivo y Lean, empleando la información levantada para generar indicadores clave de rendimiento que sustenten el plan de mejora. En su naturaleza, el proyecto corresponde a una investigación aplicada, ya que busca emplear conocimientos técnicos para resolver un problema real dentro de la planta de Áridos Cuéllar, donde la falta de un plan de mantenimiento ha provocado altos tiempos de inactividad y costos operativos elevados.

1.5.2. Métodos y técnicas de investigación

El proyecto se desarrollará utilizando diversas técnicas y métodos que proporcionarán datos tanto cualitativos como cuantitativos sobre los procesos de mantenimiento para equipos críticos de la línea de producción en la planta de Áridos Cuéllar como encuestas y entrevistas, estudio de caso, análisis de procesos, observación directa y medición de tiempos.

1.5.3. Población o sujeto de estudio

El sujeto de estudio de este proyecto es la planta de Áridos Cuéllar, ubicada en Santa Ana la Vieja (Tarija), dedicada al procesamiento de materiales provenientes del río, como arena, grava, gravilla, piedra y tierra vegetal. La investigación se centra en los equipos críticos molino de impacto, cribas vibratorias y cintas transportadoras que presentan fallas recurrentes debido a la ausencia de un plan de mantenimiento estructurado. El análisis se dirige especialmente a los equipos con mayor frecuencia de averías, dado que su inactividad afecta directamente la productividad de la planta. Además, el estudio incorpora al personal operativo y al jefe de producción, quienes poseen conocimiento directo de las intervenciones de mantenimiento y de los problemas habituales. Las entrevistas y observaciones realizadas con este equipo permitirán identificar las deficiencias actuales y fundamentar la propuesta de un plan de mantenimiento más eficiente.

1.5.4. Tipo de muestreo

Para este proyecto, el tipo de muestreo será no probabilístico por conveniencia, dado que la selección se realizó mediante un riguroso Análisis de Pareto, que identifica a la criba vibratoria de tres niveles, el molino de impacto y las cintas transportadoras como los "pocos vitales" que concentran la mayor parte de los problemas. Para validar este análisis de criticidad preliminar, se debe explicitar que la recolección de datos (frecuencia de averías y tiempos de parada) se realizó abarcando el horizonte temporal comprendido entre septiembre de 2024 y julio de 2025.

1.5.5. Recolección de información

La recolección de información es importante en este proyecto, ya que proporciona los datos necesarios para diagnosticar los problemas existentes y diseñar un plan de mantenimiento adecuado para la planta de Áridos Cuéllar. La información será un proceso integral que combinará métodos cualitativos y cuantitativos y se obtendrá a través de una combinación de técnicas que incluyen:

Observación directa: Este método permitirá obtener información de primera mano sobre el funcionamiento de los equipos, la frecuencia de las averías, los métodos actuales de intervención, y las prácticas operativas del personal. A través de visitas regulares a la planta, se realizará un registro estructurado de los eventos críticos, tiempos muertos no planificados, y condiciones de operación, identificando patrones de comportamiento que no siempre están reflejados en los registros formales.

Entrevistas estructuradas para trazabilidad y validación: Se aplicarán entrevistas al gerente general, jefe de Producción y operadores, para triangular la información. Este proceso cualitativo permitió asignar los tiempos de parada, frecuencia de averías o fallas y definir la causa raíz (Taxonomía) a los eventos históricos que carecían de registros formales, garantizando así la trazabilidad de los datos (quién y cuándo ocurrió el evento).

Análisis de registros históricos: Se revisarán los registros disponibles en formatos físicos y digitales, los cuales resultaron escasos y subespecificados. Por ello, se implementó un proceso de reconstrucción de la data operativa entre septiembre 2024 y julio 2025, concentrándose en la Ficha de registro de intervención de equipos (Anexo 1).

Uso de observación directa y cronometraje focalizado: La observación directa y el uso de cronómetros no se aplicaron a la data histórica, sino que se utilizaron durante la fase de diagnóstico (observación en campo) para validar y estandarizar el Tiempo Medio para Reparar (MTTR) en eventos recurrentes observados, asegurando la objetividad en los cálculos.

1.5.6. Protocolo de estandarización y calidad de datos operacionales

El diagnóstico cuantitativo de este proyecto, que sustenta los cálculos de OEE, MTBF, MTTR y el Análisis de Pareto, se enfrentó a un desafío inherente a la Planta de Áridos Cuéllar: la escasez de registros formales y la subespecificación de los datos operativos históricos. Por lo tanto, fue necesario implementar un protocolo de estandarización y calidad de datos operacionales riguroso para reconstruir, validar y codificar la información, asegurando su trazabilidad y confiabilidad.

Este protocolo opera dentro del diseño de investigación mixto, utilizando el componente cualitativo (entrevistas) como mecanismo de validación y reconstrucción de la data cuantitativa.

a) Reconstrucción de la data histórica y trazabilidad

Dada la inconsistencia de la documentación original, la Ficha de Registro de Intervención de Equipos (Anexo 1) no es un registro histórico de la planta, sino el formato estandarizado y reprocesado que consolida la información obtenida para el diagnóstico.

Validación de Trazabilidad (Quién, Cuándo, Dónde): La trazabilidad requerida por el SGM no se pudo extraer directamente de los registros originales incompletos. Se implementó la triangulación de fuentes mediante entrevistas con el gerente general, el jefe de producción y los operadores. Ellos fueron consultados para asignar la fecha precisa (Cuándo), el equipo (Dónde), y el personal involucrado (Quién) a los registros escasos, asegurando así que los campos obligatorios del Anexo 1 fueran fidedignos.

Estandarización de Tiempos: La información sobre tiempo promedio de parada por avería (MTTR) en el Anexo 1 se estandarizó mediante el cronometraje focalizado en actividades de mantenimiento recurrente durante la observación directa. Esto permitió asignar un tiempo promedio objetivo a las fallas críticas, supliendo la falta de un registro histórico preciso de los tiempos de intervención.

b) Codificación de fallas (Taxonomía Ad Hoc)

La observación crítica señaló la ausencia de una codificación de fallas (taxonomía). Los registros históricos de la planta, como se evidencia en el Anexo 1, solo contenían prosa descriptiva de las averías (ej. "Desgaste severo," "Ruptura de la correa").

Para lograr que esta data fuera utilizable en el Análisis de Pareto y en el cálculo de indicadores de frecuencia (MTBF), Se implementó un sistema de codificación ad hoc. Este sistema consistió en el proceso riguroso de conversión y agrupamiento de las descripciones narrativas en las categorías cuantificables que determinaron la criticidad de los equipos (ej. transformar múltiples registros de desgaste descriptivo en la categoría unificada de 'Desgaste o ruptura de las paredes de impacto' o 'Reemplazo de mallas').

Esta taxonomía ad hoc, desarrollada exclusivamente para la fase de diagnóstico (Capítulo IV), demostró la capacidad de transformar información cualitativa en variables estadísticas utilizables, superando la deficiencia estructural inicial de la planta.

c) Control de Calidad de Datos

El control de calidad de datos se implementó mediante la doble validación de la información reconstruida, un mecanismo crucial para la confiabilidad de la información que exige la gestión documental de un SGM:

Verificación de consistencia: Se verificó la coherencia de los tiempos de parada asignados con el tipo de labor descrita y el repuesto consumido.

Validación de fuente primaria: El jefe de producción y los operadores actuaron como "validador de fuente", confirmando que los eventos y tiempos asignados a las fichas (Anexo 1) eran consistentes con su memoria operativa, garantizando la integridad de los datos que alimentaron los cálculos de MTBF, MTTR y OEE.

CAPÍTULO II

2. EMPRESA/SECTOR/RUBRO O LO QUE CORRESPONDA

2.1. Empresa

Áridos Cuellar es una empresa dedicada a la extracción y comercialización de materiales áridos, con un enfoque en la producción de grava, gravilla y arena para satisfacer las necesidades del mercado local.

Figura 2.1

Información sobre la empresa

DATOS	CARACTERÍSTICAS
Razón Social	“Áridos Cuellar”
Logotipo	
Tipo De Sociedad	Unipersonal
Gerente General	Sr. Claudio Cuellar
Licencia Ambiental	Si aplica
Permiso de Explotación	Otorgado por autoridades de los municipios
Celular	72999485 - 72947776
Departamento – País	Tarija - Bolivia

Fuente: Empresa Áridos Cuellar, en base a la información de la planta.

Elaboración: Propia (2025)

2.2. Ubicación

La empresa y planta de Áridos Cuellar está ubicada en la comunidad de Santa Ana la vieja en el cruce de Kolberg, calle Wine Rd a una altura de 760 m.

Figura 2.2

Localización de la empresa



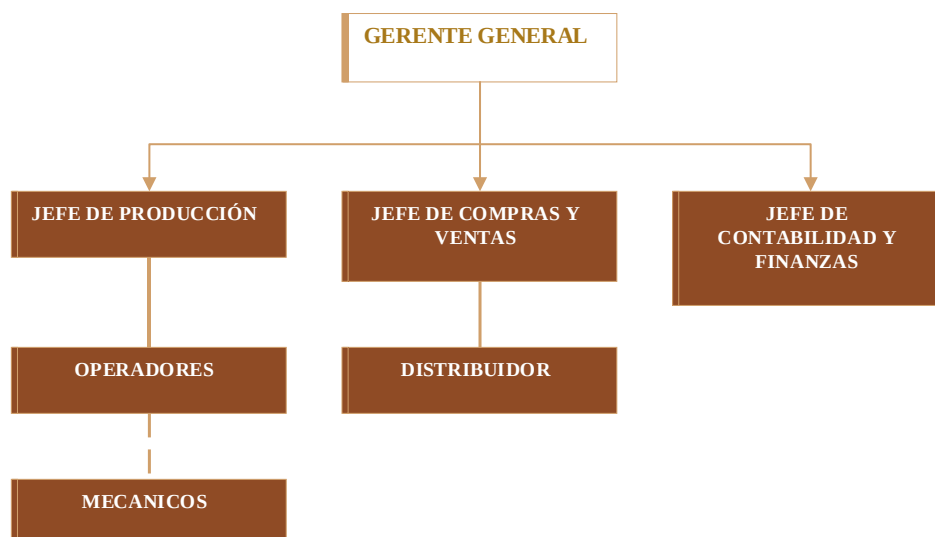
Fuente: <https://maps.app.goo.gl/Q9XNRuT7N3ptSBvg8> (2025)

2.3. Organización

Al tratarse de una empresa unipersonal la misma se encuentra dirigida por el Gerente General el señor Claudio Cuellar, quien conforma la alta dirección. El nivel táctico, se encuentra compuesto por el jefe de producción y el área operativa está conformada por operarios como se detalla a continuación:

Figura 2.3

Organigrama de la empresa



Fuente: Empresa Áridos Cuellar, en base a la información de la planta.

Elaboración: Propia (2025)

2.4. Productos y/o servicios

Actualmente la empresa oferta una variedad de productos, que son distribuidos a pequeñas empresas del centro de la ciudad, como también a grandes empresas constructoras, entre otras.

Tabla 2.1

Líneas de productos

PRODUCTOS DE LA EMPRESA DE ARIDOS CUELLAR	
	Arena gruesa
	Presentación: 1 tonelada
	Precio: 60 Bs
Arena fina	

	Presentación: 1 tonelada Precio: 65 Bs
	Gravilla Presentación: 1 tonelada Precio: 44 Bs
	Grava Presentación: 1 tonelada Precio: 29 Bs
	Piedra Presentación: 1 tonelada Precio: 50 Bs
	Limo Presentación: 1 tonelada Precio: 16 Bs

Fuente: Empresa Áridos Cuellar, en base a la información de la planta.

Elaboración: Propia (2025)

2.5. Maquinaria y Equipo

La maquinaria y el equipo son elementos fundamentales en el proceso productivo de una planta de áridos, ya que permiten optimizar la extracción, el procesamiento y la clasificación de los materiales, asegurando eficiencia y calidad en los productos finales. En la empresa Áridos Cuellar, se emplean una variedad de equipos especializados para cada etapa de la producción.

A continuación, se presenta un cuadro con las principales especificaciones de la maquinaria empleada en la empresa:

Tabla 2.2

Maquinaria y Equipo de la empresa

IMAGEN	MAQUINARÍA/EQUIPO
	Volquetas Marca: Volvo N12 6x4 Cantidad: 3 Capacidad: 12 cubos
	Pala cargadora Marca: Caterpillar 950G Cantidad: 2 Potencia: 197 hp Capacidad: 3,5 y 4,5 dm3
	Excavadora Marca: Cat 323 Cantidad: 1 Potencia: 159 hp Capacidad para biodiésel hasta B20
	Bomba Centrífuga Cantidad: 4 Potencia: 1.5 hp, 220 voltios y 50Hz Succión: 1 1/4" Salida: 1" Elevación max.: 38 mt

Succión max.: 6 mt



Red trifásica



Molino de impacto

Cantidad: 1

Potencia: 315 hp



Cinta transportadora

Cantidad: 7

Material: Caucho



Buzón

Capacidad: 50 m³/hora

Cantidad: 2



Criba Vibratoria 3 niveles

Cantidad: 3 pisos

Potencia 60 HP



Criba Vibratoria 1 nivel

Cantidad: 1 piso

Potencia 30 HP

Lavadora de arena



Capacidad: 80 - 40 tn/h



Tornillos lavadores de arena

Cantidad de tornillos: 1

Potencia: 10 HP

Producción max: 85 tn/h



Tubos

Policloruro de Vinilo (PVC)



Rampa de carga para equipo pesado

Capacidad: 10,000 lb

Fuente: Empresa Áridos Cuellar, en base a la información de la planta.

Elaboración: Propia (2025)

2.6. Materia Prima e Insumos

En esta sección se detallan los principales componentes utilizados en la producción de la planta. Estos incluyen tanto la materia prima principal (piedras del río) como los insumos complementarios necesarios para garantizar la eficiencia y el funcionamiento de los productos y maquinaria. A continuación, se describen cada uno de estos elementos:

Tabla 2.3

Materia prima e insumos

IMAGEN	DESCRIPCIÓN
	Piedras Material obtenido de los ríos de Tarija, contando con los permisos correspondientes del municipio.
	Agua El agua que se utiliza para lavar el material debe ser clara, proviene del río y es reutilizada gracias a un tratamiento de sedimentación de aguas residuales naturales.
	Diesel Combustible esencial para el movimiento de la maquinaria, ya sea para obtener la materia prima o para la distribución del producto terminado.
	Aceites Necesario para lubricar, herramientas, motores, maquinaria, equipos, etc; para prolongar la vida útil de estos componentes.
	Grasa Necesario para engrasar todos los equipos de la planta para una buena eficiencia en el trayecto de la producción.

Fuente: Empresa Áridos Cuellar, en base a la información de la planta.

Elaboración: Propia (2025)

2.7. Proceso Productivo

2.7.1. Descripción del proceso productivo

Una vez zarandeada, la materia prima se carga en volquetas y es transportada hasta la planta de producción, donde se descarga y almacena a la intemperie.

Para iniciar el proceso de producción, una pala cargadora deposita la materia prima en un buzón de recepción. Desde allí, una cinta transportadora la dirige hacia una criba vibratoria, equipada con mallas de dos secciones que permiten la clasificación inicial de los materiales: grava, gravilla y arena. En esta etapa, algunas piedras grandes, que no cumplen con las dimensiones de los productos finales, caen en una bandeja de descarte.

El material descartado se transporta mediante una cinta hacia un molino de impacto, donde se tritura hasta alcanzar el tamaño adecuado. Posteriormente, el material triturado es enviado nuevamente a la cinta principal, regresando al buzón de alimentación para pasar otra vez por la criba vibratoria. En este punto, se obtiene grava, gravilla y arena procesadas.

Los materiales clasificados son transportados por tres cintas transportadoras:

Dos de ellas conducen la grava y la gravilla, que caen por gravedad al suelo y quedan listas para la venta.

La tercera transporta la arena, que requiere un procesamiento adicional.

La arena ingresa a una lavadora circular equipada con mallas milimétricas, cuya función es eliminar el exceso de agua del material. Posteriormente, la arena lavada es transportada por la última cinta y depositada en el suelo para su secado antes de la venta.

Además, el proceso genera un residuo conocido como limo, que no es polvo ni arena. Este material es transportado mediante tuberías con agua hasta un circuito de

sedimentación natural. Allí, el limo sólido se deposita en el fondo, mientras que el agua limpia fluye hacia el extremo opuesto del circuito, permitiendo su reutilización en el proceso.

Proceso de producción de arena fina

El tratamiento de la arena fina se realiza por separado. En este caso, la arena extraída del río se coloca en un buzón con agua y es transportada mediante una cinta hasta otra criba vibratoria. Luego de su selección, el material pasa a través de un tubo hasta la lavadora circular principal, donde se extrae el agua restante antes de ser depositado para su secado.

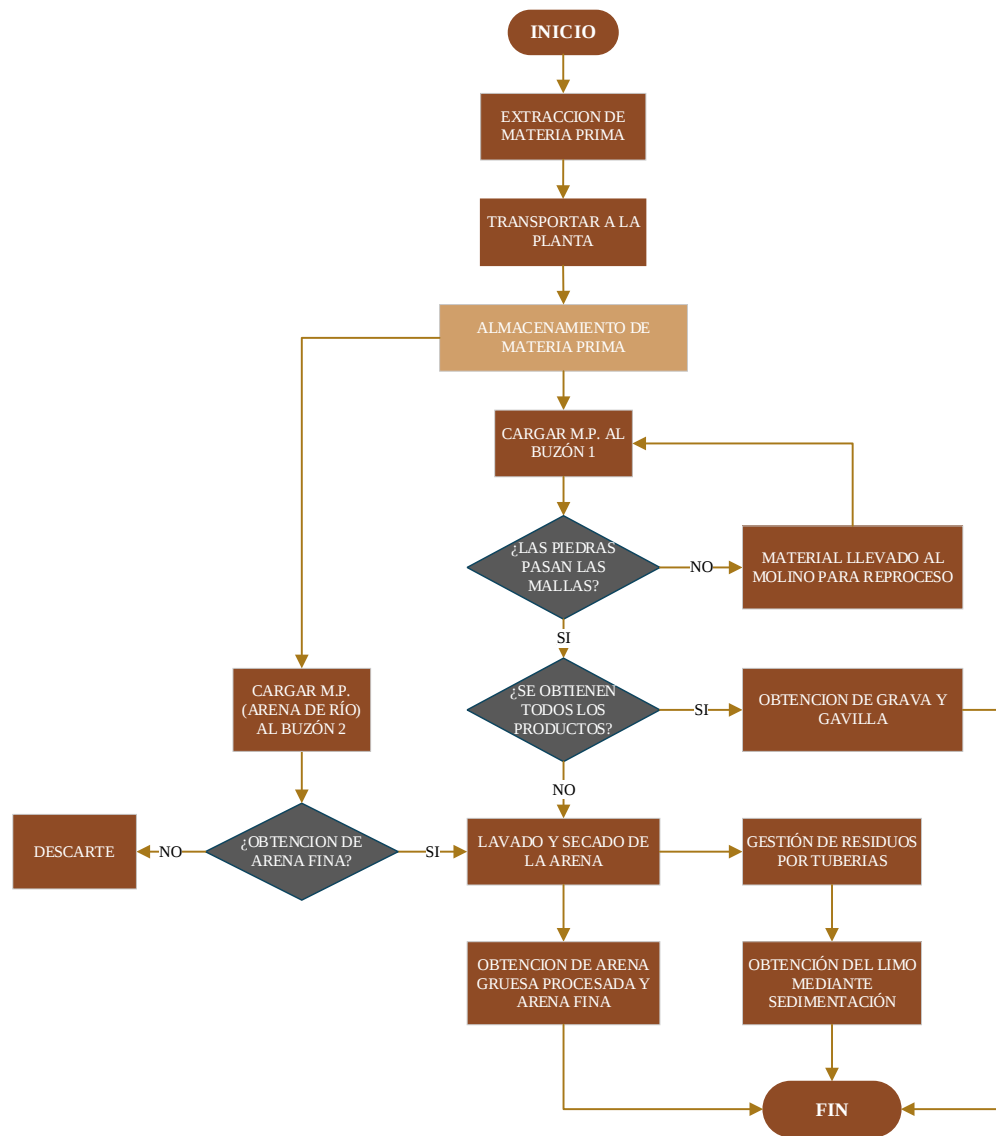
El proceso puede adaptarse según las necesidades del cliente. En algunos casos, se combina la arena triturada con la arena fina para cumplir con especificaciones particulares.

2.7.2. Diagrama de flujo del proceso

Se describen de manera visual las etapas involucradas en la producción de materiales áridos dentro de la planta. A través de este diagrama muestra cómo los materiales se obtienen desde la recolección de materia prima hasta su disposición final.

Figura 2.4

Diagrama de flujo del proceso de áridos



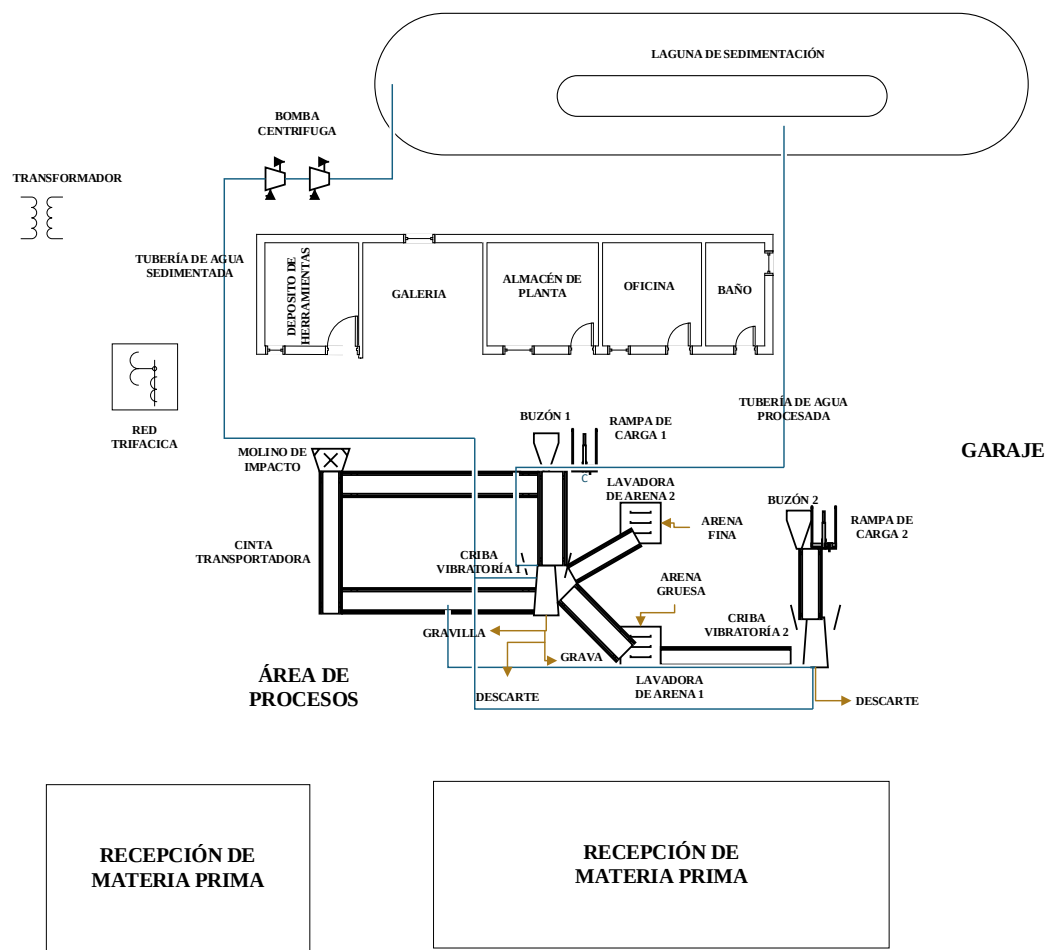
Fuente: Empresa Áridos Cuellar, en base a la información de la planta.

Elaboración: Propia (2025)

2.8. Lay Out

Figura 2.5

Lay out de la empresa ARIDOS CUELLAR



	Fecha	Nombre	Firmas	ARIDOS CUELLAR	
Dibujado	29/3/2025	Maria Fernanda Martinez Romero			
Comprobado					
Escala	LAY OUT ARIDOS CUELLAR			Versión: 1.0	
1:100				Sustituye a: v1.0	
				Sustituido por:	
				Maria Fernanda Martinez Romero	

Fuente: Empresa Áridos Cuellar, en base a la información de la planta.

Elaboración: Propia (2025)

2.9. Residuos y/o servicios

La empresa cuenta con un sistema eficiente para el tratamiento de desechos, el cual abarca desde la gestión de la materia prima hasta el manejo del agua utilizada en el

proceso. El agua pasa por un tratamiento natural que le permite ser reutilizada dentro del ciclo productivo, minimizando así el consumo de recursos hídricos y el impacto ambiental.

Además, durante la fase de selección de materiales en la criba, se lleva a cabo una separación minuciosa de los residuos orgánicos y otros materiales no deseados, como palos, ramas, hojas y otros desechos vegetales. Estos elementos se retiran oportunamente para evitar interferencias en el proceso de clasificación y para facilitar el manejo y disposición de los residuos.

Se estima que, durante la operación, la empresa tiene una pérdida aproximada del 10% de la materia prima en forma de descarte. Asimismo, entre el 5% y el 6% corresponde a limo o tierra vegetal, material que es comercializado y forma parte de la oferta del producto final. Los residuos que no pueden ser procesados ni aprovechados de alguna otra forma, es decir, los desechos orgánicos y vegetales mencionados, constituyen el sobrante del proceso.

CAPÍTULO III

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Fundamentos del Mantenimiento Industrial

3.1.1. Definición de Mantenimiento Industrial

Mantenimiento industrial es la combinación de actividades técnicas de aplicación directa y acciones de gestión económica, mediante las cuales, una instalación, equipo o maquinaria, se mantiene o se reestablece en un estado que pueda asegurar un funcionamiento o servicio óptimo ofreciendo una ventaja competitiva, buscando prolongar su ciclo de vida a un costo mínimo con máxima calidad y seguridad (Ramos Loza, 2016).

En una industria de áridos, la función del mantenimiento es garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos y la seguridad de los trabajadores. Los objetivos del mantenimiento en una planta de áridos incluyen reducir tiempos de inactividad, mejorar la productividad, prolongar la vida útil de los equipos y minimizar costos.

3.1.2. Importancia del mantenimiento en plantas de producción de áridos

El mantenimiento en plantas de áridos es fundamental para asegurar la continuidad operativa y la eficiencia del proceso productivo. En este tipo de instalaciones, donde se procesan grandes volúmenes de materiales abrasivos y pesados, el desgaste de los equipos es constante. Un modelo de mantenimiento adecuado no solo reduce los tiempos de inactividad no planificados, sino que también incrementa la confiabilidad de los equipos, prolonga su vida útil, y optimiza el uso de recursos técnicos y humanos. Además, contribuye directamente a disminuir los costos operacionales al prevenir fallas mayores y planificar las intervenciones necesarias de forma anticipada.

