

**Integración de monitoreo predictivo y diseño mecánico en la gestión del mantenimiento en la planta
de beneficio de Aris Mining Marmato**

Camilo Alberto Angarita Martinez



**Práctica presentada para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

a

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

**Integración de monitoreo predictivo y diseño mecánico en la gestión del mantenimiento en la planta
de beneficio de Aris Mining Marmato**

Camilo Alberto Angarita Martinez

**Práctica presentada para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

Mgtr. Sergio Andrés Gómez Suarez

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi mamá, Claudia, por ser raíz y refugio. Por su fuerza incansable, su mirada que siempre anima, y por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía. Todo lo que soy tiene su origen en tu ejemplo.

A mi hermana, Maya, por recordarme cada día lo que significa el amor sincero, la ternura en lo cotidiano y la alegría que nace de compartir el silencio.

A mí, por no rendirme. Por sostenerme en medio de la incertidumbre, por seguir caminando incluso cuando el camino parecía no tener forma. Este trabajo es una prueba de que la constancia, aunque silenciosa, construye.

"El paso más importante que una persona puede dar. No es el primero, ¿verdad? Es el siguiente. Siempre el siguiente paso."

— Brandon Sanderson, Juramentada

Contenido

Introducción	10
Planteamiento del problema.....	11
Justificación.....	13
Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
Marco referencial.....	15
Marco teórico	15
Metodología	20
Análisis de vibraciones en el área de molienda.....	20
Medición de espesores por ultrasonido	22
Preparación de la superficie.....	22
Definición de zonas de medición.....	23
Procedimiento de medición	23
Registro y sistematización de datos.....	23
Modelado en Solidworks.....	24
Diseño del anclaje y grouting de la base del motor y chumaceras del eje en el molino 2.....	24
Nido de hidrociclones	25
Soporte para rasquetear los casquetes del molino Allis	26
Diseño de soporte tipo cuna para levantamiento de molino.....	27
Otros diseños para fabricación de repuestos con terceros	28
Resultados	30

Análisis de vibraciones de molienda	30
Resultado del análisis de vibraciones en el molino 6	30
Resultado del análisis de vibraciones en el molino 1	37
Histórico vibraciones del molino 1.....	39
Ultrasonido, medición de espesores	42
Análisis de espesores por ultrasonido – Molino 4.....	46
Análisis de espesores por ultrasonido – tanque espesador	48
Nido de hidrociclones	52
Soporte para rasquetear los casquetes del molino allis.....	53
Soporte tipo cuna para levantamiento del molino	55
Planos técnicos de componentes para fabricación con terceros.....	56
Discusión.....	58
Conclusiones	60
Referencias	62

Lista de figuras

Figura 1 Analizador de vibraciones	21
Figura 2 Esquema molino 6	31
Figura 3 Registro de niveles de vibración en el Molino 6 – velocidad y aceleración (2024).....	32
Figura 4 Histograma de Rodamiento L. libre piñón de ataque	33
Figura 5 Histograma de Rodamiento L. libre eje de entrada/salida.....	33
Figura 6 Histograma de motor lado libre	34
Figura 7 Prueba de tintas magnéticas a la catalina realizada por empresa externa.....	35
Figura 8 Verificación de la superficie de los muñones.....	36
Figura 9 Equipo de alineación láser.....	36
Figura 10 Ensamble del nido de hidrociclones con tanques, estructura y red de tuberías.....	37
Figura 11 Registro de las vibraciones en el año 2024 molino 1	38
Figura 12 Motor lado libre	39
Figura 13 Gráfica motor L. acople.....	40
Figura 14 Gráfica rodamiento L. acople	40
Figura 15 Gráfica rodamiento motor L. libre.....	41
Figura 16 Esquema de la sectorización de la medición en el molino 6	42
Figura 17 Tabla de resultados primer muestreo molino 6 en mm.	43
Figura 18 Mallado específico sobre la zona de desgaste	44
Figura 19 Tabla de resultados segunda inspección.....	44
Figura 20 Molino 6 previo al refuerzo	45
Figura 21 Molino 6 con placa de refuerzo	45
Figura 22 Molino pintado después de la reparación	46

Figura 23 Esquema para la sectorización de la medición en el molino 4	47
Figura 24 Resultados inspección molino 4 en mm.	47
Figura 25 Ensamblaje final de la base del motor, propuesta modular	48
Figura 26 Tabla de espesores del tanque espesador 2.....	49
Figura 27 Trabajo final ejecutado por el personal de Aris Mining.....	50
Figura 28 Platina de la base del motor con sus dos configuraciones.....	51
Figura 29 Ensamblaje final de la base del motor, propuesta modular	52
Figura 30 Resultado final base moto	52
Figura 31 Ensamble del nido de hidrociclones con tanques, estructura y red de tuberías.....	53
Figura 32 Modelo CAD del soporte para rasquetear casquetes del Molino Allis	54
Figura 33 Producto final soporte de rasqueteo molino	54
Figura 34 Modelado soporte para levantamiento del molino	55
Figura 35 Diseño final fabricado bajo planos	56
Figura 36 Modelo CAD del eje de la bomba Galligher	56
Figura 37 Modelo CAD del cono de chute de alimentación.....	57
Figura 39 Eje de la celda circular	57



RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO:	Integración de monitoreo predictivo y diseño mecánico en la gestión del mantenimiento en la planta de beneficio de Aris Mining Marmato
AUTOR(ES):	Camilo Alberto Angarita Martinez
PROGRAMA:	Facultad de Ingeniería Mecánica
DIRECTOR(A):	Sergio Andrés Gomez Suarez

RESUMEN

Este documento presenta los resultados de una práctica profesional desarrollada en la planta de beneficio de Aris Mining Marmato, centrada en el fortalecimiento de la gestión del mantenimiento a través de técnicas de monitoreo predictivo, análisis de fallas y diseño mecánico. Se aplicaron inspecciones no destructivas mediante medición de vibraciones y espesores por ultrasonido en equipos críticos como molinos y un tanque espesador, lo cual permitió identificar condiciones anómalas y zonas con desgaste estructural significativo. A partir de estos hallazgos se propusieron e implementaron soluciones de diseño en software CAD, incluyendo soportes estructurales, bases modulares y documentación técnica para fabricación de repuestos. El trabajo integró diagnóstico técnico con diseño de soluciones, generando mejoras en la confiabilidad, seguridad operativa y eficiencia en los procesos de intervención.

PALABRAS CLAVE:

Mantenimiento basado en confiabilidad, vibraciones, ultrasonido, diseño mecánico, SolidWorks, minería.

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Integration of Predictive Monitoring and Mechanical Design in Maintenance Management at the Aris Mining Marmato Processing Plant

AUTHOR(S): Camilo Alberto Angarita Martinez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Sergio Andrés Gomez Suarez

ABSTRACT

This document presents the results of a professional internship carried out at the Aris Mining Marmato processing plant, focused on strengthening maintenance management through predictive monitoring techniques, failure analysis, and mechanical design. Non-destructive inspections were conducted using vibration analysis and ultrasonic thickness measurements on critical equipment such as mills and a thickener tank. These evaluations identified abnormal operating conditions and areas of significant structural wear. Based on these findings, CAD-modeled design solutions were proposed and implemented, including structural supports, modular mounting bases, and technical documentation for spare part fabrication. This work integrated technical diagnostics with engineering design, contributing to improved equipment reliability, operational safety, and efficiency in maintenance interventions.

KEYWORDS:

Reliability-centered maintenance, vibration analysis, ultrasonic testing, mechanical design, SolidWorks, mining.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

La industria minera enfrenta desafíos constantes relacionados con la eficiencia operativa y la fiabilidad de sus equipos. En este contexto, el mantenimiento predictivo se ha consolidado como una estrategia esencial para anticipar fallas y optimizar la gestión del mantenimiento, permitiendo intervenciones programadas que minimizan los tiempos de inactividad y los costos asociados. Técnicas como el análisis de vibraciones y la medición de espesores por ultrasonido permiten detectar anomalías antes de que se conviertan en fallas críticas, mejorando así la disponibilidad y seguridad de los equipos.

La planta de beneficio de Aris Mining Marmato, ubicada en el departamento de Caldas, Colombia, ha identificado la necesidad de fortalecer sus procesos de mantenimiento mediante la implementación de estrategias predictivas y soluciones de diseño mecánico adaptadas a sus necesidades específicas. Aunque existen estudios previos sobre mantenimiento predictivo en la industria minera, pocos integran de manera práctica el monitoreo de condiciones con el diseño y fabricación de soluciones mecánicas personalizadas.

Este trabajo de grado documenta la práctica profesional realizada en Aris Mining, enfocada en la aplicación de técnicas de monitoreo predictivo y el desarrollo de soluciones de diseño mecánico para la gestión del mantenimiento. Se presentan los resultados de las inspecciones realizadas, los análisis de datos obtenidos y las propuestas de diseño implementadas, con el objetivo de contribuir a la mejora continua de los procesos de mantenimiento en la planta.

Planteamiento del problema

La implementación correcta de un plan de mantenimiento es uno de los pilares clave para que cualquier industria sea más rentable. Un plan de mantenimiento es un conjunto de directrices cuyo propósito es describir cómo debe funcionar una operación e identificar oportunidades para promover estrategias que garanticen el correcto funcionamiento de las máquinas, evitando de esta manera la mayor cantidad de inconvenientes como el tiempo muerto de producción que conlleva a menos ingresos para la empresa, en este orden de ideas López (2024) menciona que “En la industria minera, el mantenimiento eficiente de los equipos es un factor clave para garantizar la continuidad operativa y la rentabilidad de las empresas”.

Dentro de los procesos involucrados en el tratamiento del mineral extraído, el área de molienda juega un papel fundamental ya que los molinos son equipos críticos para la reducción del tamaño del mineral antes de su tratamiento metalúrgico. Hechas las consideraciones anteriores, en la planta de beneficio de Aris Mining - Marmato, la ocurrencia de fallas inesperadas en los molinos representa un desafío constante, generando paradas no programadas, aumento en los costos de mantenimiento y disminución en la eficiencia operativa.

En síntesis, Aris Mining emplea un modelo de mantenimiento reactivo deficiente, el cual podría mejorar si se implementan estrategias que aborden sus falencias. Entre estas estrategias se encuentran los Análisis de Causa Raíz (RCA) y el diseño de mejoras en las piezas de recambio, como la optimización del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), el suministro de piezas con números de parte según el manual, o la disponibilidad de planos detallados para las partes.

Cabe agregar que, la empresa cuenta con equipos de inspección predictiva que hasta el momento no eran utilizados como la cámara termográfica, el analizador de vibraciones y el medidor de espesores por ultrasonido, herramientas útiles para el mantenimiento e integración de

una estrategia predictiva que complementara el mantenimiento reactivo existente en la empresa.

Ante los desafíos que propone la planta de beneficio en Marmato, es necesario implementar acciones de ingeniería enfocadas en una estrategia predictiva como la inspección de superficies por ultrasonido, las vibraciones en elementos rodantes, entre otras. Estas acciones permitirán formular soluciones a las fallas de los equipos como el diseño de componentes, o incluso prever y evitar futuros problemas.

Justificación

La práctica empresarial en Aris Mining se da como respuesta a la necesidad de intervenciones proactivas en el mantenimiento junto con el uso de herramientas disponibles en la empresa de las cuales no había personal capacitado para su manipulación y por consiguiente la falta de información valiosa para la gestión del mantenimiento y toma de decisiones. Ante la situación planteada, se presenta como solución la implementación de inspecciones de molinos por ultrasonido, análisis de vibraciones y la elaboración de diseños, ya sea para proponer mejoras en las labores de mantenimiento o bien generar planos de máquinas cuyos repuestos no se encontraban en el mercado o la empresa no tenía información de los manuales.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la gestión del mantenimiento en la planta de beneficio de aris mining, al integrar herramientas de monitoreo predictivo, el análisis de fallas y el diseño mecánico de soluciones.

Objetivos específicos

- Aplicar el ultrasonido y análisis de vibraciones como técnicas de inspección no destructivas para diagnosticar el estado de molinos y tanques espesadores.
- Participar en el diseño, modelado y seguimiento de soluciones mecánicas para la intervención de componentes estructurales y rotativos.
- Documentar soluciones técnicas validadas en planta para apoyar procesos de toma de decisiones, fabricación de repuestos y contratación de servicios.

Marco referencial

Marco teórico

La industria minera en Colombia es una actividad económica fundamental que abarca la exploración, extracción, procesamiento y comercialización de recursos minerales como oro, carbón, níquel, esmeraldas y cobre. Esta actividad ha sido históricamente significativa, no solo por su contribución al desarrollo económico, sino también por su impacto en la configuración territorial y social del país (*Colombia Minera - CHM Minería*, n.d.).

Desde una perspectiva económica, la minería representa una fuente importante de ingresos fiscales y de divisas para Colombia. Según la Agencia Nacional de Minería (2023), el sector minero ha contribuido significativamente a la generación de empleo formal, la atracción de inversión extranjera directa y la financiación de programas sociales a través de regalías.

La minería de oro abarca un sector importante de esta actividad económica, por lo que es vital que con el tiempo se proponga la adopción de mejores prácticas, como lo es el mantenimiento productivo, especialmente en las plantas de beneficio, que son aquellas instalaciones industriales diseñadas para procesar minerales auríferos, separando y recuperando el oro contenido en ellos mediante una serie de operaciones físicas y químicas. Estas plantas permiten transformar el mineral extraído en un producto comercializable, optimizando la recuperación del metal y minimizando los impactos ambientales asociados al proceso (Calderón, 2021).

El proceso de beneficio del oro comprende varias etapas fundamentales:

Trituración y molienda: Estas etapas reducen el tamaño del mineral extraído, facilitando la liberación del oro de la ganga. La trituración primaria y secundaria disminuye el tamaño del material a fragmentos entre 5 y 20 mm, mientras que la molienda lo reduce aún más,

generalmente por debajo de las 75 micras, utilizando molinos de bolas o barras (Concha, 2023).

