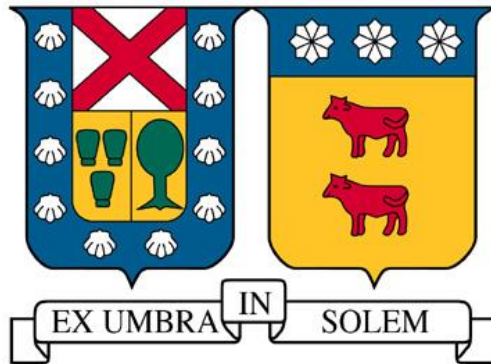


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO – CHILE



“APLICACIÓN DE OEE CON ENFOQUE DMAIC Y MODELACIÓN RAM
PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA OPERATIVA EN EL CIRCUITO
DE CHANCADO DE LA PLANTA FRANKE GRUPO MINERO LAS
CENIZAS”

YACK CHESTER VENEGAS LILLO

TRABAJO TESINA AVANCE N°1
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO

PROFESOR GUÍA: SR. RAÚL STEGMAIER



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Aplicación de OEE con enfoque DMAIC y modelación RAM para la mejora de la eficiencia operativa en el circuito de chancado de la planta Franke Grupo Minero Las Cenizas

Nombre del candidato(a): Yack Venegas Lillo

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Stegmaier Bravo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.


El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

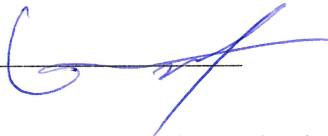
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 5.11.2025 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05/11/2025 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

La tesis tuvo como objetivo diagnosticar y optimizar el desempeño integral del proceso de conminución de la Faena Franke, operada por el Grupo Minero Las Cenizas, aplicando la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) integrada con herramientas RAM (Reliability, Availability, Maintainability) bajo un enfoque Lean Six Sigma, orientado a mejorar la eficiencia operacional y la rentabilidad del proceso. El estudio abarcó las áreas de chancado primario, chancado fino, aglomerado y apilado, con el propósito de aumentar la efectividad global de los equipos (OEE), mejorar la calidad granulométrica del producto (P80) y reducir las pérdidas por detenciones no planificadas.

El análisis evidenció que el chancado fino concentró las pérdidas más críticas para la continuidad y eficiencia del proceso, presentando una alta utilización ($\approx 84\%$) y una disponibilidad similar al resto de las áreas ($\approx 89\%$), pero con un rendimiento efectivo menor ($\approx 82,6\%$) frente al primario ($94,7\%$) y al aglomerado–apilado ($89,6\%$). Esta condición refleja una exigencia operacional elevada y una mayor variabilidad por sobrecargas y recirculaciones, confirmando al fino como el cuello de botella operativo y económico del sistema. El diagnóstico se reforzó mediante el análisis de fallas, TBF y TTR ajustados a distribuciones Weibull, Log-Normal y Exponencial, que permitieron evaluar la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos; además, la criticidad del chancador Raptor 400, junto con la correa CV-003 y el harnero SN-004, se modeló con las metodologías Jack-Knife y RBD, consolidando al chancado fino como el punto de intervención prioritario dentro de la fase Analizar del enfoque DMAIC.

Posteriormente, se evaluaron escenarios de simulación que incluyeron equipos Sandvik CH660 y CH860i, tanto en circuito abierto como cerrado, para determinar la capacidad de reducción y la estabilidad del P80. El análisis demostró que el CH860i en circuito cerrado logra simultáneamente un P80 de $\approx 9,4$ mm y una capacidad de 750 t/h, cumpliendo la meta operacional y representando la alternativa estructural más robusta y eficiente.

En la fase Mejorar, la optimización del mantenimiento y la reducción del TTR proyectaron un aumento de la disponibilidad desde $89,3\%$ hasta $92,1\%$; la estabilización de la alimentación elevó el rendimiento de $84,2\%$ a $87,9\%$; y el control del CSS y la clasificación redujo el P80 de $11,2$ mm a $9,8$ mm, mejorando la conformidad del producto de $85,0\%$ a $88,0\%$. Estas mejoras integradas incrementaron el OEE global de $68,5\%$ a $73,4\%$, equivalente a una mejora relativa del $7,1\%$ en la efectividad operativa del circuito fino.

Mediante una simulación Monte Carlo (Crystal Ball) con un horizonte de 6 años, se estimó un VAN incremental de 84,06 MM US\$, una TIR de $70,3\%$, una TIRM de $37,6\%$, un IVAN de 3,9 y un período de recuperación de 1,6 años (\approx segundo trimestre de 2026). La probabilidad de éxito técnico–económico supera el 85% , clasificando el proyecto como de riesgo controlado.

En síntesis, la integración de las metodologías DMAIC / Lean Six Sigma con RAM y la simulación financiera permitió vincular el desempeño operativo, la confiabilidad de los activos y la rentabilidad esperada, concluyéndose que la sustitución del Raptor 400 por un Sandvik CH860i en circuito cerrado constituye la opción más eficiente y económicamente atractiva para elevar la confiabilidad y calidad de la producción en la Faena Franke.

ABSTRACT

The thesis aimed to diagnose and optimize the overall performance of the comminution process at Faena Franke, operated by Grupo Minero Las Cenizas, by applying the DMAIC methodology (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control) integrated with RAM tools (Reliability, Availability, Maintainability) under a Lean Six Sigma approach, focused on improving operational efficiency and process profitability. The study covered the areas of primary crushing, fine crushing, agglomeration, and stacking, with the purpose of increasing the Overall Equipment Effectiveness (OEE), improving product size quality (P80), and reducing losses due to unplanned shutdowns.