(Alzola, 2017) En el proyecto de grado de la Universidad Católica de Valparaíso, titulado “Propuesta de implementación de un modelo de gestión de mantenimiento melón, planta áridos las garzas”. El estudio evidencia que, sin un sistema de mantenimiento bien estructurado, como ocurría inicialmente en la planta Las Garzas,

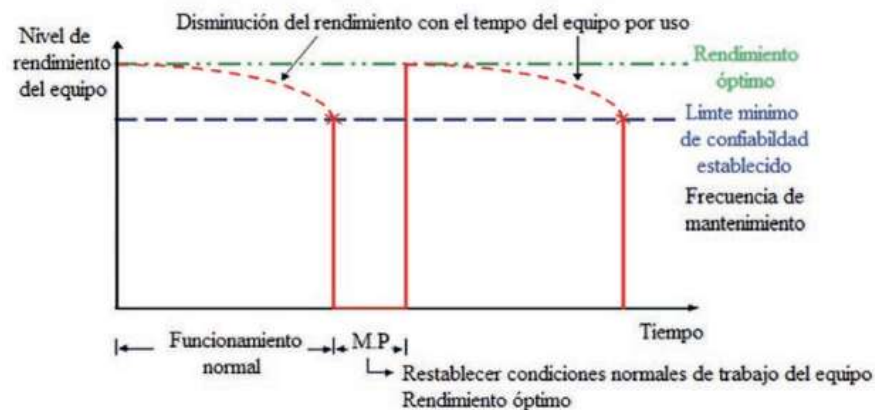
los equipos operan sin registros, sin planificación y con una alta exposición a interrupciones. La incorporación de herramientas como inspecciones sistemáticas, digitalización de rutinas y análisis de criticidad permitió avanzar hacia una gestión más eficiente, alineada con los objetivos de producción y competitividad de la empresa.

3.1.3. Mantenimiento preventivo

Es un sistema de Mantenimiento cuyo objetivo esencial es prevenir la ocurrencia de fallas en un sistema productivo, con base en la ejecución de unas tareas básicas (Observar, Inspeccionar, calibrar, ajustar, cambiar, lubricar, reparar, etc.), a unas frecuencias predeterminadas, asociadas a cada ciclo productivo en particular. La ejecución de las tareas básicas puede indicar la necesidad de realizar tareas programadas adicionales (Montilla, 2019).

Figura 3.1

Ciclo gráfico básico del Mantenimiento Preventivo



Fuente: Información del libro “Mantenimiento industrial y su administración” (Montilla, 2019)

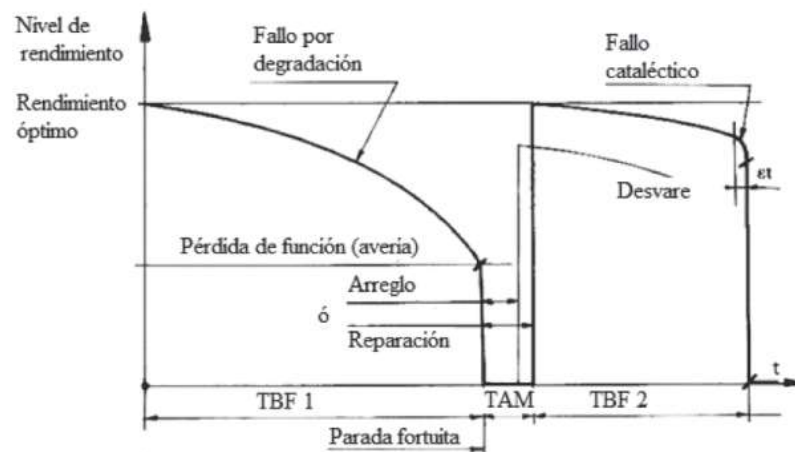
3.1.4. Mantenimiento correctivo

Este mantenimiento correctivo se aplica cuando la máquina deja de operar, porque se presenta la falla o avería y su objetivo es poner en marcha su funcionamiento, afectando lo menos posible la productividad; generalmente se repara o se reemplaza el componente del equipo o de la máquina, haciéndolo en el menor tiempo posible.

Un gráfico de Nivel de rendimiento versus tiempo transcurrido, correspondiente al ciclo de mantenimiento correctivo. Se observa claramente como el Tiempo entre Fallas TBF (Time Between Failure) se va reduciendo paulatinamente, en la medida que ocurre cada avería hasta que, por último, ocurre la falla catastrófica; una falla catastrófica obliga a evaluar la relación costo – beneficio de cambiar el equipo o efectuarle una reparación general; en relación con lo anterior, en la medida que disminuye el TBF, es más alto el nivel de rendimiento en el cual ocurre la falla (Montilla, 2019).

Figura 3.2

Ciclo gráfico del Mantenimiento Correctivo



Fuente: Información del libro “Mantenimiento industrial y su administración” (Montilla, 2019)

3.1.5. Mantenimiento Lean

Cuando se aplica la metodología Lean al mantenimiento industrial, se enfoca en optimizar los procesos de mantenimiento, reducir los tiempos de inactividad y mejorar la efectividad general de los equipos. El objetivo es garantizar que las actividades de mantenimiento se realicen de manera eficiente, que los recursos se utilicen de manera efectiva y que los equipos sean confiables y estén disponibles para la producción. (Rosales, 2023)

En la práctica se aplica a través de una amplia variedad de técnicas. Estas técnicas pueden implantarse de forma independiente o conjunta, atendiendo a las características específicas de cada caso y dependiendo de la elección de las metas que se escogen (Álvarez, 2018).

Metodología SMED

SMED es una técnica enfocada en reducir drásticamente los tiempos de preparación de máquinas, permitiendo una mayor flexibilidad en la producción. Esto se logra mediante el análisis del proceso y la eliminación de ajustes innecesarios, la estandarización de tareas y la incorporación de dispositivos que facilitan el cambio rápido de herramientas o configuraciones.

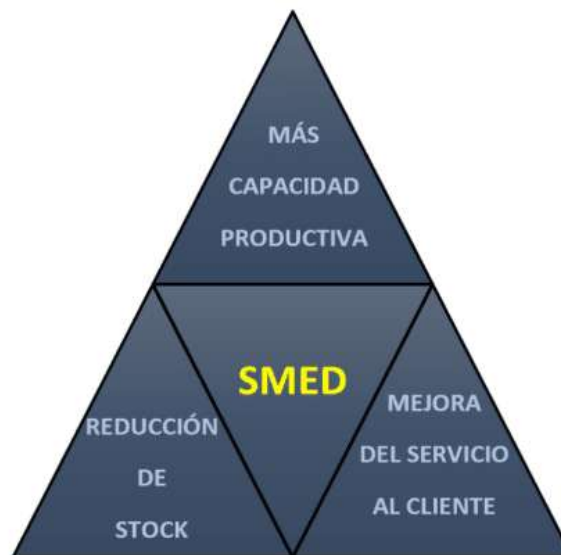
El método consta de cuatro fases principales:

- **Separar preparación interna y externa:** Identificar qué actividades se pueden realizar con la máquina en funcionamiento y convertir la mayor cantidad posible de preparaciones internas en externas.
- **Reducir el tiempo de preparación interna:** Optimizar las operaciones que requieren parada de máquina mediante estandarización, simplificación y mejor asignación de personal.

- **Mejorar el equipo:** Adaptar o rediseñar las máquinas para facilitar ajustes automáticos o rápidos.
- **Preparación cero:** Buscar eliminar completamente los tiempos de preparación mediante automatización y diseño de equipos flexibles (Álvarez, 2018).

Figura 3.3

Grafica sobre los principios de la técnica SMED



Fuente: Información del libro “Gestión de Mantenimiento: Lean Maintenance y TPM” (Álvarez, 2018)

Just In Time

La filosofía JIT se traduce en un sistema que tiende a producir justo lo que se requiere, cuando se necesita, con excelente calidad y sin desperdiciar recursos del sistema.

El JIT es una metodología de organización de la producción que tiene implicaciones en todo el sistema productivo. Además de proporcionar métodos para la planificación y el control de la producción, incide en muchos otros aspectos de los sistemas de fabricación, como son, entre otros, el diseño de producto, los recursos humanos, el sistema de mantenimiento o la calidad.

Una definición para describir el objetivo de partida de un sistema JIT podría ser: «Producir los elementos que se necesitan, en las cantidades que se necesitan, en el momento en que se necesitan» (Álvarez, 2018).

Mejora continua en mantenimiento

La mejora continua en mantenimiento busca aumentar la eficacia y eficiencia operativa, cumpliendo objetivos en tiempo y forma, reduciendo costos, incrementando la disponibilidad de equipos y perfeccionando el desempeño del personal técnico.

3.2. Plan de mantenimiento

3.2.1. Planificación y programación del mantenimiento

Concepto de planeación

Con la planificación que es una herramienta muy importante en la dirección empresarial de toda organización, hay que mencionar, además, que se debe aplicar en todos los niveles de jerarquía dentro de la organización. El objetivo de planificar es lograr, alcanzar las metas de la empresa, agilizando su consecución. También se considera como una función propia de toda organización y es de suma relevancia dentro de esta.

Concepto de programación

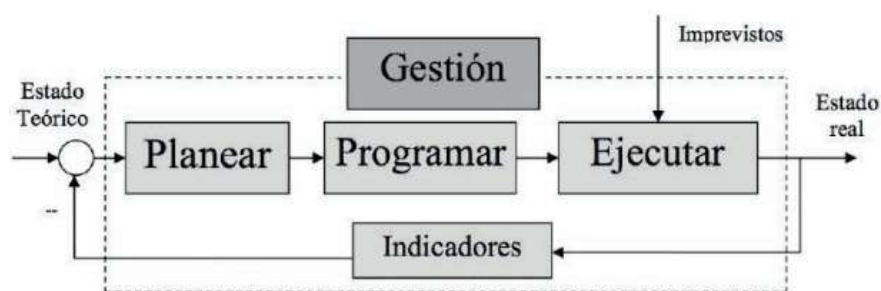
En general programar, es un proceso mediante el cual se acoplan aquellas actividades o trabajos por realizar en un orden secuencial en tiempos definidos. También, se puede decir que la programación en el mantenimiento industrial se sustenta en la secuencia de efectuar los trabajos según las referencias sugeridas o planteadas y, obviamente, se tiene en cuenta la periodicidad; apoyándose en el orden en que se deben ejecutar los mantenimientos, de acuerdo con la urgencia, disponibilidad del equipo, disponibilidad del personal, locaciones, herramientas, transporte y del material necesario, como repuestos.

Factores por tener en cuenta para la planeación y programación

- Pleno conocimiento de los procesos, de los métodos de producción, de la maquinaria, de los equipos, etc.
- Contar con un buen equipo de trabajo, donde se tenga la experticia, los conocimientos y las habilidades, para así poder estimar todos los ítems (cómo personal calificado, tiempos, equipos, herramientas, materiales, etc.) que se debe tener en cuenta en la planeación y programación del mantenimiento en las industrias.
- Tener excelentes habilidades de comunicación con todos los involucrados.
- Respeto por las personas.
- Que el personal esté comprometido con su seguridad (integridad física), con el medio ambiente, con su desarrollo personal y laboral, y por supuesto, con su empresa (Pérez Rondón, 2021).

Figura 3.4

Representación de la dinámica de un Sistema de Mantenimiento



Fuente: Información del libro “Mantenimiento industrial y su administración” (Montilla, 2019)

3.2.2. Procedimientos técnicos básicos

- Inspección y monitoreo de condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa).
- Limpieza externa e interna de la máquina/equipo.
- Inspección externa e interna del equipo (visual, al tacto, auditiva o con instrumentación). Se deben ubicar partes sueltas, faltantes, rotas, fatigadas, defectuosas, fugas en mangueras, racores, tuberías, sobrecalentamiento, corrosión, desgaste, vibración, etc.
- Reemplazo de partes o componentes. Los reemplazos pueden haber sido previamente programados o ser el resultado de las inspecciones internas o externas previas.
- Ajuste y calibración. Puede ser necesario poner en marcha el equipo o no. Puede ser de naturaleza mecánica, eléctrica, electrónica, etc. Debe hacerse con base a normas, estándares o procedimientos preestablecidos.
- Revisión de seguridad eléctrica (paros de emergencia, finales de carrera, interruptores de seguridad, etc.)
- Pruebas de operación del equipo. Procedimiento que se debe realizar una vez ejecutadas las tareas anteriores, en lo posible en compañía del operario del equipo (Montilla, 2019).

3.2.3. Gestión de repuestos

La gestión de los repuestos consiste en la planificación de compra de repuestos, a fin de mantener un stock óptimo, en función al grado de criticidad del repuesto, criticidad del equipo, costos, disponibilidad, tiempos de entrega, negociaciones con el proveedor, entre otros.

El **punto de reorden (ROP)** es la cantidad de inventario en la que deberían estar para que puedan solicitar más producto antes de que se queden sin stock mientras esperan a que llegue el nuevo pedido. Por eso, el punto de reorden se debe calcular para cada producto de tu portafolio, porque los distintos productos se comportan diferente. La fórmula del punto de reorden (ROP) es la siguiente:

Punto de reorden = (ventas promedio por día x Lead time en días) + Stock de seguridad

Esta fórmula te permite calcular el valor mínimo que necesitas tener para evitar quedarse sin stock y perder ventas por falta de producto.

Sin embargo, hay factores que no controlas y que afectan tu punto de reorden como: la demanda y el lead times o plazos de entrega de proveedores (Hernández, 2025).

Categorías de repuestos, según su necesidad en planta:

- Repuestos que son necesarios mantener en stock dentro de planta.
- Repuestos que no son necesarios tener en stock, pero si es necesario tener identificado al proveedor, plazos de entrega, disponibilidad, costo, etc.
- Repuestos indiferentes, que no es necesaria una planificación en torno a ellos.

Criterios para tener en cuenta en la selección y compra del repuesto:

- Criticidad del equipo.
- Consumo periódico.
- Tiempo entrega promedio.
- Costo del repuesto.
- Stock de seguridad.

Los repuestos al igual que los equipos deben ser identificados, para luego ser guardados en un almacén. Así mismo se debe realizar periódicamente revisiones al inventario de repuestos, a fin de controlar y garantizar la disponibilidad de estos.

3.3. Herramientas de Diagnóstico y Evaluación

3.3.1. Cursograma analítico

Una vez esbozado el diagrama general del proceso (cursograma sinóptico), se puede aumentar el grado de detalle para una mejor comprensión del sistema objeto de estudio, para esto se puede recurrir al cursograma analítico o diagrama del proceso del recorrido.

Un cursograma analítico es la representación gráfica del orden de todas las operaciones, transportes, inspecciones, demoras y almacenajes que tienen lugar durante un proceso o procedimiento, y comprende la información considerada adecuada para el análisis, como, por ejemplo: tiempo requerido y distancia recorrida.

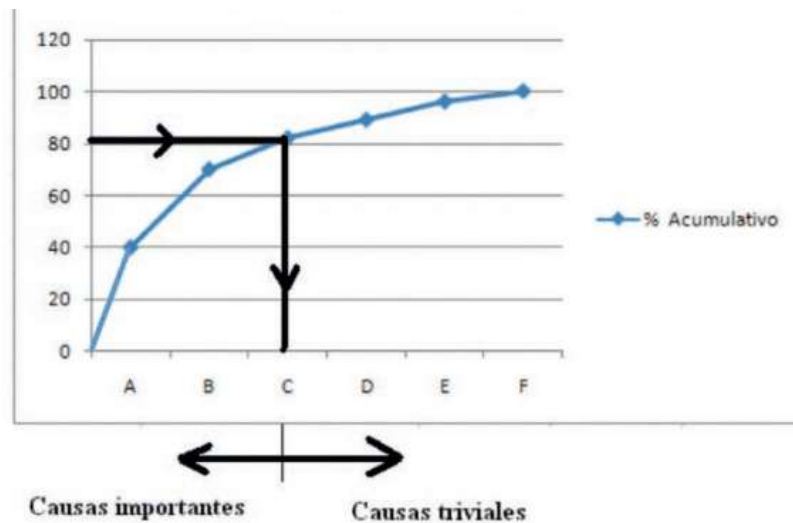
Al realizar un diagrama del proceso del recorrido, se pueden presentar tres (3) variantes, es decir que el cursograma analítico describa el orden de los hechos sujetos a examen mediante el símbolo que corresponde enfocado a Operario/ Material/ Equipo (López, 2019).

3.3.2. Análisis de Pareto

El Análisis de Pareto es una técnica que separa los “pocos vitales” de los “muchos triviales”. Una gráfica de Pareto es utilizada para separar gráficamente los aspectos significativos de un problema de los triviales (pocos vitales, muchos triviales), de manera que el equipo de trabajo sepa hacia dónde dirigir sus esfuerzos para mejorar.

Figura 3.5

Diagrama de Pareto



Fuente: Información del libro “Mantenimiento industrial y su administración” (Montilla, 2019)

3.4. Indicadores de Gestión en Mantenimiento

Los indicadores básicos de mantenimiento son los valores que nos permiten medir el grado de éxito o fracaso que logra alcanzar un plan de mantenimiento. Asimismo, son evaluadas analizando el grado de gestión y operación del mantenimiento (Montilla, 2019).

3.4.1. Eficiencia global de los equipos (OEE)

Es el indicador de referencia para medir la productividad de fabricación. En pocas palabras, identifica el porcentaje de tiempo de fabricación que es realmente productivo. Una puntuación de OEE del 100% significa que sólo se fabrican piezas buenas, lo más rápido posible y sin tiempos muertos (Cantú, 2020).

El OEE se calcula utilizando una fórmula simple:

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad}$$

Donde:

La disponibilidad se calcula como:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{(\text{Tiempo de operación} - \text{Paradas por averías})}{\text{Tiempo de operación}}$$

El rendimiento se calcula como:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Producción prevista}}{\text{Producción real}}$$

La calidad se calcula como:

$$\text{Calidad} = \frac{\text{Producción real}}{\text{Piezas buenas}}$$

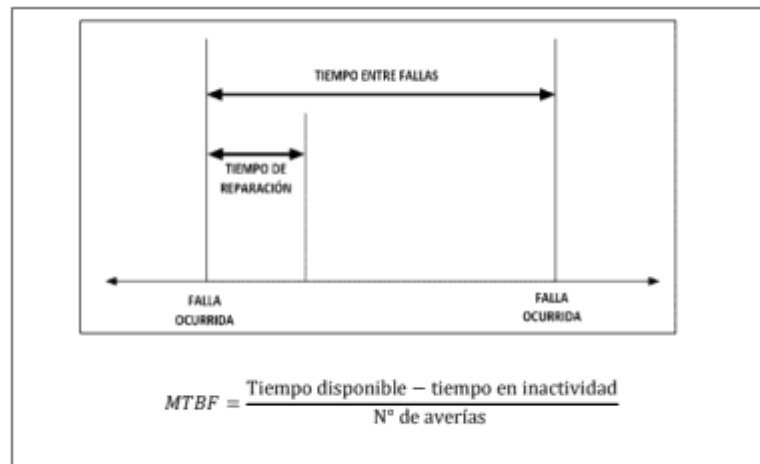
3.4.2. Tiempo medio entre fallas (MTBF)

El Tiempo promedio entre fallas indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del evento “fallo”. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo.

Este indicador nos muestra el tiempo promedio que transcurre desde una falla ocurrida hasta la próxima por ocurrir; para ello, es importante tener tres datos fundamentales: tiempo disponible (indica el tiempo en que la máquina debería estar trabajando el cual generalmente es la programación ideal de las horas operativas de la máquina al 100%), tiempo de inactividad (indica el tiempo en que la máquina estuvo paralizada ocasionado únicamente por fallas inesperadas o correctivos) y, la cantidad de averías inesperadas registradas; todos estos datos determinados en un periodo establecido para una o varias máquinas. Generalmente cuando el periodo de evaluación es mayor se tiene un alto grado de representatividad de este indicador con respecto al comportamiento de la máquina (Montilla, 2019).

Figura 3.6

Expresión matemática del tiempo medio entre fallas



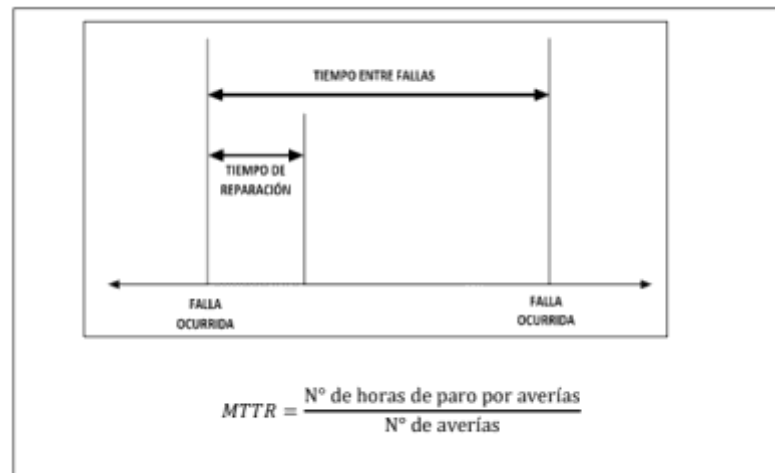
Fuente: Información del libro “Mantenimiento industrial y su administración” (Montilla, 2019)

3.4.3. Tiempo medio para reparar (MTTR)

Este indicador nos demuestra el tiempo promedio en que se toma para realizar una reparación, en ese sentido, para hallar este indicador es importante registrar únicamente el tiempo de paralización acumulado del equipo por averías inesperadas y el número de fallas o correctivos ocurridos en un periodo determinado. Igual al indicador anterior, a mayor periodo de análisis, el resultado tendrá un alto grado de representatividad de la máquina.

Figura 3.7

Expresión matemática del tiempo medio para reparar



Fuente: Información del libro “Mantenimiento industrial y su administración” (Montilla, 2019)

3.5. Evaluación Económica del Plan de Mantenimiento

3.5.1. Costos asociados al mantenimiento

Los costos de mantenimiento industrial son aquellos relacionados con la conservación y restauración de los bienes en una empresa o industria. Como su nombre lo sugiere, se refiere a esos desembolsos que la organización debe hacer para mantener la maquinaria clave de su planta en buen funcionamiento para garantizar la producción y calidad.

¿Cómo calcular los costos de mantenimiento industrial?

Costos de los repuestos

Calcula el costo de los repuestos que serán reemplazados durante el mantenimiento. Aquí considera piezas específicas, componentes y consumibles necesarios para mantener los equipos en funcionamiento.

Costo de mano de obra

Evalúa el tiempo dedicado por los técnicos y trabajadores al mantenimiento. Luego, multiplica las horas trabajadas por sus salarios por hora, incluyendo tanto el mantenimiento preventivo como el correctivo. (Alecrim, 2024)

Figura 3.8

Costos de mantenimiento industrial



Fuente: Información de la página “Costos de mantenimiento industrial: ¿qué son y cómo reducirlos?” (Alecrim, 2024; Hernández, 2025)

3.5.2. ROI: Retorno sobre la inversión en mantenimiento

El ROI es una métrica financiera que mide el beneficio obtenido por cada unidad monetaria invertida. En el contexto del mantenimiento, el ROI te ayuda a determinar si las inversiones en mantenimiento (preventivo, predictivo o correctivo) están generando un valor económico tangible en comparación con los costos asociados.

El cálculo del ROI en mantenimiento no solo se basa en los costos directos de reparación o reemplazo de componentes, sino también en otros factores como la reducción de tiempos de inactividad, el aumento en la vida útil del equipo y la mejora en la eficiencia.

El ROI se calcula con la siguiente fórmula básica:

$$\text{ROI} = \frac{\text{Utilidad neta} - \text{Costo de inversión}}{\text{Costo de inversión}} \times 100\%$$

Pasos para calcular el ROI del mantenimiento

Identificar los costos directos de mantenimiento: Para comenzar, necesitas tener un registro detallado de todos los costos asociados al mantenimiento de tus equipos electrónicos. Esto incluye mano de obra, costos por paradas, costos de repuestos y componentes.

Calcular las pérdidas por inactividad: Uno de los mayores beneficios del mantenimiento es evitar el tiempo de inactividad no planificado. Para cuantificar esto, debes conocer el costo de cada hora de inactividad de tus equipos. Multiplica el número de horas de inactividad evitadas por el costo por hora para obtener un valor.

Considerar el ahorro en eficiencia: El mantenimiento regular, como la limpieza de componentes o la recalibración de sistemas, puede mejorar la eficiencia de los equipos (BOARD, 2024).

Otra forma de aplicar la fórmula del ROI:

$$\text{ROI} = \frac{\text{Ahorros generados por el mnto} - \text{Costos del mnto}}{\text{Costos del mnto}} \times 100\%$$

3.6. Aspectos Normativos y Legales

3.6.1. Normas boliviana NB 12017 Sistema de Gestión de Mantenimiento de Activos

NB 12017 es una norma boliviana centrada en la gestión de activos. Esta norma proporciona una visión general. Establece el marco para que las organizaciones gestionen eficazmente sus activos a lo largo de su ciclo de vida, aumentando el valor obtenido de los activos, lo que es crucial para lograr los objetivos de la organización (IBNORCA, 2020).

3.6.2. Requisitos estructurales del SGM

La norma exige que el SGM esté documentado y se base en requisitos específicos:

Tabla 3.1

Requisitos estructurales del SGM

Requisito Clave de la NB 12017	Detalle según la Norma	Relevancia en el Proyecto
Documentación	Toda organización debe establecer, documentar, implementar, mantener y mejorar continuamente su SGM. La documentación debe incluir al menos un Manual Administrativo y un Manual Operativo.	Su proyecto genera instructivos de mantenimiento (preventivo, programado, correctivo) y registros (Checklists, Órdenes de Trabajo) que representan la materialización de los procedimientos exigidos por estos manuales.
Planeación	Debe definir la política, el alcance y los objetivos de mantenimiento, así como la estructura, responsabilidades y funciones. La metodología utilizada para la programación de las actividades debe quedar establecida.	Su cronograma de actividades planificadas se basa en el requisito de que la organización debe definir, documentar e implementar un plan de mantenimiento y su metodología. La planificación se realiza bajo criterios de vida útil y condición.
Ejecución	Debe contener los procedimientos operativos aplicables, definir la metodología de inspección rutinaria y la interrelación de los cuatro elementos fundamentales (objetos, entornos, personal y recursos).	Los instructivos de inspección visual (diaria/semanal) y por condición (medición de espesor de placas/gomas o tensión de correas) cumplen con esta exigencia de establecer metodologías de inspección.
Recursos Humanos	Se deben establecer procedimientos para la calificación, competencia, experiencia y capacitación permanente de todo el personal.	Es un requisito indispensable para la implementación de metodologías avanzadas como SMED (Single Minute Exchange of Die), que requiere capacitación para que el personal realice cambios rápidos de manera eficiente.