Concentración gravimétrica: Separa las partículas de oro basándose en diferencias de densidad, utilizando equipos como mesas Wilfley o canalones. Este método es especialmente efectivo para recuperar oro grueso (Concha, 2023).

Flotación: Proceso que permite la separación selectiva de minerales mediante la adhesión de partículas hidrofóbicas a burbujas de aire. Es útil para concentrar minerales de oro asociados con sulfuros (Concha, 2023).

Lixiviación: Consiste en disolver el oro contenido en el mineral mediante soluciones químicas, comúnmente cianuro de sodio, en presencia de oxígeno. Este proceso puede realizarse en tanques agitadores o por percolación en pilas (Dasen Mining, s.f.).

Adsorción y recuperación: El oro disuelto se recupera utilizando carbón activado (proceso CIP/CIL) o mediante el proceso Merrill-Crowe, que implica la precipitación del oro con polvo de zinc tras la clarificación de la solución rica (Marsa, s.f.).

Fundición: El concentrado de oro obtenido se funde para producir lingotes de alta pureza, listos para su comercialización (Calderón, 2021).

Las operaciones en plantas de beneficio presentan diversos riesgos, incluyendo fallas mecánicas, exposición a sustancias químicas peligrosas y generación de residuos contaminantes. Un mantenimiento predictivo y eficiente es esencial para garantizar la continuidad operativa, la seguridad del personal y la protección del medio ambiente (Concha, 2023). Por lo tanto, el mantenimiento de equipos industriales constituye una disciplina esencial para la gestión de activos en la industria minera, ya que, además de garantizar la continuidad operativa y contribuir a la reducción de costos y la prolongación de la vida útil de la maquinaria (Díaz, 2024). Tradicionalmente, se han empleado enfoques basados en el mantenimiento correctivo y

preventivo; sin embargo, en la actualidad, el mantenimiento predictivo se ha posicionado como la estrategia más avanzada, dado que permite anticiparse a las fallas mediante un monitoreo constante y el análisis de datos críticos (Montilla, 2019). En este sentido, la detección temprana de indicadores de deterioro posibilita programar intervenciones antes de que se produzcan fallas críticas, lo que a su vez reduce significativamente los tiempos de inactividad y optimiza los costos operativos (López, 2024). Asimismo, dentro de las técnicas empleadas en el mantenimiento predictivo, destacan el análisis de vibraciones, la termografía y el ultrasonido, de las cuales se va a abordar a continuación:

Análisis de vibraciones: Es una técnica que permite identificar anomalías en el funcionamiento de la maquinaria, detectando fenómenos como el desbalanceo, desalineación y desgaste de componentes, la cual se basa en la medición de las vibraciones emitidas por los equipos y en el análisis de patrones que se desvían de condiciones normales, lo cual constituye un indicador crucial de posibles fallas (Suazo, 2025).

Termografía: Se utiliza para monitorear las variaciones de temperatura en los equipos, lo que facilita la identificación de áreas con fricción excesiva o fallos en sistemas eléctricos y mecánicos, siendo ambas técnicas pilares del mantenimiento predictivo (López, 2024).

Medición de espesores por ultrasonido: Es una técnica no destructiva ampliamente utilizada en la industria para determinar el grosor de materiales sólidos, como metales, plásticos y cerámicas. Consiste en emitir ondas sonoras de alta frecuencia hacia el material y medir el tiempo que tarda el eco en regresar al transductor. Este tiempo, junto con la velocidad de propagación del sonido en el material, permite calcular el espesor del objeto evaluado (Evident Scientific, s.f.). Una de las principales ventajas de esta técnica es que solo requiere acceso a un lado del material, lo que la hace especialmente útil en situaciones donde no es posible realizar

cortes o desmontajes.

La aplicación de estas técnicas en la minería permite anticipar fallas en equipos críticos mediante el monitoreo de condiciones operativas y la interpretación de datos en tiempo real. Su aplicación se ha vuelto indispensable en plantas de beneficio, donde equipos como espesadores, molinos, bombas slurry y celdas de flotación son fundamentales para la continuidad operacional (Jiménez et al., 2021).

Espesadores: Estos equipos son vitales para el manejo de pulpas y relaves. El mantenimiento predictivo permite identificar desgaste en mecanismos como el puente rascador y los accionamientos centrales mediante técnicas de vibraciones y termografía, reduciendo así paradas inesperadas (Sotomayor & Rivera, 2022).

Molinos (shell, casquetes, corona/catalina): Un molino de bolas es un equipo de molienda utilizado en la industria minera y en otras aplicaciones industriales. Su función principal es triturar o pulverizar materiales mediante la acción de bolas de acero o de otro material de gran dureza que giran en el interior de un cilindro. Los molinos son sometidos a altos niveles de tensión mecánica. El análisis de vibraciones permite detectar desalineaciones, fisura desbalanceo en componentes críticos como el shell o las catalinas. Además, el análisis de aceite ayuda a determinar el desgaste de los cojinetes y engranajes (Sierra & García, 2020).

Bombas verticales tipo slurry: Este tipo de bombas transporta pulpas abrasivas. Las técnicas predictivas, como el monitoreo de vibraciones y el ultrasonido, permite detectar cavitación, desbalanceo o deterioro de sellos mecánicos, mejorando su confiabilidad (Andrade & Mendoza, 2019).

Celdas de flotación: Las fallas en los agitadores o en los sistemas de aireación pueden afectar la eficiencia del proceso de concentración. Mediante el monitoreo continuo, se pueden

detectar anomalías en los motores eléctricos, variadores de frecuencia y componentes mecánicos (Muñoz et al., 2021).

La implementación de estas estrategias predictivas no solo mejora la disponibilidad de los equipos, sino que también permite una gestión más eficiente del mantenimiento, reduciendo costos y mejorando la seguridad operacional (Jiménez et al., 2021).

Es así, que el mantenimiento predictivo, sustentado en técnicas avanzadas como el análisis de vibraciones, la termografía y la implementación de rutas de inspección estructuradas, se configura como una estrategia esencial para la optimización de la gestión de activos en la industria minera. Además, la integración de estos enfoques, junto con el cumplimiento de normativas internacionales, constituye la base teórica y normativa que fundamenta la presente investigación, la cual se orienta a proponer soluciones prácticas que mejoren la eficiencia operativa y la sostenibilidad en la planta de beneficio de Aris Mining (Marinelli, 2025; Tomás, 2023).

Metodología

Este capítulo presenta los métodos y técnicas aplicados durante el desarrollo de la práctica profesional en la planta de beneficio de Aris Mining en Marmato, centrados en dos grandes líneas de trabajo: las inspecciones de integridad mediante mediciones de espesor por ultrasonido y el desarrollo de diseños técnicos en software CAD. En primer lugar, se describe la metodología usada para realizar el análisis de vibraciones, los puntos de medición y la frecuencia, en segundo lugar, se describe el procedimiento utilizado para llevar a cabo las mediciones de espesores en equipos como molinos y tanques, con el fin de evaluar el desgaste de componentes metálicos expuestos a condiciones de trabajo exigentes. Posteriormente, se detalla la metodología empleada para el diseño y modelado de soluciones técnicas en SolidWorks, incluyendo soportes, anclajes y documentación de repuestos, todos orientados a resolver necesidades puntuales de mantenimiento, seguridad operativa o mejora de procesos. Estas actividades se realizaron de manera coordinada con los equipos de mantenimiento, proyectos y operación, aplicando criterios de ingeniería práctica adaptados a las condiciones reales de la planta.

Análisis de vibraciones en el área de molienda

Las mediciones de vibraciones se iniciaron en agosto de 2024, como parte de las actividades realizadas durante la práctica profesional en la planta de beneficio de Aris Mining. Para el registro de datos se utilizó un analizador de vibraciones MICROLOG Dbx de la marca SKF, equipo portátil diseñado para el monitoreo de condición mecánica mediante la captura de señales de velocidad (mm/s) y aceleración (g), tanto en formato RMS como Peak.

Figura 1*Analizador de vibraciones*

Las frecuencias de medición no fueron fijas; en general, las mediciones se realizaron con una periodicidad promedio de dos veces por semana. Sin embargo, en algunos periodos se presentaron interrupciones por motivos operacionales o logísticos. Las mediciones fueron efectuadas con los equipos en operación bajo condiciones normales de carga, siguiendo procedimientos consistentes para asegurar la validez comparativa de los datos.

El monitoreo se llevó a cabo en los molinos 1 y 6. Cada molino contó con una configuración específica de puntos de medición seleccionados estratégicamente según la criticidad de los componentes.

Para el Molino 6 se definieron siete puntos de medición: motor lado libre, motor lado acople o cojinete lado acople, rodamiento lado acople del eje de entrada, rodamiento lado libre del eje de entrada, rodamiento lado libre del eje de salida, rodamiento lado piñón del eje de salida y rodamiento lado libre del piñón de ataque. Para el Molino 1 se midieron cuatro puntos: motor lado libre, motor lado acople, rodamiento lado acople y rodamiento lado libre.

Las ubicaciones exactas de los puntos serán ilustradas mediante imágenes en el apartado de resultados, con el fin de facilitar su identificación y replicabilidad.

Los datos anteriores a agosto de 2024 no fueron registrados por el autor, sino que pertenecen a informes elaborados por una empresa subcontratada por Aris Mining para realizar el análisis de vibraciones. Estos registros se integraron como referencia comparativa en el análisis de tendencias.

Los hallazgos obtenidos durante la práctica fueron compartidos periódicamente en reuniones de cambio de turno con el personal de mantenimiento, lo cual permitió retroalimentar las decisiones operativas en tiempo real. Asimismo, se realizó una presentación corporativa en la que se mostraron comportamientos vibracionales críticos y recomendaciones técnicas basadas en el análisis espectral y de tendencias.

El análisis se enfocó en la evaluación de aumentos anormales en las magnitudes de vibración y su correlación con posibles modos de falla. La interpretación se apoyó en criterios técnicos de la norma ISO 10816-3.

Medición de espesores por ultrasonido

Para esta tarea de medición por ultrasonido se usó el medidor de espesor marca dmq familia qs. Inicialmente se valoró la superficie en la que se iba a realizar la medición, ahora bien, en muchos casos la superficie tiene capas de suciedad o pintura que impiden la toma de datos por lo que debe limpiarse previamente.

Para esta tarea de medición por ultrasonido, se utilizó el medidor de espesor de la marca DMQ, modelo familia QS. Este equipo es adecuado para la evaluación no destructiva del espesor en estructuras metálicas. A continuación, se describen los métodos y procedimientos aplicados en los distintos equipos evaluados.

Preparación de la superficie

Antes de realizar las mediciones, se inspeccionó visualmente cada superficie para

identificar posibles interferencias. En muchos casos, la superficie presentaba suciedad, corrosión o pintura, lo que impedía una correcta transmisión de la señal ultrasónica. Por esta razón, se procedió a limpiar las zonas de interés, removiendo dichas capas para asegurar lecturas precisas.

Definición de zonas de medición

Molino 6: Se dividió el shell en 16 referencias angulares, y a lo largo del mismo se identificaron tres zonas horizontales: A, B y C. Se realizaron 16 mediciones por cada zona, para un total de 48 puntos iniciales. Posteriormente, en una segunda etapa, se cerró la malla en el área sospechosa de deterioro, midiendo 81 puntos distribuidos en una cuadrícula de 9 columnas (A–I) por 9 filas, aunque 9 puntos eran tomados por el manhole para un total de 72 puntos efectivos.

Molino 4: Al tratarse de un molino más pequeño, con dimensiones aproximadas de 1,5 m por 3 m, se realizó una única etapa de inspección. Se establecieron 29 referencias angulares y se midieron 3 zonas horizontales (A, B, C), lo que resultó en 87 puntos de medición. Espesador 2: La superficie del tanque se dividió angularmente en 10 zonas equidistantes, y verticalmente en 2 niveles accesibles para la medición. La selección de estos sectores se hizo teniendo en cuenta el acceso disponible y las condiciones operativas del equipo.

Procedimiento de medición

En cada punto definido, se aplicó gel acoplante para garantizar el contacto acústico entre la sonda y la superficie. Luego, se posicionó el equipo de medición en ángulo recto respecto a la pared metálica. En cada posición se tomaron lecturas múltiples para confirmar la estabilidad del valor reportado por el equipo. Se utilizó un patrón sistemático para asegurar una cobertura uniforme de las superficies evaluadas.

Registro y sistematización de datos

Los valores obtenidos fueron registrados en tablas estructuradas por zona y punto de

medición. Esta información fue organizada para facilitar la interpretación gráfica de los espesores en cada área evaluada. Los datos fueron empleados posteriormente como insumo para decisiones de mantenimiento, planificación de refuerzos o continuidad operacional.

Modelado en Solidworks.

Resulta oportuno mencionar que, la metodología usada para obtener las geometrías de una pieza en las instalaciones de Aris Mining dependió del alcance de cada diseño, esto se debe a que algunas piezas contó con planos propios del fabricante por lo que no necesitan muchos detalles, en cambio, existían otros diseños que exigen una ingeniería más minuciosa para su fabricación. A continuación, se presenta la metodología utilizada en algunos de los modelados realizados a lo largo de la práctica.

Diseño del anclaje y grouting de la base del motor y chumaceras del eje en el molino 2

Se hicieron mediciones en campo del área efectiva que podía tener el diseño ensamblado imaginando las posibles soluciones de anclaje para la chumacera y el motor.

El proceso de diseño de los anclajes para el sistema motriz del molino inició con la creación de una mesa técnica conformada por personal con experiencia en cimentación y anclaje de maquinaria. A partir de sus recomendaciones se establecieron las primeras directrices técnicas que guiaron los bosquejos iniciales, la toma de medidas en campo y el planteamiento de los elementos estructurales requeridos.