The analysis showed that the fine crushing circuit concentrated the most critical losses affecting process continuity and efficiency, presenting high utilization ($\approx 84\%$) and availability similar to the other areas ($\approx 89\%$), but with a lower effective performance ($\approx 82.6\%$) compared to primary crushing (94.7%) and agglomeration–stacking (89.6%). This condition indicates high operational demand and greater variability due to overloads and recirculations, confirming fine crushing as the operational and economic bottleneck of the system. The diagnosis was reinforced through the failure, TBF, and TTR analysis, fitted to Weibull, Log-Normal, and Exponential distributions, to evaluate equipment reliability and maintainability. The criticality of the Raptor 400 secondary crusher, along with conveyor CV-003 and screen SN-004, was modeled using Jack-Knife and Reliability Block Diagrams (RBD), confirming fine crushing as the priority area for intervention within the Analyze phase of the DMAIC approach.

Simulation scenarios with Sandvik CH660 and CH860i crushers, in both open and closed circuits, determined reduction capacity and P80 stability. Results demonstrated that the CH860i in closed circuit simultaneously achieves a P80 ≈ 9.4 mm and a capacity of 750 t/h, meeting operational targets and representing the most robust and efficient structural alternative.

In the Improve phase, maintenance optimization and TTR reduction increased availability from 89.3% to 92.1%; feed stabilization raised performance from 84.2% to 87.9%; and CSS control and classification reduced P80 from 11.2 mm to 9.8 mm, improving product conformity from 85.0% to 88.0%. These integrated improvements increased the overall OEE from 68.5% to 73.4%, representing a 7.1% relative improvement in operational effectiveness of the fine circuit.

A Monte Carlo simulation (Crystal Ball) with a 6-year horizon estimated an incremental NPV of US\$84.06 million, an IRR of 70.3%, a MIRR of 37.6%, an NPV Index (IVAN) of 3.9, and a payback period of 1.6 years (\approx second quarter of 2026). The technical–economic success probability exceeds 85%, classifying the project as low-risk.

In summary, the integration of DMAIC / Lean Six Sigma with RAM and financial simulation effectively linked operational performance, asset reliability, and expected profitability, concluding that replacing the Raptor 400 with a Sandvik CH860i in a closed circuit is the most efficient and economically attractive option to enhance reliability and product quality at Faena Franke.

Índice

1.	Introducción.....	7
2.	Objetivos	9
2.1.	Objetivo General	9
2.2.	Objetivos específicos.....	9
3.	Resultados esperados.....	10
4.	Metodología a utilizar	11
5.	Estado del arte	12
5.1.	Antecedentes históricos de la metodología RAM	12
5.2.	Marco teórico	13
5.2.1.	Análisis, Ajuste y Validación Estadística de Datos de Confiabilidad en Mantenimiento Industrial.	13
5.2.1.1.	Procedimiento de Estimación Empírica de la CDF en Datos de Confiabilidad .	14
5.2.1.2.	Modelación de distribuciones probabilísticas.....	14
5.2.1.3.	Bondad de Ajuste y Validación del Modelo de Confiabilidad	17
5.2.2.	Modelación de la disponibilidad en sistemas industriales mediante RBD.....	18
5.2.3.	Metodologías de gestión en mantenimiento y confiabilidad.....	20
5.2.4.	Control Estadístico y Capacidad del Proceso.....	21
5.2.4.1.	Gráficos de Control I-MR.....	21
5.2.4.2.	Índices de Capacidad del Proceso.....	23
5.2.5.	Enfoque en OEE como indicador central.....	25
5.2.6.	Chancado, P80 y recuperación metalúrgica en óxidos de cobre	27
6.	Aplicación metodología DMAIC.	29
6.1.	Definir	29
6.1.1.	Título del proyecto.	29
6.1.2.	Project Charter.....	29
6.1.2.1.	Caso de negocio.....	29
6.1.2.2.	Declaración del problema.....	31
6.1.2.3.	Declaración de metas.....	31
6.1.2.4.	Alcance	32
6.1.2.5.	Integrales de los equipos.....	33
6.1.3.	Características críticas de calidad CTQ.....	33
6.1.4.	Vínculo con la estrategia de la compañía.....	34
6.1.5.	Vínculo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU.	35
6.1.6.	Diagrama Flujo.....	35
6.1.6.1.	Diagramas de flujo Chancado.....	35
6.1.6.1.1.	Chancado grueso:.....	35
6.1.6.1.2.	Chancado fino:	36

6.1.6.2.	Diagramas de flujo Aglomerado Apilado.....	36
6.2.	Medir.....	37
6.2.1.	Análisis general de datos operacionales por indicadores de desempeño.....	37
6.2.2.	Análisis de variabilidad de indicadores de desempeño.....	41
6.2.2.1.	Aplicación de los gráficos I-MR.....	41
6.2.2.2.	Interpretación de puntos fuera de control en gráficos I-MR.....	42
6.2.2.3.	Análisis por KPI.....	42
	Disponibilidad (<i>Dr</i>) gráficos I-MR. Figura 12.....	42
	Utilización (<i>Ur</i>) gráficos I-MR Figura 13.....	43
	Disponibilidad OEE ($DOEE = Dm * Uo$) gráficos I-MR Figura 14.....	43
	Rendimiento efectivo (<i>REf</i>) gráficos I-MR Figura 15.....	44
	Producto $DOEE \cdot REfr = OEEt$ gráficos I-MR Figura 16.....	45
	Calidad (<i>KRmr</i>) gráficos I-MR Figura 17.....	46
	OEE Global gráficos I-MR Figura 18.....	46
6.2.2.4.	Síntesis Aplicación de los gráficos I-MR.....	47
6.2.2.5.	Evaluación de la Capacidad y Calidad del Proceso.....	48
6.2.2.6.	Aplicación gráficos de capacidad.....	50
6.2.3.	Medición de parámetros granulométricos y metalúrgicos – análisis integrado.....	52
6.2.3.1.	Análisis general de granulometrías.....	55
6.2.4.	Análisis datos operacionales por tipos de detención.....	55
6.2.4.1.	Análisis generan de datos operacionales por tipos de detención.....	55
6.2.4.2.	Análisis cuello de botella analizando detenciones por área.....	58
6.2.4.2.1.	Aglomerado apilado.....	58
6.2.4.2.2.	Chancado Fino.....	61
6.2.4.2.3.	Chancado Primario.....	64
6.2.4.2.4.	Síntesis de análisis cuello de botella analizando detenciones por área.....	67
6.2.5.	Síntesis de resultados de la etapa Medir para definir el área donde se aplicará las mejoras.68	
6.2.6.	Análisis Estadístico General de TBF y TTR.....	69
6.2.6.1.	Bondad de ajuste de distribuciones para datos TBF y TTR.....	69
6.2.6.2.	Confiabilidad – MTBF bajo distribución Weibull.....	69
6.2.6.3.	Mantenibilidad – MTTR por estadística descriptiva.....	70
6.2.6.4.	Síntesis.....	70
6.2.6.5.	Gráficos ajustados linealmente según el tipo de distribución.....	73
6.2.7.	Disponibilidades equivalentes del circuito de chancado fino (análisis RBD).....	75
6.2.8.	Confiabilidad de misión del circuito de chancado fino (RBD, $R(t=744h)$).....	76
6.2.9.	Análisis de confiabilidad temporal por equipos ($R(t)$ de 1 h a 31 días).....	78
6.2.10.	Análisis Jack-Knife del circuito de chancado fino (equipos, subsistemas y	

