UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA PLANIFICACIÓN Y ESTRUCTURACIÓN DE PROYECTOS DE SOSTENIMIENTO EN EL RECLAMADOR BM-150, ZARANDA SC-160 Y REPARACIONES ESTRUCTURALES EN CERRO MATOSO S.A.

Daniel Andrés Hoyos Lobo

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesores

Diego Hernán Giraldo Vásquez, Doctor (PhD) en Materiales

José David Lozano Suárez, Ingeniero Mecánico – Máster en Gestión de Proyectos

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Materiales

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Cita	Hoyos Lobo [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] D. A. Hoyos Lobo, “Implementación de una metodología para la planificación y estructuración de proyectos de sostenimiento en el reclamador bm-150, zaranda sc-160 y reparaciones estructurales en Cerro Matoso S.A.” Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025.

creative commons CC BY NC SA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Quiero darle la gloria y el honor por este trabajo, en primer lugar, a Dios, quien fue mi fortaleza y guía a lo largo de todo mi proceso académico y profesional. Su presencia me dio las ganas de salir adelante luego del accidente que cambió el rumbo de mi vida; sin Él, nada de esto hubiera sido posible.

Aprovecho para dedicar también este logro con todo mi corazón a mi madre, **Yinis Lobo**, quien ha sido mi mayor inspiración para salir adelante, impulsándome siempre a pesar de las dificultades.

A mi padre, **Uldarico Hoyos**, le agradezco profundamente por ser un ejemplo de resiliencia, constancia y amor por lo que hacemos. Su apoyo incondicional y esfuerzo diario han sido fundamentales para sacar adelante a nuestra familia.

Y a mi hermana **Marina Hoyos**, gracias por estar siempre a mi lado, sobre todo, por ver en mi esa inspiración.

Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente a la **Cerro Matoso S.A. South 32** por creer en mí y una vez más luego de mi accidente darme esta hermosa oportunidad de desarrollar mis prácticas profesionales en una de las mejores compañías del mundo, donde cada miembro se mostró dispuesto a colaborar y aportar a mi proceso de aprendizaje.

Valoro mucho y por lo tanto mi especial gratitud al profesor **Diego Giraldo**, mi asesor académico, por su constante disposición para orientarme y enfocarme a dar siempre lo mejor de mí.

Agradecimientos también al ingeniero **José Lozano**, mi asesor externo, por su apoyo firme y leal, por su confianza y guía permanente durante todo el proceso.

Por último, gracias a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de mi proceso de formación. Sus palabras de ánimo y cada gesto de apoyo fueron herramientas fundamentales para cada logro obtenido.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN....9
ABSTRACT....10
I. INTRODUCCIÓN....11
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA....14
III. OBJETIVOS....16
A. Objetivo general....16
B. Objetivos específicos....16
IV. MARCO TEÓRICO / ESTADO DEL ARTE....17
Clasificación de Proyectos en Cerro Matoso....17
Proyectos Tipo A1....17
Proyectos Tipo A2....17
Prefactibilidad....18
Factibilidad....18
Entregables estandarizados....18
Cadena del reclamador BM – 150....19
Zaranda SC-160....20
Reparaciones Estructurales....22
V. METODOLOGÍA....24
Etapa 1: Revisión y procesamiento de la información existente (Caso de Negocio)....24
Etapa 2: Preparación de entregables y alcances de trabajo para cada proyecto....25
Alcance del trabajo (SOW)....25
Registro y análisis de Riesgos....26
Plan de Ejecución de Proyecto (PEP)....27
VI. RESULTADOS....28

Procesamiento de información para el reclamador de mineral. 28
Hipótesis 1. 29
Hipótesis 2. 30
Hipótesis 3. 31
Procesamiento de información para cambio de zaranda. 32
Retiro de elementos estructurales. 34
Estructura superior de la zaranda SC-160. 35
Inspección de puntos de anclaje para izaje. 36
Inspección de elementos estructurales. 37
Procesamiento de información para las reparaciones estructurales. 37
Descripción de Hallazgos. 39
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS 40
Alternativas para reclamador BM-150. 41
Mejoramiento en el sistema de sellado para la SC-160. 42
Condiciones estructurales con soluciones previstas. 43
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 46
REFERENCIAS 47

LISTA DE TABLA

TABLA I. REGISTRO DE RIESGO PARA CADA PROYECTO. 26
TABLA II. ESQUEMA PARA ELABORAR UN PEP. 27
TABLA III. CLASIFICACIÓN DE HIPÓTESIS. 29
TABLA IV. ACTIVIDADES PARA CAMBIO DE ZARANDA. 33
TABLA V. CLASIFICACIÓN DE HALLAZGOS [21]. 38
TABLA VI. DESCRIPCIÓN DEL HALLAZGO FE1-15. 40
TABLA VII. RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA A EFECTUADA. 41
TABLA VIII. ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS. 45

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Localización de la planta de Cerro Matoso. 11
Fig. 2. Reclamador BM-150 y sus cadenas [5]. 19
Fig. 3. Disposición de Zaranda SC -160 [6]. 21
Fig. 4. Esquema de gestión de la integridad estructural [14]. 23
Fig. 5. Daños corrosivos y mecánicos a las estructuras [18]. 24
Fig. 6. Condiciones actuales de las cadenas del BM-150 [5]. 29
Fig. 7. Desgastes irregulares en sprockets [19]. 30
Fig. 8. Desalineamiento de 14 mm [19]. 30
Fig. 9. Acordonamiento de soldadura [19]. 31
Fig. 10. Ausencia de cordón vertical [19]. 32
Fig. 11. Chuta y estructura de escaleras superiores [20]. 35
Fig. 12. Escaleras lado norte y campañas de captación de polvos [20]. 35
Fig. 13. Estructura superior de la SC-160 [20]. 36
Fig. 14. Puntos de anclaje para izamiento [20]. 36
Fig. 15. Estructura pórtica de la SC-160. 37
Fig. 16. Número de hallazgos y clasificación [21]. 38
Fig. 17. Patología de los hallazgos. 39
Fig. 18. Plano del sprocket y sus partes. 42
Fig. 19. Modificación y mejora de los eslabones de cadena. 42
Fig. 20. Mejoramiento propuesto para sistema de sellado. 43
Fig. 21. Hallazgo A200-29A con su ubicación [23]. 44
Fig. 22. Reporte de condiciones estructurales [23]. 44

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

BM-150	Reclamador de mineral
CMSA.	Cerro Matoso S.A.
Esp.	Especialista
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KPI	Indicador de desempeño
PEP	Plan de ejecución de proyectos
PhD	Doctor
RR	Registro de riesgos
RRR	Calificación de riesgo residual
SC-160	Zaranda o Criba
SOW	Alcance del trabajo **(**Scope of Work)
UdeA	Universidad de Antioquia

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en el mejoramiento e implementación de una metodología ágil de estructuración de proyectos de ingeniería desde la fase de planeacion, enfocados al sostenimiento y preservación de activos en **CMSA**, con el fin de optimizar la gestión de proyectos para garantizar la continuidad operacional, la eficiencia en el uso de recursos y la prolongación de la vida útil de los activos estratégicos de la compañía. Realizando la caracterización de la metodología actualmente utilizada en la empresa y la revisión bibliográfica a través del histórico de intervenciones estructurales, mecánicas, mantenimientos correctivos/preventivos y cambios de equipos realizados anteriormente, se evaluaron las fortalezas, vacíos y oportunidades de mejora a raíz de una documentación completa. Asimismo, la segunda fase estuvo enfocada en la definición clara de roles, responsabilidades, cronogramas, presupuestos, requerimientos técnicos y criterios de evaluación, con el fin de establecer una estructura estandarizada y aplicable a futuros proyectos. Los resultados obtenidos evidencian una mayor claridad en la planeación, reducción de incertidumbre en la ejecución y una alineación más precisa entre los objetivos corporativos y los proyectos de ingeniería. Por último, se concluye que la aplicación de esta metodología no solo fortalece la gestión de activos, sino que también promueve la sostenibilidad, reducción de costos y la competitividad de la organización en el sector minero-industrial.

Palabras clave — **Metodología de proyectos, preservación, sostenimiento de activos, vida útil, estructuración de proyectos.**

ABSTRACT

This paper focuses on the improvement and implementation of an agile methodology for structuring engineering projects from the planning phase, focused on the maintenance and preservation of assets at **CMSA**, to optimize project management to ensure operational continuity, efficient use of resources, and the extension of the useful life of the company's strategic assets. By characterizing the methodology currently used in the company and reviewing the literature through the history of structural and mechanical interventions, corrective/preventive maintenance, and equipment changes carried out previously, the strengths, gaps, and opportunities for improvement were evaluated based on comprehensive documentation. Likewise, the second phase focused on clearly defining roles, responsibilities, schedules, budgets, technical requirements, and evaluation criteria to establish a standardized structure applicable to future projects. The results obtained show greater clarity in planning, reduced uncertainty in execution, and a more precise alignment between corporate objectives and engineering projects. Finally, it is concluded that the application of this methodology not only strengthens asset management but also promotes the sustainability and competitiveness of the organization in the mining-industrial sector.