Las indicaciones establecieron que el diseño debía incorporar dos pletinas metálicas de acero A36, una de 1" y otra de 1.5" de espesor. Estas láminas debían permitir el libre movimiento del piñón de ataque una vez instalado el sistema, garantizando su correcta alineación y funcionamiento. La pletina de mayor calibre fue anclada directamente al concreto utilizando grouting con un patrón de 11 orificios de 1" distribuidos alrededor de su perímetro, por donde se

ubicaron pernos pasantes.

Para los pernos, se estableció como requerimiento una longitud superior a 1.5 metros, con un diámetro nominal de 1", y acompañados de una tuerca niveladora que permitiera ajustar la altura y nivelación de los componentes durante la instalación.

Respecto al diseño del soleplate del motor, se contó con mayor flexibilidad. Las especificaciones indican también el uso de pletinas de 1" y 1.5" de espesor, pero esta vez con dimensiones generales de 1.6 m x 1.6 m y 12 orificios pasantes de 1.5" distribuidos simétricamente. Al igual que en el anclaje del piñón, la lámina más gruesa sería la embebida en el concreto mediante grouting.

Una vez validadas las especificaciones y geometrías, se procedió a modelar el diseño en software CAD, obteniendo los planos técnicos necesarios. El diseño final fue aprobado por el equipo técnico, permitiendo su ejecución a través de un esfuerzo conjunto entre el área de mantenimiento y el equipo de proyectos para renovar adecuadamente los anclajes del sistema motriz.

Nido de hidrociclones

El diseño del nido de hidrociclones partió de una necesidad particular: reutilizar los hidrociclones existentes en planta, así como materiales disponibles en el inventario, con el objetivo de reducir costos y tiempos de adquisición. Bajo esta premisa, el primer paso consistió en modelar la geometría del hidrociclón ya existente, para lo cual se realizaron mediciones en campo y se recreó su forma en un entorno CAD. Esto permitió trabajar con el equipo en un modelo tridimensional que sirviera de referencia para los demás elementos del diseño.

En paralelo, se identificaron en almacén unas láminas metálicas roladas que serían utilizadas para fabricar los tanques de solución rica y pobre del sistema. Fue necesario ir al sitio,

medir manualmente las dimensiones de estas láminas y ajustar a ellas las formas y capacidades de los depósitos. Con esta información se avanzó en el diseño de una estructura que pudiera soportar ambos tanques considerando aspectos como estabilidad, distribución de carga y compatibilidad con el espacio físico disponible en planta.

Una vez definidos estos elementos base se procedió a ensamblar virtualmente el sistema completo integrando los hidrociclones, los tanques, la estructura de soporte y la red de tuberías. Finalmente, se desarrolló un diseño tentativo del distribuidor central contemplando criterios de simetría hidráulica y compatibilidad con los caudales esperados.

Todo el proceso tuvo como objetivo entregar un modelo de ensamblaje funcional del nido de hidrociclones con los planos técnicos necesarios para su posterior fabricación e implementación.

Soporte para rasquetear los casquetes del molino Allis

Una de las actividades clave durante el proceso de mantenimiento del molino 1 fue el rasqueteo del babbitt en los casquetes, una operación necesaria para asegurar una adecuada superficie de contacto entre el cojinete y el eje. Para llevar a cabo esta intervención de forma segura y eficiente se identificó la necesidad de diseñar un soporte que permitiera sostener el casquete durante el proceso de rasqueteo, evitando mantenerlo suspendido mediante el puente grúa, pues esto representaba un riesgo operativo y limitaba el uso de dicho equipo para otras tareas.

El diseño del soporte partió de un reconocimiento del entorno de trabajo y del casquete considerando sus dimensiones, peso y puntos de apoyo. A partir de este análisis se establecieron criterios de estabilidad, accesibilidad y maniobrabilidad que debía cumplir el soporte.

Adicionalmente, con el fin de optimizar recursos y tiempos de ejecución, se optó por utilizar

materiales disponibles en bodega, por lo que se realizó una búsqueda y selección de perfiles metálicos y platinas sobrantes en el almacén.

Una vez identificados los materiales disponibles y definidos los requerimientos funcionales del soporte, se desarrolló un modelo digital utilizando software CAD. En este modelo se ajustaron las dimensiones, los puntos de contacto y la geometría general del soporte, garantizando la compatibilidad con el espacio de trabajo y la facilidad de acceso al cojinete durante el proceso de rasqueteo. El diseño se centró en proporcionar estabilidad al casquete mientras se encontraba fuera de su alojamiento, sin requerir el uso continuo del puente grúa, lo cual fue un criterio técnico fundamental para el desarrollo de esta solución.

Diseño de soporte tipo cuna para levantamiento de molino

Para este diseño se partió de una necesidad operativa recurrente: realizar trabajos de mantenimiento bajo el shell del molino que requieren levantar la máquina mediante gatos hidráulicos. El método tradicional, que apoyaba el molino directamente sobre bloques, generaba puntos de concentración de carga con riesgo de deformación y accidentes. Por ello, se planteó como solución la creación de un soporte tipo cuna que distribuye de forma más homogénea el peso del molino al momento de levantarlo.

La metodología comenzó con un análisis de las condiciones físicas del molino y su entorno. Se tomaron mediciones in situ del diámetro externo del shell, el espacio disponible entre el molino y la cimentación, y los puntos habituales de apoyo de los gatos hidráulicos. Estas dimensiones sirvieron como base para definir la geometría del soporte, el cual debía adaptarse perfectamente a la curvatura del molino sin interferir con otros elementos mecánicos.

Se evaluaron distintos perfiles estructurales disponibles en planta para seleccionar los más adecuados, priorizando aquellos con alta resistencia a compresión y buena soldabilidad.

Posteriormente, se elaboró un modelo tridimensional en software CAD que permitió visualizar el comportamiento estructural del soporte bajo carga distribuida. El diseño contempló refuerzos transversales y placas base para asegurar su estabilidad y rigidez.

Una vez validada la geometría mediante simulaciones preliminares, se generaron los planos técnicos con todos los detalles necesarios para su fabricación local.

Otros diseños para fabricación de repuestos con terceros

Durante el desarrollo de la práctica se presentaron situaciones en las que fue necesario elaborar documentación técnica de componentes ya existentes en la planta con el objetivo de facilitar futuros procesos de adquisición o fabricación. Aunque algunos de estos elementos eran conocidos por los fabricantes habituales, la empresa requería planos detallados que permitieran aclarar especificaciones y minimizar errores en los pedidos.

Para el desarrollo de esta documentación técnica se realizó primero el levantamiento de medidas directamente en sitio. Utilizando herramientas de medición básicas como calibradores y flexómetros se tomaron las dimensiones principales de cada pieza prestando especial atención a geometrías clave, detalles funcionales y características que pudieran generar ambigüedad en la fabricación.

A partir de la información obtenida por las mediciones se construyeron modelos tridimensionales en software CAD, representando con fidelidad las características de los componentes, luego se elaboraron los planos técnicos con sus respectivas acotaciones, tolerancias y detalles necesarios, asegurando una comunicación clara entre la empresa y los posibles fabricantes.

Esta serie de pasos se aplicaron para el extremo del eje de la bomba vertical Galligher, la placa de la prensa en la zona de precipitados; el cono final del chute de alimentación, y el eje de

la celda circular. En todos los casos, el propósito fue garantizar un soporte gráfico claro y preciso que permitiera gestionar pedidos con mayor exactitud y confianza.

Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las actividades técnicas desarrolladas durante la práctica profesional en la planta de beneficio de Aris Mining Marmato.

Primero, se exponen los registros tomados mediante análisis de vibraciones en los molinos 1 y 6, utilizando un analizador SKF MICrolog DXb. Las mediciones se enfocaron en variables de velocidad y aceleración, capturadas en puntos estratégicos de cada equipo.

Posteriormente, se detallan los valores obtenidos en las mediciones de espesor por ultrasonido, realizadas sobre los shells del molino 6, el molino 4 y el tanque espesador 2.

Finalmente, se incluyen los modelos tridimensionales desarrollados en software CAD como parte del soporte técnico brindado a distintas áreas de planta. Esta sección contiene también las figuras, tablas y planos técnicos derivados de los levantamientos realizados en campo.

Análisis de vibraciones de molienda

Como parte del seguimiento al estado operativo de los equipos críticos de la planta, se realizó un análisis de vibraciones en los molinos 1 y 6. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando el equipo analizador SKF Microlog DBx, aplicando un único sensor tipo acelerómetro para registrar datos en puntos estratégicos como el motor, los rodamientos y los acoples. Las variables evaluadas fueron aceleración (mm/s^2) y velocidad (mm/s), con el fin de caracterizar el comportamiento dinámico de los componentes a lo largo del tiempo. A continuación, se presentan las tablas y gráficas que resumen los valores obtenidos en cada uno de los puntos de medición, organizados cronológicamente y por ubicación.

Resultado del análisis de vibraciones en el molino 6

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el monitoreo de vibraciones del

Molino 6, con base en los datos recolectados entre agosto y octubre de 2024. Las mediciones se realizaron utilizando un analizador de vibraciones SKF MICrolog DXb, registrando valores de velocidad pico (mm/s) y aceleración RMS (g) en siete puntos de medición distribuidos estratégicamente en componentes clave del molino. Estos puntos incluyen el motor lado libre, motor lado acople o cojinete lado acople, rodamiento lado acople del eje de entrada, rodamiento lado libre del eje de entrada, rodamiento lado libre del eje de salida, rodamiento lado piñón del eje de salida y rodamiento lado libre del piñón de ataque. Las ubicaciones específicas de estos puntos se mostrarán en la Figura 2.

Figura 2

Esquema molino 6

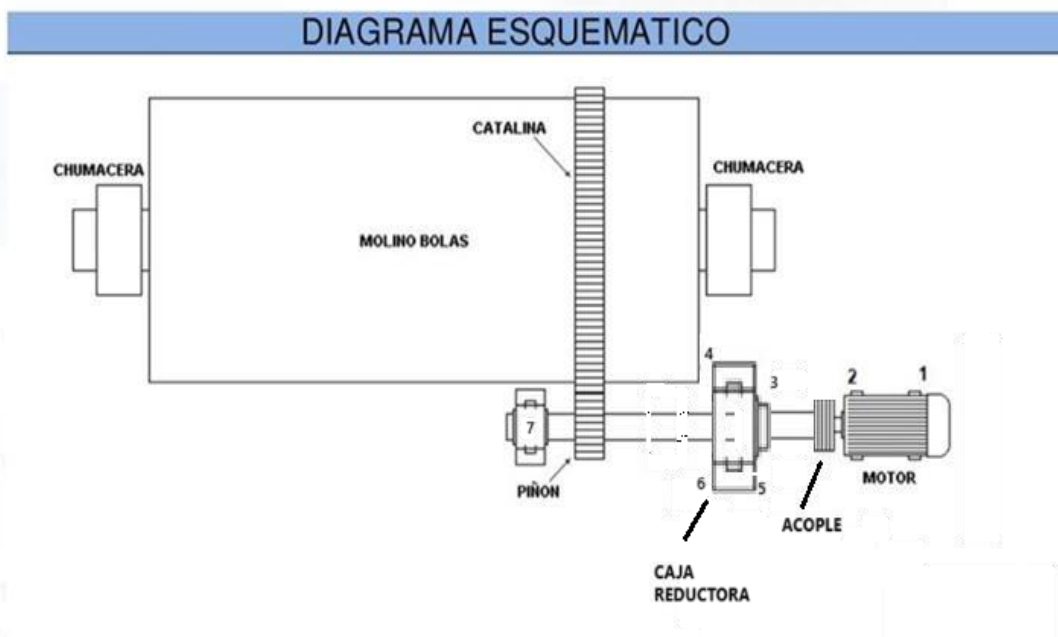


Figura 3

Registro de niveles de vibración en el Molino 6 – velocidad y aceleración (2024)