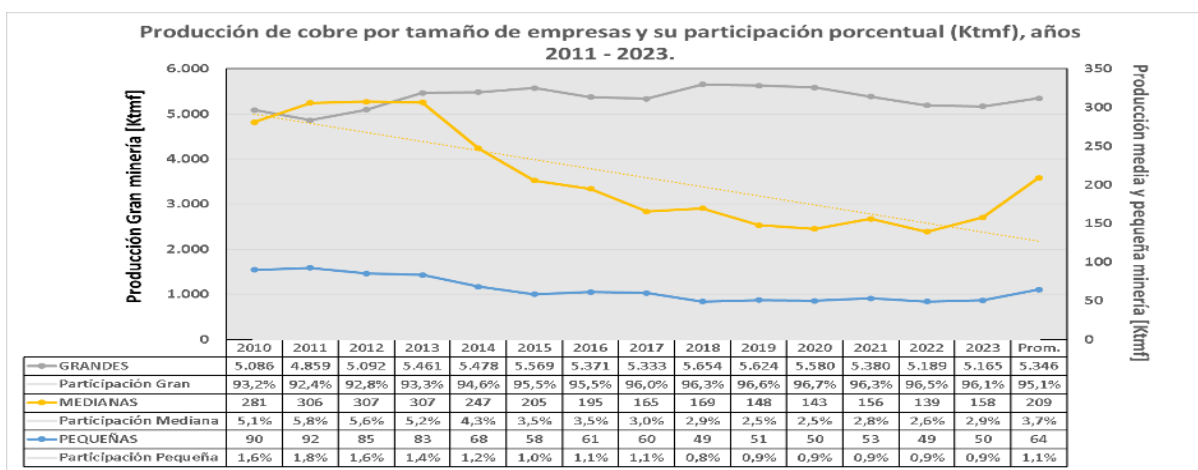
componentes; horizonte 36 meses).....	80
6.2.10.1. Lectura por equipos	80
6.2.10.2. Lectura por subsistemas.....	81
6.2.10.3. Lectura por componentes.....	82
6.2.11. Analizar – Escenarios de chancado secundario–terciario	83
6.3. Mejorar	90
6.3.1. Punto de partida (resumen de Medir y Analizar)	90
6.3.2. Enfoque OEE como eje de la mejora (A–P–Q)	90
6.3.2.1. Rama azul: CV003, CV005 y CV007.....	90
6.3.2.2. Bloque final: CV008 y CV010 (con eliminación de CV009).....	91
6.3.2.3. Chancador secundario: reemplazo CR002 → CH860(i)	91
6.3.2.4. Harnero secundario SN-001 (mantenibilidad).....	91
6.3.3. Disponibilidades equivalentes y Análisis de confiabilidad temporal por equipos (R(t) de 1 h a 31 días) posterior al proyecto de mejoras área chancado fino	92
6.3.3.1. La rama azul (CV003–SN003–CR002–CV005–CV007):.....	92
6.3.3.2. Rama verde (FE008–SN003–CR004 // FE009–SN004–CR005).....	94
6.3.3.3. Rama Amarilla (CV008 –CC010)	94
6.3.3.4. Resultado Disponibilidad mejorada.....	94
6.3.3.5. Resultado confiabilidad mejorada	96
6.3.4. Análisis de sensibilidad de la producción de cátodos por pares de variables operacionales	99
6.3.5. Análisis de proyección de costos aplicando % ponderado al $\Delta\%$ de aumento de beneficio	100
6.3.6. Inversiones y estimación de costos (pre-FEED)	103
6.3.7. Resultados económicos y financieros del Proyecto N°1	105
6.3.7.1. Diagnóstico base y evolución de indicadores	105
6.3.7.2. Parámetros de conversión y supuestos económicos	106
6.3.7.3. Resultados económicos – Flujo de caja proyectado	106
6.3.7.4. Ratios financieras	108
6.3.7.5. Incertidumbre y sensibilidad	108
6.4. Controlar.....	111
6.4.1. Integración metodológica y enfoque de mejora continua.....	111
6.4.2. Seguimiento de indicadores clave (KPIs)	112
6.4.3. Frecuencia de control y trazabilidad	112
6.4.4. Estandarización operativa y de mantenimiento.....	113
6.4.5. Revisión periódica y auditorías internas	113
7. Conclusiones	114
8. Recomendaciones.....	116
9. Bibliografía.....	118

1. Introducción

En los últimos años, la minería del cobre en Chile ha enfrentado diversos riesgos que han impactado tanto su operación como su entorno, entre ellos la volatilidad del precio, las fluctuaciones cambiarias, el aumento de los costos y la disminución de las leyes minerales. Estos factores han impulsado la necesidad de optimizar los procesos productivos y mejorar los indicadores de productividad, confiabilidad y eficiencia en las plantas de procesamiento.