Fuente: Información del documento “Normas boliviana NB 12017 Sistema de Gestión de Mantenimiento de Activos” (IBNORCA, 2020)

Elaboración: Propia (2025)

3.6.3. Sistemas Electrónicos y Software (CMMS/EAM)

Según la NB 12017 (IBNORCA, 2020), Los sistemas electrónicos utilizados dentro del SGM, como un CMMS o EAM, deben contar con la capacidad técnica necesaria, estar validados y recibir mantenimiento por proveedores calificados. La organización debe garantizar la integridad, seguridad y confidencialidad de toda la información generada, así como disponer de procedimientos para su correcto almacenamiento, transmisión y uso. Cuando el software es adquirido a terceros, se debe verificar que cuente con respaldo técnico, documentación, garantía y capacitación adecuada. Además, el manual operativo debe describir el flujo documental cuando las órdenes de trabajo y registros se generan digitalmente. En el proyecto, esta exigencia se cumple mediante la implementación de un CMMS lógico basado en hojas de cálculo avanzadas, que satisface los requisitos normativos para la gestión electrónica del mantenimiento.

CAPÍTULO IV

4. DIAGNÓSTICO

4.1. Situación actual de la planta de áridos

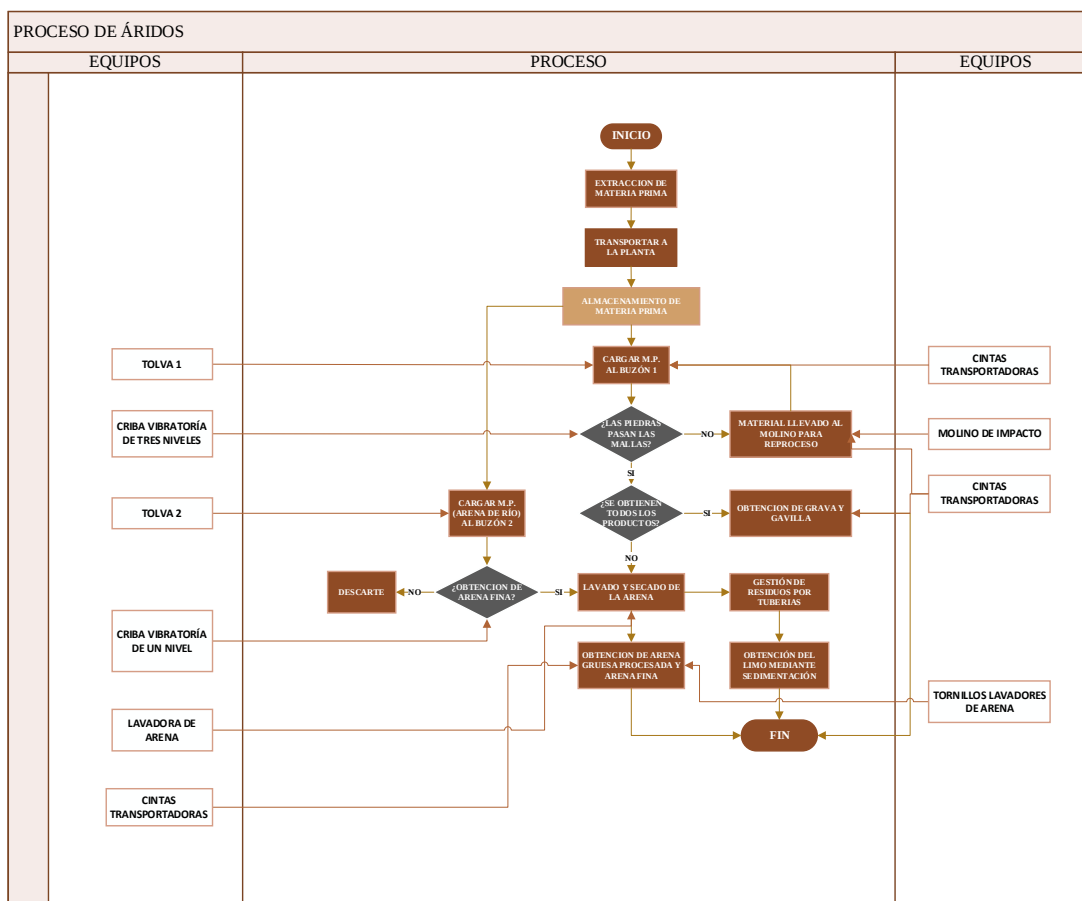
La planta de Áridos Cuéllar, ubicada en Tarija, Bolivia, se dedica a la extracción y procesamiento de materiales áridos (arena, grava, gravilla, piedra y limo) mediante un proceso que incluye etapas de clasificación, trituración y lavado.

4.1.1. Diagrama de flujo combinado

El diagrama de flujo combinado presentado refleja de manera integral las etapas del proceso de producción de áridos dentro de la planta, mostrando la secuencia desde la recepción de la materia prima hasta la obtención del producto final. En él se evidencian tanto las operaciones principales como los equipos involucrados en cada fase (tolvas, cribas vibratorias, molinos, cintas transportadoras y lavadores de arena) lo cual facilita la comprensión de la interacción entre las áreas operativas y los recursos técnicos empleados.

Figura 4.1

Diagrama de flujo combinado



Fuente: Empresa Áridos Cuellar, en base a la información de la planta.

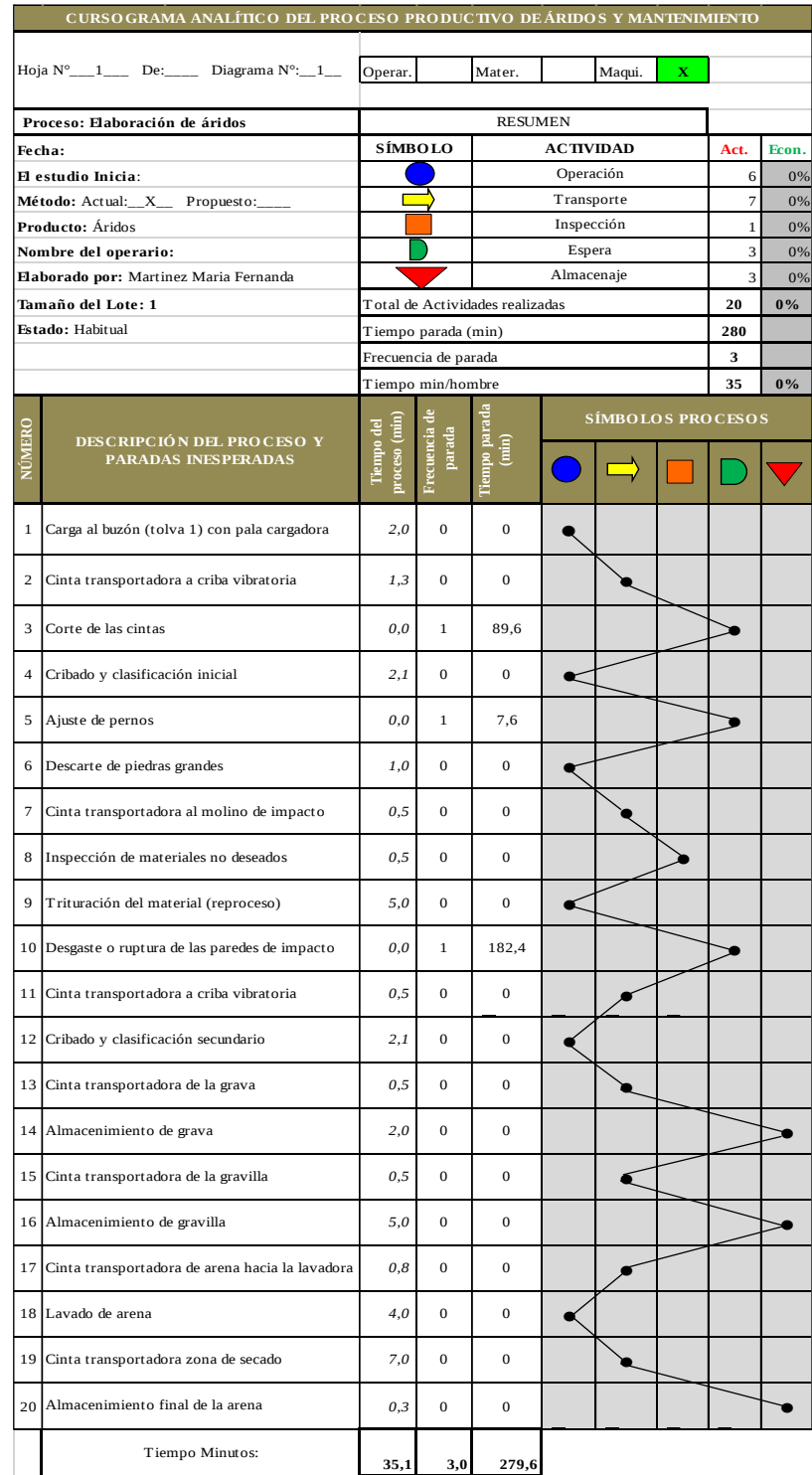
Elaboración: Propia (2025)

4.1.2. Cursograma analítico actual de averías en condiciones normales

El presente cursograma analítico actual de averías en condiciones normales representa de manera detallada la secuencia del proceso productivo de la planta de áridos, incorporando las principales interrupciones y fallas inesperadas que afectan la continuidad operativa. Mediante símbolos estandarizados (operación, transporte, inspección, espera y almacenaje), se identifican los puntos críticos del flujo de trabajo y se cuantifican los tiempos de parada, la frecuencia de las fallas y el tiempo total de inactividad, información clave para el diagnóstico de mantenimiento.

Figura 4.2

Cursograma analítico actual de averías en condiciones normales



Fuente: Información proporcionada por la planta Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El cursograma analítico evidencia que el proceso productivo de la planta de Áridos Cuellar presenta una alta incidencia de paradas inesperadas, acumulando un tiempo total de 279,60 minutos (4,66 horas) y una frecuencia promedio de 3 interrupciones por proceso. Estas condiciones reflejan una dependencia del mantenimiento correctivo, lo que incrementa los tiempos improductivos y retrasa la operación. Asimismo, el tiempo de proceso de 35,10 minutos (0,59 horas) muestra que la eficiencia global se ve afectada por esperas, fallas recurrentes y actividades no planificadas. Estos resultados confirman la necesidad de fortalecer el mantenimiento preventivo y la gestión de repuestos críticos, con el fin de reducir la frecuencia de fallas y optimizar la disponibilidad de los equipos.

4.1.3. Cursograma analítico de averías en condiciones críticas

El presente cursograma analítico de averías en condiciones críticas representa de manera detallada la secuencia del proceso productivo de la planta de áridos, incorporando las principales interrupciones y fallas inesperadas que afectan la continuidad operativa.

Figura 4.3

Cursograma analítico de averías en condiciones críticas

CURSOGRAMA ANALÍTICO DEL PROCESO PRODUCTIVO DE ÁRIDOS Y MANTENIMIENTO									
Hoja N° 1 De: Diagrama N°: 1				Operar.		Mater.		Maqui.	X
Proceso: Elaboración de áridos				RESUMEN					
Fecha:		SÍMBOLO		ACTIVIDAD		Act.		Econ.	
El estudio inicia:				Operación		6		0%	
Método: Actual: X Propuesto:				Transporte		7		0%	
Producto: Áridos				Inspección		1		0%	
Nombre del operario:				Espera		9		0%	
Elaborado por: Martinez Maria Fernanda				Almacenaje		3		0%	
Tamaño del Lote: 1	Total de Actividades realizadas					26		0%	
Estado: Crítico	Tiempo real (min)					2.249			
	Frecuencia de parada					9			
	Tiempo min/hombre					35		0%	
NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y MANTENIMIENTO	Tiempo del proceso (min)	Frecuencia de parada	Tiempo parada (min)	SÍMBOLOS PROCESOS				
1	Carga al buzón (tolva 1) con pala cargadora	2,0	0	0	●				
2	Ruptura de las paredes por peso excesivo	0,0	1	470				●	
3	Cinta transportadora a criba vibratoria	1,3	0	0	●				
4	Corte de las cintas	0,0	1	89,6				●	
5	Cribado y clasificación inicial	2,1	0	0	●				
6	Ajuste de pernos	0,0	1	7,6				●	
7	Reemplazo de mallas	0,0	1	891,2				●	
8	Reposición de gomas	0,0	1	87,8				●	
9	Descarte de piedras grandes	1,0	0	0	●				
10	Cinta transportadora al molino de impacto	0,5	0	0	●				
11	Inspección de materiales no deseados	0,5	0	0				●	
12	Trituración del material (reproceso)	5,0	0	0	●				
13	Desgaste o ruptura de las paredes de impacto	0,0	1	182,4				●	
14	Desgaste o ruptura de las chapaletas	0,0	1	128,8				●	
15	Cinta transportadora a criba vibratoria	0,5	0	0	●				
16	Cribado y clasificación secundario	2,1	0	0	●				
17	Revienta la correa de la criba	0,0	1	140				●	
18	Cinta transportadora de la grava	0,5	0	0	●				
19	Almacenamiento de grava	2,0	0	0					●
20	Cinta transportadora de la gravilla	0,5	0	0	●				
21	Almacenamiento de gravilla	5,0	0	0					●
22	Cinta transportadora de arena hacia la lavadora	0,8	0	0	●				
23	Lavado de arena	4,0	0	0	●				
24	Ingreso de agua al eje	0,0	1	252				●	
25	Cinta transportadora zona de secado	7,0	0	0	●				
26	Almacenamiento final de la arena	0,3	0	0					●
Tiempo Minutos:		35,1	9,0	2.249,4					

Fuente: Información proporcionada por la planta Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El cursograma muestra que las averías en condiciones críticas generan un total de 2.249,40 minutos (37,49 horas) de paradas inesperadas, con una frecuencia promedio de 9 interrupciones por proceso. Este nivel de recurrencia confirma la elevada dependencia del mantenimiento correctivo y la ausencia de estrategias preventivas que reduzcan los tiempos de inactividad. En consecuencia, la disponibilidad de los equipos se ve comprometida, afectando directamente la productividad y los costos operativos de la planta de Áridos Cuéllar.

4.2. Identificación de la situación actual de averías habituales

Actualmente, en la planta de Áridos Cuéllar se ha identificado que las averías constituyen uno de los principales factores que afectan la disponibilidad y eficiencia de los equipos críticos, particularmente en la criba vibratoria de tres niveles y el molino de impacto. Estas averías pueden clasificarse en dos categorías: habituales y críticas.

Las averías habituales corresponden a fallas de menor impacto, pero de alta recurrencia, como el aflojamiento de pernos por vibración excesiva, el desgaste o ruptura de las paredes de impacto y corte de las cintas. Aunque estas fallas pueden resolverse en plazos relativamente cortos, generan frecuentes interrupciones en el proceso productivo, aumentando los tiempos de inactividad y los costos correctivos.

Por otro lado, las averías críticas están asociadas a problemas de mayor severidad y costo, tales como el reemplazo de mallas, desgaste o ruptura de las chapaletas y que reviente la correa de la criba, o la necesidad de hacer la reposición de gomas, la ruptura de las paredes del equipo de la Tolva 1 por peso excesivo y cambio de componentes del eje por ingreso de agua. Estas contingencias no solo implican una mayor inversión en repuestos y servicios externos (como tornería o grúas), sino también tiempos prolongados de parada, que afectan directamente la producción y los compromisos comerciales de la planta.

El análisis realizado mediante cursogramas, evidencia que la mayoría de estas averías tienen como origen la ausencia de un plan estructurado de mantenimiento preventivo y

tomar herramientas de la metodología lean, así como deficiencias en la gestión de repuestos críticos. En consecuencia, la planta depende en gran medida de un mantenimiento correctivo, lo cual incrementa la incertidumbre operativa y los costos asociados a la inactividad.

4.3. Selección de los equipos críticos

Para identificar los equipos críticos de la planta de Áridos Cuéllar, se consideraron los registros obtenidos entre septiembre de 2024 y julio de 2025, relacionados con la frecuencia de averías anuales, el tiempo promedio de parada por falla (minutos) y el tiempo promedio anual de paradas acumuladas por fallas (minutos). Estos indicadores permiten dimensionar no solo la cantidad de fallas que afectan a cada equipo, sino también la magnitud de su impacto en la continuidad productiva. Con base en estos datos se elaborarán tablas de referencia y un diagrama de Pareto, herramienta que facilitará la priorización de los equipos cuya gestión de mantenimiento requiere mayor atención debido a su criticidad dentro del proceso productivo. Para los datos de tiempo promedio de paradas por avería de los equipos ver anexo 1.

4.3.1. Datos de los equipos

Criba vibratoria de tres niveles

Tabla 4.1

Datos promedio de la criba vibratoria de tres niveles

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Reemplazo de mallas	5	891,20	4.456,00
Reposición de gomas	5	87,80	439,00
Fallas en la correa de la criba	2	140,00	280,00
Ajuste de pernos	13	7,60	98,80
TOTAL	25	1.126,60	5.273,80

Fuente: Planta de Áridos Cuéllar

Elaboración: Propia (2025)

El análisis de averías evidencia que, aunque el ajuste de pernos presenta la mayor frecuencia anual 13 ocurrencias, su impacto en tiempo perdido es reducido en comparación con otras averías. En contraste, el reemplazo de mallas, con solo 5 eventos anuales, concentra el mayor tiempo de inactividad acumulado 4.456 minutos, considerándolo el de mayor criticidad, seguido por la reposición de gomas 439 minutos y la ruptura de correas 280 minutos. Esto demuestra que no todas las averías con alta frecuencia son críticas, y que la prioridad en el plan de mantenimiento debe enfocarse en aquellas averías de menor frecuencia, pero de alto impacto en tiempo de parada y productividad, siendo el reemplazo de mallas el principal factor de indisponibilidad en la planta.

Molino de impacto**Tabla 4.2**

Datos promedios del molino de impacto

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Desgaste o ruptura de las paredes de impacto	12	182,40	2.188,80
Desgaste o ruptura de las chapaletas	4	128,80	515,20
TOTAL	16	311,20	2.704,00

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

Los resultados muestran que el desgaste o ruptura de las paredes de impacto constituye la avería más crítica del molino, con 12 ocurrencias anuales que representan un total de 2.188,80 minutos de inactividad, lo que evidencia su alta frecuencia e impacto en la disponibilidad del equipo. Por otro lado, el desgaste o ruptura de las chapaletas, aunque menos recurrente 4 eventos anuales, genera también una pérdida significativa de

515,20 minutos. En conjunto, estas averías suman 2.704 minutos de parada anual, confirmando que la confiabilidad del molino de impacto se ve fuertemente comprometida por el desgaste acelerado de componentes internos, situación que justifica priorizar acciones preventivas y asegurar el suministro de repuestos críticos.

Lavadora de arena

Tabla 4.3

Datos promedios de la lavadora de arena

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Ingreso de agua al eje	2	252,00	504,00
TOTAL	2	252,00	504,00

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El ingreso de agua al eje, aunque solo se presenta en 2 ocasiones anuales, genera un tiempo acumulado de 504 minutos de parada, lo que evidencia que, a pesar de su baja frecuencia, se trata de una avería de alto impacto en la disponibilidad operativa del equipo, debido a que requiere desmontaje, limpieza, secado y lubricación de componentes internos.

Tornillos lavadores de arena

Tabla 4.4

Datos promedios de los tornillos lavadores de arena

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Ingreso de agua al eje	1	270,00	270,00
TOTAL	1	270,00	270,00

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El ingreso de agua al eje, aunque se presenta únicamente en una ocasión anual, ocasiona un tiempo de inactividad de 270 minutos. Este resultado muestra que, pese a su baja frecuencia, se trata de una avería de impacto puntual, capaz de comprometer seriamente la continuidad operativa del equipo.

Tolva 1 (mayor vol.)

Tabla 4.5

Datos promedios de la tolva 1 (mayor vol.)

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Ruptura de las paredes por peso excesivo	1	280,00	280,00
TOTAL	1	280,00	280,00

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La ruptura de las paredes por peso excesivo, aunque se presenta únicamente en una ocasión anual, genera un tiempo de inactividad considerable de 280 minutos. Este tipo de avería, pese a su baja frecuencia, evidencia un impacto en la operación, ya que implica reparaciones estructurales que detienen por completo el proceso productivo. La causa principal está asociada a sobrecargas de material, lo que resalta la importancia de implementar controles de operación, monitoreo del flujo de alimentación y refuerzos estructurales preventivos para evitar la recurrencia de este tipo de fallas críticas.

Tolva 2 (menor vol.)

Tabla 4.6

Datos promedios Tolva 2 (menor vol.)

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Ruptura de las paredes por peso excesivo	1	125,00	125,00
TOTAL	1	125,00	125,00

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La ruptura de las paredes por peso excesivo, aunque registrada únicamente en una ocasión anual, ocasiona un tiempo de inactividad de 125 minutos. Si bien su impacto en comparación con otras averías es menor, este tipo de falla refleja una condición de operación inadecuada relacionada con sobrecargas de material que comprometen la estructura del equipo. Por ello, resulta fundamental establecer controles en la alimentación y límites de carga para prevenir daños mayores que, en caso de repetirse, podrían escalar a paradas críticas con consecuencias económicas más severas.

Criba Vibratoria de un nivel

Tabla 4.7

Datos promedios de la criba vibratoria de un nivel

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Cambio de mallas	1	85,00	85,00
Reposición de gomas	1	35,00	35,00
Ajuste de pernos	2	8,50	17,00
TOTAL	4	128,50	137,00

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

En este caso, las averías registradas corresponden principalmente a fallas de baja severidad, pero de aparición recurrente, como el ajuste de pernos 2 eventos anuales, que, si bien representan tiempos de inactividad reducidos 17 minutos, afectan la

continuidad del proceso por su frecuencia. Por otro lado, la reposición de gomas 35 minutos y el cambio de mallas 85 minutos suman paradas adicionales que, aunque menos frecuentes, demandan mayor tiempo de intervención. En total, estas averías acumulan 137 minutos de inactividad anual, lo cual, aunque no representa un impacto crítico, sí evidencia la necesidad de fortalecer actividades preventivas periódicas para evitar su repetición y garantizar mayor disponibilidad operativa.

Cintas transportadoras

Tabla 4.8

Datos promedios cintas transportadoras

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Corte de las cintas	8	89,60	716,80
Ruptura de la correa	1	121,00	121,00
TOTAL	9	210,60	837,80

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El corte de cintas, con 8 ocurrencias anuales, representa en dos averías más recurrentes y de impacto en la planta, acumulando un total de 837,80 minutos de inactividad anual. Esta frecuencia elevada y el tiempo promedio de parada por evento 210,60 minutos evidencian que se trata de una falla crítica para la continuidad operativa. El origen suele estar asociado al desgaste prematuro de las cintas por sobrecarga, desalineación y como también la ruptura de las correas por el tiempo que se encuentran a la intemperie. La magnitud de esta avería resalta la necesidad de implementar un plan de inspección periódica, reforzar las rutinas de alineación y control de tensión, así como asegurar la disponibilidad de repuestos para reducir tiempos de parada no programada.

Tabla 4.9

Tabla resumen

N°	Equipo	Averías promedio (año)	Tiempo promedio de parada por falla (min/día)	Tiempo promedio anual de paradas por fallas (min/año)
1	Criba Vibratoria 3 niveles	25	1.126,60	5.273,80
2	Molino impacto	16	311,20	2.704,00
3	Lavadora de arena	2	252,00	504,00
4	Tomillos lavadores de arena	1	270,00	270,00
5	Tolva 1 (mayor vol.)	1	280,00	280,00
6	Tolva 2 (menor vol.)	1	125,00	125,00
7	Criba Vibratoria 1 nivel	4	128,50	137,00
8	Cintas transportadoras	9	210,60	837,80
TOTAL		59	2.703,90	10.131,60

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

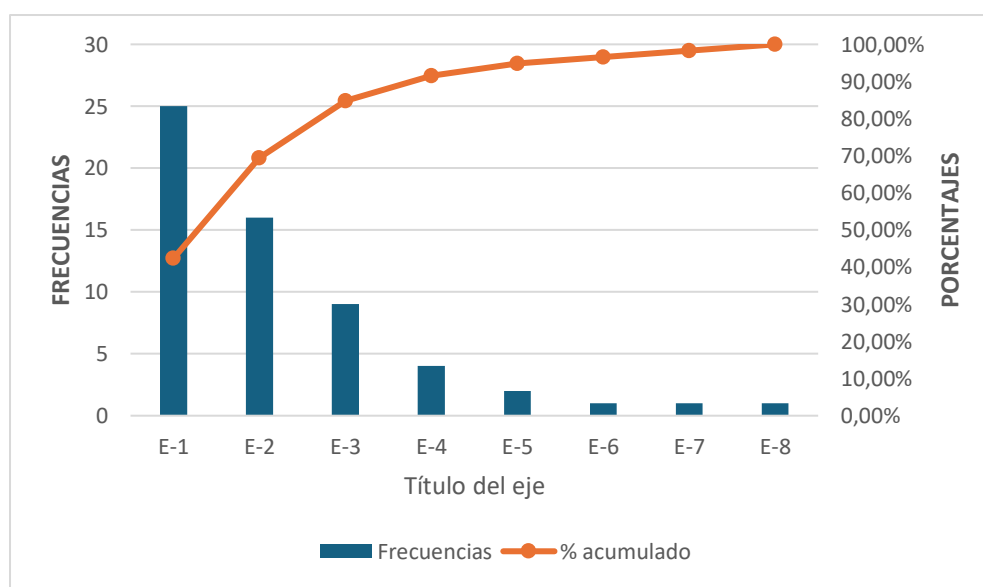
El análisis de la tabla muestra que las averías más frecuentes y con mayor tiempo de parada se concentran en la criba vibratoria de tres niveles, el molino de impacto y las cintas transportadoras, los cuales representan los equipos más críticos dentro del proceso. Estos equipos generan la mayor pérdida de tiempo productivo anual, lo que resalta la necesidad de priorizar su mantenimiento preventivo.

4.4. Selección de equipos críticos mediante el diagrama de Pareto

La selección de equipos críticos mediante el diagrama de Pareto permite identificar cuáles son los equipos que generan la mayor cantidad de fallas y, por ende, representan un mayor impacto en la disponibilidad de la planta. Este análisis se basa en el principio 80/20, que establece que un pequeño número de causas concentra la mayor parte de los problemas. En este caso, se clasificaron los equipos según la frecuencia de averías, calculando su porcentaje individual y acumulado para determinar los que requieren mayor atención dentro del plan de mantenimiento.