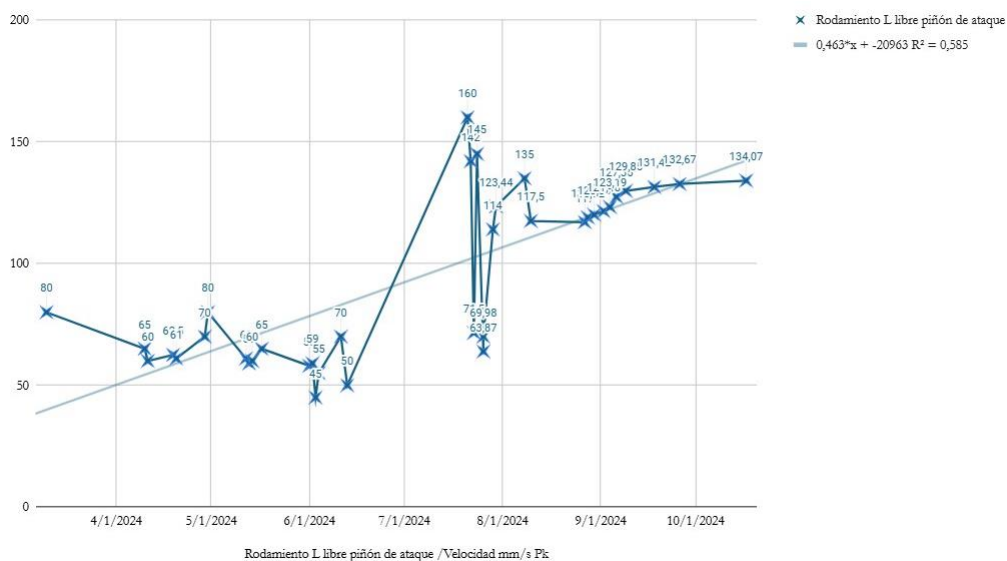
MOLINO 6	Motor lado libre		Motor lado acople/Cojinete L acople		Rodamiento L acople eje de entrada		Rodamiento L libre eje de entrada		Rodamiento L libre eje de salida		Rodamiento L piñón eje de salida		Rodamiento L libre piñón de ataque	
	Fecha	Velocidad mm/s Pk	Aceleración g RMS	Velocidad mm/s Pk	Aceleración g RMS	Velocidad mm/s Pk	Aceleración g RMS	Velocidad mm/s Pk	Aceleración g RMS	Velocidad mm/s Pk	Aceleración g RMS	Velocidad mm/s Pk	Aceleración g RMS	Velocidad mm/s Pk
3/10/2024	12,3	0,8	14	0,9	34	3,4	47,5	3,1	49	2,4	54	2,5	80	7,9
4/10/2024	13,5	0,7	10	0,65	26	2,2	51	2,4	39	1,8	60	2	65	7,85
4/11/2024	14,2	0,75	14	0,85	25	2,3	43	2,8	48	2,4	41	2,4	60	8
4/19/2024	12,3	0,55	12,5	0,9	40	3	34	3	34	2,3	42,5	1,5	62,5	7,85
4/20/2024	16,5	0,65	14	1,1	39	2,9	44	2,4	39	2	52,5	1,55	61	7,7
4/29/2024	12,5	0,62	12,5	0,85	32,5	2,5	39	2,75	47	2,5	40	1,55	70	6,5
4/30/2024	11,8	0,68	10	0,9	29	2,1	36	2,6	40	1,75	39	1,53	80	7
5/12/2024	13	0,51	12,5	0,8	27,5	2,6	50	4	64	2,2	57,5	2,25	61	10,5
5/13/2024	11,8	0,98	13	0,6	27	2,4	44,5	3,75	54	2,1	57,5	2,2	59	8
5/14/2024	16	0,52	13,5	0,75	40	3,5	49,8	4,25	46	2,4	52,5	1,75	60	6,4
5/17/2024	13,5	0,5	14	0,73	31	3	42,5	3,4	45	2,1	45	2,1	65	9
6/1/2024	13,7	0,7	16	1,15	55	4,25	41	4,75	47	2,2	47,5	2,4	58	8
6/2/2024	13,5	0,71	12,5	1,1	46	2,9	59	4,9	59	2,3	64	2,7	59	10
6/3/2024	12,5	0,6	13	0,85	30	2,25	52,5	3,9	54	2,4	52,5	2,2	45	5,9
6/4/2024	17	0,65	17,1	0,9	32,5	2,9	48	3,85	49	2,45	55	2,6	55	6
6/11/2024	12,5	0,5	15	1,25	35,1	4,4	50	5,9	55	2,1	59	3,5	70	12
6/13/2024	10	1,2	11	0,75	25,4	2	40	3,78	40	2,3	42,5	2	50	5,9
7/21/2024	32,5	1,6	40	2,7	86	6,75	85	4,5	112	1,8	90	3,9	160	18
7/22/2024	20	1,1	65	1,9	64	4,5	65	3,75	60	6	52,5	3,25	142	12
7/23/2024	8,3	1	10,9	1,1	55,8	3,92	55	3,17	50	5	58,8	3,64	71,5	6,04
7/24/2024	10	1,4	12	1,4	38,5	2,4	57,14	3,8	55	6	40	2,8	145	13
7/26/2024	3,4	0,4	4	0,5	16,74	2	23	3,16	13,22	2,4	17	3	63,87	9,74
7/26/2024	3,2	0,5	4,7	0,53	16	1,92	25	3,4	28,84	3,2	18,2	3,2	69,98	7,5
7/29/2024	12,6	0,4	19,9	0,56	45,09	2,2	48,14	2,3	38,29	2	44,64	2,5	114	6
7/30/2024	15,8	0,4	17,87	0,5	47	2,2	48,17	2,1	45	2,2	38,87	3,15	123,44	6,3
8/8/2024	20	0,45	25	0,58	50,4	2,6	48,6	2,4	50,1	2,78	50,8	2,8	135	4,6
8/10/2024	8,7	0,48	9	0,53	39	2,3	38	2	45	2,1	41	2,1	117,5	7
8/27/2024	13,2	3,04	5,99	0,903	19,7	2,19	15	2,71	18	3,18	17,1	2,76	117	5,12
8/28/2024	14,8	3,8	5,93	1,01	25,6	3,09	14,3	2,15	21,2	2,87	15,9	2,43	118,92	5,47
8/30/2024	15,8	3,46	6,09	1,05	18,8	2,33	14,7	2,52	19,6	2,8	14,7	2,51	120,03	5,89
9/2/2024	12,1	2,9	6,36	1,04	21,5	2,72	13,4	1,9	17,1	2,67	15,4	2,33	121,48	6,23
9/4/2024	14,6	3,49	5,83	0,824	16,8	2,95	13,1	1,74	19	2,68	14,3	2,64	123,19	6,78
9/6/2024	13,9	3,24	6,43	1,09	18,3	2,3	18,1	2,22	12,5	2	13	2,71	127,36	7,04
9/9/2024	12,6	4,16	6,22	0,955	15,5	2,69	13,5	2,76	16,6	2,5	13,8	2,81	129,85	7,65
9/18/2024	14	3,25	5,95	0,929	16,8	1,57	27,2	10,1	13,7	1,88	15,2	3,21	131,42	8,19
9/26/2024	15	3,18	6	1,11	19,5	2,45	15,05	1,49	15,7	2,49	11,7	2,224	132,67	9,31
10/17/2024	16	3,31	12,6	1,99	14,8	2,96	12,4	1,71	16,9	2,71	13,6	2,64	134,07	9,88

A continuación, se presenta el análisis por componentes del sistema motriz del Molino 6 con base en los registros históricos de vibraciones tomados entre enero y octubre de 2024.

Rodamiento L. libre piñón de ataque: Se mantuvo como el componente con mayores valores de vibración a lo largo de todo el periodo, con un comportamiento especialmente agresivo desde julio.

Figura 4

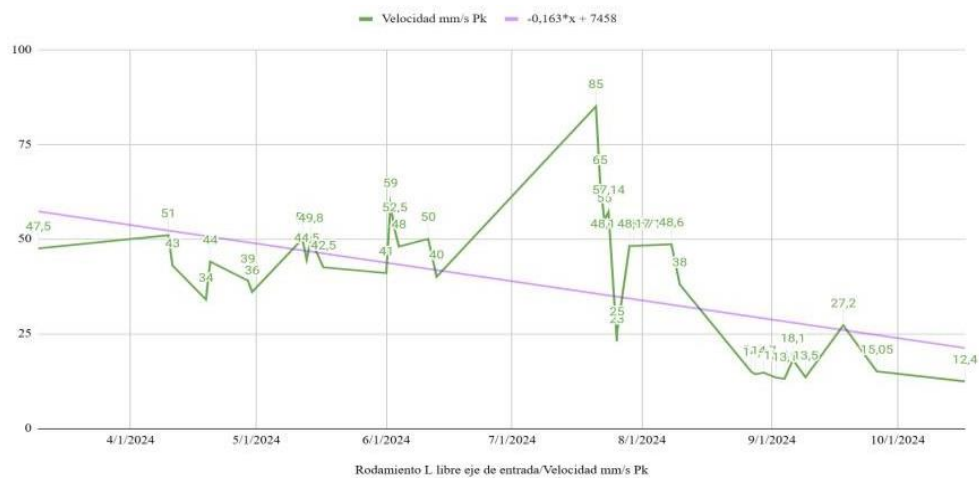
Histograma de Rodamiento L. libre piñón de ataque



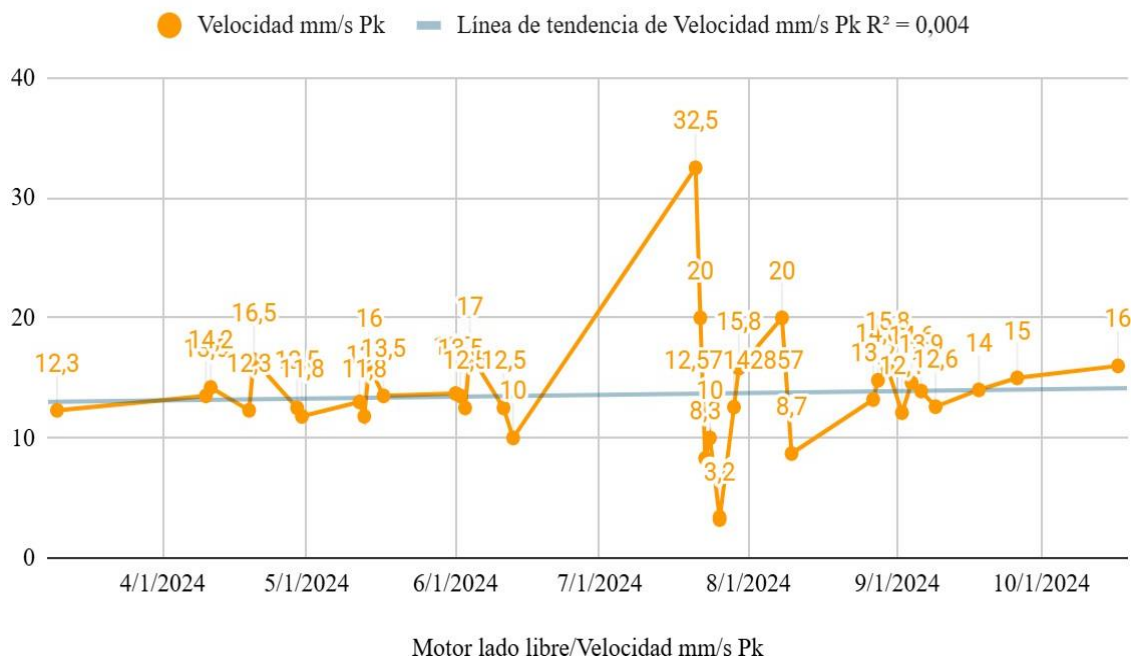
Rodamientos de eje de entrada/salida: Aunque presentaron valores intermedios, se evidenció un patrón oscilante con ligeras mejoras después de las inspecciones.

Figura 5

Histograma de Rodamiento L. libre eje de entrada/salida



Motor y acoplamientos: Los valores fueron altos, pero menos variables. La alineación láser probablemente corrigió parcialmente estos niveles.

Figura 6*Histograma de motor lado libre*

Los valores de velocidad y aceleración registrados superan los límites establecidos por normas como la ISO 10816 para maquinaria rotativa industrial. No obstante, es importante resaltar que estos valores deben analizarse en el contexto operacional del molino, el cual trabaja bajo condiciones exigentes de carga y régimen continuo, factores que impactan directamente en el nivel vibracional registrado. Por esta razón, se adoptó un enfoque de análisis prudente que prioriza la comparación entre fechas y componentes, más allá de un juicio absoluto respecto a la norma.

Durante las semanas monitoreadas, se observaron varios picos de vibración que justificaron intervenciones específicas. A continuación, se destacan los eventos más relevantes:

21 y 22 de julio de 2024: Se registraron aumentos abruptos en velocidad (hasta 112 mm/s) y aceleración (hasta 18 g) en el lado libre del piñón de ataque. Estas cifras indicaron un estado crítico de vibración, especialmente en ese punto.

31 de julio de 2024: Con el objetivo de diagnosticar y mitigar las anomalías detectadas, se contrató una empresa externa para realizar una alineación láser de acoplamientos y la verificación del estado de los trunión. Ese mismo día, se ejecutó un ensayo de tintas magnéticas para evaluar la catalina.

Las imágenes de estas actividades se presentan a continuación. Existieron los siguientes hallazgos:

Figura 7

Prueba de tintas magnéticas a la catalina realizada por empresa externa



Nota: Realizando la prueba de tintas magnéticas se encontró pitting y deformación en los dientes de la misma, como acción correctiva se emparejó el perfil de los dientes de Catalina pasándole pulidora.

Figura 8

Verificación de la superficie de los muñones



Nota: Con una escuadra se procedió a revisar la superficie del muñón de lado descarga como también, el de lado alimento y se notaban canales producto probablemente de una mala lubricación y polución que entró a la chumacera.

Figura 9

Equipo de alineación láser



Nota: Con el equipo de alineación láser y ayuda del equipo topográfico que manejaba la empresa contratista se realizaron cambios a la alineación, ya que encontraron desfases entre los ejes paralelos del motor y el molino además de un desnivel en el eje transversal del molino. A

pesar de la intervención, las vibraciones en el lado libre del molino no disminuyeron, lo que indicó que el origen del problema podría estar vinculado con el desgaste o desalineación de la catalina, situación confirmada mediante el ensayo mencionado.

Agosto 2024: Tras la alineación, los niveles vibracionales continuaron siendo elevados en algunos componentes. Por ejemplo, el 8 de agosto, el rodamiento lado libre del piñón de ataque alcanzó los 135 mm/s y 4,6 g, manteniendo así un estado inestable.

A continuación, se presentan la tabla de datos y la gráfica de evolución temporal de los puntos más críticos, con énfasis en el rodamiento del piñón de ataque y el eje de salida.