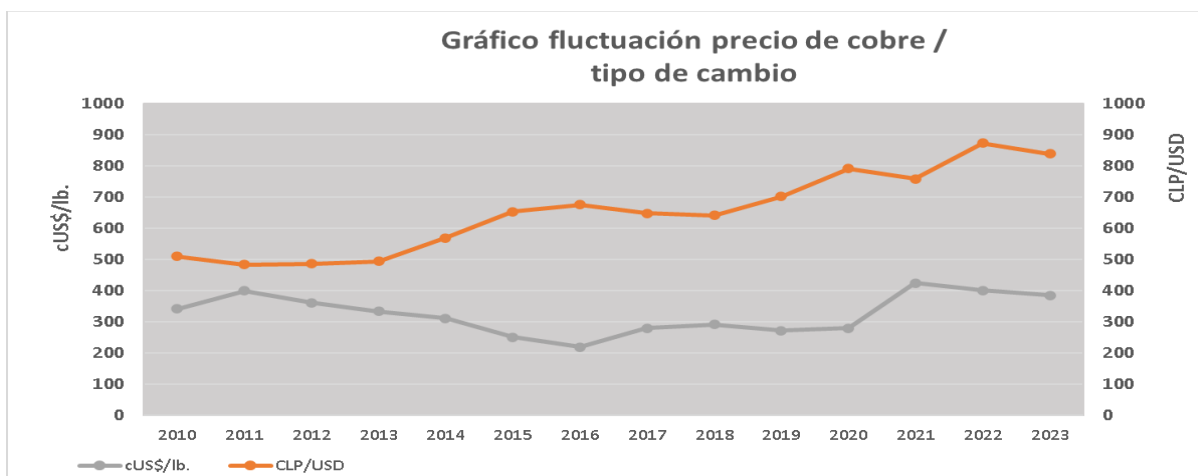
Tal situación se refleja en la evolución de la producción de cobre por tamaño de empresa (Figura 1), donde se observa la participación predominante de la gran minería, y en la relación entre el precio del cobre y el tipo de cambio (Figura 2), variables que han mostrado una alta volatilidad en el período 2010–2023, según los registros oficiales del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).

Figura 1. Producción de cobre por tamaño de empresa y su participación.



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2010–2023).

Figura 2. Precio del cobre y tipo de cambio.



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO, 2010–2023).

La investigación busca identificar brechas de desempeño en los circuitos de chancado, entregando además un análisis general del aglomerado y apilado en Faena Franke, con el fin de proponer mejoras que aumenten la recuperación metalúrgica y la Eficacia Global de los Activos (OEE). El enfoque se centrará en la optimización del P80, la reformulación de circuitos y la evaluación de alternativas de equipos que eleven la confiabilidad, mantenibilidad y desempeño del sistema.

La faena, ubicada en Antofagasta y operada por el Grupo Minero Las Cenizas, procesa 4 millones de toneladas anuales, con hasta 30.000 t de cátodos y una ley promedio de 0,65% CuT. Estudios recientes evidencian restricciones relevantes: variabilidad del P80 que impacta el aglomerado y la lixiviación, cuellos de botella en chancado fino, fallas mecánicas en equipos críticos y tiempos muertos por esperas en la alimentación.

Para abordar estas problemáticas se aplicará la metodología RAM (PAS 55), modelando el sistema con métricas de confiabilidad (λ , MTBF, MTTR) y distribuciones estadísticas (Weibull, normal), complementadas con Jack Knife, histogramas, análisis multivariado y gráficos de control I-MR. También se utilizarán RBD para estimar disponibilidad y confiabilidad equivalente bajo distintas configuraciones.

El estudio contempla simulaciones con PlantDesigner (Sandvik), considerando el caso base en circuito abierto y escenarios en circuito cerrado inverso. Estas proyecciones permitirán analizar el P80 final, la capacidad efectiva del circuito y validar técnicamente mejoras en chancadores, harneros y correas. Con ello se definirá el P80 óptimo de operación y se establecerán criterios técnicos para procesos aguas abajo.

Las recomendaciones estarán sustentadas en la mejora de confiabilidad, mantenibilidad y desempeño, habilitando decisiones de rediseño o inversión. La metodología DMAIC será el eje del análisis técnico, complementada con PDCA para asegurar la sostenibilidad operativa. Finalmente, se efectuará una evaluación técnico-económica mediante flujo de caja proyectado y simulaciones de Monte Carlo, cuantificando viabilidad, riesgos y robustez de los resultados frente a la incertidumbre operacional y metalúrgica.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Mejorar los indicadores de OEE y la recuperación metalúrgica en el circuito de chancado de la Faena Franke, mediante un diagnóstico técnico-operacional desarrollado bajo la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), orientado a identificar brechas de desempeño, determinar el P80 óptimo y evaluar alternativas de modificación de circuitos y activos críticos. El trabajo se sustenta en análisis RAM, modelación estadística, gráficos I-MR, diagramas RBD, simulaciones en Sandvik PlantDesigner y evaluación técnico-económica con flujo de caja y simulaciones Monte Carlo. El aglomerado y apilado se abordarán solo de forma general como caso base de referencia.