Tabla 4.10*Frecuencia de averías de los equipos de la planta*

N°	Equipos	Frecuencias	%	Acumulado	% acumulado
E-1	Criba Vibratoria 3 niveles	25	0,42	25	0,42
E-2	Molino impacto	16	0,27	41	0,69
E-3	Cintas transportadoras	9	0,15	50	0,85
E-4	Criba Vibratoria 1 nivel	4	0,07	54	0,92
E-5	Lavadora de arena	2	0,03	56	0,95
E-6	Tornillos lavadores	1	0,02	57	0,97
E-7	Tolva 1 (mayor vol.)	1	0,02	58	0,98
E-8	Tolva 2 (menor vol.)	1	0,02	59	1,00
TOTAL		59			

Fuente: Planta de Áridos Cuellar**Elaboración:** Propia (2025)**Figura 4.4***Diagrama de Pareto de averías de los equipos de la planta***Fuente:** Planta de Áridos Cuellar**Elaboración:** Propia (2025)

El diagrama de Pareto evidencia que las fallas se concentran principalmente en la criba vibratoria de tres niveles (E-1), el molino de impacto (E-2) y las cintas transportadoras (E-3), que en conjunto representan aproximadamente el 85,00% de las averías totales. Esto significa que la mayor parte de la producción perdida y de los costos asociados a paradas se originan en estos tres equipos, por lo que deben ser considerados como equipos críticos dentro de la planta. El resto de los equipos, aunque también presentan fallas, tienen una incidencia menor.

4.5. Descripción de los equipos seleccionados

En el presente proyecto se seleccionaron como equipos críticos la criba vibratoria y el molino de impacto, debido a su participación directa en el proceso de clasificación y reducción de los materiales. Por lo tanto, Ambos equipos fueron priorizados a partir del análisis de criticidad preliminar, basado en la frecuencia de fallas, tiempo promedio de parada por falla e impacto económico.

En la siguiente ficha se enfoca en la descripción de los equipos críticos para obtener parte de los productos finales que ofrece la planta de Áridos Cuellar.

Tabla 4.11

Ficha técnica descripción Criba de 3 niveles

CRIBA DE 3 NIVELES	
	Ficha técnica descripción del equipo
Modelo	ECOCLAS ZC 1540 – 1540/3
Dimensiones	309 x 128 x 87 cm

Potencia	Motor de 12,5 CV a 1400 RPM con transmisión mediante 3 correas B85 al excéntrico del eje.
Capacidad	Hasta 150 Tn/h (en función a la granulometría y la frecuencia de oscilación).
Regador (2)	Termofusión de 2" – Bomba de 4 CV; 550 l/min

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La criba vibratoria es esencial en el proceso de clasificación granulométrica de los áridos. Su correcta operación garantiza la calidad del producto final y el cumplimiento de especificaciones del cliente. Las fallas en este equipo provocan interrupciones en la línea de producción y acumulación de material sin clasificar, afectando directamente la continuidad operativa. Su alta frecuencia de uso y exposición al desgaste justifican su selección como equipo crítico dentro del plan de mantenimiento.

Tabla 4.12

Ficha técnica descripción del Molino de impacto

MOLINO DE IMPACTO	
 Ficha técnica descripción del equipo	
Modelo	AREMAR I T
Boca de entrada (mm)	200 x 1080

Peso (Kg)	10000
Tamaño Alimentación (mm)	70/80
Potencia (CV)	240/340
Producción (Tn/h)	220 - 300

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El molino de impacto cumple una función central en la etapa de trituración secundaria, permitiendo la reducción del material a tamaños específicos requeridos para los distintos productos. Es un equipo sometido a fuertes cargas mecánicas y desgaste por impacto constante, lo que lo hace vulnerable a fallas que pueden generar paradas prolongadas y elevados costos de reparación. Su criticidad se basa en su impacto directo sobre el rendimiento global de la planta y la eficiencia del proceso productivo.

Tabla 4.13

Ficha técnica descripción del Cinta transportadora

CINTA TRANSPORTADORA	
	
Ficha técnica descripción del equipo	
Ancho (mm)	500, lisa, montada sobre tríos conductores
Largo (mm)	11500
Velocidad (m/seg)	0,75 a 1,8
Potencia (CV)	10

Producción (Tn/h)	400
-------------------	-----

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La cinta transportadora cumple una función esencial en la etapa de movilización y alimentación del material dentro de la planta, asegurando la continuidad del flujo hacia los diferentes equipos de proceso. Al estar en operación constante, se encuentra expuesta a esfuerzos mecánicos, desgaste por fricción y posibles desalineaciones que pueden ocasionar fallas o roturas en la banda. Su criticidad radica en que una detención inesperada interrumpe de manera inmediata la cadena de producción, generando tiempos de inactividad y pérdidas significativas.

4.6. Cursograma analítico del proceso de mantenimiento

El cursograma analítico del proceso de mantenimiento permite representar de manera ordenada y visual cada una de las actividades involucradas en la atención de fallas y paradas inesperadas del equipo. A través de símbolos normalizados se identifican las operaciones, inspecciones, transportes, demoras y almacenajes, lo que facilita comprender el flujo de trabajo, el tiempo requerido y los puntos críticos del proceso. Este recurso constituye una herramienta esencial para la optimización del mantenimiento, ya que evidencia oportunidades de mejora en la gestión de recursos y en la reducción de tiempos improductivos. Para más detalles ver anexo 1.

4.6.1. Criba vibratoria de tres niveles

Figura 4.5

Cursograma analítico del proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles

CURSOGRAMA ANALÍTICO DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE LA CRIBA DE TRES NIVELES									
Hoja N° ____ 1 ____ De: ____ Diagrama N°: ____ 1 ____				Operar:	X	Mater.		Maqui.	
Proceso: Elaboración de áridos				RESUMEN					
Fecha:				SÍMBOLO	ACTIVIDAD				Act.
El estudio Inicia:					Operación				15
Método: Actual: __X__ Propuesto: ____					Transporte				2
Equipo: Criba vibratoria de tres niveles					Inspección				4
Nombre del operario:					Espera				2
Elaborado por: Martinez Maria Fernanda					Almacenaje				0
				Total de Actividades realizadas					23
				Cantidad de veces por ejecución					102,0
				Tiempo del proceso (min)					1126,6
NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y PARADAS INESPERADAS	Tiempo del proceso (min)	Cantidad de veces por ejecución	SÍMBOLOS PROCESOS					
									
1	Verificación de disponibilidad de herramientas y repuestos	30,0	2						
2	Inspección de la caja reductora (nivel de aceite)	10,0	1						
3	Inspección del sistema de tuberías de agua (flujo y limpieza de obstrucciones)	15,3	1						
4	Preparación y traslado de grúa para desmontaje de la criba	30,2	1						
5	Desmontaje de la criba vibratoria con grúa	20,4	1						
6	Aflojado de pernos con llave neumática	85,0	70						
7	Retiro de perfiles de sujeción y mallas (grava, gravilla, arena)	25,0	3						
8	Limpieza integral de la estructura de la criba	27,5	1						
9	Cortar gomas para cambiar en el equipo	51,0	1						
10	Verificación de los 70 pernos (clasificación de aptos/no aptos)	30,0	1						
11	Compra de pernos faltantes	35,0	1						
12	Soldadura de la malla arenera (unión de secciones)	60,0	1						
13	Reposicion de gomas por riel	27,0	9						
14	Reposición de gomas junto a los pernos	60,0	1						
15	Cambio de la malla para arena	150,0	1						
16	Asegurar la malla en el centro del equipo	55,0	1						
17	Cambio de la malla para gravilla	100,2	1						
18	Asegurar la malla en el centro del equipo	40,0	1						
19	Cambio de la malla para grava	60,0	1						
20	Asegurar la malla en el centro del equipo	30,0	1						
21	Montaje de la criba vibratoria en su estructura con grúa	45,0	1						
22	Revienta la correa de la criba	140,0	1						
Tiempo Minutos:		1126,6	102,0						

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El cursograma analítico elaborado muestra que el proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles se compone de una secuencia de operaciones e inspecciones que demandan una coordinación precisa para evitar demoras prolongadas. A partir del análisis de los tiempos asignados a cada actividad, se observa que las etapas críticas corresponden principalmente a la inspección del daño y la ejecución de las reparaciones, ya que concentran la mayor inversión de tiempo y recursos. Asimismo, en la presente figura, permite identificar posibles puntos de espera o acumulación que, de no gestionarse adecuadamente, pueden retrasar la reincorporación del equipo a la producción.

4.6.2. Molino de impacto

Figura 4.6

Cursograma analítico del proceso de mantenimiento del molino de impacto

CURSOGRAMA ANALÍTICO DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DEL MOLINO DE IMPACTO										
Hoja N° __1__ De: __ __ Diagrama N°: __1__				Operar.	X	Mater.		Maqui.		
Proceso: Elaboración de áridos				RESUMEN						
Fecha:				SÍMBOLO	ACTIVIDAD				Act.	
El estudio Inicia:					Operación				6	
Método: Actual: __X__ Propuesto: __ __					Transporte				0	
Equipo: Molino de impacto					Inspección				2	
Nombre del operario:					Espera				0	
Elaborado por: Martinez Maria Fernanda					Almacenaje				0	
				Total de Actividades realizadas					8	
				Cantidad de veces por ejecución					8,0	
				Tiempo del proceso (min)					311,2	
NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y PARADAS INESPERADAS			Tiempo del proceso (min)	Cantidad de veces por ejecución	SÍMBOLOS PROCESOS				
										
1	Apertura del molino (aflojar perno tipo abrazadera, retirar seguros, liberar puertas)			15,5	1	●				
2	Limpieza interna del equipo (retiro de polvo y residuos acumulados)			15,0	1	●				
3	Verificación del estado interno: paredes, chapaletas (martillos) y componentes			7,0	1			●		
4	Aflojado de pernos y desmontaje de paredes internas dañadas			30,0	1	●				
5	Reemplazo de paredes internas en caso de desgaste/fisuras			114,9	1	●				
6	Desmontaje y reemplazo de chapaletas (martillos)			105,8	1	●				
7	Verificación final de piezas reemplazadas y fijaciones			6,0	1			●		
8	Cierre del molino (alineación, colocación de seguros y mecanismos de fijación)			17,0	1	●				
Tiempo Minutos:				311,2	8,0					

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El cursograma analítico elaborado refleja que el proceso de mantenimiento del molino de impacto involucra una serie de operaciones e inspecciones que demandan una adecuada planificación y coordinación del personal de mantenimiento. El mayor consumo de tiempo se concentra en la inspección del daño y en la ejecución de las reparaciones, etapas críticas para garantizar la confiabilidad del equipo. Asimismo, se

observa que los puntos de espera y verificación influyen directamente en la duración total del proceso, por lo que representan oportunidades para mejorar la eficiencia operativa. A sí mismo, en la figura permite identificar posibles redundancias o retrasos que, de no atenderse, prolongan la indisponibilidad del molino e incrementan el impacto económico de la parada.

4.6.3. Cinta transportadora

Figura 4.7

Cursograma analítico del proceso de mantenimiento de la cinta transportadora

CURSograma ANALÍTICO DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE LA CINTA TRANSPORTADORA								
Hoja N° ____1____ De: ____ Diagrama N°: ____1____			Operar.	X	Mater.			
					Maqui.			
Proceso: Elaboración de áridos			RESUMEN					
Fecha:			SÍMBOLO	ACTIVIDAD		Act.		
El estudio Inicia:				Operación		5		
Método: Actual: __X__ Propuesto: ____				Transporte		0		
Equipo: Cinta transportadora				Inspección		4		
Nombre del operario:				Espera		0		
Elaborado por: Martinez Maria Fernanda				Almacenaje		0		
			Total de Actividades realizadas			9		
			Cantidad de veces por ejecución			9,0		
			Tiempo del proceso (min)			210,6		
NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y PARADAS INESPERADAS	Tiempo del proceso (min)	Cantidad de veces por ejecución	SÍMBOLOS PROCESOS				
								
1	Limpieza en el área de trabajo: retirar restos de áridos y materiales que obstaculicen la reparación	18,0	1	●				
2	Inspección del daño: identificación del tipo de corte (transversal, longitudinal o irregular)	10,0	1			●		
3	Evaluación de magnitud reparación con grapas mecánicas	5,0	1			●		
4	Reparación de la banda: colocación de grapas mecánicas y remache en el tramo afectado	30,0	1	●				
5	Verificación de alineación de poleas y rodillos	57,0	1			●		
6	Fallas en la correa	76,0	1	●				
7	Ajuste de la tensión de la banda según especificaciones	7,0	1	●				
8	Eliminación de material atrapado que pueda generar nuevos cortes	6,0	1	●				
9	Verificación final del desplazamiento uniforme y seguro de la banda	1,6	1			●		
Tiempo Minutos:		210,6	9,0					

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

En la figura, muestra que el proceso involucra diferentes etapas que combinan inspección, verificación y ejecución de tareas técnicas. Los mayores tiempos se concentran en la revisión del estado de la banda y los componentes mecánicos, así como en las labores de ajuste y reparación, lo que evidencia la importancia de contar con un plan de mantenimiento preventivo que minimice estas interrupciones.

La representación evidencia también la presencia de momentos de verificación que, si bien son necesarios para asegurar la calidad de la intervención, pueden convertirse en cuellos de botella si no se gestionan de manera adecuada. Estos aspectos representan oportunidades para optimizar el uso de recursos y reducir la duración de la parada del equipo.

4.7. Descripción del proceso de mantenimiento actual de los equipos críticos

4.7.1. Proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles

El proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles en la planta de áridos “Cuellar” se lleva a cabo tiene como objetivo asegurar la continuidad operativa del equipo y garantizar la calidad del producto clasificado.

Herramientas y repuestos: Antes de iniciar cualquier actividad de mantenimiento, se debe asegurar la disponibilidad previa de al menos el 80% de las herramientas y repuestos necesarios, con el fin de evitar interrupciones durante la intervención y garantizar la continuidad del proceso.

Tabla 4.14*Herramientas y repuestos de la criba de tres niveles*

	Categoría	Descripción	Cantidad por avería actual
Criba vibratoria de 3 niveles	Herramientas necesarias	Llave neumática	1 unidad
		Extractor de engranajes o rodamientos	1 unidad
		Martillo	1 unidad
		Destornilladores planos y de estrella	1 set completo
		Espátulas	1 unidad
		Calibrador	1 unidad
		Escobilla	1 unidad
		Soldador	1 unidad
		Metro	1 unidad
		Amoladora	1 unidad
	Repuestos requeridos	Malla de grava	1 unidad
		Sujeción de gomas de largo tramo	2 unidades
		Rieles de goma	5 unidades
		Malla de gravilla	1 unidad
		Malla de arena	1 unidad
		Pernos	5 docenas
		Sujeción de gomas de corto tramo	60 unidades
		Correa de distribución	1 unidades

Fuente: Planta de Áridos Cuellar**Elaboración:** Propia (2025)

La tabla presentada detalla de manera organizada las herramientas necesarias y los repuestos requeridos para la atención de averías en la criba vibratoria de 3 niveles. Se observa que el conjunto de herramientas listadas responde a las labores habituales de desmontaje, ajuste, soldadura, limpieza y verificación dimensional, lo que asegura una correcta ejecución de las tareas de mantenimiento. Por otro lado, los repuestos señalados se corresponden con los elementos de mayor desgaste y probabilidad de falla, tales como las mallas de diferentes granulometrías, rieles y sujeciones de goma, además de componentes de transmisión como la correa de distribución.

Inspección de la caja reductora y del sistema de tuberías de agua: Durante la revisión, se debe verificar el nivel y condición del aceite de la caja reductora. En caso de deficiencia, se procederá al rellenado o cambio del lubricante, y si se detectan engranajes dañados o rotos, se deben reemplazar inmediatamente para evitar fallas mayores.

Asimismo, las tuberías de agua deben ser inspeccionadas para asegurar su flujo libre; se deben limpiar en caso de obstrucciones causadas por acumulación de polvo, sedimentos u otros residuos que afecten la eficiencia del sistema de lavado.

Desmontaje de la criba vibratoria: Para ejecutar esta actividad, se requiere el uso de una grúa de elevación que permita descender la criba a un sector accesible, donde se pueda realizar con mayor seguridad y facilidad el reemplazo de mallas, el ajuste o cambio de pernos desgastados, así como la revisión y reposición de las gomas de sujeción.

Aflojado de pernos: Utilizando una llave neumática (aflojador de pernos de aire), se procede a aflojar los pernos de fijación de la criba, los cuales aseguran los perfiles de sujeción que mantienen las mallas en posición. Este paso es necesario para permitir el desmontaje seguro de las mallas y su posterior reemplazo.

Retiro de perfiles de sujeción y mallas: Una vez retirados los pernos, se procede a extraer los dos perfiles de sujeción que fijan la primera malla (de grava). A continuación, se retiran cuidadosamente los rieles de goma ubicados por debajo de esta malla. Para desmontar la segunda malla, se debe verificar que no existan elementos adicionales de sujeción (como alambres, amarres o fijaciones improvisadas) que puedan impedir su liberación.

El mismo procedimiento se repite para las siguientes mallas correspondientes a gravilla y arena, asegurando que cada una se libere completamente antes de su reemplazo o mantenimiento.

Limpieza de la criba: Una vez retiradas todas las mallas y componentes asociados, se realiza la limpieza integral de la estructura del equipo, eliminando residuos acumulados de material procesado, polvo y grasa, con el fin de preparar adecuadamente la superficie para la instalación de nuevos elementos, en caso de ser necesarios.

Verificación de pernos: Se debe realizar una inspección visual y mecánica detallada de los 70 pernos que conforman el ensamblaje del equipo. Aquellos que presenten desgaste, deformación o pérdida de rosca serán clasificados como no aptos y separados de los que aún se encuentran en condiciones operativas adecuadas, a fin de proceder con su reemplazo o reutilización según corresponda.

Soldadura de la malla arenera: La malla arenera suministrada de fábrica se presenta en dos secciones que, individualmente, no cubren la longitud total del equipo. Por ello, es necesario unir ambas partes mediante soldadura, con el objetivo de formar una sola pieza continua que se ajuste correctamente al área de cribado, evitando el uso de tramos separados y facilitando su instalación y funcionamiento.

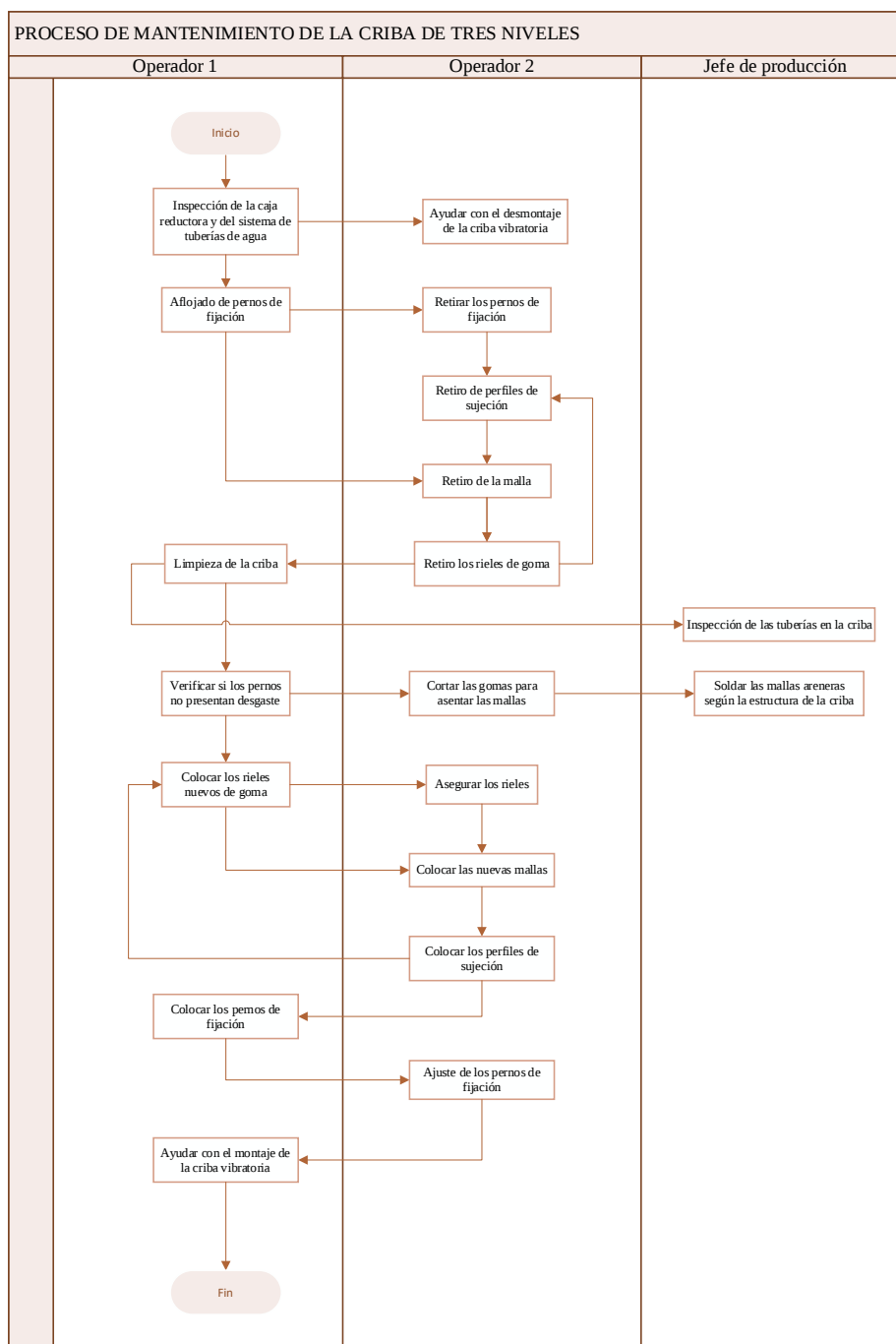
Armado de la criba: En esta etapa final, se procede al ensamblaje de la criba, colocando todas las piezas nuevas, reparadas en su posición correspondiente, asegurando el correcto ajuste de mallas, pernos, gomas y demás componentes.

Montaje de la criba vibratoria: Una vez completado el armado, se realiza el montaje del equipo en su estructura de operación, utilizando una grúa de elevación para posicionarlo cuidadosamente en su lugar de trabajo.

4.7.2. Diagrama de flujo del proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles

Figura 4.8

Proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles



Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

4.7.3. Proceso de mantenimiento del molino de impacto

Herramientas y repuestos

Tabla 4.15

Herramientas y repuestos del molino de impacto

	Categoría	Descripción	Cantidad por avería actual
Molino de impacto	Herramientas necesarias	Llave neumática	1 unidad
		Seguros mecánicos	1 unidad
		Martillo	1 unidad
		Destornilladores planos y de estrella	1 set completo
		Calibrador	1 unidad
		Escobilla	1 unidad
		Taladro percutor	1 unidad
		Amoladora	1 unidad
		Metro	1 unidad
	Repuestos requeridos	Placa interna	5 unidad
		Chapaletas	2 unidades
		Pernos	1 unidades

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La tabla presentada reúne de forma estructurada las herramientas y repuestos esenciales para realizar labores de mantenimiento correctivo en el molino de impacto. Las herramientas listadas corresponden a operaciones críticas como desmontaje, ajuste, perforación, limpieza y verificación dimensional, todas necesarias para garantizar la precisión y seguridad en cada intervención.

En cuanto a los repuestos, se destacan las placas internas y chapaletas, que constituyen los componentes de mayor desgaste debido a la exposición continua a impactos y abrasión. La definición de cantidades por avería actual, como en el caso de las cinco placas internas y las dos chapaletas, asegura que el stock mínimo esté alineado con la realidad operativa del equipo, evitando tiempos muertos por falta de suministros.

Apertura del molino de impacto: Para iniciar el proceso de mantenimiento del molino, es necesario contar con una llave neumática específica diseñada para aflojar el perno tipo abrazadera que mantiene el seguro principal del equipo. Una vez aflojado este perno, se procede a retirar el seguro y, posteriormente, se utilizan picaportes para liberar las puertas del molino.

Después de este paso, se extrae un segundo seguro, que consiste en una palanca de apertura. Dado que las puertas están patentadas y ajustadas a presión, es necesario aplicar fuerza sobre la palanca (generalmente mediante golpes controlados) para lograr la apertura completa de las puertas y acceder al interior del equipo.

Limpieza interna del equipo: Una vez que el equipo ha sido abierto, se procede a realizar una limpieza exhaustiva de la parte interna, eliminando el polvo acumulado, residuos de material y otros elementos que puedan interferir en la inspección. Esta limpieza es fundamental para permitir una evaluación precisa del estado de las piezas, facilitando la identificación de posibles desgastes, fisuras o roturas en los componentes del molino.

Verificación del estado del molino de impacto: Se realiza una inspección técnica de las paredes internas del molino, evaluando el nivel de desgaste por abrasión e impacto generado por el material procesado. Asimismo, se verifica el estado de las chapaletas (martillos), identificando posibles roturas, desgastes o aflojamiento, con el fin de determinar la necesidad de reemplazo.

Cambio de paredes internas y chapaletas: Luego del proceso de verificación técnica, si se detectan roturas, fisuras o desgastes significativos en las paredes internas del molino, se debe proceder al aflojado de los pernos de sujeción que fijan dichas estructuras, para permitir su desmontaje y posterior reemplazo.