Keywords — **Project methodology, preservation, asset maintenance, shelf life, project structuring.**

I. INTRODUCCIÓN

Cerro Matoso S.A. (CMSA) trata mineral de níquel laterítico en una instalación de procesamiento pirometalúrgico para producir ferroníquel como producto comercial. La planta de producción incluye trituración, almacenamiento/mezcla de mineral, secado, calcinación (mediante reducción previa en hornos rotativos) proceso de fundición que se lleva a cabo en hornos eléctricos y refinación para producir ferroníquel de calidad comercial [1].



Fig. 1. Localización de la planta de Cerro Matoso.

En el marco de estos procesos, en la compañía operan diversos equipos orientados a la obtención de mineral destinado a exportación. En dichos procesos intervienen activos de alto impacto tanto económico como funcional. Entre ellos se destaca el reclamador de mineral, el cual, mediante un sistema de cadenas equipadas con bandejas, efectúa el raspado de la superficie de la pila principal, removiendo el material y depositándolo en las bandas transportadoras que lo conducen hacia la etapa de secado [2].

De manera complementaria, se encuentra la zaranda, equipo que recibe el mineral seco proveniente de los secadores y lo clasifica mediante un sistema de vibración inclinada. En su interior dispone de dos mallas con diferentes aberturas, lo que permite optimizar el manejo del

volumen de mineral, obteniendo como resultado un material de rechazo y otro que continúa hacia el proceso de calcinación [3].

A lo largo de sus 43 años de operación, CMSA se ha destacado por mantener una excelente rentabilidad. Este desempeño sostenido ha implicado importantes retos y el desarrollo de grandes proyectos, los cuales han sido clave para garantizar la estabilidad y continuidad de la operación de la planta. Desde la puesta en marcha de cada línea de producción, la empresa se ha enfocado en maximizar los recursos disponibles, minimizando reprocesos y evitar sobrecostos.

Dentro de las nuevas áreas de estudio e innovación dentro de la compañía, en los últimos 10 años se ha consolidado un pilar importante: el área de ingeniería y proyectos. Dicha unidad ha dado la oportunidad tanto de empleo como de nuevas ideas de mejora, convirtiéndose en una excelente alternativa para la compañía en cuanto a estudio de nuevas tecnologías, herramientas, innovación, mejoramiento continuo, técnicas y procesos sostenibles en el tiempo. Gracias al estudio que se realiza en esta unidad, el área ha tenido una gran acogida por parte del personal de base operativa, ya que es la encargada de canalizar y gestionar sus ideas de mejora en campo; y todo esto llevando siempre la bandera del trabajo en equipo realizando las sinergias entre los frentes de trabajo, los cuales aportan para ser de la empresa una familia, donde el cuidado, la confianza, la unidad y la excelencia que son los valores primordiales los cuales caracterizan y motivan a la compañía a ser mejor.

La unidad denominada ingeniería y proyectos de Cerro Matoso juega un papel fundamental, al ser la encargada de asegurar la sostenibilidad de la compañía mediante el desarrollo y ejecución de los proyectos, desde su concepción hasta su entrega a satisfacción a las partes interesadas, que incluyen los diferentes departamentos y unidades de la compañía. Esta gestión se realiza cumpliendo estrictamente con los requerimientos de calidad, costos, tiempos y control de la inversión, considerando factores clave como la complejidad del proyecto, los riesgos para las personas y los activos, la disponibilidad de recursos, los costos involucrados, entre otros aspectos relevantes [4].

Los proyectos por realizar son antes llevados a un estudio para ser priorizados por CMSA dependiendo el grado de criticidad, riesgo y afectación algún activo de la compañía; para los años FY26 y FY27 (años financieros que van desde julio – julio año calendario) se realizará un servicio de ingeniería el cual regulará la relación contractual entre el contratista y CMSA de los proyectos abordándolos desde la fase conceptual, prefactibilidad y factibilidad [4].

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de la realización de la práctica académica, se da paso a la búsqueda, desarrollo de ingeniería, planeacion y mejora de la metodología de solución de los problemas planteados en cada proyecto en los cuales se tendrá influencia. Esto con el fin de mejorar las estrategias actuales de la empresa, donde se encontró que muchas veces los proyectos son abordados sin una regulación en los documentos existentes ni la revisión del histórico en el área de ejecución; por lo que es importante replantear la metodología para generar una verificación de cada paso que dé como resultado soluciones seguras y satisfactorias al cliente.

A continuación, se describen cada uno de ellos con su caso de negocio y su respectivo desglose con algunas aclaraciones de los antecedentes de cada uno:

- Cadena del reclamador BM - 150: Los sistemas de reclamo de mineral ubicados en el área 100 de la planta, identificado con el tag. BM-150, presentan un deterioro de sus sistemas de transporte mediante cadenas de rodillos, los cuales están por llegar al final de su ciclo de vida útil. Las cadenas, bandejas y guías se reemplazan cíclicamente cada cinco 5 años como parte de un reacondicionamiento preventivo, con el fin de evitar las indisponibilidades del sistema y un aumento en los costos de reparación.

Por la situación descrita, o que se requiere de un nuevo diseño que permita reducir las paradas no programadas que afectan el funcionamiento de la planta y, por ende, su producción [5].

- Cambio de Zaranda SC-160: En el 2019 se desarrolló una ingeniería básica para el análisis de alternativas estructurales y el plan de izaje para realizar la tarea de cambiar una zaranda, que realiza una clasificación primaria del mineral.

Con un nuevo diseño con las modificaciones para la nueva zaranda, se busca generar mejores condiciones de trabajo tales como un sellado efectivo y permitiendo, mediante tapas removibles en la parte superior, realizar cambios de rejillas de forma más segura y ergonómica, reduciendo el esfuerzo físico del personal.

Adicionalmente, se estima dar solución a un tema de polución, que afecta al personal con exceso de material particulado en la zona de trabajo [6].

- Reparaciones estructurales: La empresa CMSA inició operaciones en 1982 la línea 1 y en 2000 la línea 2. Aunque en los últimos 6 años se adoptaron buenas prácticas para revisar la integridad de sus activos estructurales, existen estructuras y edificios de la operación que no han sido inspeccionados ni intervenidos. Continuando con el concepto de sostenimiento estructural, se está abordando la administración de la infraestructura de la operación de manera más dinámica y preventiva siguiendo un procedimiento y estándar estructurado. Esperando, como consecuencia la actualización del inventario de activos cada dos años, con apoyo en empresas colombianas de ingeniería y construcción que aseguren una operación más confiable y segura de la planta.

Esta iniciativa pretende empaquetar la ejecución de los trabajos de adecuación, reparación y cambio de componentes estructurales; con el objetivo de dejar una línea base sobre la condición estructural de los principales edificios e infraestructuras de la operación.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Implementar una metodología estandarizada para la planificación y estructuración de proyectos desde la fase de ingeniería, con el propósito de optimizar la gestión, el control y la ejecución de los proyectos de sostenimiento del Reclamador BM-150, la Zaranda SC-160 y las estructuras en **CMSA**, garantizando su operatividad, eficiencia y prolongación de su vida útil.

B. Objetivos específicos

- Planificar y desarrollar ingenierías detalladas que garanticen la implementación segura, eficiente y alineada con los estándares técnicos, mediante una adecuada gestión de recursos, tiempos y riesgos.
- Facilitar talleres de planificación y constructibilidad con las partes interesadas, promoviendo la colaboración interdisciplinaria y la toma de decisiones informadas desde etapas tempranas del proyecto.
- Realizar análisis costo-beneficio de diseños existentes, con el fin de identificar oportunidades de mejora y optimización en los proyectos a implementar.
- Desarrollar y estandarizar la documentación técnica asociada a los cambios de fase de los proyectos, desde ingeniería hasta ejecución, asegurando trazabilidad, control y cumplimiento de los lineamientos internos de Cerro Matoso S.A.

IV. MARCO TEÓRICO / ESTADO DEL ARTE

Clasificación de Proyectos en Cerro Matoso.

Dentro de la compañía, los proyectos son clasificados de acuerdo con diversos factores, tales como su nivel de criticidad, el riesgo de ocurrencia, el potencial de daño al personal o a los activos, entre otros elementos que requieren un análisis exhaustivo.