2.2. Objetivos específicos

- Caso base: Levantar indicadores actuales de OEE (Utilización, Disponibilidad, Rendimiento y Calidad), identificando cuellos de botella con datos históricos y registros de detenciones. El aglomerado y apilado se incluirán solo a nivel general.
- Áreas críticas y confiabilidad: Detectar equipos o subsistemas críticos aplicando metodología RAM (PAS 55), estimando λ , MTBF y MTTR. El análisis se apoyará en distribuciones Weibull y normal, validación Jack Knife y gráficos I-MR, principalmente en Excel.
- Determinación del P80: Establecer el P80 objetivo para alcanzar 70% de extracción, mediante estudios metalúrgicos y simulaciones en PlantDesigner, evaluando qué equipos o configuraciones requieren ajustes.
- Escenarios de mejora: Diseñar alternativas de rediseño (equipos en paralelo, redundantes o circuito cerrado inverso), proyectando su efecto en disponibilidad, OEE y P80 óptimo.
- Evaluación tecnológico-operacional: Comparar configuraciones y marcas de equipos considerando criterios de confiabilidad, mantenibilidad y desempeño, seleccionando aquellas de mayor impacto técnico.
- Evaluación económico-financiera: Justificar mejoras con flujo de caja y Monte Carlo, considerando rentabilidad, ciclo de vida y continuidad operativa. El enfoque PDCA reforzará la etapa "Controlar" del ciclo DMAIC para asegurar sostenibilidad.

3. Resultados esperados

Con este trabajo se espera obtener un conjunto de resultados técnicos y operacionales que sirvan de base para la toma de decisiones en el rediseño del circuito de chancado de la Faena Franke. En particular, se proyecta:

- Levantamiento del caso base: Obtener los indicadores actuales de la Eficacia Global de los Activos (OEE), incluyendo Utilización, Disponibilidad Física, Rendimiento y Calidad, identificando cuellos de botella operacionales mediante el análisis de datos históricos y registros de detenciones.
- Determinación de áreas críticas y modelación de confiabilidad: Identificar los equipos o subsistemas críticos del circuito de chancado mediante la aplicación de la metodología RAM (Reliability, Availability and Maintainability), conforme a la Norma PAS 55, estimando métricas como tasa de fallas (λ), MTBF y MTTR. La evaluación se apoyará en distribuciones estadísticas (Weibull, normal), validación Jack Knife y gráficos I-MR, con cálculos realizados principalmente en Excel.
- Determinación metalúrgica del P80 objetivo: Realizar estudios y simulaciones en Sandvik PlantDesigner para establecer el P80 óptimo que permita estabilizar la recuperación metalúrgica en niveles cercanos al 70%.
- Propuesta de mejoras de alto impacto: Diseñar escenarios de mejora en la configuración del chancado mediante cambios estructurales (equipos en paralelo, redundantes o en circuito cerrado inverso), estimando sus efectos sobre la disponibilidad global, el OEE y el P80.
- Evaluación tecnológico-operacional de alternativas: Comparar configuraciones y marcas de equipos bajo criterios de confiabilidad, mantenibilidad y desempeño, priorizando aquellas que presenten mayor impacto en la operación y la continuidad del proceso.
- Evaluación económico-financiera de inversiones: Justificar técnica y económicamente las propuestas de mejora mediante flujo de caja proyectado y simulaciones Monte Carlo, considerando rentabilidad, riesgos y continuidad operativa. Asimismo, incorporar el ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) como complemento de la etapa Controlar del enfoque DMAIC, asegurando la sostenibilidad de las acciones implementadas.

4. Metodología a utilizar

La investigación se desarrollará bajo el enfoque DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), en línea con la Norma PAS 55 y la metodología RAM, centrada en el circuito de chancado y con un análisis general del aglomerado–apilado como caso base.

4.1. Definir

- Problema: baja recuperación metalúrgica y bajos indicadores de OEE.
- Alcance: análisis técnico detallado en chancado y diagnóstico general en aglomerado–apilado.
- Metas: mejorar confiabilidad, recuperación y productividad.
- Entregables: Project Charter, caso de negocio preliminar e identificación de clientes internos y externos.
- Herramientas: SIPOC, CTQ, árbol de problemas y diagrama de flujo.

4.2. Medir

- Recolección de datos históricos: producción, detenciones, mantenimientos, OEE y recuperación.
- Indicadores: Utilización, Disponibilidad, Rendimiento y Calidad.
- Métricas RAM: λ , MTBF, MTTR.
- Herramientas estadísticas: Weibull, normal, Jack Knife y gráficos I-MR.
- Generación de la línea base del sistema con apoyo en Excel.

4.3. Analizar

- Identificación de equipos y fallas críticas con metodología RAM.
- Análisis causa–efecto de detenciones y pérdidas de eficiencia.
- Evaluación del impacto del P80 en aglomerado y lixiviación.
- Simulaciones de escenarios en chancado con diferentes configuraciones.
- Apoyo con histogramas, Pareto y diagramas de dispersión.

4.4. Mejorar

- Propuestas: cambios de equipos, configuraciones en paralelo/stand-by y mejoras operativas.
- Evaluación técnica orientada al P80 objetivo, OEE y reducción de pérdidas.
- Priorización según impacto y costo.
- Análisis económico mediante flujo de caja y simulaciones Monte Carlo (6 años).
- Escenarios preliminares de rediseño con beneficios proyectados.

4.5. Controlar

- Aplicación de PDCA para sostener las mejoras del DMAIC.

- Indicadores de seguimiento técnico y económico.
- Documentación de estándares y rutinas de control.
- Retroalimentación continua y auditorías internas para mantener resultados.

5. Estado del arte

Este capítulo se dividirá en dos partes. La primera abordará los antecedentes generales de la metodología RAM, presentando los conceptos fundamentales de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, junto con su evolución y aplicación en la gestión de activos industriales. La segunda parte corresponderá al marco teórico, donde se desarrollarán los principios, indicadores y modelos utilizados para evaluar el desempeño operativo de los sistemas críticos, estableciendo la base conceptual que sustenta el análisis técnico aplicado en esta investigación.