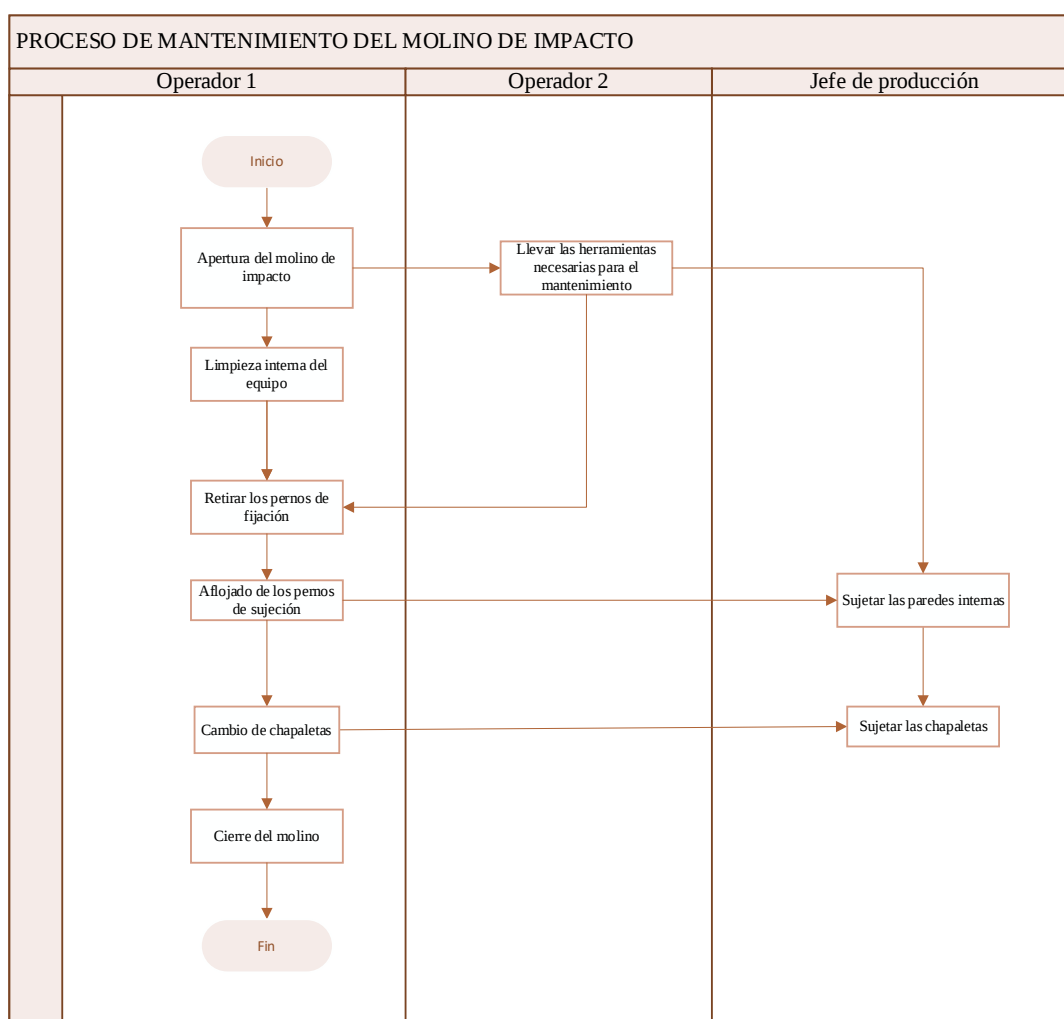
En el caso de las chapaletas o martillos, si se observa desgaste excesivo o pérdida de eficiencia en la trituración, se deben liberar los seguros mecánicos correspondientes para efectuar el cambio de estas piezas de forma segura y precisa.

Cierre del molino: Una vez completadas todas las tareas de inspección y mantenimiento interno, se procede al cierre del molino, asegurando que todas las piezas se encuentren correctamente alineadas y ensambladas. Posteriormente, se colocan con precisión los seguros y mecanismos de fijación correspondientes.

4.7.4. Diagrama de flujo del proceso de mantenimiento del molino de impacto

Figura 4.9

Proceso de mantenimiento del molino de impacto



Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

4.7.5. Proceso de mantenimiento la cinta transportadora

Herramientas y repuestos

Tabla 4.16

Herramientas y repuestos de la cinta transportadora

	Categoría	Descripción	Cantidad por avería actual
Cinta transportadora	Herramientas necesarias	Juego de llaves	1 set completo
		Llave ajustable (Stillson)	1 unidad
		Destornilladores planos y de estrella	1 set completo
		Escobilla	1 unidad
		Metro	1 unidad
		Amoladora	1 unidad
	Repuestos requeridos	Banda transportadora	1 unidad
		Grapas	4 unidades
		Tornillería (pernos, tuercas, arandelas)	Stock variado
		Correa de distribución	1 unidad

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La tabla expone de manera organizada las herramientas y repuestos fundamentales para el mantenimiento correctivo de la cinta transportadora, equipo clave en la continuidad del flujo de producción de áridos. Las herramientas seleccionadas, como el juego de llaves, la llave ajustable y la amoladora, permiten efectuar con precisión tareas de desmontaje, ajuste, corte y sustitución de componentes, mientras que instrumentos básicos como el metro y la escobilla aseguran una adecuada medición y limpieza del área de trabajo, factores esenciales para una reparación segura y eficiente.

En cuanto a los repuestos, la banda transportadora se identifica como el elemento principal a reemplazar en caso de cortes o desgastes críticos, mientras que las grapas

cumplen la función de garantizar reparaciones rápidas y provisionales, reduciendo tiempos de inactividad.

Limpieza en el área de trabajo: Para iniciar el proceso de mantenimiento de la cinta transportadora, es necesario retirar los restos de áridos y cualquier material que pueda dificultar la reparación o comprometer la seguridad de la operación.

Inspección del daño: Es fundamental identificar el tipo de corte que presenta la banda, ya sea transversal, longitudinal o un rasgado irregular. Este diagnóstico inicial permite evaluar la magnitud de la afectación y definir si la reparación debe realizarse de manera temporal, mediante soluciones rápidas como grapas del tramo afectado.

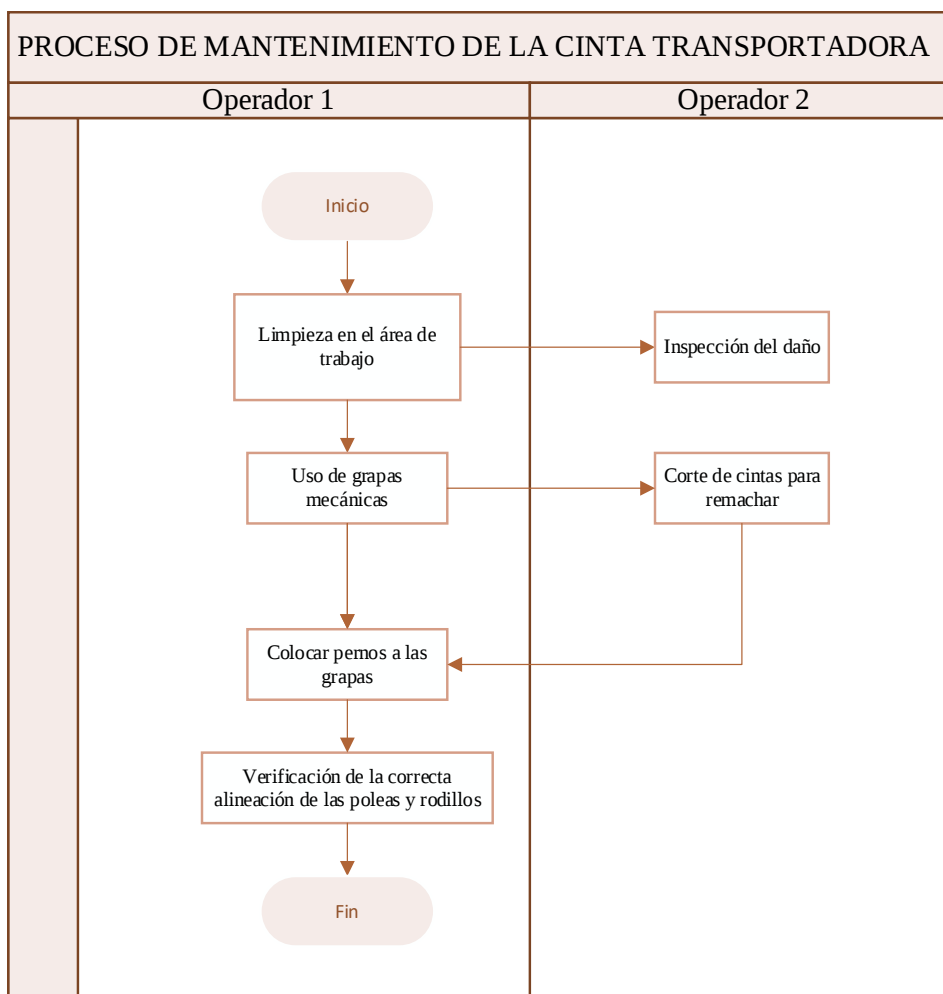
Reparación: En casos de emergencia o cuando el corte es de gran tamaño, se recurre al uso de grapas mecánicas de unión, junto a pernos se efectúa un remache en la cinta.

Verificación: Posterior a la reparación de la cinta transportadora, es fundamental comprobar la correcta alineación de las poleas y rodillos para evitar desvíos en la banda. Asimismo, se debe ajustar la tensión de la misma de acuerdo con las especificaciones técnicas, garantizando un desplazamiento uniforme y seguro. Finalmente, es importante eliminar cualquier material atrapado en la estructura que pueda ocasionar nuevos cortes o daños prematuros, asegurando así la confiabilidad operativa del equipo.

4.7.6. Diagrama de flujo del proceso de mantenimiento la cinta transportadora

Figura 4.10

Proceso de mantenimiento de la cinta transportadora



Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

4.8. Cálculo de la producción

La producción del diagnóstico actual se evalúa el impacto productivo de las fallas en los equipos críticos. A sí mismo, se considera las entrevistas y las fichas de los equipos correspondientes para obtener datos según equipo.

Criba vibratoria de tres niveles

Capacidad de producción de hasta 150 Tn/h, dependiendo de la granulometría y frecuencia de oscilación. Dato obtenido de la ficha técnica del equipo.

Considerando un turno operativo estándar de 11,50 horas diarias, y un rendimiento de actividad real del 75,33% este dato se obtiene del anexo 3.

Formula

$$\text{Capacidad nominal} = \frac{\text{Capacidad de producción}}{\text{Tiempo de producción}}$$

$$\text{Producción real} = \text{Capacidad nominal} \times \%$$

$$\text{Capacidad nominal} = \frac{150 \text{ toneladas}}{1 \text{ hora}} \times \frac{11,50 \text{ horas}}{1 \text{ día}} = 1.725,00 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}}$$

$$\text{Producción real al } 75,33\% = 1.725,00 \times 0,7533 = 1.299,44 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}}$$

El cálculo realizado muestra que la capacidad nominal del equipo es de 1.725,00 toneladas por día, considerando una capacidad de producción de 150 toneladas por hora y un tiempo efectivo de operación de 11,50 horas diarias. Sin embargo, al aplicar un factor de rendimiento del 75,33%, que contempla interrupciones operativas, mantenimientos programados, imprevistos y pérdidas inherentes al proceso, la producción real esperada se reduce a 1.299,44 toneladas por día.

Molino de impacto

Rendimiento 86,67%, se obtiene del anexo 4.

$$\text{Capacidad nominal} = \frac{300 \text{ toneladas}}{1 \text{ hora}} \times \frac{11,50 \text{ horas}}{1 \text{ día}} = 3.450,00 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}}$$

$$\text{Producción real al } 86,67\% = 3.450,00 \times 0,8667 = 2.990,12 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}}$$

El análisis de capacidad refleja que, bajo condiciones nominales, la planta alcanza una producción teórica de 3.450.00 toneladas por día, calculada a partir de una capacidad horaria de 300 toneladas y un rendimiento de operación mencionado anteriormente. No obstante, al incorporar el factor de rendimiento del 86,67%, que contempla paradas operativas, mantenimientos preventivos y correctivos, así como pérdidas propias del proceso, la producción real efectiva se ajusta a 2.990,12 toneladas por día.

Cinta transportadora

Rendimiento 89,00%, se obtiene del anexo 5.

$$\text{Capacidad nominal} = \frac{400 \text{ toneladas}}{1 \text{ hora}} \times \frac{11,50 \text{ horas}}{1 \text{ día}} = 4.600,00 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}}$$

$$\text{Producción real al 89,00\%} = 4.600,00 \times 0,8900 = 4.094,00 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}}$$

El cálculo realizado permite establecer la capacidad operativa diaria de la planta a partir de su rendimiento nominal y del tiempo efectivo de trabajo. Inicialmente, la cinta transportadora y los equipos asociados tienen una capacidad nominal de 400 toneladas por hora, lo que proyectado a un turno de un tiempo ya mencionado representa una capacidad teórica de 4.600,00 toneladas/día. Sin embargo, considerando un factor de rendimiento del 89,13%, que contempla paradas técnicas, mantenimientos menores y pérdidas inevitables en el proceso, la producción real efectiva se reduce a aproximadamente 4.100,00 toneladas/día.

4.9. Gestión actual de repuestos

La gestión de repuestos en mantenimiento es un proceso estratégico que busca asegurar la disponibilidad de los insumos necesarios para mantener la continuidad operativa de los equipos e instalaciones. Su importancia radica en evitar tiempos de inactividad por falta de repuestos, optimizar los costos de inventario y garantizar la eficiencia en la ejecución de las labores de mantenimiento preventivo y correctivo. Una adecuada gestión implica clasificar, planificar y controlar los niveles de stock según la criticidad

de cada repuesto, su consumo histórico y el tiempo de entrega de los proveedores, con el fin de lograr un equilibrio entre disponibilidad y costos de almacenamiento.

Tabla 4.17

Matriz de criticidad y tiempos de entrega de repuestos actuales

Equipos	Repuestos	Consumo prom. (unidades/parada)	Unidad	Tiempo entrega prom. (días)	Criticidad
Molino de impacto	Chapaletas	2	Pieza	20	Alta (A)
Molino de impacto	Placa interna	6	Pieza	18	Alta (A)
Criba vibratoria 3N	Mallas areneras	2	Mallas	7	Alta (A)
Cintas transportadoras	Bandas	1	Banda	7	Alta (A)
Criba vibratoria 3N	Correa de distribución	3	Correa	3	Alta (A)
Cintas transportadoras	Correa de distribución	3	Correa	3	Alta (A)
Criba vibratoria 3N	Fierros de construcción (D=8)	25	Barras	2	Media (B)
Criba vibratoria 3N	Fierros de construcción (D=10)	20	Barras	2	Media (B)
Criba vibratoria 3N	Goma (caucho sintético)	7	Metros	1	Media (B)
Cintas transportadoras	Grapas	1	Docena	1	Media (B)
Criba vibratoria 3N	Electrodos	6	Kg	1	Baja (C)
Todos los equipos	Aceite	18	Litros	1	Baja (C)
Todos los equipos	Grasa	18	Kg	1	Baja (C)
Todos los equipos	Pernos	5	Docena	1	Baja (C)

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El análisis de la gestión de repuestos para los equipos críticos de la planta evidencia la necesidad de implementar un sistema de control de inventarios basado en la criticidad de los componentes. Donde:

Categoría A: repuestos críticos que paran la planta si faltan.

Categoría B: necesarios, pero con alternativas rápidas.

Categoría C: consumibles o fáciles de conseguir en el mercado local.

Los repuestos clasificados como Alta Criticidad (A), como las mallas areneras, chapaletas, placas internas y correas de distribución, presentan tiempos de entrega prolongados (7-20 días) y consumos mensuales significativos, lo que los convierte en elementos estratégicos para el mantenimiento. Es prioritario establecer stocks de seguridad y puntos de reorden para estos ítems para evitar paradas productivas. Por otro lado, los repuestos de baja criticidad (C) como electrodos, aceite y grasa, al tener tiempos de entrega cortos (1 día) y alta rotación, pueden gestionarse con inventarios reducidos. La implementación de un sistema de gestión de repuestos categorizado permitirá optimizar la inversión en inventario, reducir el tiempo de respuesta en mantenimiento correctivo y mejorar la disponibilidad general de los equipos, contribuyendo directamente al aumento de la eficiencia global de la planta. Estos datos son obtenidos de la planta de áridos. Para más detalles ver anexo 2.

4.10. Indicadores KPI's y OEE actuales de los equipos críticos

El Overall Equipment Effectiveness (OEE), o Eficiencia Global de los Equipos, es un indicador de gestión utilizado en mantenimiento industrial para medir el desempeño real de los equipos productivos. Se obtiene combinando tres variables fundamentales: Disponibilidad (tiempo real de operación frente a las paradas por fallas), Rendimiento (producción alcanzada frente a la prevista) y Calidad (proporción de producción buena sobre la producción total). De esta forma, el OEE permite identificar pérdidas por fallas, bajas velocidades y defectos en el proceso.

4.10.1. Protocolo de medición del OEE actual

La determinación de la Eficiencia Global de los Equipos (OEE) actual, fue un proceso de análisis y estandarización de datos reconstruidos, esencial para establecer el punto de partida del diagnóstico y justificar la magnitud de la propuesta de mejora.

a) Ventana de tiempo de los datos de falla

El indicador OEE se calculó sobre una ventana de tiempo de once meses de operación, comprendida entre septiembre de 2024 y julio de 2025. Este periodo se seleccionó por ser la muestra más representativa de las fallas históricas de los equipos críticos.

La evidencia fuente para la medición de la Disponibilidad se origina en la Ficha de Registro de Intervención de Equipos (Anexo 1), la cual es el resultado directo del protocolo de estandarización y calidad de datos operacionales (Sección 1.5.6). Debido a la escasez de registros formales en la planta, esta ficha consolidó los datos mediante la reconstrucción y validación de eventos a través de entrevistas con los operadores, el jefe de producción y el gerente general.

En consecuencia, los datos utilizados en el Diagrama de Pareto (Figura 4.4) y posteriormente para el cálculo de la Disponibilidad son promedios de tiempos de parada extraídos de esta ficha reconstruida. Este proceso garantiza la trazabilidad de la información, ya que se define explícitamente el origen del dato numérico.

b) Supuestos operativos clave y paros planificados

El cálculo del OEE se realiza asumiendo los siguientes supuestos operativos, que reflejan las condiciones y prácticas de registro actuales de la planta:

Tiempo de operación disponible: Se estableció un turno operativo de 11,50 horas diarias.

Inclusión de paros planificados en la disponibilidad: Un supuesto crítico de esta línea base es que los paros planificados (como almuerzo) no fueron separados de los tiempos de avería en la documentación de la planta. Por lo tanto, los datos del Anexo 1 y del Diagrama de Pareto incluyen estos paros planificados dentro del tiempo total registrado, lo que afecta directamente el cálculo de la Disponibilidad. Esta práctica de registro, que no distingue adecuadamente entre paros por fallas y paros programados (un error de gestión documental), resulta en una Disponibilidad artificialmente baja o

incluso nula (como el 0% actual de la criba), pero es un reflejo fiel del estado operativo real que el proyecto busca transformar.

c) Protocolo de cálculo por componente del OEE

El OEE se descompone en tres variables, cada una obtenida a partir de una fuente de evidencia trazable:

La Disponibilidad (Tiempo Real de Operación frente a las Paradas por Fallas) se calculó utilizando los tiempos promedios de paradas por avería.

Los minutos de Paradas por avería para cada tipo de avería se basaron en los promedios anuales de los tiempos de paradas documentados en la Ficha de Registros (Anexo 1).

El Rendimiento (Producción Alcanzada frente a la Prevista) se basó en el cálculo de la productividad y la capacidad nominal:

Capacidad Nominal (Producción Prevista), se obtuvo de las fichas técnicas de cada equipo (Criba: 150 Tn/h; Molino: 220-300 Tn/h; Cinta: 400 Tn/h), las cuales establecen la capacidad máxima teórica. Por otro lado, se derivó del cálculo de la productividad, aplicando el rendimiento de actividad real, lo que incorpora las interrupciones operativas.

La Calidad (Proporción de Producción Buena sobre la Producción Total) se determinó a partir de los descartes, un dato que carecía de registro formal:

La tasa de descarte se obtuvo mediante información directa proporcionada por el jefe de producción. Por otro lado, la producción buena se obtuvo restando la tasa de descarte de la producción real, lo que generó valores constantes del 100% para equipos que no generan desperdicio directo (como el Molino de Impacto).

d) Límites operativos y reporte por equipo

El conjunto de valores obtenidos, reportados en las siguientes tablas 4.18, 4.19 y 4.20 y sus respectivos Anexos, establecen el límite operativo inferior del desempeño actual.

Equipo cuello de botella: La Criba Vibratoria de Tres Niveles se identifica como el equipo cuello de botella, dado que su capacidad nominal es la más baja (150 tn/h). Su OEE baseline para el reemplazo de mallas es del 0%, lo que subraya la criticidad de la inactividad.

4.10.2. Indicador OEE actual de la criba vibratoria de 3 niveles

Tabla 4.18

Indicador resumen de OEE actual de la criba vibratoria de 3 niveles

	Averías	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Calidad (%)	OEE
Criba vibratoria de 3 niveles	Reemplazo de mallas	0%			0%
	Tiempo de operación				
	Paradas por avería				
	Reposición de gomas				66%
	Tiempo de operación	87%	75,33%	100%	
	Paradas por avería				
	Revienta la correa de la criba				60%
	Tiempo de operación				
	Paradas por avería	80%			
	Ajuste de pernos				74%
	Tiempo de operación	99%			
	Paradas por avería				

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El análisis del OEE en la criba vibratoria de tres niveles permite evaluar cómo las distintas averías afectan la eficiencia global del equipo. En el caso del reemplazo de mallas, la eficiencia resultó en 0%, debido a que el tiempo de parada por esta avería superó al tiempo total de operación, lo que genera una disponibilidad negativa. Sin embargo, de acuerdo con la teoría, cualquier valor negativo se ajusta automáticamente

a 0%. Por otro lado, al considerar las demás averías registradas, la disponibilidad del equipo se mantuvo en niveles aceptables, alcanzando valores iguales o superiores al 80%. En cuanto al rendimiento, este se calculó comparando la producción real del equipo (113 toneladas/hora, convertidas a toneladas/día) con la producción prevista según la ficha técnica. Finalmente, respecto a la calidad, el producto alcanzó un 100%, ya que el cálculo se realizó a partir del descarte generado: la producción buena se obtuvo restando el descarte de la producción real. Por lo tanto, los resultados muestran que, excepto en el caso del ajuste de pernos, donde la eficiencia global alcanzó el 74%, el resto de las averías reducen significativamente la eficiencia del equipo. Esto evidencia la necesidad de reforzar las actividades de mantenimiento preventivo y la gestión de repuestos críticos. Para más detalles ver anexo 3.

4.10.3. Indicador OEE actual del molino de impacto

Tabla 4.19

Indicador resumen de OEE actual del molino de impacto

	Averías	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Calidad (%)	OEE
Molino de impacto	Desgaste o ruptura de las paredes de impacto	74%			64%
	Paradas por avería		86,67%	100%	
	Desgaste o ruptura de las chapaletas	81%			70%
	Paradas por avería				

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El análisis del OEE en el molino de impacto muestra eficiencias globales variadas del 64% y 70% esto según por el tipo de avería que tiene este equipo, con una calidad constante del 100%, ya que este equipo no genera desperdicio en su proceso de trituración. Con respecto al rendimiento, este se calculó comparando la producción real del equipo (260 toneladas/hora, convertidas a toneladas/día) con la producción prevista según la ficha técnica. Sin embargo, las averías relacionadas con el desgaste o ruptura

de las paredes de impacto y de las chapaletas afectan de manera significativa la disponibilidad (74% y 81%, respectivamente), lo que a su vez reduce el desempeño global del equipo. Estos resultados evidencian que, aunque el molino asegura un producto de calidad, las pérdidas de eficiencia se concentran principalmente en los tiempos de inactividad por mantenimiento correctivo, lo que refuerza la necesidad de fortalecer las estrategias de mantenimiento preventivo en sus componentes de mayor desgaste. Para más detalles ver anexo 4.

4.10.4. Indicador OEE actual de la cinta transportadora

Tabla 4.20

Indicador resumen de OEE actual de la cinta transportadora

	Averías	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Calidad (%)	OEE
Cintas transportadoras	Corte de las cintas	87%			77%
	Paradas por avería				
	Ruptura de la correa	82%	89,00%	100%	73%
	Paradas por avería				

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

El análisis de eficiencia (OEE) para las cintas transportadoras muestra un valor entre 73% y 77%, lo que indica un desempeño aceptable, pero con margen de mejora. La disponibilidad del 87% y el 82% refleja interrupciones significativas causadas principalmente por los cortes de las cintas, que generan un promedio de 89.6 minutos y ruptura de la correa, que tiene un promedio de 121 minutos de paradas no planificadas. Aunque el equipo mantiene un rendimiento del 89% y una calidad del 100% (al no generar desperdicios), las interrupciones recurrentes limitan su capacidad operativa. Estos resultados destacan la necesidad de implementar un programa de mantenimiento preventivo focalizado en el monitoreo y reemplazo proactivo de las cintas, así como la estandarización de procedimientos de reparación

rápida para reducir el MTTR y optimizar la disponibilidad. Para más detalles ver anexo 5.

4.10.5. Protocolo de cálculo y metodología de MTBF y MTTR actuales

La medición del MTBF (Confiabilidad) y MTTR (Mantenibilidad) se realizó mediante un cálculo determinístico para establecer el desempeño operativo de los equipos críticos.

a) Fórmulas, delimitación y muestreo del baseline

El MTBF y MTTR fueron calculados para establecer el *baseline* actual (Total anual actual) de los tres equipos críticos (Criba 3N, Molino de Impacto y Cintas Transportadoras).

Fórmulas utilizadas: La medición se realizó utilizando las fórmulas estándar de la gestión de mantenimiento, asegurando la consistencia en la evaluación del desempeño:

El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), indicador de confiabilidad, se obtuvo dividiendo el Tiempo total de operación entre la Cantidad de averías inesperadas registradas.

El Tiempo Medio Para Reparar (MTTR), indicador de mantenibilidad, se obtuvo dividiendo el Tiempo de paralización acumulado por averías inesperadas entre el Número de fallas o correctivos ocurridos.

Delimitación de fallas funcionales: Las fallas funcionales se delimitaron como aquellas averías inesperadas (mantenimiento correctivo) que resultaron en la parada repentina, parcial o total de las actividades operacionales de la planta. Estas paradas por avería son las que afectan directamente la Disponibilidad y se convierten en el factor clave del cálculo del MTTR. El registro de estas fallas se basó en la Taxonomía Ad Hoc desarrollada en la fase de diagnóstico (Sección 1.5.6), que codificó las descripciones narrativas de los registros históricos (Anexo 1) para agruparlas en

categorías cuantificables (Reemplazo de mallas, Desgaste o ruptura de las paredes de impacto).

Tamaño muestral y período de observación: El análisis del MTBF/MTTR actual se basó en una muestra total de 50 averías inesperadas registradas globalmente en los tres equipos críticos. El período de observación para la recolección de estos datos fue de 11 meses de operación, comprendido entre septiembre de 2024 y julio de 2025. Este horizonte temporal y el tamaño muestral proporcionaron la base para el cálculo MTBF/MTTR total de la línea de producción.

4.10.6. Indicadores MTBF y MTTR actuales

El MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) y el MTTR (Tiempo Medio Para Reparar) son indicadores clave de mantenimiento que permiten evaluar la confiabilidad y eficiencia de los equipos. El MTBF mide el tiempo promedio de operación entre fallas, reflejando la confiabilidad del equipo, mientras que el MTTR cuantifica el tiempo promedio requerido para restablecer su operación después de una falla, indicando la eficacia del proceso de mantenimiento. Juntos, estos indicadores proporcionan una visión integral del desempeño de los activos y son fundamentales para identificar oportunidades de mejora en la gestión de mantenimiento.