Resultado del análisis de vibraciones en el molino 1

El Molino 1 fue monitoreado mediante el analizador de vibraciones SKF MICrolog DXb, evaluando cuatro puntos específicos: Motor lado libre, Motor lado acople, Rodamiento lado acople y Rodamiento lado libre. Las mediciones incluyeron valores de velocidad (en mm/s pico) y aceleración (en g RMS), registradas de forma frecuente entre enero y octubre de 2024. A continuación, se presenta la tabla con los valores obtenidos:

Figura 10

Ensamble del nido de hidrociclones con tanques, estructura y red de tuberías

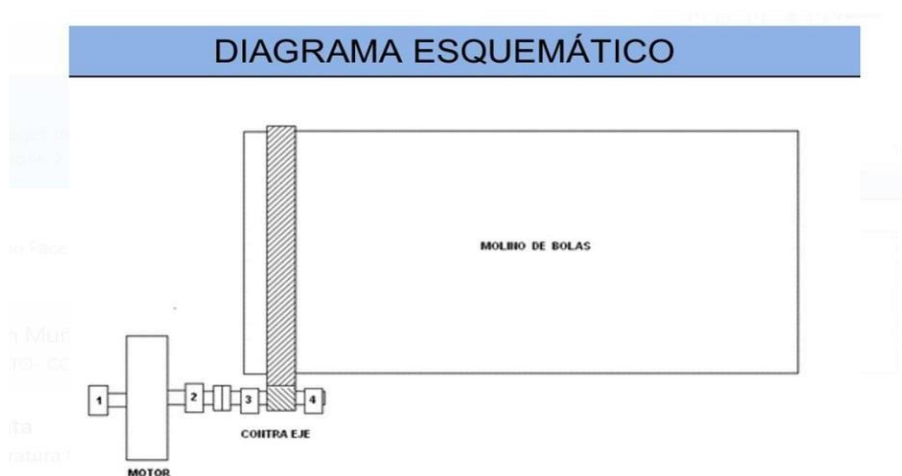


Figura 11

Registro de las vibraciones en el año 2024 molino 1

Fecha	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
	Motor Lado libre		Motor Lado acople		Rodamiento L. acople		Rodamiento L. Libre	
	Velocidad [mm/s pk]	Aceleración [g rms]	Velocidad [mm/s pk]	Aceleración [g rms]	Velocidad [mm/s pk]	Aceleración [g rms]	Velocidad [mm/s pk]	Aceleración [g rms]
1/1/2024	40	3,5	7	1,5	25	4,5	20	4,5
	36	2,5	7,5	1	20	2,4	10	2
	25	3	12,5	1	15	2	22	2
3/1/2024	15	2	2,5	1	15	2	12	1,5
	13	1	8,5	1,3	20	3	15	1,6
	8	0,5	5	1,5	15	1,5	14	4
	10	0,6	21	0,7	16	1	12	2
	5	1,5	7	1,8	10	0,9	15	2,1
	20	0,7	4	1	5	0,8	12	2,7
	22	1,5	5	0,5	15	0,7	10	3
	5	0,7	4	1	30	0,5	5	1,5
	6	1,3	2,5	0,9	10	0,5	12	1,4
	5	1	2,5	2,5	10	0,9	12	1,4
	6	1,8	2,5	0,5	9	1	10	1,3
4/30/2024	6	0,5	2,5	0,4	9	2,5	5	1
	6	0,4	5	0,4	10	1,5	5	1
	6	0,4	5,2	0,4	10	2	6	1
	6	0,4	5	0,5	25	2,5	6	1,1
	6	0,4	5	1	15	1,7	6	3
	5	0,4	15	0,7	10	1	15	2,5
	15	0,45	12,5	0,5	10	4,3	16	1,5
	10	0,7	10	2	9	2,5	15	2
	10	0,5	11	2,2	8	2	10	1,5
	20	1,1	7,5	2	0,7	1,5	24	4
	22	1	8	1	25	4,2	20	5
	15	0,9	10	1,5	20	3,6	10	6
	10	0,8	10	1,5	50	2,5	8	4
	6	0,7	7,5	0,6	20	2	9	4
6/29/2024	7	0,5	7,6	1	10	1,5	5	3
	10	0,6	11	2	15	1	10	1,5
	8	0,6	7,5	2	10	1,7	6	1,3
7/25/2024	8	0,5	6	3,5	10	2	10	2
7/29/2024	2	0,3	5,2	1,1	6,2	1,3	9	0,9
7/30/2024	2,8	1,06	7,6	1,1	8,6	1,3	10,2	0,9
8/10/2024	9,8	0,2	10,9	0,8	10,16	3	10,4	1,4
8/30/2024	4,71	0,689	4,7	0,943	7,3	1,45	9,73	2,27
9/2/2024	5,17	0,657	4,97	1,14	5,65	1,4	10,7	2,12
9/4/2024	4,57	0,44	4,54	1,14	5,35	1,03	10,8	2,15
9/6/2024	4,7	0,586	4,81	1,07	4,11	1,45	10,6	1,51
9/9/2024	4,64	0,551	3,85	0,808	5,53	1,47	12	2,31
9/12/2024	3,95	0,551	4,65	1,09	5	1,54	14,4	1,95
9/18/2024	4,97	0,577	4,95	1,4	4,83	1,32	13	1,29
9/26/2024	6,16	0,852	6,52	1,64	7,37	1,33	13,6	1,68
10/2/2024	7,03	0,883	6,35	1,63	5,62	1,34	13,9	1,59
10/5/2024	6,77	0,955	6,29	1,6	5,73	2,09	28,3	2,71
10/16/2024	13,1	1,12	12,8	1,7	43,7	11,6	23	3,39
10/17/2024	14,7	1,51	13,4	1,95	32,2	11,7	28	2,83

Durante los primeros registros de enero de 2024, se observaron valores anómalamente altos de velocidad en el Motor lado libre (hasta 40 mm/s pk) y en el Rodamiento lado acople (25 mm/s pk), muy por encima de los límites recomendados por normas como la ISO 10816. Estos niveles sugieren condiciones de desbalance, desalineación o defectos mecánicos importantes, aunque en ese momento la interpretación dependía exclusivamente de informes externos proporcionados por una empresa subcontratada.

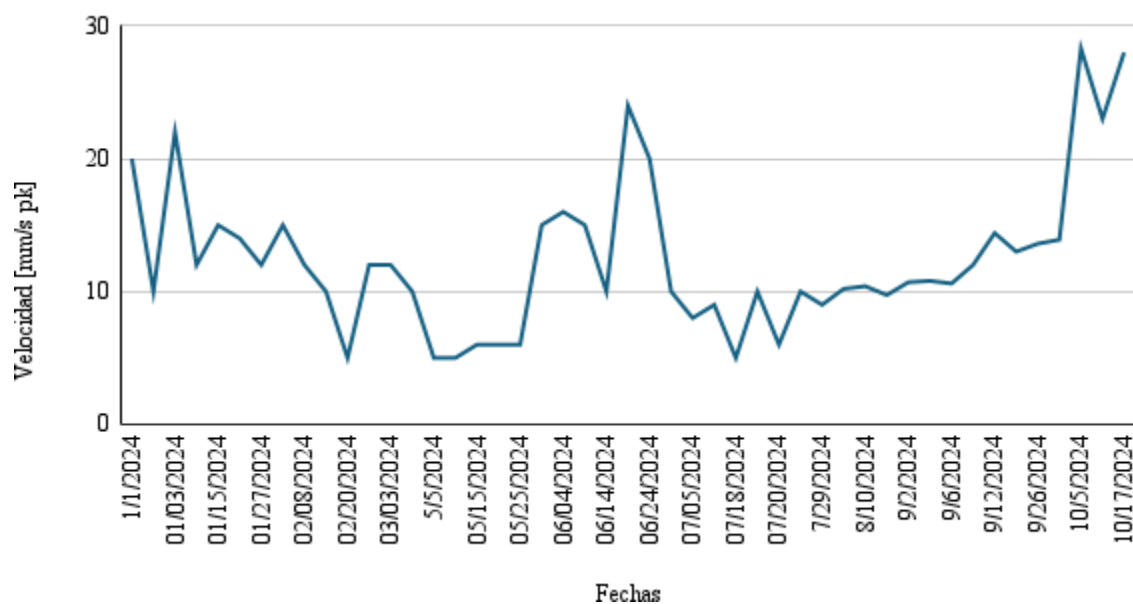
A partir de agosto de 2024, cuando inició el proceso de medición directa como parte de esta práctica profesional, se evidenció una mejora en la consistencia del registro de datos. Las frecuencias de muestreo fueron variables: en algunas semanas se realizaron hasta dos o más mediciones, mientras que en otras no se registraron datos debido a condiciones operacionales u otras prioridades de planta.

Histórico vibraciones del molino 1

Motor lado libre: Presentó altos niveles de velocidad en enero (hasta 40 mm/s pk) con aceleraciones de hasta 3,5 g RMS, y aunque estos valores descendieron en meses posteriores, hubo picos esporádicos, como el 13 de octubre, donde volvió a marcar 14,7 mm/s pk.

Figura 12

Motor lado libre

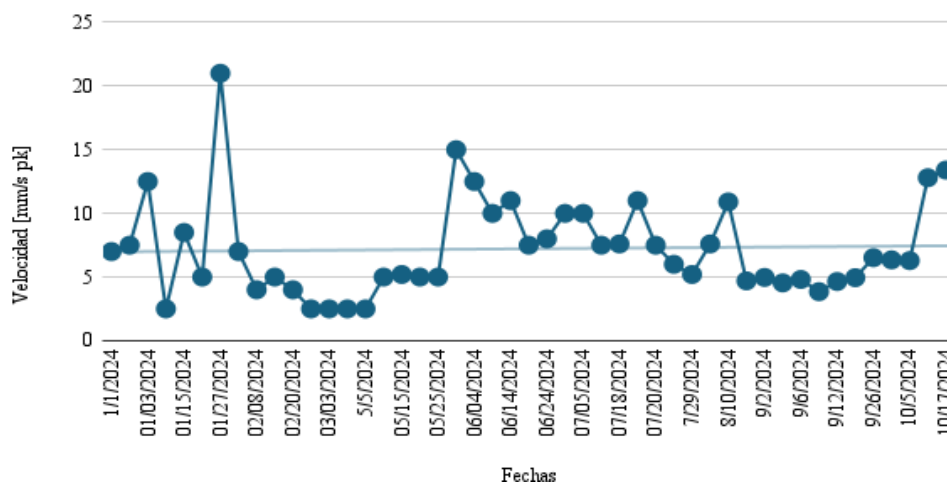


Motor lado acople: Registró un aumento paulatino en los niveles de vibración, desde valores bajos en abril (2,5 mm/s pk) hasta alcanzar 13,4 mm/s pk en octubre. Las aceleraciones también fueron ascendentes, llegando a 1,95 g RMS el 17 de octubre, lo que puede indicar

presencia de problemas como solturas o desalineación persistente.

Figura 13

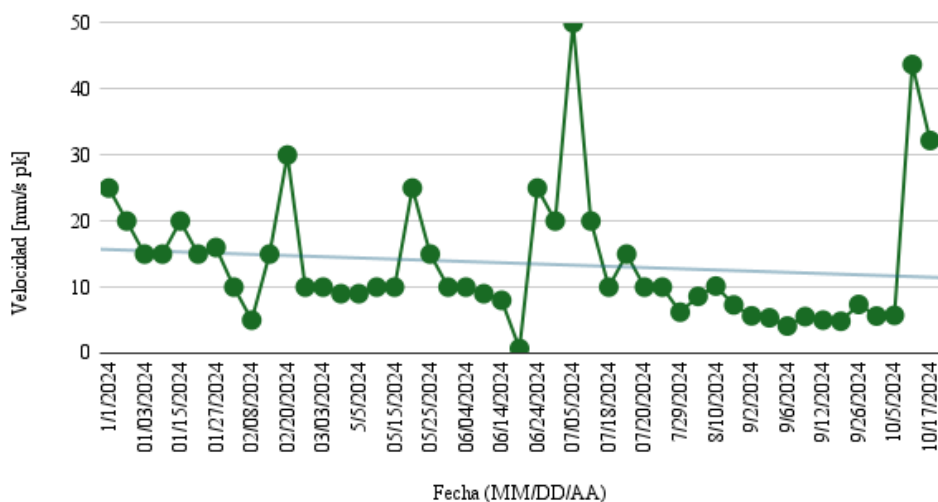
Gráfica motor L. acople.



Rodamiento lado acople: En este punto se evidenciaron anomalías significativas. El 16 de octubre, la velocidad alcanzó los 43,7 mm/s pk, y la aceleración 11,6 g RMS, lo que claramente excede cualquier valor aceptable según norma. Esto sugiere una condición severa de falla incipiente o avanzada, probablemente relacionada con defectos internos del rodamiento.

Figura 14

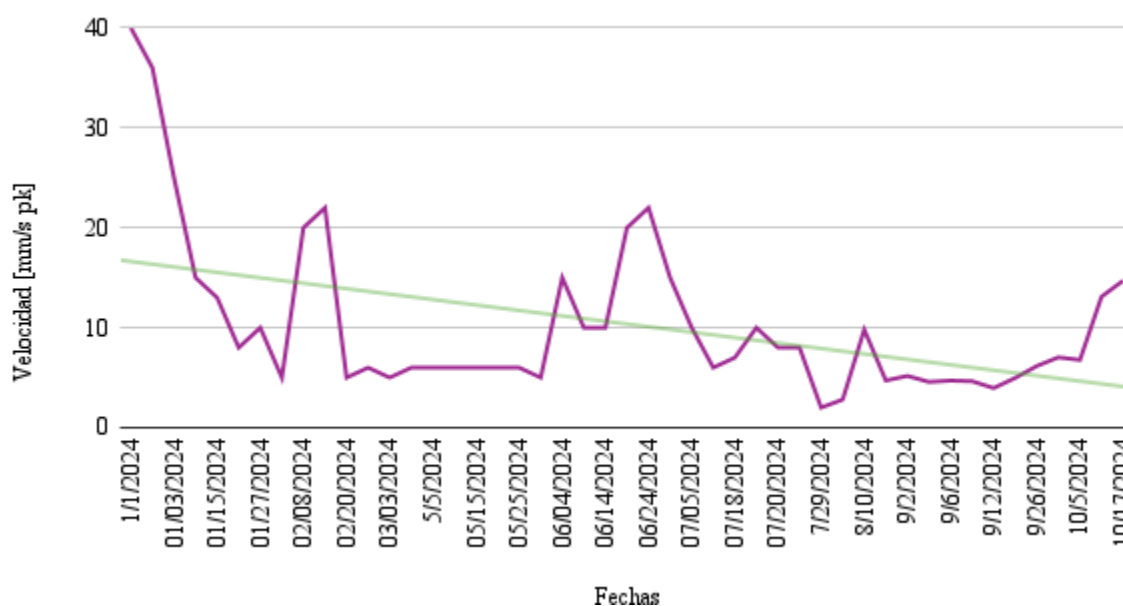
Gráfica rodamiento L. acople



Rodamiento lado libre: Aunque mostró comportamientos relativamente estables en aceleración, presentó un incremento marcado de velocidad a finales de octubre (28 mm/s pk el 5 de octubre y 28 mm/s pk el 17 de octubre), sugiriendo un posible efecto indirecto de una condición severa en otro componente.