Con base en estos criterios, los proyectos se agrupan en las siguientes cuatro categorías principales:

- Proyectos tipo compra (Purchase).
- Proyectos tipo A1.
- Proyectos tipo A2.
- Proyectos tipo B o C.

A continuación, se presenta una explicación detallada de cada tipo de proyecto:

Proyectos Tipo A1.

Este tipo de proyectos tiene una única alternativa preferida desde el inicio. Por esta razón, requiere diseño para las fases combinadas de prefactibilidad y factibilidad. En estos casos, la fase única se trata como Prefactibilidad.

El enfoque principal consiste en preparar la alternativa seleccionada para su ejecución, sin necesidad de comparar múltiples opciones de diseño o entrega. Se trata, entonces, de un proyecto que avanza directamente hacia la consolidación técnica y económica de una solución previamente definida [7].

Proyectos Tipo A2.

Este tipo de proyectos cuenta con opciones limitadas en alcance y/o modelo de entrega, ambos requieren trabajo para seleccionar la alternativa preferida. Las fases de Prefactibilidad y Factibilidad se trabajan por separado.

La naturaleza de la prefactibilidad también difiere ligeramente. En un proyecto Tipo A1, la alternativa preferida se conoce antes de comenzar el estudio de Prefactibilidad y el enfoque está en la preparación para la ejecución. Sin embargo, para un proyecto Tipo A2, existe la opción (en alcance y/o modelo de entrega), y se requiere trabajo para seleccionar la alternativa preferida. En esta fase también se produce la planificación de viabilidad y la planificación preliminar de ejecución [7].

Prefactibilidad.

Estudio integral de la viabilidad de un proyecto minero que ha avanzado a una etapa en la que se ha establecido el método de extracción, en el caso de la minería subterránea [7].

El objetivo principal es comparar las alternativas desarrolladas durante el estudio de concepto, seleccionar la mejor opción y definir los parámetros técnicos, económicos y operativos que optimicen la escala y el alcance del proyecto.

Factibilidad.

Es el estudio integral de todos los factores técnicos de ingeniería, operativos, económicos, ambientales y otros factores relevantes se consideran con suficiente detalle como para que pueda servir razonablemente, como base para una decisión final y la ejecución del proyecto [7].

Lo anterior llevan consigo unos formatos en cuenta para la realización del estudio de ingeniería y posteriormente al cambio de fase de ejecución, es decir, unos entregables que la compañía estandarizó donde se hace más fácil y visual los requerimientos de cada servicio en manera de diagramas e ilustraciones.

Entregables estandarizados.

La compañía puede, de acuerdo con la dinámica de las áreas de la empresa, solicitar a la ingeniería que proporcione servicios a CMSA de conformidad con los entregables tales como:

- Planos de Ingeniería
- Alcance del Trabajo.
- Alcance de Constructibilidad.

- Plan de Ejecución de Proyecto.
- Registro de Riesgos.
- Estructura de Costos.

Cada uno de estos entregables con información detallada del proyecto en estudio y consigo lo que conlleva su realización y así solicitar servicios, requisitos del cronograma, los entregables requeridos, las tarifas aplicables y otros cargos, si dicho trabajo se realizará en función del tiempo y los materiales, y otros detalles que sean razonablemente necesarios para que la Ingeniería preste los Servicios solicitados. Cada entregable del servicio entrará en vigor con las tarifas del servicio cuando sea aprobado por representantes autorizados de cada parte [7].

Cadena del reclamador BM – 150

Por otra parte, el reclamador BM-150 constituye uno de los pilares iniciales de la operación minera, al encargarse de recuperar el mineral desde la pila de almacenamiento y transferirlo hacia bandas transportadoras que alimentan la trituración y clasificación primaria [2]. Este equipo opera mediante un sistema de bandejas accionadas por cadenas y sprockets conectados a un sistema motriz. Al ser responsable de la formación y despacho de la pila de mineral, su disponibilidad es esencial para mantener el flujo continuo a los procesos posteriores. En la **(Fig. 2)**, respectivamente se muestra el reclamador y los componentes de la cadena mencionados para mejor comprensión:



Fig. 2. Reclamador BM-150 y sus cadenas [5].

La experiencia en equipos similares de recuperación a granel, como los bucket wheel reclaimers, muestra que los bordes de las bandejas o cestas están sujetos a abrasión intensa y requieren materiales resistentes al desgaste [8]. Además, se ha documentado que la contaminación por polvo abrasivo en cadenas, piñones y rodamientos acelera el deterioro si no se realizan programas de lubricación y sellado adecuados [9]. Investigaciones recientes en dinámica de acoplamiento rígido-flexible destacan la importancia de balancear cargas en sistemas motorizados para reducir fallas en condiciones variables de operación [10].

Finalmente, en equipos de larga vida operativa, la decisión entre reparación mayor o reemplazo completo debe evaluarse considerando el costo total del ciclo de vida y la criticidad del equipo dentro de la operación [11]. En consecuencia, el BM-150, al ser un eslabón inicial y estratégico del proceso, no debe estar expuesto a fallas en su sistema de cadenas; su mantenimiento proactivo es indispensable para evitar cuellos de botella y pérdidas operacionales significativas.

Zaranda SC-160

En la operación de CMSA se cuenta con una zaranda encargada de realizar una clasificación primaria del mineral proveniente de la exploración. Este es un equipo comúnmente utilizado en la minería para separar materiales según su tamaño, utilizando como principio la generación de una vibración inclinada con una superficie con orificios (malla). Mientras que el mineral pasa el equipo va separando partículas más finas que atraviesan la malla de las más gruesas que quedan retenidas.

En el caso de CMSA, el material que pasa a través de la malla es el que se destina al procesamiento, ya que es allí donde se concentra el porcentaje óptimo de ferroníquel para la operación [6].

Entre las principales ventajas de este equipo se destacan:

- Eficiencia energética, ya que su inclinación permite que el mineral descienda por gravedad mientras es clasificado, reduciendo la necesidad de equipos de transporte o impulso adicional.
- Ausencia de reactivos químicos, lo que lo convierte en un proceso limpio y sostenible.

- Versatilidad ante condiciones climáticas, ya que el equipo puede operar eficientemente incluso cuando el mineral llega húmedo, gracias a su mecanismo de vibración continua que facilita el paso del material por la malla.

La zaranda está diseñada con una malla estandarizada que permite el paso de partículas con un tamaño aproximado de 10 a 15 centímetros de diámetro, lo cual asegura una adecuada preparación del material para las etapas posteriores del proceso productivo.

En la **(Fig. 3)**, se muestra donde se encuentra ubicada esta zaranda y de una idea de su función; es notorio en la imagen cómo le llega el material a una banda transportadora en la parte superior que deposita el mineral a clasificar, y por la parte inferior se ve la banda que lleva el mineral a los siguientes procesos.



Fig. 3. Disposición de Zaranda SC -160 [6].

En la literatura técnica se reporta que estos equipos son susceptibles a fatiga estructural en marcos y uniones soldadas, fallas en cojinetes y desgaste de mallas debido a cargas dinámicas de operación continua [12]. Investigaciones recientes proponen incluso la aplicación de algoritmos de visión artificial para identificar fallas en mallas durante operación, mientras que técnicas de simulación por elementos discretos (DEM) permiten optimizar parámetros como amplitud, frecuencia y geometría de malla para maximizar la eficiencia del cribado [13]. Estos aportes refuerzan la necesidad de un plan de mantenimiento preventivo y predictivo robusto, que minimice riesgos de paradas inesperadas y asegure continuidad en la alimentación al horno calcinador.

Reparaciones Estructurales

Administrar la integridad estructural de los edificios de la operación es una actividad que, cuando está bien enfocada y desarrollada, facilita la confiabilidad de los activos y evita la ocurrencia de eventos dañinos contra las personas e infraestructura de la planta [14]. En este sentido, la incorporación de normas técnicas internacionales como la ISO 9223 y la ISO 12944 resulta fundamental, ya que permiten clasificar la corrosividad de la atmósfera y definir los sistemas de protección más adecuados para preservar las estructuras metálicas en ambientes industriales agresivos [15], [16].

La práctica de realizar inspecciones frecuentes y ejecutar reparaciones anuales a los hallazgos más críticos responde a lo establecido en la ISO 15686, que orienta la planificación de la vida útil de los activos, y que plantea la gestión del ciclo de vida de estos como estrategia para garantizar continuidad operativa [17]. Dichas normas sirven de guía para transformar los reportes técnicos de inspección en planes estructurados de intervención, priorizando la asignación de recursos en función de la criticidad de cada hallazgo.