5.1. Antecedentes históricos de la metodología RAM

La incorporación de estas herramientas ha permitido aplicar el enfoque RAM de manera más amplia y precisa en procesos industriales y sistemas de infraestructura crítica, combinando análisis probabilísticos con simulaciones avanzadas.

La metodología RAM (Reliability, Availability, Maintainability) tiene sus raíces en la evolución de la ingeniería de mantenimiento, disciplina que pasó de ser una actividad correctiva a una función estratégica dentro de las organizaciones industriales. Durante la primera mitad del siglo XX, el mantenimiento se consideraba un “mal necesario”, limitado a reparar equipos cuando ocurría una falla. Sin embargo, el aumento de la complejidad tecnológica y las exigencias de producción tras la Segunda Guerra Mundial impulsaron el desarrollo de la ingeniería de confiabilidad, orientada a cuantificar y controlar las fallas mediante herramientas estadísticas y modelos probabilísticos (Pintelon & Parodi-Herz, 2011).

En los años cincuenta y sesenta surgieron los primeros programas de mantenimiento preventivo y predictivo, apoyados en distribuciones de falla como Weibull y exponencial, permitiendo estimar la vida útil de los componentes y optimizar la frecuencia de intervención. Entre las décadas de 1970 y 1990, la función de mantenimiento evolucionó hacia un enfoque técnico-económico, donde la disponibilidad y la mantenibilidad se integraron como variables esenciales de desempeño, dando origen a la metodología RAM. Este enfoque permitió evaluar cuantitativamente la capacidad de un sistema para operar sin fallas, mantenerse disponible y ser reparado de forma eficiente durante su ciclo de vida.

Paralelamente, surgieron conceptos complementarios como el Mantenimiento Productivo Total (TPM) en Japón y el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en la industria aeronáutica y nuclear, que consolidaron el vínculo entre confiabilidad, productividad y seguridad operacional. A fines del siglo XX, con la expansión de la informática industrial, aparecieron herramientas como los Diagramas de Bloques de Confiabilidad (RBD), la Simulación de Monte Carlo y los sistemas CMMS/EAM, que permitieron integrar los análisis RAM con la gestión digital de activos.

En la actualidad, la metodología RAM se aplica en sectores como la minería, energía, transporte y manufactura avanzada, orientada a la optimización del ciclo de vida del activo, la gestión de riesgos y la toma de decisiones basada en datos. Su propósito principal es reducir costos operacionales, aumentar la confiabilidad de los equipos y asegurar la continuidad productiva mediante estrategias sostenibles y predictivas de mantenimiento.

5.2. Marco teórico

RAM es una metodología que reúne tres KPI clave en la gestión de activos: Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad. Su objetivo principal es reducir los costos de mantenimiento y operación, mejorar la productividad y, como consecuencia, aumentar las utilidades de la organización. El análisis RAM evalúa el desempeño del sistema mediante la medición del número de fallos de los activos, el tiempo entre fallos, el tiempo de reparación, entre otras métricas. Al utilizar cálculos numéricos para evaluar los equipos, se puede concluir que los resultados obtenidos de los tres conceptos que componen el análisis RAM deben ser siempre expresados en términos cuantitativos y sustentados en modelos probabilísticos.

- produce la falla.
- Efecto: consecuencia técnica, económica o en seguridad.
- Falla: error o defecto que genera el evento no deseado.

5.2.1. Análisis, Ajuste y Validación Estadística de Datos de Confiabilidad en Mantenimiento Industrial.

El análisis de confiabilidad permite anticipar fallas, optimizar mantenimiento y medir el efecto de las intervenciones, apoyándose en indicadores clave. Los principales son:

- MTBF (Mean Time Between Failures): tiempo promedio entre fallas.
- MTTR (Mean Time To Repair): tiempo promedio de reparación.
- Tasa de falla (λ): fallas esperadas por unidad de tiempo; inversa del MTBF en tasas constantes.
- Confiabilidad $R(t)$: probabilidad de operar sin fallas hasta un tiempo t .
- Probabilidad acumulada de falla $F(t)$: chance de fallar antes de un tiempo específico.
- Función de densidad $f(t)$: distribución de fallas en el tiempo.
- Disponibilidad intrínseca A_i : capacidad de estar operativo considerando fallas y reparaciones.

Estos indicadores requieren métodos estadísticos rigurosos que permitan estimar distribuciones y parámetros a partir de datos reales. El procedimiento típico incluye: asignar probabilidades empíricas, seleccionar la distribución, ajustar parámetros y validar el modelo. Con ello se establece una base confiable para la toma de decisiones en mantenimiento industrial.

5.2.1.1. Procedimiento de Estimación Empírica de la CDF en Datos de Confiabilidad

Cuando se trabaja con datos continuos como los TBF (tiempos entre fallas) o TTR (tiempos de reparación), es necesario ajustar estos datos a una distribución de probabilidad adecuada, como Weibull, Exponencial, Normal o Log-Normal. Para esto, el primer paso consiste en estimar empíricamente la función de distribución acumulada $F_n(t)$ (CDF, Función de distribución acumulada), la cual, en el caso de los TBF, representa la probabilidad acumulada de falla, es decir, la probabilidad de que un componente o sistema falle antes o en el instante t :

$$F_n(t_i) = P(T \leq t_i)$$

Dado que se trabaja con muestras finitas, se recurre a estimadores empíricos como los propuestos por Benard y Weibull, los cuales relacionan la posición del dato i dentro del conjunto ordenado con el tamaño total n de la muestra.

Las fórmulas aplicadas son:

$$\frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad \text{Benard}$$
$$\frac{i}{n + 1} \quad \text{Weibull}$$

donde i corresponde a la posición del dato dentro del conjunto ordenado ($i=1,2,\dots, n$) y n representa el número total de observaciones de la muestra.