Figura 15

Gráfica rodamiento motor L. libre



Las condiciones de operación del molino durante este periodo fueron exigentes, lo cual puede justificar parcialmente la superación reiterada de los límites normativos. Sin embargo, el análisis se llevó a cabo con criterio técnico prudente, buscando tendencias más que una evaluación basada exclusivamente en valores puntuales.

Los hallazgos fueron compartidos en las reuniones de cambio de turno, promoviendo acciones tempranas. En al menos una ocasión, se elaboró una presentación corporativa interna para comunicar el estado del equipo y proponer correctivos.

Ultrasonido, medición de espesores

Como parte del diagnóstico estructural del Molino 6, se realizó una inspección de espesores en su shell utilizando equipo de ultrasonido. El objetivo fue identificar zonas con desgaste crítico que pudieran comprometer la integridad estructural del equipo.

En una primera etapa, se llevó a cabo una medición en 16 referencias angulares distribuidas alrededor del perímetro del shell. En cada una de estas se tomaron tres mediciones correspondientes a diferentes alturas o zonas a lo largo del cuerpo del molino, identificadas como A, B y C. En total se obtuvieron 48 puntos de medición. Esta inspección reveló la existencia de valores inferiores a los 8 mm en varias zonas, a pesar de que el espesor nominal del shell es de media pulgada (12,7 mm). Las ubicaciones críticas se concentraron en los sectores 4A, 6A-B-C, 7B-C, 8B-C, 9A-B-C, 15C y 16C, alcanzando un espesor mínimo de 5,3 mm.

Figura 16

Esquema de la sectorización de la medición en el molino 6

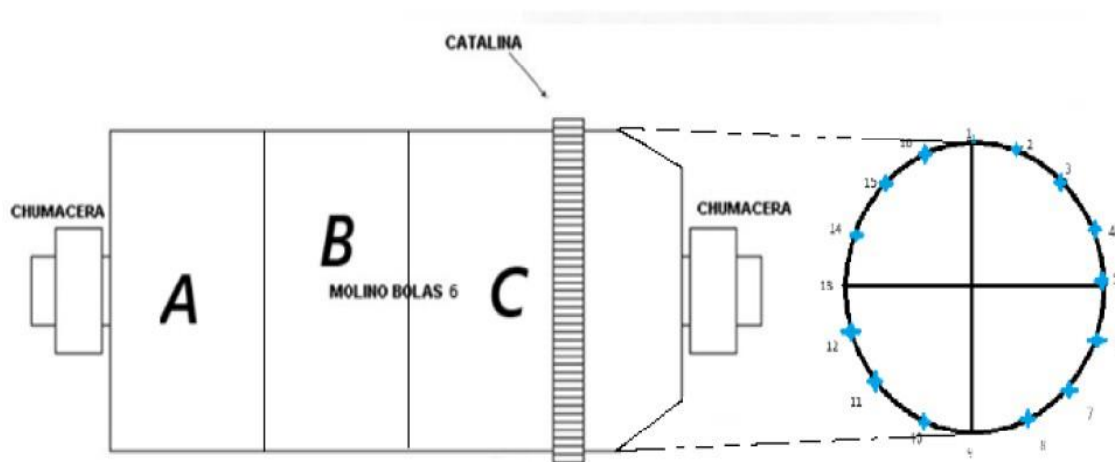


Figura 17

Tabla de resultados primer muestreo molino 6 en mm.

PUNTO	A	B	C
1	12,13	12,14	10,45
2	12,5	11,76	12,05
3	8,24	11,6	11,9
4	7,61	11,15	11,05
5	13,7	11,5	11,2
6	6,42	5,3	6,75
7	13,7	6,6	8,83
8	13,12	8,61	10,02
9	9,25	7,37	10,21
10	14,71	12,3	11,56
11	12,9	13,3	12,01
12	13,12	8,61	10,02
13	12,59	11,98	12
14	11,6	11,46	8,89
15	13,55	10,32	7,5
16	9,98	compuerta	8,97

A partir de estos hallazgos, se ejecutó una segunda inspección más detallada mediante el cierre de malla, que consistió en una cuadrícula de 81 puntos de medición dispuestos en 9 filas (del 1 al 9) y 9 columnas (de A a I). Esta metodología permitió delimitar con precisión la extensión del deterioro, evidenciando una concentración de espesores críticos (menores a 6 mm) especialmente en las filas 7 y 8. Esta información fue clave para definir la estrategia de intervención estructural.

Figura 18

Mallado específico sobre la zona de desgaste

**Figura 19**

Tabla de resultados segunda inspección

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	11	11	10	8,	8,	7,	8,	9,	9,
	10	10	9,	8,	8,	8,	6,	7,	8,
	11	12	12	8,	8,	9,	9,	10	11
	13	11	12	MANHOLE			9	9,	10
	10	9,	7,				7,	9,	8,
	11	12	12				11	6	11
	9,	6,	6,	6,	3,	7,	13	12	12
	9,	9,	10	9,	5,	7,	10	14	10
	10	10	9,	9,	8,	9,	10	10	11

Según el levantamiento realizado, se determinaron las siguientes áreas: un área total del shell inspeccionado de 8.639.001 mm², un área correspondiente al manhole de 276.000 mm², un área afectada en la virola de 6.090.227 mm² y un área de refuerzo con lámina de 1/4" de 1.046.400 mm².

Figura 20

Molino 6 previo al refuerzo

**Figura 21**

Molino 6 con placa de refuerzo



Como acción correctiva, se instaló una lámina de 5/8" sobre el área afectada.

Posteriormente, la zona intervenida fue pintada para asegurar protección contra la corrosión.

Figura 22

Molino pintado después de la reparación

**Análisis de espesores por ultrasonido – Molino 4**

Se realizó una inspección de espesores en el shell de un segundo molino de menores dimensiones (aproximadamente 1,5 m de alto por 3 m de largo). Para esta inspección, se utilizó el mismo equipo de ultrasonido con el fin de determinar el estado de la lámina metálica que recubre la estructura cilíndrica del molino.

En total, se midieron 29 puntos distribuidos en tres zonas (A, B y C) que representan sectores longitudinales del shell. Las lecturas se registraron en milímetros y permitieron detectar variaciones de espesor importantes, principalmente en la zona media del cuerpo del molino.

Figura 23

Esquema para la sectorización de la medición en el molino 4

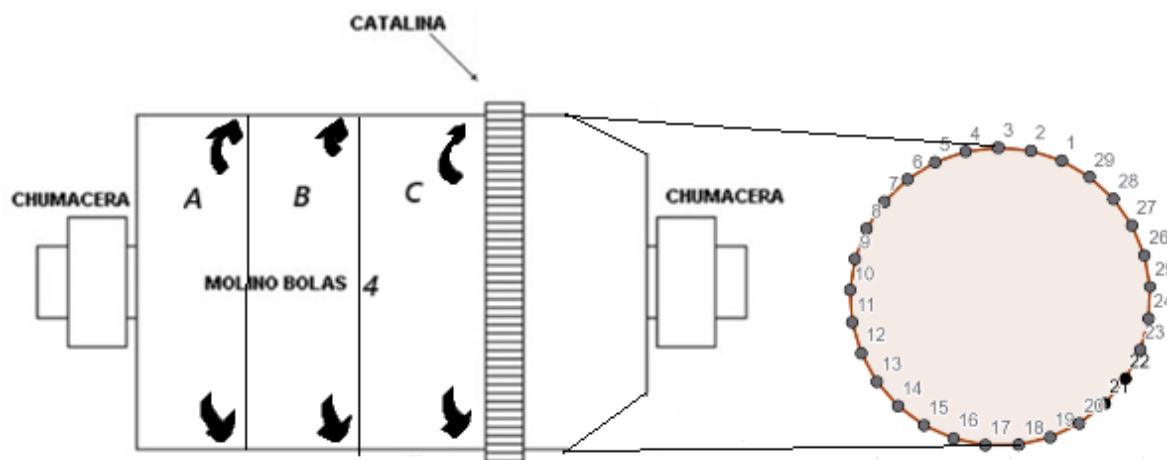


Figura 24

Resultados inspección molino 4 en mm.

PUNTO	A	B	C
1	11,8	10,7	11,6
2	11,5	11,2	11,1
3	11,5	12,1	11
4	11,6	11	8,7
5	7,2	6,7	9,03
6	7,9	7	12,6
7	11,02	7	11,4
8	7	7,4	11
9	9,9	5,9	6,1
10	10,09	9,7	8,2
11	8,9	9,5	7,8
12	7,9	8,3	11,8
13	7,8	8,3	10,6
14	10,1	9,9	5,5
15	10,5	10,8	9,4
16	12	9,3	6,4
17	6,2	10,6	7,8
18	6,1	5,6	9,5
19	9,7	8,7	9,2
20	12	9,2	10,6
21	11,5	7,2	5,8
22	5,7	4,53	5,8
23	5,5	5,1	4,2
24	5,3	7,7	3,6
25	1,8	2,6	7,5
26	6,6	6	7,02
27	7,5	6,6	7,2
28	4	3,2	5,6
29	11	11,3	10,6

Entre los hallazgos más relevantes, se identificaron espesores críticos por debajo de los 6 mm, en especial en los puntos 22, 23, 24, 25 y 28, donde se llegaron a detectar valores tan bajos como 1,8 mm. Estas condiciones indican una pérdida significativa de material en ciertos sectores.

Dado que la zona deteriorada se evidenció rápidamente, no fue necesario cerrar malla para aumentar la densidad de puntos, como en el caso anterior. Esto permitió actuar de forma directa en la región afectada y tomar decisiones correctivas oportunas. Se decidió reforzar el área comprometida mediante la instalación de una lámina adicional que garantizara la continuidad estructural del molino.

Esta intervención se realizó como medida preventiva para evitar un posible colapso o falla estructural debido al desgaste por abrasión y fatiga, típicos en este tipo de equipos sometidos a cargas de impacto constantes.

Análisis de espesores por ultrasonido – tanque espesador

Se realizó una inspección de espesores en el tanque espesador utilizando equipo de ultrasonido para evaluar la condición de la lámina metálica del tanque. Este tanque se dividió en 10 zonas angulares equidistantes alrededor de su perímetro y 2 zonas verticales accesibles para limpieza y medición, las cuales fueron seleccionadas en función de la accesibilidad y el riesgo de desgaste.

Figura 25

Ensamblaje final de la base del motor, propuesta modular

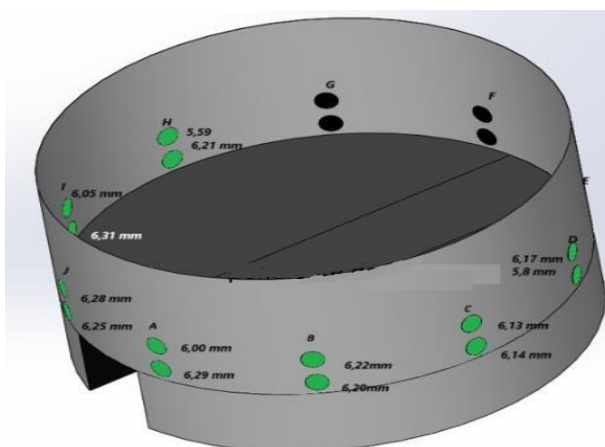


Figura 26

Tabla de espesores del tanque espesador 2

		Column	Row		Tank Wall Loss Percentage	
			1	2	1	2
Tank Wall Loss Percentage Alerts 0-10 % 11-29 % ≥30 % Not Measured		A	6,29 mm	6,00 mm	0,94 %	5,5 %
		B	6,20 mm	6,22 mm	0,78 %	1,25 %
		C	6,14 mm	6,13 mm	3,3 %	3,46 %
		D	5,80 mm	6,17 mm	2,8 %	8,66 %
		E	NOT MEASURED	NOT MEASURED		
		F	NOT MEASURED	NOT MEASURED		
		G	NOT MEASURED	NOT MEASURED		
		H	6,21 mm	5,59 mm	2,2 %	12 %
		I	6,31 mm	6,31 mm	0,62 %	4,72 %
		J	6,25 mm	6,28 mm	1,8 %	1,10 %

Los resultados obtenidos en todas las zonas no presentaron indicios de desgaste significativo, ya que los valores de espesor se mantuvieron dentro de los rangos aceptables. De hecho, no se identificaron variaciones preocupantes en los valores registrados, lo que sugirió que la lámina del tanque no experimentaba deterioro crítico.

Tomando como referencia los valores obtenidos se asumió que la lámina tenía originalmente espesor de $\frac{1}{4}$ ", con lo que podemos encontrar que el valor promedio de pérdida de pared en el tanque fue de 3,5%, por otro lado, otro hallazgo fue que existía otra zona en la que se había perdido el 12% del espesor. Los valores de espesor medidos se mantuvieron consistentemente por encima de los mínimos establecidos, lo que llevó a la conclusión de que no era necesaria una intervención o refuerzo adicional.