Tabla 4.21*Indicadores resúmenes actuales de MTBF y MTTR*

Equipos	Descripción	Promedio anual
Criba 3N	Cantidad de averías	25
	Tiempo de paradas por averías (min)	5.274,00
	MTBF* (min)	7.351,44
	MTBF* (hrs)	122,52
	MTTR* (min)	210,96
	MTTR* (hrs)	3,52
	Cantidad de averías	16
Molino de impacto	Tiempo de paradas por averías (min)	2.704,00
	MTBF* (min)	11.690,38
	MTBF* (hrs)	194,84
	MTTR* (min)	169,00
	MTTR* (hrs)	2,82
	Cantidad de averías	9
Cintas transportadoras	Tiempo de paradas por averías (min)	838,00
	MTBF* (min)	20.913,56
	MTBF* (hrs)	348,56
	MTTR* (min)	93,11
	MTTR* (hrs)	1,55
Total, de averías		50
Total, de Tiempo de paradas por averías (min)		8.816,00
MTBF (min)		11.208,68
MTBF (hrs)		186,81
MTTR (min)		176,32
MTTR (hrs)		2,94

Fuente: Planta de Áridos Cuellar**Elaboración:** Propia (2025)

El análisis de los indicadores anuales evidencia que los equipos críticos de la planta presentan una elevada incidencia de averías, acumulando un total de 50 fallas y generando 8.816 minutos de tiempo perdido por paradas no planificadas. La criba vibratoria de tres niveles es el equipo que concentra el mayor impacto, tanto por su alto número de averías como por los extensos tiempos de detención asociados. En contraste, las cintas transportadoras muestran menor frecuencia de fallas y tiempos de recuperación más cortos, lo que se refleja en un MTBF significativamente superior.

Los valores globales de MTBF y MTTR revelan un sistema con baja confiabilidad y mantenibilidad limitada, donde las fallas ocurren con frecuencia relativamente alta (MTBF de 186,81 horas) y requieren intervenciones prolongadas (MTTR de 2,94 horas en promedio). Estos resultados indican que la planta opera con una alta dependencia del mantenimiento correctivo, generando pérdidas de disponibilidad y afectando la estabilidad del proceso productivo. Para más detalles ver anexo 6.

CAPÍTULO V

5. PLAN DE MANTENIMIENTO

5.1. Plan de mantenimiento para equipos críticos

El **mantenimiento preventivo y programado** tiene como objetivo anticiparse a las fallas, reducir los tiempos de inactividad no planificados y prolongar la vida útil de los equipos críticos de la planta de áridos Cuéllar. Este enfoque combina las acciones basadas en condición (según las averías frecuentes detectadas en el diagnóstico) con las actividades calendarizadas en un plan estructurado de inspecciones y reemplazos.

El **mantenimiento correctivo de emergencia** está orientado a la rápida resolución de fallas inesperadas. Se debe diseñar un protocolo de respuesta rápida que incluya procedimientos detallados para el diagnóstico rápido de fallas. La rápida disponibilidad de repuestos críticos, como chapaletas y mallas, debe estar asegurada mediante un sistema de inventario eficiente.

El **mantenimiento Lean** se enfoca en la reducción de desperdicios y tiempos de inactividad. El uso de las metodologías Just-In-Time (JIT) y Single Minute Exchange of Die (SMED) permitirá mejorar la eficiencia y reducir costos.

JIT (Just-In-Time): Implementar un sistema de gestión de repuestos que permita la entrega de materiales justo cuando se necesiten. Esto implica contar con proveedores confiables para el suministro de repuestos críticos. SMED (Single Minute Exchange of Die): Aplicar SMED en el cambio de componentes como mallas y chapaletas para reducir el tiempo de parada de los equipos seleccionados. Por lo tanto, se debe capacitar al personal para realizar cambios rápidos de manera eficiente, utilizando herramientas especializadas y procesos estandarizados.

5.1.1. Plan de mantenimiento de la criba vibratoria de tres niveles

Tabla 5.1

Plan de mantenimiento de la criba vibratoria de tres niveles

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios						
			Llave neumática	Extractor	Juego de llaves	Grasa	Aceite	Checklist estandarizado	Equipos de medición de vibración
Preventivo y programado: Evitar paradas por desgaste y actividades planificadas.	Inspección para ajuste de pernos	Diaria (15 min/turno)	✓		✓			✓	✓
	Inspección de mallas							✓	
	Inspección de gomas							✓	
	Engrase	Semanal del equipo (≤ 20 min)				✓		✓	
	Cambio de mallas	Cada trimestre	✓	✓	✓			✓	
	Revisión de correas de transmisión	Semestre						✓	
	Caja de reductora			✓	✓		✓	✓	
	Limpieza profunda	Trimestral						✓	
	Sustitución de gomas de asiento	Trimestral		✓				✓	

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios				
			Mallas graveras pre ensambladas	Correas de repuesto	Herramientas	Checklist estandarizado	
Correctivo de Emergencia: Respuesta rápida.	Ruptura de malla gravera	Reemplazo inmediato	✓		✓	✓	
	Ruptura de correa			✓	✓	✓	

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios					
			críticos en stock JIT	Grúa disponible	Herramientas SMED	Manual de funciones	Manual de procedimientos	Instructivo
Lean (JIT + SMED) Reducción de desperdicios.	JIT (Gestión de Repuestos)	≤ 96 hrs. Para entregas			✓	✓		✓
	2 mallas areneras.		✓		✓		✓	
	1 juego de gomas de asiento y retención.		✓		✓		✓	
	2 correas.		✓		✓		✓	
	SMED (Cambio Rápido)				✓		✓	✓
	Preparar herramientas.							✓
	Estandarizar secuencia (con grúa).			✓				
	Capacitación.				✓	✓	✓	✓

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La tabla evidencia que el mantenimiento de la criba vibratoria requiere una combinación equilibrada entre inspecciones rutinarias, sustitución programada de

componentes y protocolos rápidos de respuesta ante averías. Asimismo, la incorporación de prácticas Lean, como el aseguramiento de repuestos críticos bajo un esquema JIT y la aplicación de la metodología SMED en los cambios de mallas, permite reducir el tiempo de parada y aumentar la eficiencia operativa. En conjunto, este plan no solo previene fallas críticas, sino que también establece una gestión estratégica de recursos que fortalece la confiabilidad de la planta de áridos.

5.1.2. Plan de mantenimiento del molino de impacto

Tabla 5.2

Plan de mantenimiento del molino de impacto

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios						
			Llave neumática	Juego de llaves	Palancas	Chapaletas	Placas	Grasa	Checklist estandarizado
Preventivo y programado: Evitar paradas por desgaste y actividades planificadas.	Inspección de chapaletas	Diaria (10 min/turno)							✓
	Inspección de placas				✓		✓		✓
	Engrase	Semanal del equipo (≤ 15 min)						✓	✓
	Cambio de chapaletas por desgaste	Cada trimestre	✓	✓	✓	✓			✓
	Pernos	Mensual, trimestral	✓	✓					✓
	Alineación de rotor y ejes	Trimestral		✓				✓	✓
	Limpieza profunda	Mensual							✓

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios			
			Juego de chapaletas en stock	Juego de placas en stock	Herramientas	Checklist estandarizado
Correctivo de Emergencia: Respuesta rápida.	Ruptura de chapaleta	Reemplazo inmediato	✓		✓	✓
	Ruptura en placa interna			✓	✓	✓

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios				
			Repuestos críticos en stock JIT	Carros de herramientas móviles	Manual de funciones	Manual de procedimientos	Instructivo
Lean (JIT + SMED) Reducción de desperdicios.	JIT (Gestión de Repuestos)	≤ 72 hrs. Para entregas			✓		✓
	3 chapaletas		✓	✓		✓	
	4 placas internas		✓	✓		✓	
	SMED (Cambio Rápido)			✓		✓	✓
	Preparar herramientas.						✓
	Procedimiento estandarizado					✓	
	Capacitación.				✓	✓	✓

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La tabla refleja que el molino de impacto requiere un control riguroso sobre el desgaste de chapaletas y placas, ya que estos elementos representan los puntos más vulnerables del equipo. El plan propone no solo su sustitución preventiva cada trimestre, sino también protocolos rápidos de reemplazo en caso de roturas inesperadas. Asimismo, la implementación de JIT asegura la disponibilidad de repuestos críticos en tiempos oportunos, mientras que la metodología SMED optimiza los cambios de componentes, reduciendo las paradas de mantenimiento. En conjunto, estas acciones permiten mejorar la confiabilidad del molino, reducir costos asociados a fallas críticas y mantener un flujo productivo estable.

5.1.3. Plan de mantenimiento de la cinta transportadora

Tabla 5.3

Plan de mantenimiento de la cinta transportadora

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios				
			Juego de llaves	Rodillos de repuesto	Grasa	Correas de repuesto	Checklist estandarizado
Preventivo y programado: Evitar paradas por desgaste y actividades planificadas.	Inspección de Bandas	Diaria (10 min/turno)					✓
	Inspección de Rodillos						✓
	Inspección de Grapas						✓
	Engrase	Semanal del equipo (≤ 10 min)			✓		✓
	Alineación y tensión	Semanal (20 min)	✓				✓
	Revisión de motor y transmisión	Trimestral	✓	✓		✓	✓
	Limpieza de rodillos y poleas	Mensual					✓

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios				
			Kit de grapas	Bandas de repuesto	Rodillos de repuesto	Correas de repuesto	Herramientas
Correctivo de Emergencia: Respuesta rápida.	Remaches con grapas	Reemplazo inmediato (≤40 min)	✓	✓			✓
	Ruptura de correa	Reemplazo inmediato				✓	✓
	Falla en rodillo/motor	Reemplazo rápido			✓		✓

Tipo de Mantenimiento	Actividades	Frecuencias	Recursos Necesarios				
			Repuestos críticos en stock JIT	Kit de herramientas de empalme	Manual de funciones	Manual de procedimientos	Instructivo
Lean (JIT + SMED) Reducción de desperdicios.	JIT (Gestión de Repuestos)	≤ 72 hrs. Para entregas de la banda			✓		✓
	1 banda		✓	✓		✓	
	2 correas		✓	✓		✓	
	12 grapas		✓	✓		✓	
	SMED (Cambio Rápido)			✓		✓	✓
	empalme						✓
	Capacitación en empalme rápido				✓	✓	✓
	Uso de plantillas visuales				✓	✓	✓

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

La tabla evidencia que la cinta transportadora es un equipo clave para el flujo del proceso productivo, por lo que su mantenimiento debe priorizar la prevención de cortes

y fallas en las correas. El plan contempla tanto inspecciones frecuentes como reemplazos inmediatos en casos de emergencia, reduciendo tiempos de parada y garantizando continuidad operativa. Con la implementación del sistema JIT se asegura la reposición oportuna de repuestos críticos, mientras que la metodología SMED optimiza los tiempos de empalme y cambio de bandas mediante prácticas estandarizadas y capacitación del personal. En conjunto, estas acciones fortalecen la confiabilidad del equipo y contribuyen a la eficiencia global de la planta de áridos.

5.1.4. Estructura documental estandarizada

La Estructura Documental Estandarizada (Tabla 5.4) materializa los procedimientos operativos, los cuales satisfacen el requisito 6.7.1 (Manual Operativo) de la NB 12017, garantizando que se defina la ejecución, coordinación y control del mantenimiento. Estos Instructivos documentan la metodología necesaria para la conservación y confiabilidad de los tres equipos más críticos de la planta: la criba vibratoria de tres niveles, el molino de impacto y la cinta transportadora, ver anexo 8.

La documentación se organiza en cuatro categorías principales: mantenimiento programado (basado en vida útil y uso), mantenimiento preventivo (inspección y condición), mantenimiento correctivo (respuesta inmediata ante fallas catastróficas), y mantenimiento Lean (optimización de la ejecución mediante JIT y SMED).

Tabla 5.4*Estructura documental estandarizada*

MANTENIMIENTO	EQUIPO	Instructivo
PROGRAMADO	Criba vibratoria de tres niveles	AC-PRG-CVCM-INS-01
		AC-PRG-CVCT-INS-01
	Molino de impacto	AC-PRG-MOCP-INS-01
		AC-PRG-MOCH-INS-01
PREVENTIVO	Cinta transportadora	AC-PRG-CTEM-INS-01
	Criba vibratoria de tres niveles	AC-PV-CVCM-INS-01
		AC-PV-CVCT-INS-01
	Molino de impacto	AC-PV-MOCP-INS-01
		AC-PV-MOCH-INS-01
	Cinta transportadora	AC-PV-CTEM-INS-01
CORRECTIVO	Criba vibratoria de tres niveles	AC-CRR-CVCM-INS-01
		AC-CRR-CVCT-INS-01
	Molino de impacto	AC-CRR-MOCP-INS-01
		AC-CRR-MOCH-INS-01
LEAN	Cinta transportadora	AC-CRR-CTEM-INS-01
	Criba vibratoria de tres niveles	AC-LN-CVCM-INS-01
		AC-LN-CVCT-INS-01
	Molino de impacto	AC-LN-MOCP-INS-01
		AC-LN-MOCH-INS-01
	Cinta transportadora	AC-LN-CTEM-INS-01

Elaboración: Propia (2025)**5.2. Cursograma analítico propuesto**

La razón principal de estos cursogramas es contrastar el método de trabajo actual con un método mejorado, utilizando la simbología estandarizada de operación, transporte, inspección, espera y almacenaje. Este análisis permite cuantificar los tiempos de intervención y las paradas inesperadas para identificar oportunidades de mejora operativa, especialmente mediante la reducción del tiempo medio para reparar (MTTR), aplicando metodologías Lean como SMED (Single Minute Exchange of Die).

El cursograma analítico propuesto presenta la secuencia de actividades de mantenimiento reestructurada, buscando la máxima eficiencia operativa mediante la

aplicación rigurosa de la metodología SMED (Single Minute Exchange of Die). La principal meta es minimizar el tiempo de parada o MTTR (Tiempo Medio Para Reparar), trasladando tareas que actualmente se realizan con el equipo detenido (internas) a momentos previos a la parada (externas).

La implementación de este cursograma se respalda en los instructivos con enfoque Lean, (ver anexo 8 instructivos AC-LN-CVCM-INS-01, AC-LN-CVCT-INS-01, AC-LN-MOCP-INS-01, AC-LN-MOCH-INS-01 y AC-LN-CTEM-INS-01) y se centra en los equipos que generan la mayor pérdida de tiempo productivo anual que son la criba vibratoria de tres niveles, el molino de impacto y las cintas transportadoras.

5.2.1. Cursograma analítico propuesto del proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles

Figura 5.1

Cursograma analítico propuesto del proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles

CURSOGRAMA ANALÍTICO PROPUESTO DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE LA CRIBA DE TRES NIVELES									
Hoja N° ____1____ De:____ Diagrama N°: __1__				Operar.	X	Mater.		Maqui.	
Proceso: Elaboración de áridos				RESUMEN					
Fecha:				SÍMBOLO	ACTIVIDAD				Act.
El estudio Inicia:					Operación				14
Método: Actual:____ Propuesto: __X__					Transporte				2
Equipo: Criba vibratoria de tres niveles					Inspección				3
Nombre del operario:					Espera				0
Elaborado por: Martínez Maria Fernanda					Almacenaje				0
Propuesta				Total de Actividades realizadas					19
				Cantidad de veces por ejecución					106,0
				Tiempo del proceso (min)					723,7
NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y PARADAS INESPERADAS	Tiempo del proceso (min)	Cantidad de veces por ejecución	SÍMBOLOS PROCESOS					
									
1	LOTO y seguridad	5,0	2	●					
2	Inspección de la caja reductora (nivel de aceite)	10,0	1				●		
3	Inspección del sistema de tuberías de agua (flujo y limpieza de obstrucciones)	15,3	1				●		
4	Traslado de grúa para desmontaje de la criba	20,4	1		●				
5	Desmontaje de la criba vibratoria con grúa	8,0	1	●					
6	Aflojado de pernos con llave neumática	20,0	70	●					
7	Retiro de perfiles de sujeción y mallas (grava, gravilla, arena) en paralelo	35,0	3	●					
8	Retiro de gomas por riel	10,0	3	●					
9	Limpieza intensiva de la estructura de la criba	20,0	1	●					
10	Verificación de los 70 pernos (clasificación de aptos/no aptos)	25,0	1				●		
11	Soldadura y corte de mallas (si aplica)	45,0	1	●					
12	Reposicion de gomas por riel y junto a los pernos	40,0	9	●					
13	Cambio de la malla para arena	90,0	1	●					
14	Asegurar la malla en el centro del equipo	11,7	1	●					
15	Cambio de la malla para gravilla	90,0	1	●					
16	Asegurar la malla en el centro del equipo	11,7	1	●					
17	Cambio de la malla para grava	90,0	1	●					
18	Asegurar la malla en el centro del equipo	11,7	1	●					
19	Montaje de la criba vibratoria en su estructura con grúa, fijar anclajes	50,0	1	●	●				
20	Cierre de intervención (llenar registros correspondientes)	15,0	4				●		
21	Fallas en la correa de la criba	100,0	1	●					
Tiempo Minutos:		723,7	106,0						

Fuente: Instructivos

Elaboración: Propia (2025)

El proceso propuesto logra una reducción significativa, pasando de un tiempo total de proceso actual de 1.126,60 minutos a un tiempo objetivo de 723,70 minutos. Esta optimización se basa en:

- Preparación y seguridad acelerada: La tarea de "LOTO y seguridad" se establece en solo 5 minutos, priorizando la rapidez en la aplicación del Bloqueo/Etiquetado.
- Optimización del izaje: La actividad desmontaje de la criba vibratoria con grúa se reduce significativamente a un tiempo objetivo de 8 minutos, lo cual es posible al asegurar que la grúa esté en posición lista antes de la parada.
- Trabajo en paralelo: El aflojado de pernos con llave neumática (70 pernos) se estandariza a 20 minutos, aprovechando el uso de 2 llaves neumáticas trabajando simultáneamente por zonas (trabajo en paralelo).
- Enfoque de mantenimiento programado: La reducción se enfoca en la gestión eficiente de fallas de alto impacto, como el reemplazo de mallas, que actualmente representa la mayor inactividad acumulada (promedio de 891,20 minutos de parada por avería).

Las tareas de cierre de intervención (llenar registros correspondientes) deben completarse en 10 a 15 minutos, incluyendo el llenado de la Orden de Trabajo Correctiva (AC-RG-CV-01) y el Checklist SMED (AC-RG-PVT-CV-06).

Importante: Los procesos de operación “Inspección de la caja reductora (nivel de aceite), con un tiempo de proceso de 10 minutos” y “Inspección del sistema de tuberías de agua (flujo y limpieza de obstrucciones), con un tiempo de proceso de 15,30 minutos”. Forman parte del proceso de mantenimiento de la criba de tres niveles, como

se muestra en la figura 5.1, pero no así en los instructivos, donde se obtuvo la mayor parte de información. Por lo tanto, estos 25,30 minutos se adjudicarán en el tipo de averías del reemplazo de mallas.

5.2.2. Cursograma analítico propuesto del proceso de mantenimiento del molino de impacto

Figura 5.2

Cursograma analítico propuesto del proceso de mantenimiento del molino de impacto

CURSOGRAMA ANALÍTICO PROPUESTO DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DEL MOLINO DE IMPACTO								
Hoja N° ____1____ De:_____ Diagrama N°: __1__		Operar. X Mater. Maqui.						
Proceso: Elaboración de áridos		RESUMEN						
Fecha:		SÍMBOLO	ACTIVIDAD			Act.		
El estudio Inicia:			Operación			8		
Método: Actual:_____ Propuesto: __X__			Transporte			0		
Equipo: Molino de impacto			Inspección			3		
Nombre del operario:			Espera			0		
Elaborado por: Martínez Maria Fernanda			Almacenaje			0		
Propuesta	Total de Actividades realizadas					11		
	Cantidad de veces por ejecución					15,0		
	Tiempo del proceso (min)					213,0		
NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y PARADAS INESPERADAS	Tiempo del proceso (min)	Cantidad de veces por ejecución	SÍMBOLOS PROCESOS				
1	LOTO y seguridad	8,0	2					
2	Apertura del molino (aflojar perno tipo abrazadera, retirar seguros, liberar puertas)	10,0	1					
3	Limpieza interna del equipo (retiro de polvo y residuos acumulados)	10,0	1					
4	Verificación del estado interno: Paredes y componentes	15,0	1					
5	Aflojado de pernos y desmontaje de paredes internas dañadas	30,0	1					
6	Montaje placa nueva; torque final secuenciado	50,0	1					
7	Verificación del estado interno: Chapaletas (martillos) y componentes	5,0	1					
8	Aflojado/desmontaje de chapaletas	20,0	1					
9	Instalación de las chapaletas nuevas	30,0	1					
10	Cerrar las puertas del molino con las aseguradoras correspondientes	10,0	1					
11	Pruebas funcionales del equipo	20,0	2					
12	Cierre documental SMED del molino de impacto	5,0	2					
Tiempo Minutos:		213,0	15,0					

Fuente: Instructivos

Elaboración: Propia (2025)

El cursograma propuesto se enfoca en optimizar el proceso de intervención para el molino, el cual sufre críticamente por el desgaste o ruptura de las paredes de impacto (MTTR promedio de 182,40 minutos) y de las chapaletas (MTTR promedio de 128,80 minutos). El proceso actual total es de 311,2 minutos. La propuesta Lean implementada a través del instructivo AC-LN-MOCP-INS-01 y AC-LN-MOCH-INS-01 busca reducir este tiempo mediante:

- Limpieza rápida y verificación: Se proponen 10 minutos para la limpieza intensiva interna del molino de impacto, y 15 minutos para la verificación de las placas internas, asegurando un diagnóstico rápido que minimiza el tiempo con el molino abierto.
- Optimización del desmontaje: El aflojado de pernos y retiro de placas afectadas se estandariza a 30 minutos mediante la acción de equipos en paralelo.
- Montaje y torque secuenciado: La instalación de las placas nuevas y el torque final secuenciado con torquímetro se asigna un tiempo objetivo de 50 minutos, garantizando precisión en el apriete.

Las tareas deben registrarse en el registro semanal de desgaste de placas (AC-RG-PRG-MOI-02) y, al finalizar, en el Checklist SMED (AC-RG-MOI-03) ver anexo 8.

Importante: El tiempo individual de 158 minutos para placas y 101 minutos para chapaletas son los tiempos base obtenidos de los instructivos individuales optimizados (AC-LN-MOCP-INS-01 y AC-LN-MOCH-INS-01, respectivamente). El proyecto de grado propone la implementación de un proceso unificado para el molino de impacto, cuyo tiempo de ejecución de 213 minutos se detalla en el cursograma analítico propuesto, demostrando un ahorro de 46 minutos al ejecutar en paralelo las actividades

de sustitución de placas y chapaletas, y al consolidar las tareas secuenciales obligatorias (LOTO, apertura, cierre, pruebas y cierre documental).

5.2.3. Cursograma analítico propuesto del proceso de mantenimiento de la cinta transportadora

Figura 5.3

Cursograma analítico propuesto del proceso de mantenimiento de la cinta transportadora

CURSO GRAMA ANALÍTICO PROPUESTO DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE LA CINTA TRANSPORTADORA									
Hoja N° ____1____ De:____ Diagrama N°:____1____			Operar.	X	Mater.		Maqui.		
Proceso: Elaboración de áridos			RESUMEN						
Fecha:			SÍMBOLO		ACTIVIDAD		Act.		
El estudio Inicia:					Operación		6		
Método: Actual:____ Propuesto: __X__					Transporte		0		
Equipo: Cinta transportadora					Inspección		2		
Nombre del operario:					Espera		0		
Elaborado por: Martinez Maria Fernanda					Almacenaje		0		
Propuesta			Total de Actividades realizadas				8		
			Cantidad de veces por ejecución				10,0		
			Tiempo del proceso (min)				161,0		
NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y PARADAS INESPERADAS		Tiempo del proceso (min)	Cantidad de veces por ejecución	SÍMBOLOS PROCESOS				
									
1	LOTO y diagnóstico rápido		5,0	2	●				
2	Limpieza en el área de trabajo		5,0	1	●				
3	Preparación de bordes (amoladora/metro)		10,0	1	●				
4	Reparación de la banda: colocación de grapas mecánicas y remache en el tramo afectado		30,0	1	●				
5	Fijación de remaches (doble herramienta)		24,0	1	●				
6	Verificación de alineación de poleas y rodillos		7,0	1			●		
7	Ajuste de alineación y tensión de la correa		68,0	1	●				
8	Prueba funcional acelerada		7,0	1	●				
9	Cierre documental SMED de la cinta transportadora		5,0	1			●		
Tiempo Minutos:			161,0	10,0					

Fuente: Instructivos

Elaboración: Propia (2025)

La reparación de cintas es crítica debido a los 837,80 minutos de inactividad anual acumulada, con un tiempo de proceso correctivo actual de 210,60 minutos. El cursograma propuesto, basado en el instructivo AC-LN-CTEM-INS-01 anexo 8, reduce el tiempo total de intervención a 161 minutos mediante:

- Diagnóstico acelerado: LOTO y diagnóstico rápido se realiza en solo 5 minutos, enfocándose en confirmar el tipo de grapa necesaria.
- Conversión de tareas: La preparación de bordes (amoladora/metro) se realiza rápidamente en 10 minutos, optimizando el corte a escuadra de la banda.
- Instalación rápida en paralelo: El proceso crítico de colocación y fijación de grapas se divide en instalación de grapas en paralelo (30 minutos) y fijación de remaches (doble herramienta) (24 minutos), lo que reduce drásticamente el tiempo de empalme.
- Ajuste y prueba final: El ajuste de alineación y tensión de la correa se limita a 8 minutos, seguido de una prueba funcional acelerada de 68 minutos.

El cierre documental debe registrar los tiempos exactos de intervención en el Checklist SMED (AC-RG-CTEM-04) y el consumo de repuestos (grapasp, tornillería) en el registro de consumo de repuestos (AC-RG-CTEM-02).

5.3. Reducción de averías

Según el análisis de la ficha de registro de intervención de equipos (Anexo 1) y el Diagrama de Pareto (Anexo 4), la planta registra un total de 50 averías anuales en sus tres equipos críticos (Criba 3N, Molino de Impacto y Cintas Transportadoras).

La razón de la propuesta de los instructivos (Mantenimiento Programado/Preventivo) y las metodologías Lean (JIT/SMED) es convertir la mayor parte de estas 50 averías inesperadas en paradas planificadas de corta duración.

A continuación, se desarrolla y justifica la reducción proyectada en la frecuencia de averías, para convertir las fallas correctivas en intervenciones planificadas.

5.3.1.Reducción de averías criba vibratoria de tres niveles

La criba vibratoria de tres niveles (E-1) es el equipo más crítico de la planta, concentrando 25 averías anuales con un total de 5.273,80 minutos de parada. El objetivo es reducir las averías inesperadas a solo 11 ocurrencias programadas (o ajustes preventivos), logrando un ahorro de 3.131,80 minutos/año.