5.2.1.2. Modelación de distribuciones probabilísticas

La modelación de datos de fallas (TBF) y reparaciones (TTR) constituye una etapa esencial en los estudios de confiabilidad, ya que permite representar de manera estadística el comportamiento de los activos y proyectar su desempeño futuro. Este proceso se desarrolla en tres etapas complementarias que aseguran tanto la validez estadística como la aplicabilidad práctica de los resultados:

- Selección y caracterización.

La primera etapa consiste en identificar la distribución probabilística que mejor representa el patrón de fallas o reparaciones de los equipos. Entre las más utilizadas en confiabilidad destacan:

- Exponencial, adecuada para describir procesos aleatorios con una tasa de fallas constante, propia de la fase de “vida aleatoria” de los activos.
- “Weibull, altamente versátil, que permite modelar las tres fases clásicas de la curva de la bañera: fallas tempranas ($\beta < 1$), vida útil aleatoria ($\beta \approx 1$) y desgaste progresivo ($\beta > 1$)”
- Normal, empleada cuando los tiempos de reparación o vida útil muestran un comportamiento simétrico en torno a un valor promedio.
- Log-Normal, apropiada para fenómenos en los que los tiempos hasta la falla están influidos por factores multiplicativos y exhiben una distribución asimétrica hacia la derecha.
- Transformación de datos para ajuste lineal.

Una vez seleccionada la distribución, los datos empíricos de la función acumulada deben transformarse para linealizar su representación. Este proceso permite expresar la ecuación en la forma $y=a \cdot x+b$ y ajustarla mediante regresión lineal.

El objetivo de la linealización es facilitar la estimación de parámetros y evaluar la calidad del ajuste con el coeficiente de determinación R^2 . Además, ofrece una ventaja gráfica, pues permite comparar los datos experimentales con el modelo teórico y detectar desviaciones o patrones atípicos.

- Estimación de parámetros y funciones de confiabilidad. A partir de la regresión se obtienen los parámetros propios de cada distribución: β y η en Weibull; λ en Exponencial; y μ y σ en Normal y Log-Normal.

Con estos parámetros se calculan indicadores como media, mediana y moda, además de las funciones de confiabilidad $R(t)$, probabilidad acumulada de falla $F(t)$ y tasa de fallas $\lambda(t)$. Estos resultados permiten proyectar la sobrevivencia de los equipos y fundamentar la planificación de estrategias de mantenimiento.

La Tabla 1 resume en un solo cuadro las funciones de cada distribución, las transformaciones necesarias para linealización y las fórmulas de estimación de parámetros, brindando una visión integral para aplicar los modelos estadísticos en confiabilidad.

Tabla 1. Funciones, transformaciones y parámetros estadísticos de distribuciones aplicadas en análisis de confiabilidad.

Distribución	Pasos Claves para el ajuste	$f(t)$ Densidad	$F(t)$ Probabilidad de falla acumulada	$R(t)$ Confiabilidad	$\lambda[t]$ Tasa de falla	MTTR o MTBF	Transformación para linealizar	Estimar parámetros estadísticos y confiabilidad	Probabilidad acumulada teórica F [ti]	Confiabilidad $R[t_i]$
Weibull	3. Calcular $Y = \text{Ln}(-\text{Ln}(1 - F_n[t]))$ y $X = \text{Ln}(TBF / TTR)$ 4. Graficar X vs. Y . 5. Ajustar recta por mínimos cuadrados 6. Obtener β y η 7. Calcular R^2	$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	$1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	$e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$	$\frac{1}{\lambda}$	$Y = \beta * \text{Ln}(TBF \text{ o } TTR) - \beta * \text{Ln}(\eta)$	$\beta = \text{Pendiente}$ $\eta = e^{-\text{Intercepto}/\beta}$ Media = $\eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ Mediana = $\eta * \text{Ln}(2)^{\frac{1}{\beta}}$ Moda = $\eta * \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}}$ Media = a MTTR o MTBF	$F[t_i] = 1 - e^{-\left(\frac{t_i-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	$R[t_i] = e^{-\left(\frac{t_i-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$
Exponencial	3. Calcular $Y = \text{Ln}(1 - F_n[t])$ 4. Graficar $X = TBF / TTR$ vs. Y . 5. Ajustar recta por mínimos cuadrados 6. Obtener λ 7. Calcular R^2	$\lambda e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	λ constante	$\eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$	$Y = \lambda * (TBF \text{ o } TTR)$	$\lambda = -\text{Pendiente}$ Media = $\frac{1}{\lambda}$ Mediana = $\frac{\text{Ln}2}{\lambda}$ Moda=0 Media = MTTR o MTBF	$F[t_i] = 1 - e^{-\lambda t_i}$	$R[t_i] = e^{-\lambda t_i}$
Normal	3. Calcular $Y = \phi^{-1}(F_n[t])$ 4. Graficar $X = TBF / TTR$ vs. Y . 5. Ajustar recta por mínimos cuadrados 6. Obtener μ y σ 7. Calcular R^2	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$	$1 - \phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$	No aplicable (no confiable)	μ	$Y = a * (TBF \text{ o } TTR) + b$	$\mu = -b/a$ $\sigma = 1/a$ Media = μ Mediana = μ Moda = μ Media = a MTTR o MTBF	$F[t_i] = \phi\left(\frac{t_i - \mu}{\sigma}\right)$	$R[t_i] = 1 - \phi\left(\frac{t_i - \mu}{\sigma}\right)$
Log-Normal	1. Calcular $Y = \phi^{-1}(F_n[t])$ y $X = \text{Ln}(TBF / TTR)$ 2. Graficar X vs. Y . 3. Ajustar recta por mínimos cuadrados 4. Obtener μ y σ Calcular R^2	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\text{ln}t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\phi\left(\frac{\text{ln}t - \mu}{\sigma}\right)$	$1 - \phi\left(\frac{\text{ln}t - \mu}{\sigma}\right)$	$\lambda[t] = \frac{f(t)}{R(t)}$	$e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$	$Y = a * \text{Ln}(TBF \text{ o } TTR) + b$	$\mu = -b/a$ $\sigma = 1/a$ Media = $e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$ Mediana = $e^{\mu - \sigma^2}$ Moda = e^μ Media = a MTTR o MTBF	$F[t_i] = \phi\left(\frac{\text{ln}t_i - \mu}{\sigma}\right)$	$R[t_i] = 1 - \phi\left(\frac{\text{ln}t_i - \mu}{\sigma}\right)$

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Yáñez, M., Gómez de la Vega, H., Semeco Soto, K., & Medina, N. (s.f.). Confiabilidad integral. Tomo I: Ingeniería de Confiabilidad – Equipos.