Como resultado de esta inspección, se determinó que el tanque se encontraba en buenas condiciones operativas y, por lo tanto, no requirió reforzamiento ni trabajos correctivos. El seguimiento de su estado será realizado en intervalos regulares de acuerdo con el plan de mantenimiento preventivo para asegurar que su integridad estructural se mantenga durante su ciclo de vida.

Anclaje y Grouting del Sistema Motriz del Molino 2

A partir del levantamiento de medidas y la elaboración de los planos, se obtuvo el modelo tridimensional completo del sistema de anclaje del motor y la chumacera del Molino 2. Las Figuras muestran el diseño de las pletinas metálicas, el patrón de perforación, y el ensamble sobre la base de concreto.

Figura 25

Modelo CAD del sistema de anclaje y grouting de las chumaceras del eje.

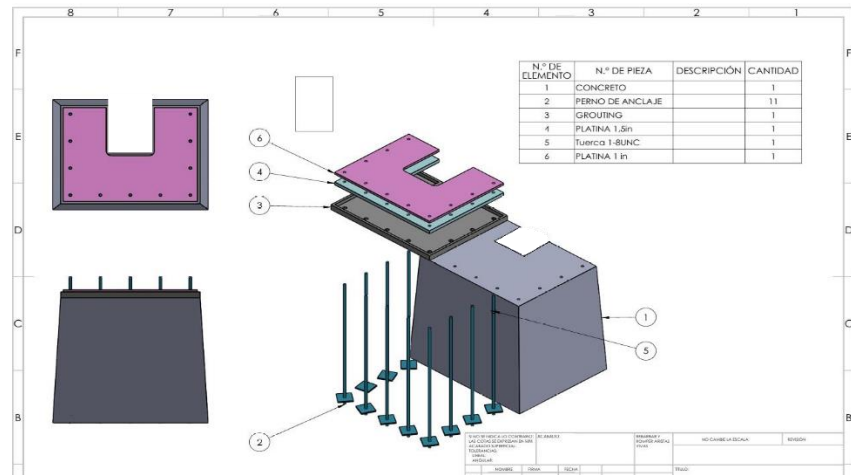


Figura 27

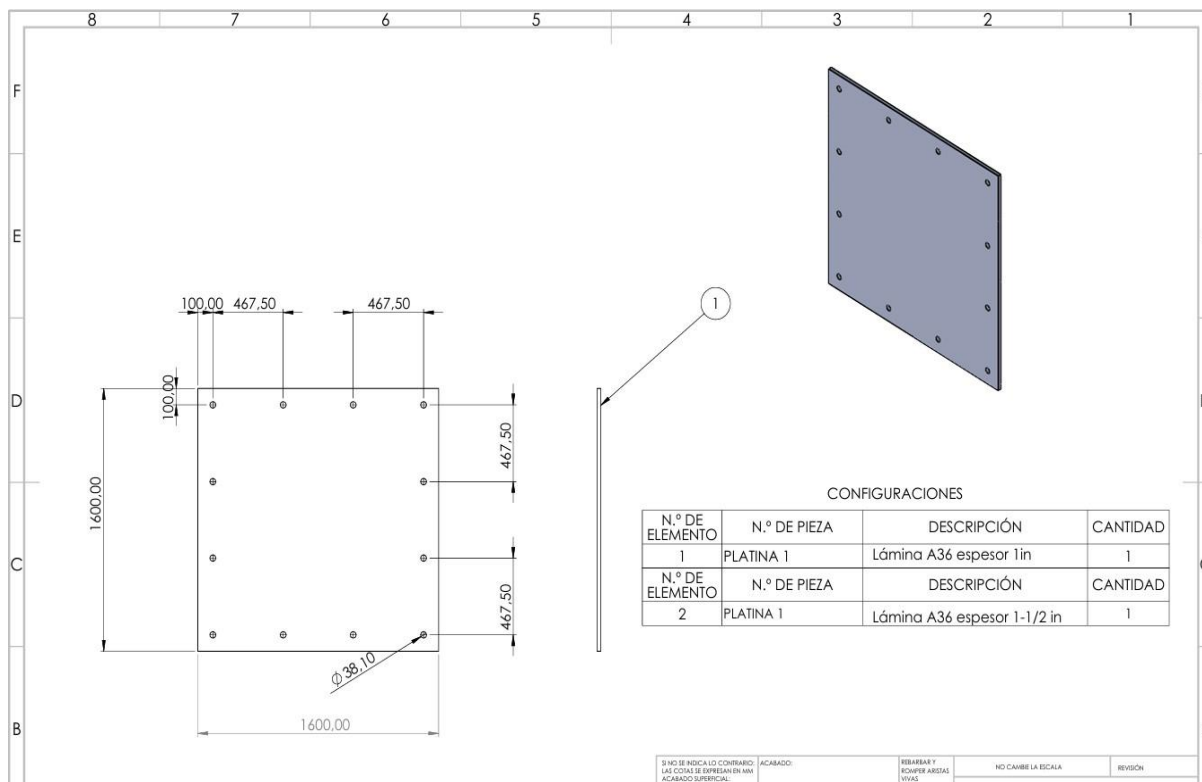
Trabajo final ejecutado por el personal de Aris Mining



Uno de los resultados más relevantes del trabajo de modelado fue el diseño de la pletina de anclaje para el motor del sistema motriz del Molino 2. Este componente constituye la interfaz directa entre el motor y la cimentación de concreto.

Figura 28

Platina de la base del motor con sus dos configuraciones



Como valor agregado al diseño original, se propuso una base modular capaz de acoplar adecuadamente dos motores distintos sobre la misma estructura, sin requerir modificaciones mayores en la cimentación ni en el patrón de perforaciones. Esta solución mejora la versatilidad operativa y la gestión de repuestos, permitiendo una respuesta más rápida ante fallas o necesidades de reemplazo del motor.

Figura 29

Ensamblaje final de la base del motor, propuesta modular

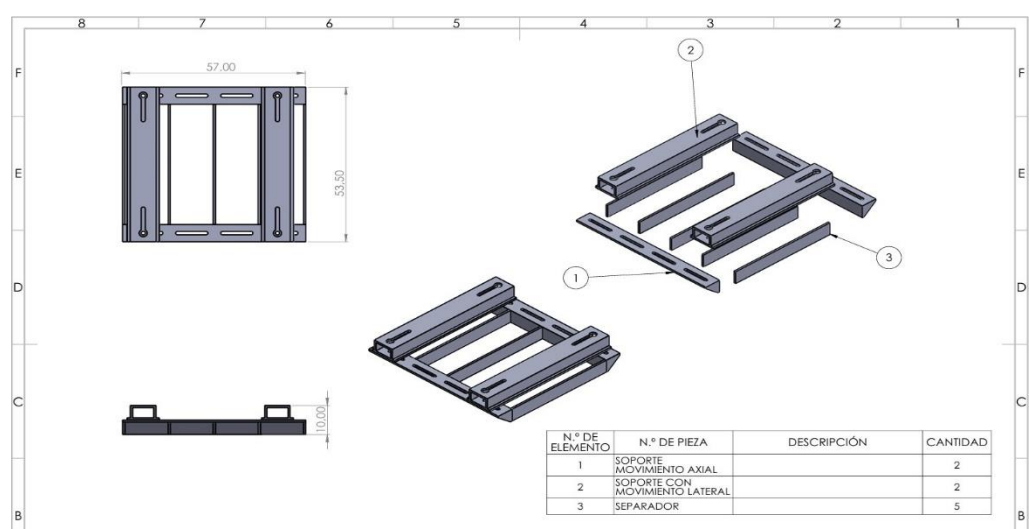


Figura 30

Resultado final base moto

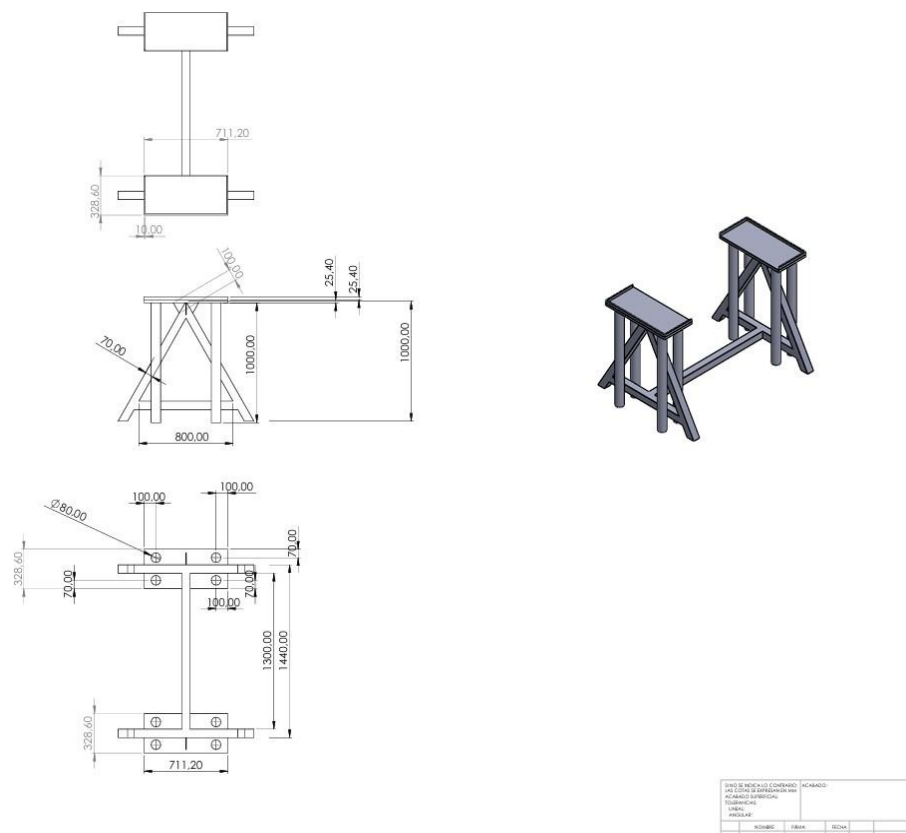


Nido de hidrociclones

Como resultado del proceso de diseño, se obtuvo un modelo tridimensional funcional que integra los hidrociclones existentes, los tanques rolados y la estructura de soporte. En la siguiente figura se observa el diseño ensamblado, incluyendo el distribuidor central propuesto. Este

Figura 32

Modelo CAD del soporte para rasquetear casquetes del Molino Allis



Nota. Modelo CAD del soporte para rasquetear casquetes del Molino Allis.

Figura 33

Producto final soporte de raspado molino



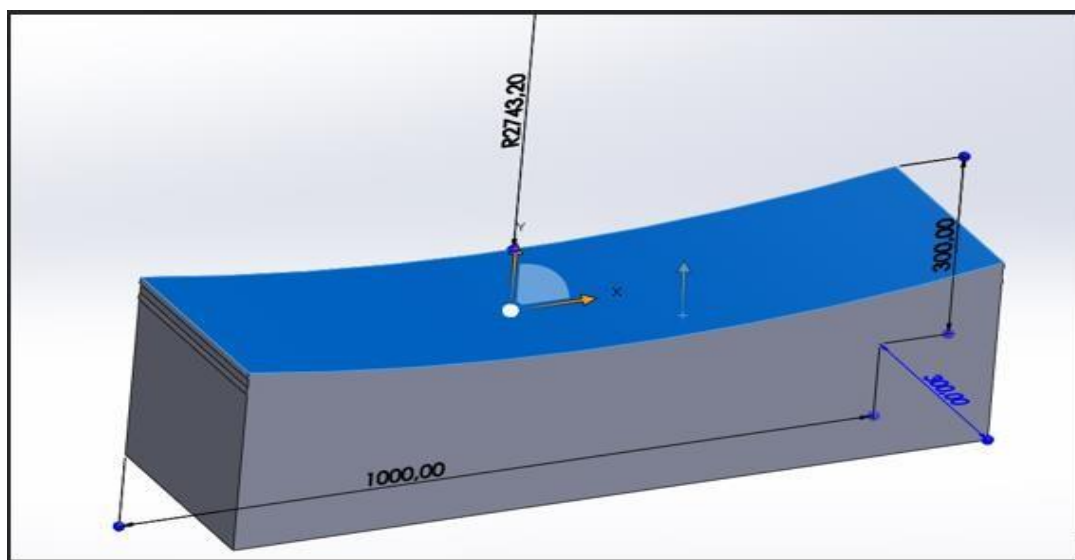
Nota. Modelo CAD del soporte para rasquetear casquetes del Molino Allis.

SopORTE tipo cuna para levantamiento del molino

El diseño final del soporte tipo cuna permitió obtener una estructura robusta y funcional capaz de adaptarse al diámetro del shell y distribuir de forma uniforme el peso del molino durante el levantamiento. En la figura siguiente se presenta el modelo tridimensional del soporte, en el cual se observan las secciones curvadas de apoyo, los refuerzos internos y las bases de contacto con el suelo.

Figura 34

Modelado soporte para levantamiento del molino



La implementación de este diseño en planta tiene como principal valor agregado la mejora en la seguridad del proceso de elevación del molino y la reducción del riesgo de daños estructurales. Además, su fabricación fue posible utilizando materiales disponibles en bodega, lo que representó un ahorro en costos y tiempos de adquisición. Este diseño quedó documentado para futuras intervenciones similares en otros equipos de la planta y se implementó para levantar el molino 6.

Figura 35

Diseño final fabricado bajo planos



Planos técnicos de componentes para fabricación con terceros

Los modelos tridimensionales obtenidos para piezas clave de la planta permitieron generar planos técnicos con acotaciones. A continuación, se listan los principales componentes modelados: el eje de bomba vertical Galligher, la placa de prensa correspondiente a la zona de precipitados, el cono final del chute de alimentación y el eje de la celda circular.