La compañía tiene un proceso interno estructurado para este tipo de reparaciones, las cuales, al ser de carácter anual, requieren de un equipo de trabajo robusto y conformado por profesionales de diversas áreas. De igual manera, desde todos los niveles jerárquicos se promueve

la protección y preservación de la integridad de los activos. En la **(Fig. 4)** se presenta el esquema organizacional de CMSA [14]:

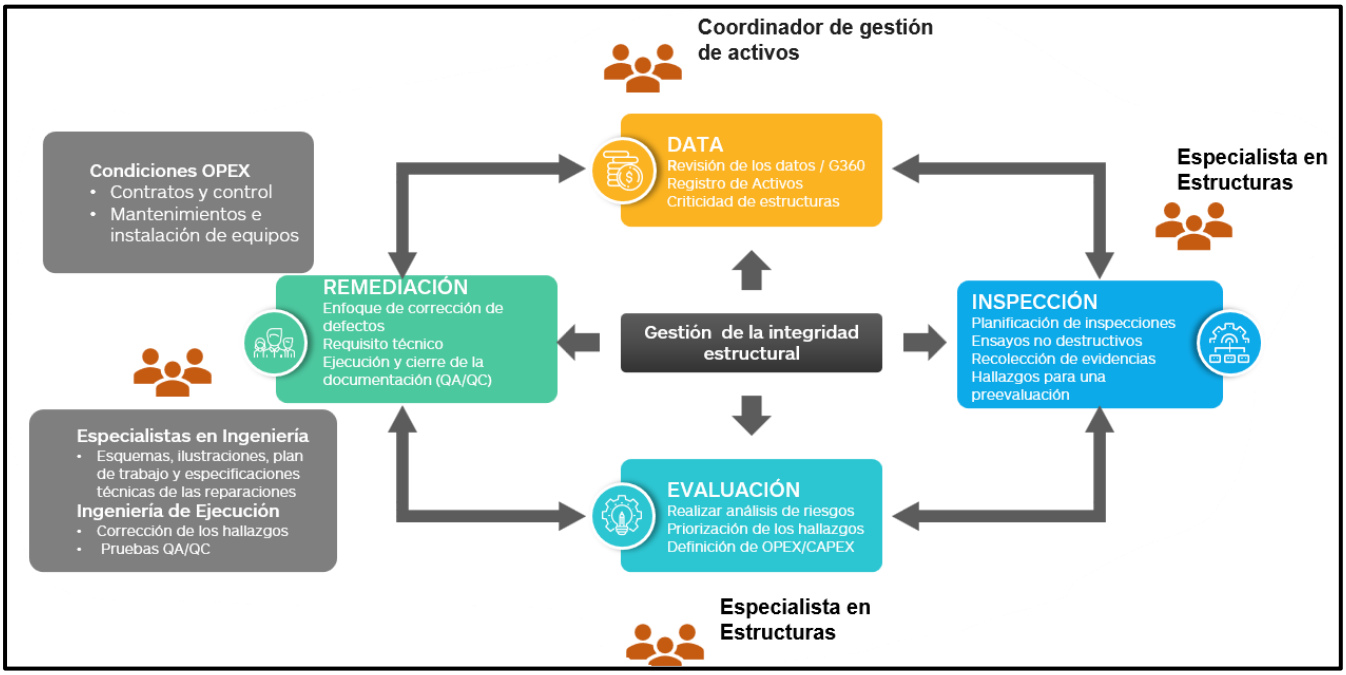

Fig. 4. Esquema de gestión de la integridad estructural [14].

He aquí la parte de ingeniería de proyectos le corresponde revisar y poner en marcha un plan de realización de las reparaciones alrededor de toda la planta, es decir, llevar a cabo un estudio de ingeniería donde las funciones y resultados de todo lleve a tener un plan tal que se pueda:

- Evaluar criticidad (severidad, probabilidad de riesgo) de cada hallazgo.
- Clasificar por área de trabajo e influencia.
- Cotizar cada uno de los servicios de reparaciones.
- Identificar acciones en la operación para preservar integridad de los activos.
- Evaluar el proceso de licitación con contratistas.
- Coordinar las visitas de especialistas y la respectiva sinergia con cada área de influencia.
- Programar reuniones con los expertos con los que cuenta la compañía que son un pilar importante con su experiencia.

La **(Fig.5)** muestra con mayor claridad lo antes mencionado, permitiendo observar algunos de los daños causados a la estructura de edificios debido a la agresividad de la atmósfera en la que se desarrolla la operación.



Fig. 5. Daños corrosivos y mecánicos a las estructuras [18].

V. METODOLOGÍA

Con la siguiente metodología se plantea desde la Ingeniería de Materiales, fortalecer y optimizar los pasos existentes para la solución de proyectos de mejora, integrando criterios técnicos como la selección adecuada de materiales, el análisis de fallas, la durabilidad, la sostenibilidad y el comportamiento en servicio. Esta visión permitirá desarrollar una metodología más robusta y orientada a la eficiencia operativa, reducción de costos y prolongación de la vida útil de activos, alineándose con los objetivos estratégicos de cada proyecto. Para la cual se divide el trabajo en etapas, las cuales son:

Etapa 1: Revisión y procesamiento de la información existente (Caso de Negocio)

Se realizará un estudio exhaustivo de la información disponible, incluyendo historiales de reparaciones y cambios de equipos en los últimos años. El fin de esta etapa es revisar y apuntar cada detalle a tener en cuenta al momento de poner en marcha un proyecto de esta magnitud. Dentro de la búsqueda sobre documentación en bases de datos de la empresa, se identificaron planos, diseños y modificaciones previas, las cuales resultan ser fundamentales como una guía técnica.

Esta información permite evaluar lo ya implementado con una visión enfocada en el mejoramiento continuo, garantizando una operación segura y eficiente.

Etapa 2: Preparación de entregables y alcances de trabajo para cada proyecto.

Una vez hecha la revisión de la documentación, se procede a la preparación de cada uno de los entregables de base para este tipo de proyectos. Durante la puesta en marcha de la ingeniería, cada detalle debe ser plasmado, licitaciones de servicios especializados de cada tarea y proceso. A continuación, se enlistan los entregables a preparar para cada uno de los proyectos:

Alcance del trabajo (SOW).

En este documento debe estar plasmado toda la información especificada debido a que este es la base con la que se cotizan los servicios de los contratistas y con los fabricantes dado el caso; algunos de los pilares importantes que debe tener y presentar este son:

1. Introducción.
2. Alcance del trabajo.
3. Descripción general y específica.
4. Obligaciones del contratista.
5. Control de la obra.
6. Requisitos HSE.
7. Estructura de costos.
8. Cronograma de ejecución
9. Calidad en fabricaciones.
10. Personal requerido.
11. Entregables de licitación.
12. Mano de Obra.
13. Orden y Aseo.
14. Suministros de CMSA.
15. Servicios fuera del alcance.

Registro y análisis de Riesgos.

Como el cuidado es uno de los valores corporativos con mayor importancia, es notorio que este documento debe ser realizado teniendo en cuenta cada detalle del proyecto; donde se busca dejar por escrito cualquier tipo de altercado al que se pueda estar expuesto algún miembro del equipo desde la evaluación de riesgos en oficina hasta el campo de ejecución.

Debe incluir todos los riesgos detectados, junto con la información requerida en la **TABLA I:**

TABLA I. REGISTRO DE RIESGO PARA CADA PROYECTO.

Tema	**Subtemas**
Clasificación de peligro	Transito
	Mecánico
	Eléctrico
	Tecnológico
	Estructural
	Civil
	Psicosocial
Efectos principales a la salud	Robustez
	Eficiencia Operativa
Descripción	Detalle
	Factor
Actividad	Rutinaria
	No rutinaria
Expuestos	Plantas
	Visitantes
	Contratistas
Medidas de Control	Fuente
	Medio
	Personas

Evaluación del riesgo	Nivel de deficiencia
	N. de exposición
	Probabilidad
	Nivel de Consecuencia

Con este registro se asegurará que el diseño del proyecto incorpore prácticas seguras, permitiendo que los trabajadores y contratistas regresen a casa sanos y salvos.

Plan de Ejecución de Proyecto (PEP).

En dicho documento se debe enfocar el plan detallado de la forma en que el equipo del proyecto va a manejar la ejecución y el cumplimiento del alcance, de acuerdo con la estrategia de ejecución, los objetivos del proyecto, los indicadores de desempeño (KPI´s), la programación y el estimado del costo. Este documento es de vital importancia para el cambio de fase de ingeniería a ejecución; para este punto se plasmó lo que debe contener en la **TABLA II**:

TABLA II. ESQUEMA PARA ELABORAR UN PEP.