Tabla 5.5

Reducción de averías criba vibratoria de tres niveles

Tipo de Avería	Frecuencia Actual (averías/año)	Frecuencia Propuesta (intervenciones/año)	Justificación de la Reducción (Uso de Instructivos)
Reemplazo de mallas	5	2	Mantenimiento programado por uso (AC-PRG-CVCM-INS-01); La falla catastrófica se evita al monitorear la Producción acumulada (AC-RG-PRG-CV-01). El reemplazo se planifica cuando el consumo supere el 80% de la vida útil programada. Esto convierte 3 fallas inesperadas en reemplazos planificados de alta duración, pero controlados.
Reposición de gomas	5	2	Mantenimiento programado por condición (AC-PRG-CVCM-INS-01); Se utiliza el registro semanal de gomas (AC-RG-PRG-CV-02) para medir el espesor con un calibrador. El reemplazo se programa si el espesor se reduce al 50% del nominal. Esto permite convertir 3 fallas inesperadas de desgaste o ruptura en intervenciones planificadas.

Fallas en la correa	2	1	Mantenimiento programado por vida útil y condición (AC-PRG-CVCT-INS-01): La correa de distribución (Correa B85) tiene una vida útil de 2.070 horas o 6 meses. La avería se reduce a la mitad planificando el reemplazo al alcanzar el 80% de su vida útil (3,726 horas). Además, se aplica inspección preventiva semanal para retensado inmediato si la deflexión aumenta > 20%.
Ajuste de pernos	13	6	Mantenimiento preventivo diario (AC-PV-CVCM-INS-01): Estas fallas por vibración se atacan mediante la inspección visual rápida diaria (AC-RG-PVT-CV-02). El operador debe ajustar de inmediato si se identifica una holgura superior a 3 cm. Esto convierte 7 de las 13 fallas en ajustes menores (que no son contabilizados como averías inesperadas), eliminando la parada.
Total, Criba	25 averías/año	11 intervenciones/año	

Fuente: Instructivos

Elaboración: Propia (2025)

5.3.2. Reducción de averías molino de impacto

El Molino de impacto (E-2) registra 16 averías anuales con 2.704 minutos de inactividad. La propuesta busca reducir esta frecuencia en un 50%, convirtiendo 8 fallas inesperadas en reemplazos planificados, logrando un ahorro de 1.352 minutos/año.

Tabla 5.6*Reducción de averías molino de impacto*

Tipo de Avería	Frecuencia Actual (averías/año)	Frecuencia Propuesta (intervenciones/año)	Justificación de la Reducción (Uso de Instructivos)
Desgaste/ruptura paredes de impacto	12	6	Mantenimiento programado y preventivo por condición/uso (AC-PRG-MOCP-INS-01 y AC-PV-MOCP-INS-01): Se implementa la medición semanal de desgaste (AC-RG-PRG-MOI-02). Se programa el reemplazo si la pérdida de espesor es mayor al 30% (espesor original 30 mm), o al alcanzar el 80% de la vida útil (74.750 toneladas). Esto convierte 6 de las 12 rupturas inesperadas en reemplazos planificados.
Desgaste/ruptura chapaletas	4	2	Mantenimiento programado y preventivo por condición/uso (AC-PRG-MOCH-INS-01 y AC-PV-MOCH-INS-01): Se implementa la medición semanal de desgaste (AC-RG-PRG-CH-MOI-02). Se programa el reemplazo si la pérdida de espesor es mayor al 50% (espesor original 50 mm), o al alcanzar el 80% de la vida útil (224.250 toneladas). Esto convierte 2 de las 4 rupturas inesperadas en reemplazos planificados.
Total, Molino	16 averías/año	8 intervenciones/año	

Fuente: Instructivos**Elaboración:** Propia (2025)**5.3.3.Reducción de averías cintas transportadoras**

Las Cintas Transportadoras (E-3) registran 9 averías anuales, con un total de 837,80 minutos de inactividad. La propuesta busca convertir 6 fallas inesperadas en ajustes menores o eliminarlas, logrando un ahorro de 569 minutos/año.

Tabla 5.7*Reducción de averías cintas transportadoras*

Tipo de Avería	Frecuencia Actual (averías/año)	Frecuencia Propuesta (intervenciones/año)	Justificación de la Reducción (Uso de Instructivos)
Corte de las cintas	8	3	Mantenimiento preventivo semanal y programado (AC-PV-CTEM-INS-01): La alta recurrencia de cortes se aborda mediante la inspección visual diaria/semanal del empalme mecánico (AC-RG-CTEM-01). Si se detecta un clip/grapa ligeramente suelto o pequeña holgura, se realiza ajuste menor preventivo de inmediato. Esto convierte 5 de los 8 cortes inesperados en ajustes o reparaciones programadas de menor magnitud.
Fallas en la correa	1	0	Mantenimiento Preventivo: Se elimina esta avería inesperada al incorporar la Inspección de motor y transmisión de las cintas (similar a la Criba 3N), incluyendo la verificación de desgaste visual, tensión y alineación (AC-RG-PVT-COR-03). Si se detecta un riesgo inminente, se programa el reemplazo antes de la ruptura catastrófica.
Total, Cintas	9 averías/año	3 intervenciones/año	

Fuente: Instructivos**Elaboración:** Propia (2025)**5.4. Datos propuestos de los equipos críticos****5.4.1. Datos propuestos de criba vibratoria de tres niveles**

Tabla 5.8*Datos propuestos de criba vibratoria de tres niveles*

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Reemplazo de mallas	2	566,7	1.133,40
Reposición de gomas	2	50	100,00
Fallas en la correa de la criba	1	100	100,00
Ajuste de pernos	6	7	42,00
TOTAL	11	723,7	1.375,40

Fuente: Cursograma analítico (fig. 5.1)**Elaboración:** Propia (2025)

La optimización de estos tiempos y la consecuente reducción del tiempo total anual de paradas de 5.273,80 minutos a 1.375,40 minutos, es el resultado directo de la implementación de un plan de mantenimiento que sigue los requisitos de la norma boliviana NB 12017 (Sistemas de Gestión de Mantenimiento). Dicha norma exige la mejora continua de la conservación y la garantía de confiabilidad operativa, lo cual se logra mediante el fortalecimiento del mantenimiento preventivo y programado y la aplicación de la metodología Lean (SMED) para la reducción del Tiempo Medio Para Reparar (MTTR), especialmente en las averías de alta criticidad como el Reemplazo de mallas. Asimismo, la frecuencia de averías anuales se redujo de 25 eventos (situación actual) a 11 eventos (condición propuesta).

5.4.2. Datos propuestos del molino de impacto

Tabla 5.9*Datos propuestos del molino de impacto*

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Desgaste o ruptura de las paredes de impacto	6	123	738,00
Desgaste o ruptura de las chapaletas	2	90	180,00
TOTAL	8	213	918,00

Fuente: Cursograma analítico (fig. 5.2)**Elaboración:** Propia (2025)

La optimización de estos tiempos y la consecuente reducción del tiempo total anual de paradas de 2.704,00 minutos (situación actual del molino) a 918,00 minutos (condición propuesta), es el resultado directo de la implementación de un plan de mantenimiento que sigue los requisitos de la norma boliviana NB 12017 (Sistemas de Gestión de Mantenimiento). Dicha norma exige la mejora continua de la conservación de los objetos y la garantía de confiabilidad operativa en la prestación de sus funciones, lo cual se logra mediante el fortalecimiento del mantenimiento preventivo y programado y la aplicación de la metodología Lean (SMED) para la reducción del Tiempo Medio Para Reparar (MTTR).

Asimismo, la frecuencia total de averías anuales del molino de impacto se redujo de 16 eventos (situación actual), con 12 eventos de paredes de impacto y 4 de chapaletas, a 8 eventos (condición propuesta), con 6 eventos propuestos para el desgaste de paredes y 2 para el desgaste de chapaletas.

5.4.3. Datos propuestos de las cintas transportadoras

Tabla 5.10*Datos propuestos de las cintas transportadoras*

Tipo de averías	Frecuencias de averías anuales	Tiempo promedio de parada por avería (min)	Tiempo promedio anual de paradas por averías (min)
Corte de las cintas	3	86	258,00
Fallas en la correa	0	75	0,00
TOTAL	3	161	258,00

Fuente: Cursograma analítico (fig. 5.3)

Elaboración: Propia (2025)

La optimización de estos tiempos y la consecuente reducción del tiempo total anual de paradas de 837,80 minutos (situación actual) a 258,00 minutos (condición propuesta), es el resultado directo de la implementación de un plan de mantenimiento que sigue los requisitos de la norma boliviana NB 12017 (Sistemas de Gestión de Mantenimiento). Dicha norma exige la mejora continua de la conservación de los objetos y la garantía de confiabilidad operativa en la prestación de sus funciones, lo cual se logra mediante el fortalecimiento del mantenimiento preventivo y programado y la aplicación de la metodología Lean (SMED) para la reducción del Tiempo Medio Para Reparar (MTTR).

Esta optimización en las Cintas Transportadoras se logra al reducir la frecuencia de averías anuales de 9 eventos (situación actual) a 3 eventos (condición propuesta), lo que demuestra una mejora en la confiabilidad del equipo (MTBF).

Tabla 5.11

Resumen del impacto

Equipo	Frecuencia Anual Propuesta	Ahorro Total Proyectado (Min/año)
Criba Vibratoria 3N	11	3.898,60
Molino de Impacto	8	1.786,00
Cintas Transportadoras	3	580,00
TOTAL	22	6.264,60

Elaboración: Propia (2025)

El resumen demuestra el éxito proyectado de la implementación de la nueva estrategia de mantenimiento, la cual logra un ahorro total proyectado de 6.264,60 minutos al año (aproximadamente 104,41 horas de tiempo productivo recuperado) y reduce la frecuencia total de averías críticas de 50 a solo 22 eventos anuales en los tres equipos principales.

5.5. Impacto de la propuesta (Lean – JIT y SMED)

La reducción de la frecuencia de averías se logra al utilizar los instructivos que promueven la planificación del reemplazo antes de la falla. Las metodologías Lean influyen en la sostenibilidad de esta reducción.

5.5.1. SMED (Single Minute Exchange of Die)

La aplicación de SMED se centra en la reducción drástica de los tiempos de inactividad de alto impacto, como el reemplazo de mallas en la criba vibratoria 3N, que en el baseline arrojaba un OEE de 0%. La metodología se operacionaliza mediante la conversión de tareas internas en externas y la cuantificación de tiempos objetivo, plasmada en los cursogramas analíticos propuestos.

a) Separación interna/externa y hoja de set-up estándar

El núcleo de SMED es la reclasificación de tareas. Las tareas externas (con la máquina en funcionamiento) deben ejecutarse previamente a la parada para que, al detener el equipo, la intervención se centre solo en las tareas internas (con la máquina detenida).

Evidencia de tareas externas: La preparación del área, la pre soldadura o corte de mallas (si vienen en dos secciones), y la confirmación de la grúa y herramientas (Kit Correa o Kit Malla) se ejecutan antes del LOTO (Bloqueo/Etiquetado). Esta preparación es auditada mediante la Checklist SMED.

Tiempos objetivo por tarea: Los tiempos propuestos para el MTTR, como la reducción del cambio de mallas, se desglosan en un estudio de tiempos. Por ejemplo,

el Aflojado de Pernos se estandariza a 20 minutos mediante el uso de dos llaves neumáticas trabajando simultáneamente (trabajo en paralelo), asegurando el apriete final con torquímetro según el Instructivo de Cambio Rápido (AC-LN-CVCM-INS-01). Estas secuencias optimizadas representan la hoja de set-up estándar requerida.

La aplicación de SMED en el molino de impacto permite un ahorro de 46 minutos al ejecutar en paralelo las tareas de sustitución de placas y chapaletas, reduciendo el MTTR total de 311,2 minutos a 213 minutos.

Para el empalme mecánico de las cintas transportadoras la tarea de preparación del Kit Empalme Mecánico (grapas, tornillería, remachadora) se convierten en tareas externas, auditadas antes de que la cinta se detenga, eliminando el tiempo de búsqueda y preparación de materiales. Por lo tanto, el proceso crítico de reparación de la banda con grapas mecánicas de unión se optimiza para reducir su tiempo total de 210,60 minutos a 161 minutos. Este ahorro significativo se logra gracias a la operacionalización de la fijación de remaches mediante el trabajo en paralelo de dos técnicos, utilizando doble herramienta para la colocación y apriete de los clips.

5.5.2. Just In Time (JIT) en gestion de repuestos

La implementación de la metodología Just In Time (JIT) es la respuesta estructural del proyecto ante la vulnerabilidad operativa que actualmente genera la falta de repuestos de Alta Criticidad (A), como las mallas, chapaletas y placas internas. Estos componentes presentan tiempos de entrega (Lead Time) prolongados, de hasta 20 días, lo que obliga a la planta a operar hasta la falla catastrófica.

El objetivo de la Gestión de Repuestos, que se detallará en el futuro Capítulo VI, es asegurar la disponibilidad ininterrumpida de estos componentes clave, alineando el inventario con el plan de mantenimiento preventivo/programado (22 intervenciones planificadas, en contraste con las 50 averías inesperadas actuales).

La operacionalización del JIT se centra en el cálculo determinístico del Punto de Reorden (ROP), que funcionará como el disparador automático para las órdenes de compra.

a) Criterio de criticidad

Se debe establecer un sistema de ordenamiento y codificación de inventarios, manteniendo la clasificación de los repuestos críticos (Categoría A) debido a su impacto directo en la parada de la planta (chapaletas, placas internas).

b) Cálculo del consumo y ROP propuesto

Para calcular el ROP de manera proactiva, se debe utilizar el consumo promedio histórico (unidades/parada) y multiplicarlo por la cantidad de paradas anuales propuestas (22), ya que la nueva planificación reduce la frecuencia de averías.

El ROP se definirá como la cantidad de inventario (unidades) necesaria para cubrir la demanda durante el tiempo de espera del proveedor (Lead Time) más un Stock de Seguridad (SS). Este cálculo será el criterio operacional para activar la orden de compra antes de que el stock de seguridad se agote. Por ejemplo, el cálculo futuro indicará que el ROP para las chapaletas debe ser de 7 unidades.

5.6. Indicadores KPI's y OEE propuestos de los equipos críticos

5.6.1. Protocolo de medición del OEE propuesto

La definición del OEE propuesto (Tablas 5.12, 5.13, 5.14, 5.15) se presenta como la demostración cuantificable del éxito esperado en la conservación de los activos tras la implementación del Sistema de Gestión de Mantenimiento (SGM) y las metodologías Lean (JIT/SMED). Este protocolo establece un nuevo paradigma operativo que resuelve las deficiencias de registro y gestión encontradas en el diagnóstico actual (baseline).

a) Transformación del paradigma operacional y supuestos

El cálculo del OEE propuesto se basa en la premisa fundamental de que el Plan de Mantenimiento logrará convertir las 50 averías inesperadas anuales en solo 22 intervenciones planificadas.

La diferencia metodológica más significativa respecto al baseline actual es la corrección del error de gestión documental evidenciado en los registros históricos. Dado que la NB 12017 exige que los documentos sean clasificados y dispuestos en los puntos de uso, la propuesta del SGM establece una nueva estructura documental estandarizada (Anexo 8) que obliga a la separación rigurosa de los tiempos.

Nuevo supuesto operativo: En el escenario propuesto, se asume que los paros planificados (como almuerzo, entre otros), que artificialmente reducían la Disponibilidad en el baseline al estar mezclados con los tiempos de avería, son excluidos del tiempo total de parada. Los cálculos de Disponibilidad propuestos reflejan únicamente las pérdidas atribuibles a las paradas de mantenimiento, cumpliendo así con los estándares de medición del OEE.

b) Protocolo de cálculo por componente del OEE propuesto

El OEE propuesto proyecta la mejora de la Eficiencia Global de los Equipos (OEE), la cual se logra principalmente atacando la Disponibilidad, Rendimiento y Calidad.

La Disponibilidad aumenta sustancialmente gracias a la planificación y a las metodologías Lean:

Reducción de la Frecuencia (MTBF): El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) global proyectado aumenta de 186,17 horas a 468,52 horas. Este incremento se logra mediante el Mantenimiento Programado por Condición (basado en el 80% de la vida útil de componentes críticos como mallas y placas), evitando la falla catastrófica e inesperada.

Reducción del Tiempo de Reparación (MTTR): El Tiempo Medio Para Reparar (MTTR) global se reduce de 2,89 horas a 1,93 horas. Esta optimización del 33% se debe a la aplicación rigurosa de la metodología SMED (Single Minute Exchange of

Die), que estandariza los procedimientos y convierte las tareas internas en externas, como se detalla en los cursogramas analíticos propuestos (Figuras 5.1, 5.2, 5.3) que a su vez son obtenidos por los instructivos (anexo 8).

Los componentes de Rendimiento y Calidad se mantuvieron constantes o con mejoras marginales, ya que el factor crítico de pérdida identificado en el diagnóstico fue la Disponibilidad:

Rendimiento: Se mantuvo el Rendimiento de actividad real, ya que la Capacidad Nominal se extrajo de las fichas técnicas de los equipos y no se prevé la modificación de esta capacidad.

Calidad: Se mantiene la Calidad del 100% para la mayoría de los equipos (como el Molino de Impacto, que no genera desperdicio), utilizando el dato del descarte (0,25 toneladas/día) proporcionado por el jefe de producción para la criba vibratoria.

c) Evidencia y resultado cuantificado (OEE y Reporte)

Evidencia fuente: Los datos proyectados provienen de la reducción de averías planificada (Tablas 5.6, 5.7, 5.8) y los tiempos optimizados por SMED (Cursogramas Propuestos, Figuras 5.1, 5.2, 5.3), registrados en los Anexos 9, 10 y 11.

Recuperación del cuello de botella: La Disponibilidad proyectada en la criba vibratoria de tres niveles (equipo cuello de botella con 150 Tn/h) eleva su OEE en la avería crítica de reemplazo de mallas del 0% actual a un 13% propuesto, al transformar la falla catastrófica en una intervención programada y eficiente.

5.6.2. Indicador OEE propuesto del molino de impacto

Tabla 5.12*Indicador resumen de OEE propuesto del molino de impacto*

	Averías	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Calidad (%)	OEE
Molino de impacto	Desgaste o ruptura de las paredes de impacto	82%			71%
	Paradas por avería		86,67%	100,00%	
	Desgaste o ruptura de las chapaletas	87%			75%
	Paradas por avería				

Elaboración: Propia (2025)

Los indicadores de OEE propuestos para el molino de impacto (71% y 75%) evidencian la mejora esperada en la Disponibilidad (82% y 87%) tras la implementación de un mantenimiento Lean enfocado en reducir los altos Tiempos Medios Para Reparar (MTTR) de sus componentes internos críticos. La avería más impactante, el desgaste o ruptura de las paredes de impacto, se proyecta a un OEE del 71%, mientras que el desgaste o ruptura de las chapaletas alcanza el 75%. Estas mejoras se logran mediante la optimización de las intervenciones a través de la metodología SMED. El molino mantiene una calidad del 100% y un alto rendimiento (86,67%), confirmando que el factor limitante de la eficiencia actual es el tiempo de inactividad por mantenimiento correctivo. Para más detalles ver anexo 10.

5.6.3. Indicador OEE propuesto de la cinta transportadora

Tabla 5.13*Indicador resumen de OEE propuesto de la cinta transportadora*

	Averías	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Calidad (%)	OEE
Cintas transportadoras	Corte de las cintas	88%			78%
	Paradas por avería		89,00%	100,00%	
	Falla en la correa	89%			79%
	Paradas por avería				

Elaboración: Propia (2025)

El indicador de Eficiencia Global de los Equipos (OEE) propuesto para las cintas transportadoras (78% y 79% respectivamente) refleja la mejora esperada en la Disponibilidad (88% y 89%) tras la aplicación de estrategias de mantenimiento Lean (JIT y SMED) orientadas a reducir el alto MTTR actual de 93,11 minutos. El Corte de las cintas proyecta un OEE del 78%, impulsado por la metodología SMED que optimiza la reparación de la banda con grapas mecánicas. La Falla en la correa, proyecta el OEE más alto (79%), lo que se debe a la optimización SMED del procedimiento de cambio, mitigando el impacto de sus 121.00 minutos de parada promedio. Dado que el rendimiento (89,00%) y la calidad (100%) se mantienen estables, la disponibilidad es el único factor de mejora en la eficiencia global de este equipo crítico. Para más detalles ver anexo 11.

5.6.4. Indicador OEE propuesto de criba vibratoria de tres niveles

Tabla 5.14

Indicador resumen de OEE propuesto de criba vibratoria de tres niveles

	Averías	Disponibilidad (%)	Rendimiento (%)	Calidad (%)	OEE
Criba vibratoria de 3 niveles	Reemplazo de mallas				
	Tiempo de operación	18%			13%
	Paradas por avería				
	Reposición de gomas				
	Tiempo de operación	93%			70%
	Paradas por avería				
	Fallas en la correa de la criba		75,33%	100%	
	Tiempo de operación	86%			64%
	Paradas por avería				
	Ajuste de pernos				
	Tiempo de operación	99%			75%
	Paradas por avería				

Elaboración: Propia (2025)

El indicador resumen del OEE propuesto para la criba vibratoria de tres niveles proyecta una mejora significativa en la eficiencia operativa, enfocándose en la disponibilidad mediante la implementación de un mantenimiento Lean (JIT y SMED),

buscando reducir drásticamente los tiempos de inactividad. La avería más crítica, el reemplazo de mallas, que históricamente acumulaba el mayor tiempo de inactividad (4.456 minutos anualmente), proyecta una recuperación crítica en el OEE, pasando del 0% (actual) al 13% (propuesto), lo que refleja una reducción del tiempo medio para reparar (MTTR) gracias a la aplicación de la metodología SMED. Las averías de reposición de gomas y fallas en la correa de la criba también muestran aumentos en la disponibilidad (alcanzando el 93% y 86% propuesto respectivamente), elevando sus OEE a 70% y 64%. Finalmente, el ajuste de pernos, al ser una falla de impacto reducido (MTTR actual de 7,6 minutos), mantiene una disponibilidad del 99% y un OEE alto del 75%, confirmando que las estrategias se centran en las fallas más catastróficas, siendo la disponibilidad el factor clave de mejora en todo el equipo. Para más detalles ver anexo 9.

5.6.5. Protocolo de cálculo de mejoras para MTBF y MTTR propuesto

Las mejoras en el MTBF propuesto (incremento de 186,17 a 468,52 horas) y el MTTR propuesto (reducción de 2,89 a 1,93 horas) son el resultado directo del cambio de estrategia de mantenimiento. El cálculo de mejoras para estos indicadores se muestra en la sección 5.6.1 inciso b) Disponibilidad.

5.6.6. Indicadores MTBF y MTTR propuestos

Tabla 5.15*Indicadores MTBF y MTTR propuestos*

Equipos	Descripción	Promedio anual
Criba 3N	Cantidad de averías	11
	Tiempo de paradas por averías (min)	1.375,40
	MTBF* (min)	18.693,15
	MTBF* (hrs)	311,55
	MTTR* (min)	125,04
	MTTR* (hrs)	2,08
Molino de impacto	Cantidad de averías	8
	Tiempo de paradas por averías (min)	918,00
	MTBF* (min)	25.760,25
	MTBF* (hrs)	429,34
	MTTR* (min)	114,75
	MTTR* (hrs)	1,91
Cintas transportadoras	Cantidad de averías	3
	Tiempo de paradas por averías (min)	258,00
	MTBF* (min)	68.914,00
	MTBF* (hrs)	1.148,57
	MTTR* (min)	86,00
	MTTR* (hrs)	1,43
Total, de averías		22
Total, de Tiempo de paradas por averías (min)		2.551,40
MTBF (min)		28.111,30
MTBF (hrs)		468,52
MTTR (min)		115,97
MTTR (hrs)		1,93

Elaboración: Propia (2025)

Los valores promedios anuales obtenidos muestran un desempeño significativamente más estable y eficiente en los tres equipos críticos de la planta. La reducción de las averías a 22 eventos por año, junto con un tiempo total de paradas de 2.551,40 minutos,

evidencia un sistema más controlado y con menor interrupción operativa. El análisis de los indicadores de confiabilidad revela mejoras notables: el MTBF presenta incrementos importantes en cada equipo, lo que refleja intervalos más largos entre una falla y la siguiente, mientras que el MTTR se mantiene en valores reducidos, indicando reparaciones más ágiles y mejor gestionadas. Para más detalles ver anexo 13.

5.7. Análisis diagnóstico/propuesta

5.7.1. Análisis diagnóstico/propuesta del indicador OEE

La siguiente tabla compara el OEE (Eficiencia Global del Equipo) actual frente al OEE propuesto para las averías específicas en los tres equipos críticos de la planta: criba vibratoria de tres niveles, molino de impacto y cintas transportadoras. El OEE es un indicador clave que combina la disponibilidad, el rendimiento y la calidad. Los valores proyectados (OEE Propuesto) reflejan la mejora de la eficiencia operativa esperada tras la implementación de un Plan de Mantenimiento, que convierte 50 averías inesperadas anuales en solo 22 intervenciones planificadas. Esta estrategia busca maximizar la disponibilidad mediante la reducción drástica del tiempo de inactividad por fallas correctivas.

Tabla 5.16*Análisis diagnóstico/propuesta del indicador OEE*

Equipos	Averías	OEE actual	OEE propuesto
Criba vibratoria de 3 niveles	Reemplazo de mallas		
	Tiempo de operación	0%	13%
	Paradas por avería		
	Reposición de gomas		
	Tiempo de operación	66%	70%
	Paradas por avería		
	Fallas en la correa de la criba		
	Tiempo de operación	60%	64%
	Paradas por avería		
	Ajuste de pernos		
Molino de impacto	Tiempo de operación	74%	75%
	Paradas por avería		
	Desgaste o ruptura de las paredes de impacto	64%	71%
	Paradas por avería		
Cintas transportadoras	Desgaste o ruptura de las chapaletas	70%	75%
	Paradas por avería		
	Corte de las cintas	77%	78%
	Paradas por avería		
	Ruptura de la correa	73%	79%
	Paradas por avería		

Elaboración: Propia (2025)

El análisis comparativo del OEE identifica la baja disponibilidad, causada por paradas largas por fallas no planificadas, como la principal limitante de los equipos críticos; al migrar a un mantenimiento preventivo y programado y aplicar SMED para reducir el MTTR, se alcanzan mejoras sustanciales. En la criba vibratoria (el equipo más crítico)

se transforma la falla catastrófica del reemplazo de mallas (0% a 13% propuesto) en intervenciones programadas, además de programar la reposición de gomas (66% a 70%), el reemplazo de la correa B85 al 80% de vida útil (60% a 64%) y mantener ajustes diarios de pernos (74% a 75%), ver anexos 3 y 9. En el molino de impacto, donde la calidad ya es 100%, la disponibilidad mejora al convertir la mitad de las averías inesperadas en reemplazos por condición (paredes 64% a 71%, chapaletas 70% a 75%) y aplicar SMED para acortar intervenciones, ver anexos 4 y 10. Finalmente, las cintas transportadoras elevan su OEE al reducir la recurrencia de cortes mediante inspecciones semanales del empalme (77% a 78%) y eliminar por completo las fallas de la correa al incorporarlas a revisiones preventivas (73% a 79% propuesto), consolidando un sistema más confiable y con menor tiempo de inactividad, ver anexos 5 y 11.