Figura 36

Modelo CAD del eje de la bomba Galligher

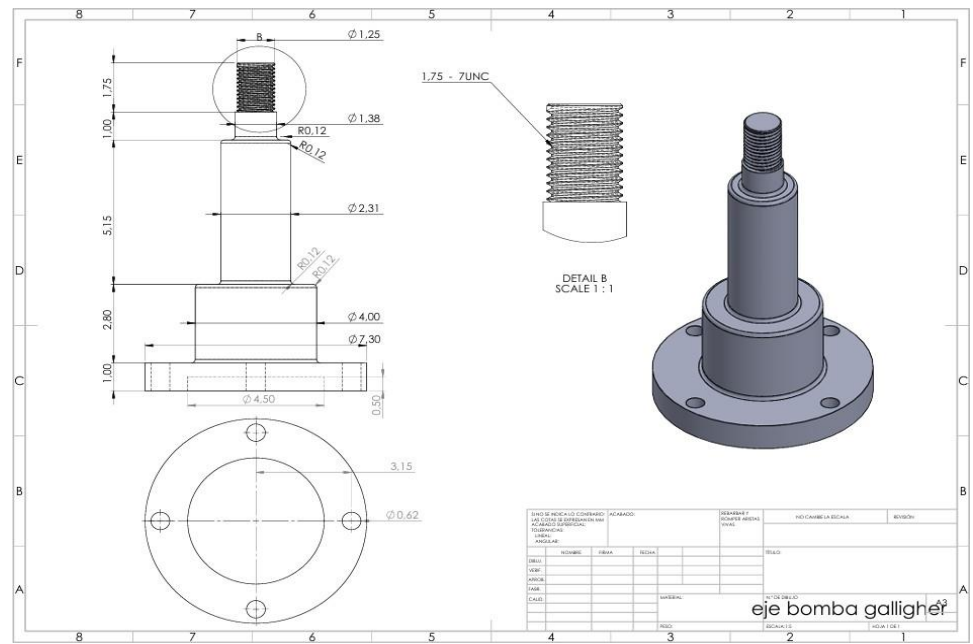


Figura 37

Modelo CAD del cono de chute de alimentación

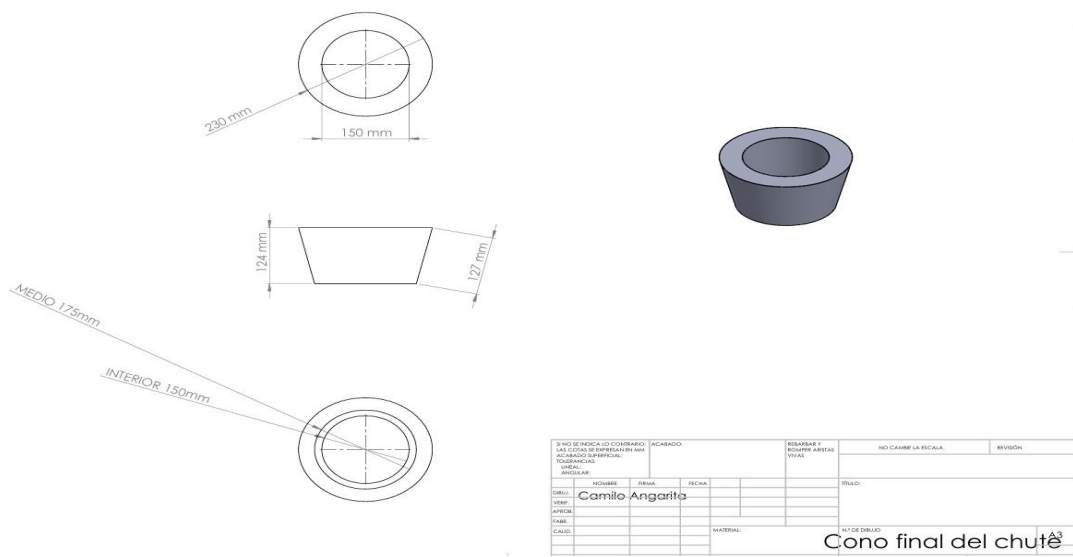
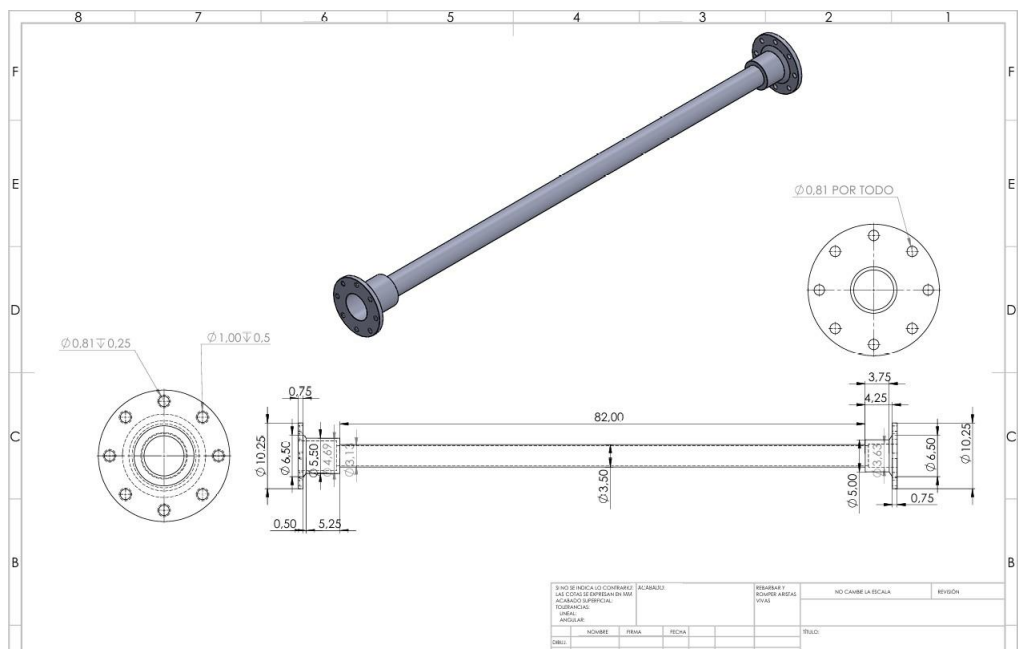


Figura 38

Eje de la celda circular



Discusión

Los resultados obtenidos en las actividades de monitoreo predictivo reflejan la importancia de aplicar técnicas de inspección no destructiva como el análisis de vibraciones y la medición por ultrasonido en equipos críticos de la planta de beneficio de Aris Mining. En el caso del Molino 6, el seguimiento histórico de parámetros como velocidad y aceleración permitió detectar tendencias asociadas a fallas mecánicas, como desalineación o rodamientos deteriorados, antes de que se generarán daños mayores. Este enfoque predictivo facilitó la programación de intervenciones y la toma de decisiones basadas en datos.

Por otro lado, las inspecciones por ultrasonido realizadas en los shells de los molinos 4 y 6, así como en el tanque espesador 2, proporcionaron información detallada sobre el estado estructural de los equipos. La segmentación por zonas de medición y el uso del equipo adecuado permitieron identificar sectores con pérdida de espesor, justificando acciones como refuerzos con placas metálicas. En el espesador, al no encontrarse pérdidas significativas, no se requirió intervención, lo cual validó el estado del activo sin necesidad de desmonte o paradas prolongadas.

En cuanto al diseño mecánico, los modelos desarrollados en SolidWorks representaron soluciones concretas a problemáticas en planta. El diseño de la base modular del motor introdujo la posibilidad de acoplar dos motores distintos sobre una misma estructura, lo que aporta flexibilidad operativa y reduce los tiempos de modificación ante reemplazos. También se destaca el diseño del soporte tipo cuna para el levantamiento del molino, que mejora la seguridad y la distribución de carga al trabajar con gatos hidráulicos. Estas soluciones fueron validadas internamente y trasladadas al área de fabricación.

Finalmente, el trabajo permitió identificar oportunidades de mejora para futuros proyectos, como la necesidad de incorporar simulaciones estructurales por elementos finitos en el proceso de diseño, así como reforzar los análisis de vibraciones con espectros de frecuencia para mayor precisión en el diagnóstico. Aun así, la práctica demostró que una estrategia de mantenimiento que combina inspección predictiva con diseño técnico aporta valor tangible a la operación minera.

Conclusiones

La presente investigación demostró la eficacia de la integración estratégica de metodologías de monitoreo predictivo, específicamente el análisis de vibraciones y la inspección de espesores por ultrasonido, con la aplicación de herramientas de diseño mecánico asistido por computadora (CAD) en la optimización de la gestión del mantenimiento de activos críticos en la planta de beneficio de Aris Mining Marmato.

Los resultados del análisis vibracional, implementado mediante el equipo SKF MICrolog DBx en los molinos 1 y 6, evidenciaron su capacidad para la detección temprana de anomalías incipientes en elementos rotativos. El seguimiento de parámetros como la velocidad y la aceleración permitió identificar tendencias de deterioro en componentes específicos, como el rodamiento libre del piñón de ataque del Molino 6, donde se registraron incrementos sostenidos en los niveles vibracionales, y en diversos rodamientos del Molino 1, posibilitando la programación de intervenciones proactivas basadas en la condición del equipo. La correlación de estos hallazgos con inspecciones complementarias, como la alineación láser y el ensayo de tintas magnéticas en el Molino 6, subrayó la importancia de un enfoque diagnóstico integral para la identificación de las causas raíz de las fallas.

De forma análoga, la aplicación de la inspección ultrasónica en los shells de los molinos 4 y 6, así como en el tanque espesador 2, proveyó datos cuantitativos precisos sobre la distribución del espesor del material. La identificación de zonas críticas con adelgazamientos significativos permitió una optimización en la asignación de recursos, focalizando las labores de refuerzo estructural en las áreas donde la integridad mecánica se encontraba comprometida.

La participación en el diseño, modelado y seguimiento de soluciones mecánicas mediante software CAD demostró un valor añadido significativo en la resolución de problemáticas específicas de la planta. El desarrollo de la pletina modular de anclaje para el motor del Molino 2 incrementó la flexibilidad operativa y la eficiencia en la gestión de repuestos. El diseño del nido de hidrociclones facilitó la comunicación técnica con proveedores externos. La creación de dispositivos como el soporte para rasquetear los casquetes del Molino Allis y el soporte tipo cuna para el levantamiento de molinos mejoraron la seguridad y la eficiencia de las tareas de mantenimiento. Adicionalmente, la generación de planos técnicos detallados de componentes clave optimizó los procesos de fabricación e intervención.

En conclusión, los resultados obtenidos durante la práctica profesional evidencian que la sinergia entre el monitoreo predictivo y el diseño mecánico representa una estrategia robusta para la optimización de la gestión del mantenimiento en plantas de beneficio. La capacidad para diagnosticar con precisión el estado de los activos y generar soluciones de ingeniería adaptadas a las necesidades específicas de la operación contribuye significativamente a la mejora de la confiabilidad operativa, la reducción de costos asociados a paradas no programadas y la extensión de la vida útil de los equipos críticos. La implementación sistemática de estas metodologías sienta un precedente valioso para futuras iniciativas de mejora continua en la planta de Aris Mining Marmato y en otras operaciones similares.

Referencias

- Andrade, J., & Mendoza, D. (2019). *Mantenimiento predictivo en bombas para lodos minerales mediante análisis de vibraciones*. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 25-34.
<https://doi.org/10.14482/inde.37.2.12345>
- Calderón, R. (2021, septiembre 15). *La importancia del análisis químico en la extracción de oro en plantas de beneficio*. *El Oriente*. <https://www.eloriente.com/articulo/la-importancia-del-analisis-quimico-en-la-extraccion-de-oro-en-plantas-de-beneficio/18429>
- Colombia Minera - CHM Minería*. (n.d.). Retrieved April 26, 2025, from <https://www.chmmineria.com.co/colombia-minera?>
- Concha, H. (2023). *Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso del mercurio*. *Santa Rosa del Sur (Bolívar)*. Academia.edu.
https://www.academia.edu/115193543/Gu%C3%ADa_metodol%C3%B3gica_para_el_mejoramamiento_productivo_del_beneficio_de_oro_sin_el_uso_del_mercurio_Santa_Rosa_del_Sur_Bol%C3%ADvar_
- Dasen Mining. (s.f.). *Solución de equipo y planta de procesamiento CIP CIL de mineral de oro*. <https://www.dasenmining.com/es/gold-ore-concentrator/gold-cip-cil-processing-plant/>
- Jiménez, F., Pardo, A., & Castillo, M. (2021). *Estrategias de mantenimiento predictivo aplicadas a la minería en Latinoamérica*. *Revista Ciencia, Ingeniería y Tecnología*, 15(1), 45-58.
<https://doi.org/10.22201/rit.2021.15.1.004>
- Marsa. (s.f.). *Planta*. <https://marsa.com.pe/operaciones/planta/>
- Metso. (s.f.). *Proceso BIOX®*. <https://www.metso.com/es/portafolio/proceso-biox/>
- Ministerio de Minas y Energía. (s.f.). *Minería para la Vida*. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/transformaci%C3%B3n-minera/>

Muñoz, R., López, G., & Quintero, L. (2021). *Evaluación del mantenimiento predictivo en celdas de flotación para plantas concentradoras de oro*. Ingenius, 28(4), 60-71.

<https://doi.org/10.33333/ingenius.2021.28.004>

Sierra, M., & García, J. (2020). *Monitoreo de condiciones en sistemas de molienda para prevenir fallas catastróficas*. Ingeniería Mecánica, 14(3), 15-26.

<https://doi.org/10.5555/imec.2020.14.3.015>

Sotomayor, H., & Rivera, P. (2022). *Optimización del mantenimiento predictivo en espesadores mediante sensores inteligentes*. Revista Minera, 8(1), 85-96.

<https://doi.org/10.12345/revmin.2022.8.1.085>