Tema	**Subtemas**
Resumen del proyecto	Condiciones del sitio
	Legislación, estándares y especificaciones
Roles y responsabilidades	Lideres y posición
	Función y entregables
Descripción del trabajo	Alcance y Facilidades
	Ingeniería a detalle
	Documentación
	Transición a la operación
Cronograma	Compra - Ejecución

Una vez obtenido cada uno de estos documentos finamente elaborados puntualizando en los detalles de cada proyecto, se tendría una base para el cambio a la próxima área. Esto incluye la realización de reuniones de entrega, lideradas por el área de Auditoría y Control, en las que se revisará la planeación estratégica y se elaborarán las actas de aprobación. En caso de ser necesarias modificaciones o cambios pertinentes, se aplicarán antes de pasar a los integrantes del comité de inversión y entregar a los ejecutores que elegirán por acta de asignación de los líderes que pondrá el proyecto en marcha.

VI. RESULTADOS

Procesamiento de información para el reclamador de mineral.

A continuación, se presenta un enfoque detallado sobre los principales problemas identificados en el reclamador, los cuales fueron analizados a través de un estudio de causa raíz. Este equipo, que hace parte de la línea de producción y está alineado con la estrategia de alimentación de mineral homogenizado hacia los secadores, cumple un papel fundamental en la estabilidad del proceso. Cuando el reclamador se para, la homogenización del mineral se ve comprometida, ya que el proceso debe realizarse mediante cargadores, los cuales no garantizan una mezcla adecuada. Esta situación genera variaciones en la composición química de la alimentación hacia los calcinadores, afectando directamente la estabilidad de la línea integrada.

En la (**Fig. 6)** se ilustran las condiciones físicas actuales de la cadena del equipo BM150, las cuales evidencian una baja confiabilidad operativa. Se ha identificado un incremento progresivo en las fracturas de la cadena, iniciando en los extremos de los eslabones y propagándose debido a desalineamientos en los sprockets [5]. Estos defectos provocan concentraciones de esfuerzo que terminan en la fractura de los componentes.



Fig. 6. Condiciones actuales de las cadenas del BM-150 [5].

Con base en esta revisión, se estableció como prioridad el desarrollo de un estudio de hipótesis orientado a determinar las causas de los daños recurrentes en los eslabones de la cadena del reclamador. Este análisis se complementó con un estudio previo de causa raíz realizado por una empresa contratista de CMSA, lo cual permitió enfocar la investigación hacia los factores más relevantes. Como resultado de este trabajo, en la **Tabla III** se presentan las hipótesis priorizadas, clasificadas según su nivel de repercusión y veracidad, constituyendo un insumo clave para la toma de decisiones y la definición de acciones correctivas.

TABLA III. CLASIFICACIÓN DE HIPÓTESIS.

HIPÓTESIS	**BM 150**
Hipótesis 1 – Desgaste Irregular	VERDADERO
Hipótesis 2 – Desalineamiento de sprockets	VERDADERO
Hipótesis 3- Soldadura de extremo a extremo	VERDADERO
Hipótesis 4 – Soldadura vertical	FALSO
Hipótesis 5 - Endurecimiento	FALSO

Hipótesis 1.

Se plantea que se genera un sobreesfuerzo en la parte interior de los eslabones cuando al pasar la cadena por los sprockets motrices, los dientes están desgastados de forma irregular de tal

manera que el contacto lo ejerce un solo sprockets cargando al eslabón. De la verificación de la hipótesis se encontró en la inspección a sprockets motrices desgaste con deformación de flujo plástico no uniforme en ambos sprockets motrices ver **(Fig.7)** [19].



Fig. 7. Desgastes irregulares en sprockets [19].

Hipótesis 2.

Se identificó que se genera un sobreesfuerzo en la parte interior de los eslabones cuando, al pasar la cadena por los sprockets motrices, los dientes no se encuentran alineados sincrónicamente, de modo que el contacto es ejercido únicamente por uno de ellos. Esta condición transfiere la carga directamente al eslabón y fuerza al soporte. La verificación de la hipótesis, mediante la inspección de alineamiento, evidenció una diferencia de 14 mm entre ambos sprockets motrices. Como consecuencia, al producirse el cambio de sentido, el esfuerzo sobre los soportes se concentra en el extremo del cordón de soldadura, incrementando las exigencias cuando el diente del sprocket transmite el giro para el retorno del transportador ver **(Fig.8)** [19].



Fig. 8. Desalineamiento de 14 mm [19].

Hipótesis 3.

Se plantea que se genera una zona de concentración de esfuerzos al terminar el cordón de soldadura justo en los bordes del soporte. Una vez realizada la verificación de la hipótesis se encontró que los soportes de la cadena principal están soldados de la misma manera con el cordón de extremo a extremo ver **(Fig.9)** [19].



Fig. 9. Acordonamiento de soldadura [19].

De la hipótesis 4, que presenta que el agrietamiento y rotura ocurre cuando los soportes se sueldan a la barra del eslabón de forma vertical, esto se encontró falso en la verificación debido que todos los soportes no están soldados con el cordón vertical **(Fig.10)**. Y por último se revisó la hipótesis 5, donde se hablaba de un agrietamiento que ocurre cuando la dureza superficial de la barra se incrementa cuando el eslabón es sometido a calor y es enfriado abruptamente con agua fría en procesos de mantenimiento correctivo durante la operación, lo que resultó falso porque este tipo de proceso asemejado a un temple no es probable en procesos de mantenimiento [19].



Fig. 10. Ausencia de cordón vertical [19].

Procesamiento de información para cambio de zaranda.

Del estudio y revisión de la documentación existente relacionada con el cambio de zaranda en la planta, se identificó la relevancia de este equipo dentro de la operación. La falla o paro de este equipo de manera prolongada afecta la producción elevando costos asociados a la desconexión de los hornos calcinadores por falta de alimentación. Asimismo, su correcto funcionamiento impacta directamente en los equipos posteriores de la cadena productiva.

Consecuentemente, se elaboró un listado principal de tareas necesarias para llevar a cabo el cambio de la zaranda, considerando cada detalle técnico analizado y siguiendo las recomendaciones de los expertos del área 200 de la compañía [20].

- Planeación detallada de la tarea.
- Preparativos para el desmontaje de la zaranda actual y montaje de la nueva.
- Retiro de elementos que interfieran en el desmontaje.
- Desmontaje de la zaranda existente.
- Montaje de la nueva zaranda.
- Readecuación de los elementos retirados durante el proceso de montaje.
- Acompañamiento en la puesta en marcha del nuevo equipo.

Con el propósito de esquematizar las tareas a ejecutar, se elaboró la **TABLA IV**, en la que se presenta una agrupación detallada de las actividades, organizadas según el orden de ejecución

recomendado. En ella se resaltan los pasos necesarios para el bloqueo del sistema, garantizando así el acceso seguro del personal, así como las labores de limpieza requeridas. Este procedimiento se diseñó bajo los principios de cuidado, excelencia, orden y aseo, con el fin de asegurar un desarrollo eficiente y seguro de las actividades [20].

TABLA IV. ACTIVIDADES PARA CAMBIO DE ZARANDA.

TAREA	DETALLES
Cambio de zaranda actual SC-160	Bloqueo con tarjeta y candado del sistema
	Realizar despeje y limpieza del área
Despeje de la zaranda	Desmonte de la campana de succión de gases
	Desconexión eléctrica de motor
	Desmonte de moto
	Desmonte de plataformas
	Desmonte de chuta de entrada
	Desmonte de tambor entrada
	Desmonte de chuta de descarga
	Desconexión hidráulica
	Desmonte de guardas
	Desatornillar la zaranda de la base
Desmonte de zaranda	Instalación de sistema de izamiento
	Izaje de retiro de zaranda
	Limpieza de las estructuras
Montaje de zaranda nueva	Adecuación de la nueva zaranda en sitio de izaje
	Instalación de sistema de izaje
	Montaje de zaranda a estructura despejada
	Adecuación de la zaranda en las estructuras
Instalación de sistemas auxiliares	Instalación de tornillería

	Instalación de tapas y motor
	Conexión eléctrica motriz
	Instalación del sistema hidráulico
	Instalación de la trasmisión de potencia
	Instalación de accesorios
Pruebas en vacío	Realizar primera prueba en vacío
	Ajuste según resultados
	Segunda prueba en vacío
Ensamble de equipos desmontados	Montaje de tambor
	Instalación de chuta de entrada y descarga
	Ensamble de campa extractora
	Ensamble de estructuras y pasamanos
Pruebas en vacío con estructuras	Arranque de equipo en vacío y con carga
	Ajuste de equipos y mallas
	Entrega de equipo en modo producción

Una vez revisado el esquema de ejecución se pasó a ver los primeros resultados del análisis, se identificaron aspectos clave a tener en cuenta en el desarrollo del proyecto, los cuales se clasificaron de la siguiente manera:

Retiro de elementos estructurales.