5.7.2. Análisis diagnóstico/propuesta de los indicadores MTBF y MTTR

Esta tabla presenta una comparación exhaustiva de los indicadores clave de desempeño (KPI) de mantenimiento, MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) y MTTR (Tiempo Medio Para Reparar), para los tres equipos más críticos de la planta (criba vibratoria de tres niveles, molino de impacto y cintas transportadoras). La columna total anual actual refleja el desempeño histórico de los equipos, caracterizado por una alta dependencia del mantenimiento correctivo. Por otro lado, la columna Total anual propuesto proyecta las mejoras en confiabilidad y eficiencia tras la implementación de un plan de mantenimiento, cumpliendo con los requisitos de la norma boliviana NB 12017. El objetivo central de esta propuesta es convertir 50 averías inesperadas anuales en solo 22 intervenciones programadas, lo que se traduce en un ahorro proyectado de 6.264,20 minutos de inactividad al año. Para más detalles ver anexos 6 y 13.

Tabla 5.17*Análisis diagnóstico/propuesta de los indicadores MTBF y MTTR*

Equipos	Descripción	Datos anuales actuales	Datos anuales propuestos
Criba 3N	Cantidad de averías	25	11
	Tiempo de paradas por averías (min)	5.274,00	1.375,40
	MTBF* (min)	7.351,44	18.693,15
	MTBF* (hrs)	122,52	311,55
	MTTR* (min)	210,96	125,04
	MTTR* (hrs)	3,52	2,08
Molino de impacto	Cantidad de averías	16	8
	Tiempo de paradas por averías (min)	2.704,00	918,00
	MTBF* (min)	11.690,38	25.760,25
	MTBF* (hrs)	194,84	429,34
	MTTR* (min)	169,00	114,75
	MTTR* (hrs)	2,82	1,91
Cintas transportadoras	Cantidad de averías	9	3
	Tiempo de paradas por averías (min)	838,00	258,00
	MTBF* (min)	20.913,56	68.914,00
	MTBF* (hrs)	348,56	1.148,57
	MTTR* (min)	93,11	86,00
	MTTR* (hrs)	1,55	1,43
Total, de averías		50	22
Total, de Tiempo de paradas por averías (min)		8.816,00	2.551,40
MTBF (min)		11.208,68	28.111,30
MTBF (hrs)		186,81	468,52
MTTR (min)		176,32	115,97
MTTR (hrs)		2,94	1,93

Elaboración: Propia (2025)

Los resultados comparativos entre los datos actuales y los datos propuestos evidencian una mejora significativa en el desempeño de los equipos críticos de la planta. La implementación del plan de mantenimiento reduce de manera notable la frecuencia anual de averías, pasando de 50 a 22 eventos. De forma paralela, el tiempo total de

paradas disminuye de 8.816 minutos a 2.551,40 minutos, lo que implica una recuperación sustancial de horas productivas a lo largo del año.

Los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad muestran también una evolución favorable. El MTBF aumenta en todos los equipos, reflejando intervalos más amplios entre fallas, mientras que el MTTR disminuye, indicando que las intervenciones son más rápidas y eficientes. Para el conjunto de equipos, el MTBF se incrementa de 186,81 horas a 468,52 horas, mientras que el MTTR baja de 2,94 a 1,93 horas, lo que confirma una mayor disponibilidad operativa y una gestión del mantenimiento más efectiva.

5.8. Sistema de control operacional

La propuesta del Plan de Mantenimiento se sustenta en una arquitectura lógica de gestión (CMMS Lógico) que se emplearan hojas de cálculo avanzadas (Excel) como plataforma central de control. Esta elección es pragmática y viable para Áridos Cuéllar en su fase inicial de SGM, alineándose con el perfil requerido para el jefe de producción, quien debe manejar software de gestión de mantenimiento.

El sistema de control comienza con la catalogación de los activos y sus componentes como ser el árbol de activos (deben estar jerarquizados en el sistema Lógico para vincular todas las órdenes de trabajo y repuestos a la ubicación correcta) y listas de materiales (su funcionalidad se satisface a través de la Ficha de registro de repuestos propuestos y costos (Anexo 14) y los listados detallados en los instructivos (Anexo 8), los cuales especifican los repuestos críticos necesarios para cada intervención).

5.8.1. Flujo de Órdenes de Trabajo (OT) y codificación de fallas

El CMMS Lógico administra el flujo de la información, desde la detección de una anomalía hasta el cierre y la retroalimentación. Este flujo se protocoliza mediante la documentación estandarizada:

Generación de OT: El personal operativo utiliza los registros de inspección preventiva para detectar daños. Si se detecta una condición de falla crítica, se dispara automáticamente una Orden de Trabajo Correctiva (OTC).

Flujo documental: El formato de la OTC (Anexo 8) es el núcleo del flujo. En este formato, el tiempo total de intervención y los repuestos consumidos son registrados al cierre.

Codificación de fallas: Las fallas se codifican directamente en la OT mediante la selección del Tipo de componente afectado (ej., Malla1 □, Placa □, Chapaleta □). Esta taxonomía Ad Hoc (o la clasificación del Tipo de avería) es fundamental para que la hoja de cálculo pueda realizar análisis estadísticos sobre la frecuencia de averías.

5.8.2. Seguridad en el mantenimiento de la planta

LOTO: es un acrónimo de (Bloqueo/Etiquetado). Es un procedimiento de seguridad que se utiliza en la industria para proteger a los trabajadores de la liberación inesperada de energía peligrosa de máquinas y equipos durante su mantenimiento o reparación.

El propósito principal del LOTO es garantizar que el equipo no pueda encenderse o liberar energía accidentalmente mientras alguien está trabajando en él. Esto se logra aislar la fuente de energía y colocar un dispositivo de bloqueo y una etiqueta de advertencia.

EPP (Equipo de protección personal)

Figura 5.4

Equipo de protección personal

Categoría	Elemento	Descripción	Dimensiones / Medidas típicas	Características principales	Imágenes
EPP (Equipo de Protección Personal)	Casco de seguridad	Protección contra impactos y caída de objetos.	Ajustable (tallas universales).	Polietileno de alta densidad, suspensión interna de 4–6 puntos.	
	Guantes anticorte	Protección de manos frente a aristas de metal o cortes en mallas.	Tallas M–XL.	Fibra anticorte nivel 5, recubrimiento en palma.	
	Gafas de seguridad	Protección contra polvo, partículas y chispas de soldadura ligera.	Lente ancho: 14–16 cm.	Polycarbonato transparente, antiempañante.	
	Protector auditivo	Protección contra vibraciones y ruido de la criba (>85 dB).	Atenuación: 25–30 dB.	Tipo copa o tapón reutilizable.	
	Botas de seguridad	Protección de pies ante impactos y deslizamientos.	Tallas 38–45.	Puntera de acero, suela antideslizante y dieléctrica.	
	Mascarilla / respirador	Protección frente a polvo de áridos.	FFP2 o N95.	Filtros reemplazables; ajuste anatómico.	

Elaboración: Propia (2025)

El uso adecuado del Equipo de Protección Personal constituye la última barrera de defensa ante los riesgos inherentes a las operaciones de la planta de áridos. Su correcta selección y empleo no solo reduce significativamente la probabilidad de accidentes, sino que garantiza que los trabajadores desarrollen sus actividades en condiciones seguras y controladas. La implementación de EPP obligatorio asegura un estándar mínimo de protección frente a proyecciones, ruido, polvo, vibraciones y riesgos mecánicos presentes en los equipos de trituración y clasificación. Además, el cumplimiento riguroso de estas medidas fomenta una cultura preventiva dentro de la organización, fortaleciendo la responsabilidad individual y colectiva en materia de seguridad industrial.

CAPÍTULO VI

6. GESTIÓN DE REPUESTO

6.1. Gestión de repuestos propuesta

La propuesta de Gestión de Repuestos implementa los requisitos 6.3.1 y 6.6 de la NB 12017 al establecer un sistema de gestión de almacenes y definir canales de comunicación y coordinación con el área operativa, elementos esenciales del Manual Administrativo para garantizar la prestación eficiente del servicio de mantenimiento.

El objetivo estratégico principal de la gestión de repuestos, impulsado por la metodología Just In Time (JIT), es asegurar la disponibilidad ininterrumpida de componentes clasificados como de Alta Criticidad (A), cuya falta detiene la planta, tales como las placas internas del molino (cuyo Lead Time es de 18 días), las chapaletas (con 20 días de tiempo de entrega) o las mallas areneras. Este enfoque tiene como meta fundamental eliminar la dependencia de las costosas y riesgosas compras externas de emergencia, las cuales suelen incurrir en costos elevados debido a la urgencia y los sobrecargos generados por la inflación o la necesidad de una pronta llegada del repuesto. Al planificar con antelación, el sistema previene la operación de los equipos "hasta la falla catastrófica" por la escasez de suministros críticos. Para más detalles ver tabla 4.17.

La siguiente tabla presenta la gestión de repuestos propuesta para los equipos críticos de la planta de áridos. Este análisis se elaboró con base en los registros de repuestos anexo 14, tiempos de entrega y nivel de criticidad de cada repuesto. Su objetivo es establecer un control más eficiente del inventario, asegurando la disponibilidad oportuna de materiales esenciales para las actividades de los mantenimientos.

Tabla 6.1

Matriz de criticidad y tiempos de entrega de repuestos propuesto

Equipos	Repuestos	Consumo prom. (unidades/parada)	Unidad	Cantidad de paradas (Paradas/año)	Consumo total (unidades/año)	Tiempo entrega prom. (días)	Criticidad
Molino de impacto	Chapaletas	2	Pieza	2	4	20	Alta (A)
Molino de impacto	Placa interna	6	Pieza	6	36	18	Alta (A)
Criba vibratoria 3N	Mallas areneras	2	Mallas	2	4	7	Alta (A)
Cinta transportadoras	Bandas	1	Banda	1	1	7	Alta (A)
Criba vibratoria 3N	Correa de distribución	3	Correa	1	3	3	Alta (A)
Criba vibratoria 3N	Fierros de construcción (D=8)	25	Barras	2	50	2	Media (B)
Criba vibratoria 3N	Fierros de construcción (D=10)	20	Barras	2	40	2	Media (B)
Criba vibratoria 3N	Goma (caucho sintético)	7	Metros	2	14	1	Media (B)
Cinta transportadoras	Grapas	1	Docena	3	3	1	Media (B)
Criba vibratoria 3N	Electrodos	6	Kg	2	12	1	Baja (C)
Todos los equipos	Aceite	18	Litros	3	54	1	Baja (C)
Todos los equipos	Grasa	18	Kg	4	72	1	Baja (C)
Todos los equipos	Pernos	5	Docena	15	75	1	Baja (C)

Elaboración: Propia (2025)

El análisis propuesto prioriza el inventario y la planificación de compra de repuestos de Alta Criticidad (A), cuya escasez detiene la planta. Los datos de consumo promedio (veces/año) utilizados en esta propuesta se derivan de la optimización de la demanda actual registrada en el anexo 2 al alinearse con la menor frecuencia de averías propuesta en el cronograma de actividades planificadas (anexo 12). Esta reducción es crucial, ya que se proyecta que la frecuencia de averías propuesta (tabla 5.16) convertirá las 50 averías inesperadas actuales en solo 22 intervenciones programadas al año. Los repuestos críticos, como las placas internas (18 días de entrega) y las chapaletas (20 días de entrega), presentan tiempos de entrega prolongados, lo que refuerza la necesidad de gestionar un stock de seguridad y calcular el Punto de Reorden (ROP) utilizando la metodología Just In Time (JIT).

6.2. Cálculos ROP propuesto (punto de reorden)

La presente tabla resume los cálculos del punto de reorden (ROP) propuestos, los cuales son la base de la gestión de repuestos bajo la filosofía Just In Time (JIT). El objetivo primordial de esta planificación es asegurar la disponibilidad ininterrumpida de componentes clasificados como de Alta Criticidad (A), cuya ausencia detiene la planta, como son las placas internas (con un tiempo de entrega o Lead Time de 18 días) y las chapaletas (con un Lead Time de 20 días).

El ROP (calculado como Demanda diaria promedio $\times$ Lead time + Stock de seguridad) permite determinar el nivel exacto de inventario restante que debe disparar automáticamente una nueva orden de compra, garantizando que el repuesto llegue justo antes de que el stock de seguridad (SS) se agote. En este caso, la demanda diaria promedio $\times$ Lead time será el consumo promedio $\times$ cantidad de paradas. Para el desarrollo del cálculo se considera un mes de 25 días operativos para la demanda diaria.

Tabla 6.2

Cálculo del Punto de Reorden propuesto (ROP)

Equipos	Repuestos	Consumo prom. (unidades/parada)	Unidad	Cantidad de paradas (Paradas/año)	Consumo total (unidades/año)	Stock de seguridad (SS)	ROP
Molino de impacto	Chapaletas	2	Pieza	2	4	2,26	7
Molino de impacto	Placa interna	6	Pieza	6	36	7,80	44
Criba vibratoria 3N	Mallas areneras	2	Mallas	2	4	2,20	7
Cinta transportadoras	Bandas	1	Banda	1	1	1,05	3
Criba vibratoria 3N	Correa de distribución	3	Correa	1	3	3,15	7
Criba vibratoria 3N	Fierros de construcción (D=8)	25	Barras	2	50	27,50	78
Criba vibratoria 3N	Fierros de construcción (D=10)	20	Barras	2	40	22,00	62
Criba vibratoria 3N	Goma (caucho sintético)	7	Metros	2	14	7,70	22
Cinta transportadoras	Grapas	1	Docena	3	3	1,10	5
Criba vibratoria 3N	Electrodos	6	Kg	2	12	6,30	19
Todos los equipos	Aceite	18	Litros	3	54	19,80	74
Todos los equipos	Grasa	18	Kg	4	72	19,80	92
Todos los equipos	Pernos	5	Docena	15	75	6,50	82

Elaboración: Propia (2025)

El análisis del Punto de Reorden (ROP) confirma la necesidad de una gestión rigurosa para los repuestos de Alta Criticidad (A) que presentan tiempos de entrega prolongados, como las chapaletas (ROP 7 unidades) y las placas internas (ROP 44 unidades). Los valores de consumo promedio (veces/año) utilizados en esta propuesta son el resultado directo de la optimización del mantenimiento, que convierte las 50 averías inesperadas anuales actuales en solo 22 intervenciones planificadas. Esta reducción de la frecuencia de fallas permite establecer stocks de seguridad (SS) optimizados, y garantiza que la planificación de la compra se active con suficiente antelación para que el repuesto esté disponible, eliminando la dependencia de compras externas de emergencia y costosas.

CAPÍTULO VII

7. INVERSION DE LA PROPUESTA

7.1. Análisis del costo por paradas (tiempos muertos)

La principal fuente de ahorro de la propuesta se deriva de la reducción drástica de los tiempos muertos por fallas inesperadas. La implementación de mantenimientos preventivos/programados y la metodología SMED para acortar el MTTR (Tiempo Medio Para Reparar) permiten cuantificar el ahorro en tiempo y en producción no perdida.

7.1.1.Reducción total de tiempos de parada anual

Tabla 7.1

Reducción total de tiempos de parada anual

Equipo	Tiempo de Parada Actual (min/año)	Tiempo de Parada Propuesto (min/año)	Ahorro de Tiempo (min/año)
Criba Vibratoria 3N	5.274,00	1.375,40	3.898,60
Molino de Impacto	2.704,00	918,00	1.786,00
Cintas Transportadoras	838,00	258,00	580,00
Total, general	8.816,00	2.551,40	6.264,60

Fuente: Punto 5.4

Elaboración: Propia (2025)

La estrategia Lean convierte 50 averías inesperadas actuales en solo 22 intervenciones planificadas anuales. Esto genera un ahorro total proyectado de 6.264,60 minutos al año (aproximadamente 104,41 horas de tiempo productivo recuperado).

7.1.2. Valoración del costo por parada (pérdida de producción)

Para cuantificar el costo por parada que será igual a utilidad neta, se debe valorar la producción recuperada (tn/año) multiplicada por el precio de venta (P.U. de Venta).

Producción recuperada: Utilizaremos la capacidad nominal promedio de la criba vibratoria de tres niveles (uno de los equipos más críticos) para estimar el tonelaje recuperado:

La razón para valorar este tiempo recuperado, debemos usar la tasa de producción del equipo que limita la capacidad total de la planta. Según las fichas técnicas del equipo:

Criba vibratoria de tres niveles: Capacidad de hasta 150 tn/h.

Molino de impacto: Producción de 220 - 300 tn/h.

Cinta transportadora: Producción de 400 tn/h.

Dado que la criba vibratoria de tres niveles es el equipo con la capacidad nominal más baja (150 tn/h) en la cadena principal del proceso, se considera el cuello de botella. Por lo tanto, la producción recuperada será:

$$\text{Producción Recuperada: } 6.264,60 \frac{\text{min}}{\text{año}} \times 2,5 \frac{\text{tn}}{\text{min}} = 15.661,50 \frac{\text{tn}}{\text{año}}$$

Precio de venta (P.U. de Venta)

Tabla 7.2

Precio de venta

Producto	P.U. (Bs/tn)
Arena Gruesa	60,00
Arena Fina	65,00
Gravilla	44,00
Grava	29,00
Limo	16,00
Total, promedio	42,80

Elaboración: Propia (2025)

El producto la piedra no estará incluida porque es obtenida de los ríos.

Por lo tanto, el valor de costo por parada será:

$$\text{Costo por parada: } 15.661,50 \frac{\text{tn}}{\text{año}} \times 42,80 \frac{\text{Bs}}{\text{tn}} = 670.312,20 \frac{\text{Bs}}{\text{año}}$$

Este costo 670.312,20 Bs/año será lo que la planta ahorrará utilizando la propuesta del plan de mantenimiento.

7.2. Cuantificación del costo de inversión

El Costo de Inversión se centra en el costo operativo de la implementación anual del Plan de Mantenimiento Propuesto (incluyendo repuestos y mano de obra directa).

7.2.1. Costo anual de mano de obra (M.O.) directa

El costo de mano de obra es el costo directo mensual de los 7 trabajadores, los operadores reciben 3.000,00 Bs por operador, el operador técnico 3.200,00 Bs y el jefe de producción 3.500,00 Bs; por lo tanto, el costo anual es:

Tabla 7.3

Costo anual de mano de obra

Mano de Obra	Costo Mensual (Bs.)	Costo Anual (Bs.)
Operadores (5)	15.000,00	180.000,00
Operador técnico (1)	3.200,00	38.400,00
Jefe de producción (1)	3.500,00	42.000,00
Total M.O. Directa	21.700,00	260.400,00

Fuente: Planta de Áridos Cuellar

Elaboración: Propia (2025)

7.2.2. Costo de Capacitación

Dado que SMED y JIT son metodologías avanzadas, se requiere un instructor o consultor especializado. Al no haber una cifra proporcionada en las fuentes para este rubro, se utilizará un costo estimado (que debe ser verificado de forma independiente) para cubrir la consultoría y los materiales didácticos (manuales, kits de práctica).

Se consideran los 7 miembros del equipo de mantenimiento y producción (5 operadores, 1 técnico operador y 1 jefe de producción).

Asumiendo 300 días operativos al año, con una duración de 3 días intensivos.

Tabla 7.4

Costo de capacitación

Detalle	Base de Cálculo	Costo total (Bs.)
Honorarios del instructor/consultor	Bs 800,00 por día x 3 días	2.400,00
Materiales didácticos y kits de práctica	Manuales de referencia para los 7 participantes y kits de práctica	204,00
Total, de capacitación		2.604,00

Elaboración: Propia (2025)

7.2.3. Costo anual de repuestos y consumibles cuantificables

Para llevar a cabo las comparaciones se debe utilizar el consumo y también los precios unitarios (P.U. Bs.) proporcionados (Anexo 14/Tabla 6.1):

Tabla 7.5*Costo anual de repuestos y consumibles propuestos*

Equipos	Repuestos	Unidad	Consumo total (unidades/año)	ROP	P.U. (Bs.)	Costo total (Bs.)
Molino de impacto	Chapaletas	Pieza	4	7	13.000	91.000,00
Molino de impacto	Placa interna	Pieza	36	44	3.000	132.000,00
Criba vibratoria 3N	Mallas areneras	Mallas	4	7	7.100	49.700,00
Cinta transportadoras	Bandas	Banda	1	3	2.000,00	6.000,00
Criba vibratoria 3N	Correa de distribución	Correa	3	7	250	1.750,00
Criba vibratoria 3N	Fierros de construcción (D=8)	Barras	50	78	85	6.630,00
Criba vibratoria 3N	Fierros de construcción (D=10)	Barras	40	62	98	6.076,00
Criba vibratoria 3N	Goma (caucho sintético)	Metros	14	22	15	330,00
Cinta transportadoras	Grapas	Docena	3	5	50,00	250,00
Criba vibratoria 3N	Electrodos	Kg	12	19	75	1.425,00
Todos los equipos	Aceite	Litros	54	74	60	4.440,00
Todos los equipos	Grasa	Kg	72	92	94,44	8.688,48
Todos los equipos	Pernos	Docena	75	82	300	24.600,00
TOTAL						332.889,48

Elaboración: Propia (2025)**7.2.4. Costo total de inversión**

Costo total de inversión: 260.400,00 + 2.604,00 + 332.889,48 = **595.893,48 Bs**

7.3. Cálculo del ROI

La siguiente sección detalla el Cálculo del Retorno de la Inversión (ROI), un indicador financiero clave utilizado para medir la rentabilidad del Plan de Mantenimiento Propuesto. Este cálculo compara la utilidad neta proyectada (el costo por parada evitado, o el valor de la producción recuperada anualmente) frente al costo total anual de la inversión necesaria para implementar la nueva estrategia (que incluye el costo de mano de obra, costo de capacitación y de repuestos y consumibles). La utilidad neta se deriva del ahorro total proyectado de 6.264,60 minutos de inactividad al año, logrados

al convertir fallas inesperadas en intervenciones planificadas y optimizar los tiempos de reparación mediante la metodología Lean (SMED).

El cálculo del ROI se realiza utilizando la fórmula:

$$\text{ROI} = \frac{\text{Utilidad neta} - \text{Costo de inversión}}{\text{Costo de inversión}} \times 100\%$$

$$\text{ROI} = \frac{670.312,20 - 595.893,48}{595.893,48} \times 100\%$$

$$\text{ROI} = 12,48\%$$

El resultado del 12,48% indica que la implementación de la estrategia de mantenimiento propuesta es financieramente viable y rentable. Este valor proyectado significa que por cada unidad monetaria invertida en la inversión total requerida (Bs. 595.893,48), la organización recupera su capital y genera una ganancia adicional del 12,48%. Esta utilidad neta de Bs. 670.312,20 anuales (que representa el costo por parada evitado o la producción recuperada) es el resultado directo de la recuperación de 6.264,60 minutos (aproximadamente 104,41 horas) de tiempo productivo que anteriormente se perdían debido a fallas inesperadas.

CAPÍTULO VII

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- Se logró diseñar un plan de mantenimiento integral con enfoque preventivo, correctivo y Lean para los equipos críticos de la Planta de Áridos Cuellar, cumpliendo el objetivo de reducir tiempos de inactividad, optimizar el rendimiento y minimizar costos operativos. La estrategia propuesta convierte el modelo actual, que se basa en un alto volumen de mantenimiento correctivo (50 averías), en un sistema basado en 22 intervenciones planificadas.
- La implementación del plan generará un ahorro total proyectado de 6.264,60 minutos al año (104,41 horas) de tiempo productivo recuperado. Este ahorro se valora en una utilidad neta de 670.312,20 Bs/año por la producción recuperada. El análisis económico confirma la viabilidad del proyecto con un Retorno sobre la Inversión (ROI) del 12.48%.
- Los indicadores de rendimiento proyectan una mejora global de la fiabilidad, aumentando el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de 186,81 horas a 468,52 horas. Gracias a la aplicación de la metodología SMED (Single Minute Exchange of Die), se logra una reducción significativa en el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR) de 2,94 horas a 1,93 horas.
- La propuesta eleva la Eficiencia Global de los Equipos (OEE) en las fallas más críticas, mitigando el impacto de la baja disponibilidad actual. Como la falla de "Reemplazo de mallas" en la criba vibratoria de tres niveles pasa de un OEE actual del 0% a un 13% propuesto, confirmando que las intervenciones programadas reducen drásticamente los tiempos muertos.
- La estructura documental propuesta, incluyendo instructivos de mantenimiento y registros, se alinea con los requisitos clave de la Norma Boliviana NB 12017; para la conservación y la confiabilidad operativa de los activos.

8.2. Recomendaciones

- Se recomienda la ejecución del cronograma de actividades planificadas, asegurando que las intervenciones críticas, como el reemplazo de mallas y el desgaste de placas del molino de impacto, se realicen en los tiempos definidos para evitar la recurrencia de las fallas catastróficas inesperadas.
- Se debe garantizar la correcta aplicación de la metodología SMED (Single Minute Exchange of Die), especialmente en los equipos que concentran el mayor MTTR, como la criba vibratoria de tres niveles y el molino de impacto.
- Es crucial establecer y mantener el stock de seguridad de los repuestos clasificados como de Alta Criticidad (A). Se recomienda utilizar el cálculo del Punto de Reorden (ROP) para automatizar la compra de suministros y eliminar la dependencia de adquisiciones urgentes y costosas, garantizando la disponibilidad justo a tiempo.
- Se recomienda invertir en la capacitación continua del personal operativo y técnico, especialmente en las metodologías Lean (JIT/SMED), y asegurar la adhesión a los instructivos estandarizados y los manuales de funciones.
- El uso constante de seguridad como los equipos de protección personal (EPP) para el personal, debe ser estrictamente obligatorio.
- Se recomienda que la gerencia general y el jefe de producción monitoreen periódicamente los indicadores clave de rendimiento (OEE, MTBF y MTTR), ya que estos reflejan la efectividad del plan y son esenciales para proponer acciones de mejora continua.
- Se recomienda definir un periodo de prueba de 12 a 16 semanas para implementar y garantizar la sostenibilidad del plan propuesto.