Para el cambio de la zaranda SC-160 es necesario desmontar ciertos elementos estructurales, así como partes de equipos circundantes, dado que el área presenta una alta concentración de componentes que influyen en la operación, como se puede ver en la (**Fig.11) y** en la **(Fig,12)**.



Fig. 11. Chuta y estructura de escaleras superiores [20].



Fig. 12. Escaleras lado norte y campañas de captación de polvos [20].

Estructura superior de la zaranda SC-160.

En la parte superior y sus alrededores existe una estructura de soporte que sostiene una lona de protección contra caídas de objetos. Esta estructura requiere modificaciones de diseño, ya que allí se originaban problemas de polución debido a fallas en el sistema de sellado. Por lo tanto, se formularon recomendaciones de mejora para garantizar la confiabilidad de la zona representada en la **(Fig.13)**.



Fig. 13. Estructura superior de la SC-160 [20].

Inspección de puntos de anclaje para izaje.

Antes de proceder con el izaje de los elementos estructurales, se sugirió realizar ensayos no destructivos en soldaduras y estructuras con el fin de prevenir imprevistos y accidentes. Dado que la zaranda tiene un peso aproximado de 8 toneladas, se determinó la necesidad de utilizar una grúa móvil, que además cumpliría funciones en el desmontaje de estructuras y montaje del nuevo equipo, para lo cual se definirán puntos de anclaje específicos tales como el de la **(Fig.14)**.



Fig. 14. Puntos de anclaje para izamiento [20].

Inspección de elementos estructurales.

Se recomendó verificar el estado de uniones, cables de mando, soldaduras, rieles del puente grúa, motores y demás componentes estructurales, con el objetivo de garantizar que no presenten deterioros o fallas que puedan generar contratiempos durante la ejecución. Esto cobra especial importancia considerando que el área se encuentra bajo un edificio estructural que integra múltiples elementos de protección al equipo principal como se pude ver en la **(Fig.15),** lo que hace indispensable incluir trabajos preventivos durante la parada programada.



Fig. 15. Estructura pórtica de la SC-160.

Procesamiento de información para las reparaciones estructurales.

Con la revisión de la información se obtuvieron los datos más relevantes para el presente caso de negocio. El objetivo de este análisis fue generar a través de esquemas y tablas una visión general de la planta de Cerro Matoso S.A. en relación con los hallazgos identificados en cada una de sus áreas, los cuales ascendieron a un total de 395. En la **(Fig. 16)**, se presentan de manera gráfica y esquemática, la cantidad y la clasificación de los hallazgos. Es importante resaltar que se llevaron a cabo priorizaciones en función del nivel de criticidad de cada hallazgo, ilustrando aquellos que obtuvieron una mayor calificación en el riesgo residual, determinado a través de un factor que combina severidad y probabilidad, representado con la sigla RRR.

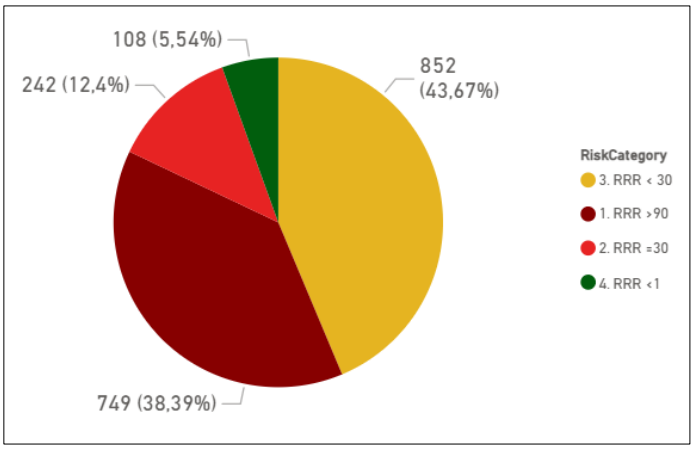

Fig. 16. Número de hallazgos y clasificación [21].

A partir del análisis realizado fue posible plantear las posibles causas y efectos de los hallazgos identificados, evidenciando cómo los entornos agresivos de la planta, particularmente en determinadas áreas, generan mayores afectaciones estructurales.

Dentro del estudio de cada uno de los casos, se realizó inicialmente la tabulación de estos a través de la clasificación por áreas de influencia, ubicación específica y nombramiento a través de una nomenclatura interna de CMSA; como se puede ver en la siguiente **TABLA V** [21].

TABLA V. CLASIFICACIÓN DE HALLAZGOS [21].

Información General	Descripción
Área	Área 400
Ubicación	Frente al foso del carro de transferencia – Nivel Piso Columna 2
Nomenclatura Hallazgo	FE1-15



Descripción de Hallazgos.

Posteriormente, tras la ilustración de los hallazgos en el plano general de la planta, se procedió a realizar una evaluación detallada de cada uno de ellos, clasificándolos de manera individual con el propósito de establecer un orden de criticidad. También fue importante conocer los orígenes o causas principales por las que se generaron los daños en las estructuras, en la **(Fig.17)** se presenta la distribución porcentual de las causas. A través de su análisis fue posible identificar no solo los factores más recurrentes, sino también la proporción en que cada uno de ellos incide en el deterioro observado.

Esta representación permitió priorizar las causas de mayor impacto y orientar la evaluación hacia posibles soluciones enfocadas en fortalecer las prácticas de operación, implementar medidas preventivas y optimizar los procesos de mantenimiento, con el fin de mitigar la recurrencia de fallas y prolongar la vida útil de los activos.

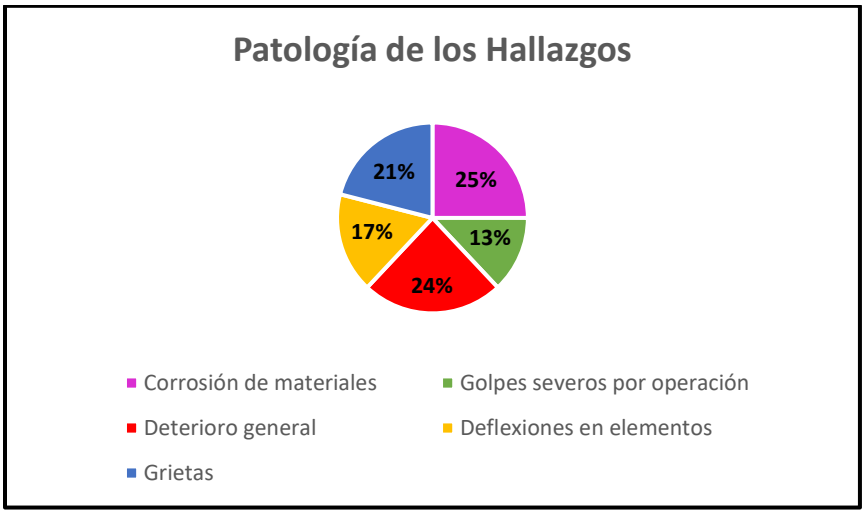

Fig. 17. Patología de los hallazgos.

De esta manera, se logró priorizar aquellos hallazgos cuya atención resulta más urgente, considerando además el presupuesto anual asignado para su mitigación y solución; en la **TABLA VI** se mostrará como se realizó la tabulación para cada uno de los hallazgos:

TABLA VI. DESCRIPCIÓN DEL HALLAZGO FE1-15.

Descripción del Hallazgo: FE1-15			
Corrosión con pérdida de material en columna y anclaje. Corrosión general de la zona.			
Tipo de estructura afectada	Acero estructural		
Criticidad de la estructura	B		
Patología	Corrosión C		
Causa de falla	Falta de mantenimiento/Acumulación de material		
Tipo de impacto	Salud y Seguridad		
Tipo de control	Eliminación		
Análisis:			
Criticidad (RRR)	Probabilidad	Severidad	RRR
	3	10	30
Tiempo esperado de respuesta	Inmediato		
Tiempo esperado de falla	Entre 6 a 12 meses (6-12)		
Consideración de carga dinámica	Estáticas		
Frecuencia sobrecarga dinámica	Sólo cargas estáticas (N/A)		
Entorno operativo	Moderado		
Desgaste operativo	Estructura no sometida a desgaste		
Cantidad de defectos identificados	Más de 5 (>= 5)		
Cantidad de personas en el área	Alto (varias personas diariamente)		
Frecuencia de limpieza requerida	Cada año (uno por año)		
Control administrativo	No aplica		

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizaron de manera más específica cada uno de los resultados obtenidos a partir de la implementación de la metodología, así como una serie de mejoras propuestas para cada uno de los proyectos analizados. En dichas recomendaciones se destacan los factores que influyen en el desempeño de los activos y se proponen acciones orientadas a prolongar su

durabilidad, mejorar su efectividad, garantizar su disponibilidad y optimizar costos, en concordancia con el plan de producción establecido por la compañía. De manera general se obtuvieron ciertos impactos representados en la **TABLA VII**.

TABLA VII. RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA A EFECTUADA.

Hallazgos	Resultados / Impacto
Los proyectos previos carecían de criterios estandarizados de selección y decisión.	Se consolidó una base técnica con planos, diseños y modificaciones que sirven de guía para nuevos proyectos.
Se detectaron fallas recurrentes y daños por falta de mantenimientos preventivos.	La metodología propone lineamientos claros que aseguran trazabilidad y evitan repetición de errores.
La ausencia de un formato único de alcance generaba ambigüedades con contratistas y fabricantes.	El **Alcance del Trabajo (SOW)** definió roles, cronogramas, costos y responsabilidades, facilitando licitaciones y ejecución.
La gestión de riesgos se realizaba en forma de reacción al problema y no de manera preventiva.	El **Registro de Riesgo** permitió clasificar riesgos por severidad y probabilidad, estableciendo estrategias de mitigación más efectivas.
La planeación de ejecución no contaba con un documento formal que guiara el cumplimiento de objetivos en la siguiente fase ejecutable.	El **Plan de Ejecución de Proyecto (PEP)** estructuró la estrategia de ejecución, con KPIs, costos y programación definidos.

Alternativas para reclamador BM-150.

El objetivo de todo el proceso metodológico fue generar alternativas de diseño y mejoramiento en la fabricación de la cadena y los sprockets, identificados como los componentes más críticos en el informe de inspección. A partir de este análisis, se dio prioridad al reforzamiento de los eslabones, recomendando la instalación de platinas dobles y la verificación de la calidad de las soldaduras ejecutadas, ya que estas presentaban deficiencias que afectaban el desempeño de la cadena, ocasionando desgastes irregulares y desalineamientos con respecto a los sprockets motrices de la **(Fig.18)**.

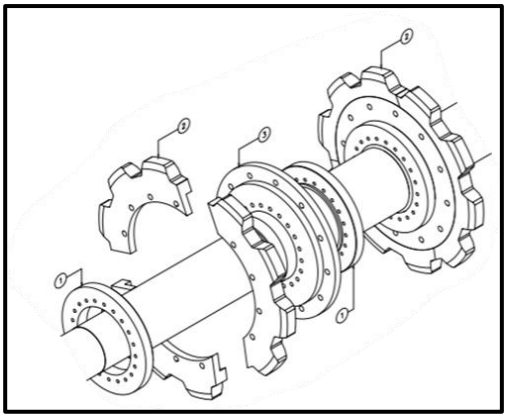

Fig. 18. Plano del sprocket y sus partes.

En la (**Fig.19)** de manera complementaria, y con el mismo nivel de prioridad, se recomendó una modificación y mejora en el nuevo diseño, la cual incluyó la revisión de la fijación de los soportes, la corrección de interferencias mediante el ajuste de calzas, la incorporación de platinas de suplemento, la mejora de elementos rodantes, pasadores y la optimización de los cordones de soldadura. Estas acciones permitirán aumentar la confiabilidad del sistema y prolongar la vida útil de los componentes críticos

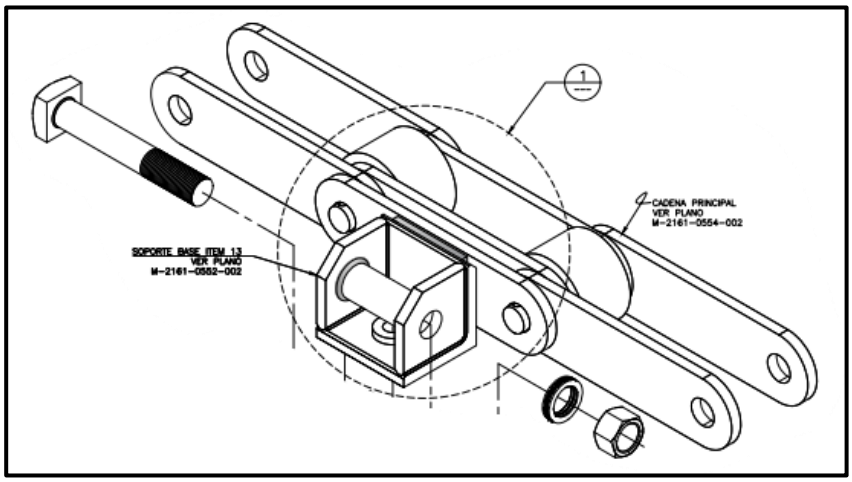

Fig. 19. Modificación y mejora de los eslabones de cadena.

Mejoramiento en el sistema de sellado para la SC-160.

El nuevo sistema de sellado permitirá reducir significativamente la emisión de partículas en el área de operación, además de incrementar la durabilidad de los componentes. En la situación actual, el sistema presenta una vida útil reducida, ocasionando rupturas frecuentes y un incremento

en la captación de aire falso a través del sistema de ventilación superior de la zaranda. El diseño propuesto en la **(Fig.20.)**, busca integrarse de manera efectiva con la estructura superior previamente construida, la cual fue diseñada con el fin de permitir la adaptación del sistema de sellado actualizado.

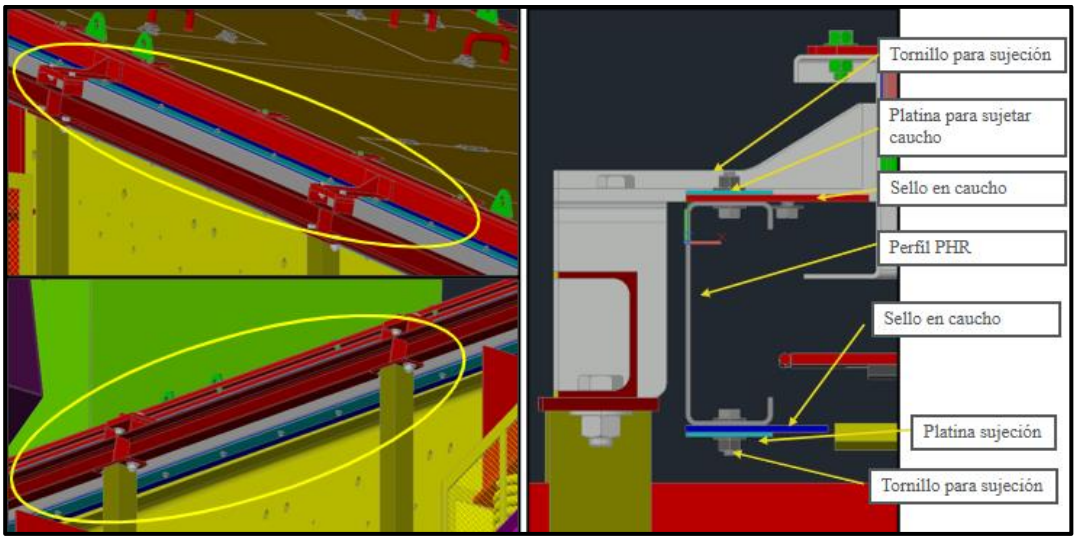

Fig. 20. Mejoramiento propuesto para sistema de sellado.

De igual manera, se contempla la incorporación de una compuerta en la parte posterior de la nueva zaranda, equipada con accesos de inspección que faciliten la supervisión y mantenimiento. Los elementos diseñados deberán ser lo más livianos posible, considerando que algunos de ellos se instalarán directamente sobre la zaranda y requerirán garantizar tanto la facilidad de montaje como la seguridad estructural [22].

Condiciones estructurales con soluciones previstas.

Dentro de los resultados obtenidos, se toma como ejemplo el hallazgo A200-29A presentado con su ubicación en la **(Fig.21)**; en la que se consolidan las condiciones estructurales encontradas durante los análisis de la información y teniendo en cuenta inspección realizada. Para cada una de estas condiciones se estableció un plan de eliminación, considerando el procedimiento correctivo más adecuado y los materiales requeridos para su ejecución, lo anterior con ayuda de los expertos de la empresa que llevan años de trayectoria y experiencia en el cuidado estructural.



Fig. 21. Hallazgo A200-29A con su ubicación [23].

Con el fin de dar soporte técnico y facilitar la toma de decisiones, se incluyeron además las tablas de unidades y precios de referencia, lo cual permitió estimar los costos asociados a cada reparación en la **(Fig.22)**; cabe aclarar que los valores económicos detallados no se muestran en el presente documento por tratarse de información confidencial y de uso interno de la compañía; sin embargo, se resalta que esta evaluación constituye una base sólida para priorizar intervenciones, optimizar recursos y garantizar la eficiencia en la gestión de los activos intervenidos.

SOUTH32

SIM - Structural Integrity Management

Reporte de Condiciones Estructurales

INFORMACIÓN GENERAL

Código Reporte	Fecha Registro	Área Proceso	Zona / Sector	Responsable Ejecución
A200-29	25/06/2025	A200	Silo 232-BN-08 (Bajos del Edificio)	

Acciones Inmediatas Sobre el Hallazgo

No requiere

Recomendaciones, Observaciones y Notas

Aplicar tratamiento anticorrosivo.
Construcción de recalce en concreto.

APU REMEDIACIÓN DE LA CONDICIÓN

Descripción de Materiales

	Especificación	Unidad	Código Stock	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Condición-A200-29-A	Suministro e instalación de barras de acero corrugado #5	kg		54.1		$ -
Condición-A200-29-A	Escarificado de concreto	m^2		3.6		$ -
Condición-A200-29-A	Concreto hidráulico F'c = 28 Mpa, vaciado en sitio	m^3		0.5		$ -
Condición-A200-29-A	Suministro e instalación de canal C4x5.4	kg		5.6		$ -
Condición-A200-29-A	Suministro y aplicación de anclaje epóxico HIT RE 500 V3 HILTI o similar	global		1.0		$ -
Condición-A200-29-A	Suministro e instalación de barras de acero corrugado #3	kg		24.7		$ -

Fig. 22. Reporte de condiciones estructurales [23].

Como análisis general, se pudo lograr y consolidar un marco metodológico más robusto que integra criterios técnicos (selección de materiales, análisis de fallas, durabilidad y sostenibilidad) con la gestión operativa y estratégica de los proyectos. Esto contribuye directamente a la reducción de costos asociados a reprocesos, mejora la eficiencia en la ejecución y prolonga la vida útil de los activos, como lo representa la **TABLA VIII**.

TABLA VIII. ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS.

Categoría	Subtemas	Definiciones
Metodología	Robustez	Consolidación de una metodología robusta, integrando criterios técnicos (selección de materiales, análisis de fallas, durabilidad, sostenibilidad).
	Eficiencia Operativa	Eficiencia en la ejecución de cada uno de los proyectos.
Activos	Preservación del patrimonio	Las estrategias y soluciones dan como resultado prolongación en la vida útil de los activos de CMSA.
Seguridad	Aprendizaje	Es un proceso de estudio de accidentes e incidentes registrados con el fin de generar y asimilar cada caso, donde los trabajadores tengan siempre una guía.
	Fortalecimiento	Mediante la realización de mantenimientos preventivos en mayor proporción que los correctivos.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La aplicación de la metodología propuesta desde la Ingeniería de Materiales permitió identificar y fortalecer aspectos críticos en la estructuración de proyectos de mejora orientados al sostenimiento y preservación algunos equipos que son activos de alto valor estratégico para Cerro Matoso S.A.

- Se concluye que la metodología planteada no solo genera mayor claridad en la planeación y ejecución de proyectos, sino que también alinea de manera efectiva las iniciativas de ingeniería con los objetivos estratégicos de la organización, aportando a su competitividad y sostenibilidad en el sector minero-industrial.

- El estudio de planos, diseños y datos históricos proporcionó una base sólida para detectar fallas recurrentes y áreas de oportunidad en cada uno de los equipos con diseños obsoletos que estaban presentando problemas a la operación, lo que facilitó orientar los nuevos proyectos hacia prácticas más eficientes y sostenibles. Este diagnóstico confirmó la necesidad de contar con una metodología formal que asegure continuidad, trazabilidad y mejoras progresivas en la gestión de activos.

- A partir del análisis de hipótesis sobre fallas en equipos y estructuras, así como de los casos de negocio evaluados, se identificaron oportunidades clave para mejorar los diseños existentes. Las reuniones con las partes interesadas fueron fundamentales para validar estas hipótesis, ya que permitieron integrar sugerencias orientadas a la mejora continua y la prevención de fallas futuras. Este proceso colaborativo consolidó la planificación desde la fase de ingeniería como una herramienta eficaz para orientar acciones de optimización.

- Por último, se recomienda la estructuración de documentos como el **SOW**, el **RR** y **PEP** herramientas claves para establecer lineamientos claros sobre roles y responsabilidades, la seguridad en la ejecución, la gestión de riesgos y la planificación estratégica del proyecto. De manera particular, la implementación del registro de riesgo introdujo una herramienta

preventiva que mejora la seguridad operacional y minimiza posibles desviaciones de cronograma y costos.

REFERENCIAS

[1] Cerro Matoso S.A., *PR09012 Unidad de Proyectos Mayores* – Superintendente de Proyecto-Norma, S.F.

[2] Cerro Matoso S.A., *PR022004OP – Manual del reclamador de mineral 161-BM-150/151,* Montelíbano, Córdoba, 12-abr-2018.

[3] Cerromatoso S.A., *PR022010OP – Manual de la subfase de clasificación de mineral parcialmente seco,* Montelíbano, Córdoba, 22-sept-2020.

[4] Cerro Matoso S.A., *TE023010 Control documental para proyectos* - Líder de Auditoría y Control-Norma, 26-mar-2024.

[5] O. Altamar Rua, *Reporte de Inspección Ensayos No Destructivos (END)* – Reclamador BM-150, SKF CMSA – South32, Código: 3429-18-24-IV-UT-PM-BM150, mayo 2024.

[6] Cerro Matoso S.A., *IT1161-01-RA. Análisis estructural Zaranda SC-160* – Semyc, 16-ene-2019.

[7] J. Prado, *Servicio de gestión de proyectos en las etapas de ingeniería y construcción*, versión V1, Planta CMSA, 12-may-2025.

[8] P. Shah, *"Construction, Working and Maintenance of Stackers and Reclaimers for Bulk Materials,"* *Practical Maintenance*, pp. 1–50, 2018. [Online]. Available: https://practicalmaintenance.net/wp-content/uploads/Construction-Working-and-Maintenance-of-Stackers-and-Reclaimers-for-Bulk-Materials.pdf

[9] ConBear Engineering, *"Reclaiming the bearing health of bucket wheels,"* *ConBear Technical News*, 2023. [Online]. Available: https://conbear.com.au/news/reclaiming-the-bearing-health-of-bucket-wheels/

[10] H. Wang, J. Liu, and C. Xu, *"Rigid–flexible coupling dynamics and optimization of bucket wheel reclaimer counterweight system,"* *Machines*, vol. 13, no. 3, p. 209, 2025. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2075-1702/13/3/209

[11] R. Morgan, S. Gatto, and D. Biggs, *"Replacement vs refurbishment of bulk material handling machines: a life cycle perspective,"* *ASPEC Engineering Papers*, 2020.

[12] L. Linhares, L. T. Duarte, and R. C. Souza, *"Failure analysis of vibrating screens in mineral processing,"* *Engineering Failure Analysis*, vol. 161, p. 107323, 2024.

[13] J. Niu, H. Gao, and Z. Wang, *"Fault detection in mining vibrating screens based on improved YOLOv5,"* *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 135, p. 107331, 2025.

[14] Cerromatoso S.A. – South32, Estatus del programa de reparaciones de estructuras CMSA-South32, Montelíbano, Córdoba, may. 2025.

[15] ISO, *"ISO 9223: Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification,"* International Organization for Standardization, 2012.

[16] ISO, *"ISO 12944-5: Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 5: Protective paint systems,"* International Organization for Standardization, 2018.

[17] ISO, *"ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology,"* International Organization for Standardization, 2024.

[18] Cerromatoso S.A., P-155 – *General Overview: Inspección de pasarelas y estructuras – Estado general, hallazgos y estimación de inversión*, Montelíbano, Córdoba, 2024.

[19] I. E. Pupo Malabet, *Análisis de causa raíz: Agrietamiento de eslabones cadena principal de los reclamadores BM-150 y BM-151*, IPM-Consulting S.A.S., Pedido 4543137475, Rev. 2, Cerromatoso S.A., mar. 2025.

[20] Cerromatoso S.A., *PR022003OP - Manual fase de secado y almacenamiento de mineral parcialmente seco*, Montelíbano, Córdoba, 11-ene-2011.

[21] Cerro Matoso S.A., *P-0124 Inspección de estructuras – Socialización de resultados RKEF*, Informe técnico, Rev. C, 24-ene-2024.

[22**]** C. Quispe, *Mantenimiento de la zaranda vibratoria por la empresa P & S Proserge S.R.L.*, Univ. Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), 2018. [Online]. Available: http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10883

[23] Cerro Matoso S.A., *SIM – Structural Integrity Management. Reporte de Condiciones Estructurales A200-29*, Montelíbano, Colombia, jun. 25, 2025.