5.2.1.3. Bondad de Ajuste y Validación del Modelo de Confiabilidad

Una vez estimados los parámetros y calculadas las funciones teóricas de distribución, es fundamental evaluar la calidad del ajuste entre los datos empíricos y el modelo estadístico seleccionado. Este paso permite validar si la distribución asumida (Weibull, Exponencial, Normal o Log-Normal) representa adecuadamente el comportamiento real de los datos de TBF o TTR. La prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) es una herramienta estándar utilizada para contrastar si una variable sigue una distribución específica, como la normal o Weibull, verificando su validez estadística.

La validación se realiza aplicando pruebas de bondad de ajuste, que pueden clasificarse en métodos gráficos y métodos cuantitativos:

a) Evaluación Gráfica (Regresión Lineal y Coeficiente de Determinación)

La forma más directa de validar el modelo es graficar los datos transformados según la distribución seleccionada. Si los puntos se alinean adecuadamente sobre una recta, se considera que existe una buena correspondencia entre los datos y el modelo.

El coeficiente de determinación R^2 indica qué tan bien se ajustan los datos a la recta estimada:

$R^2 \approx 1 \Rightarrow$ Muy buen ajuste.

$R^2 < 0,9 \Rightarrow$ Ajuste débil o incorrecta elección del modelo.

Este método es particularmente útil para Weibull y Log-Normal, ya que visualmente se puede detectar si los datos presentan curvatura (lo que indica mala selección del modelo).

b) Prueba Estadística de Bondad de Ajuste Kolmogorov–Smirnov (K–S)

El test de Kolmogorov–Smirnov (K–S) es un procedimiento no paramétrico y supervisado, utilizado para comparar dos muestras o una muestra con una distribución de probabilidad teórica. El estadístico que entrega el test corresponde a la distancia máxima existente entre dos distribuciones acumuladas, lo que permite determinar si ambas provienen o no de la misma población.

Para un conjunto de n observaciones independientes e idénticamente distribuidas, la función de distribución acumulada empírica se define como la proporción de observaciones menores o iguales a un valor dado. A partir de esta función se construye el estadístico D , que representa dicha distancia máxima entre las distribuciones acumuladas comparadas.

El estadístico D sigue una distribución normal tipificada, y si su valor es mayor al correspondiente a z en el nivel de confianza elegido, se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que existe una diferencia significativa entre las poblaciones comparadas. Un valor más alto de D implica una mayor discrepancia entre ambas distribuciones, lo que se asocia con una mejor capacidad del modelo para distinguir entre grupos o categorías (por ejemplo, entre clientes “buenos” y “malos”)

La Tabla 2 resume la aplicación de la prueba de Kolmogorov–Smirnov (K–S), cuyo estadístico se define como

$$D = \text{Max}|F_n[t_i] - F(t_i)|$$

representando la distancia máxima entre la distribución acumulada empírica $F_n(t)$ y la teórica $F(t)$

La regla de decisión establece que si $D \leq D_{\text{crítico}}$, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que los datos se ajustan a la distribución asumida. En cambio, si $D > D_{\text{crítico}}$, se rechaza H_0 , evidenciando una diferencia significativa entre ambas distribuciones.

El valor crítico D se obtiene a partir de tablas estadísticas para el nivel de confianza seleccionado. Este procedimiento, de carácter no paramétrico y supervisado, permite validar de manera objetiva el ajuste entre una muestra empírica y una distribución teórica (Jiménez, 2014).

Tabla2. Prueba de Bondad de Ajuste: K-S

Prueba de Bondad de Ajuste	Estadístico (Fórmula)	Regla de Decisión	Aplicación principal	Descripción técnica y observaciones clave
Kolmogorov–Smirnov (K-S)	$D = \text{Max} F_n[t_i] - F(t_i) $	<p>Si $D \leq D_{\text{crítico}}$: no se rechaza H_0</p> <p>Si $D > D_{\text{crítico}}$: se rechaza H_0</p> <p>$D_{\text{crítico}}$ se obtiene por tabla</p>	Weibull, Exponencial Normal Log-Normal	El test K–S es no paramétrico y supervisado. Se utiliza para comparar dos muestras o una muestra con una distribución teórica, midiendo la distancia máxima entre sus funciones de distribución acumulada. El estadístico D sigue una distribución normal tipificada; si su valor excede el z crítico al nivel de confianza elegido, se rechaza la hipótesis nula. Mientras mayor sea D , mayor es la diferencia entre las distribuciones comparadas.

Fuente: Elaboración propia (2025), con base en Jiménez (2014).

5.2.2. Modelación de la disponibilidad en sistemas industriales mediante RBD

Cuando un sistema alcanza cierta complejidad, se hace difícil determinar directamente su confiabilidad o disponibilidad global.” En estos casos, se recurre a una descomposición en equipos o subsistemas más simples, de los cuales se conozca o pueda estimarse su comportamiento”. El Diagrama de Bloques de Confiabilidad (RBD, por sus siglas en inglés) representa gráficamente esta descomposición funcional.

El RBD no requiere representar las conexiones físicas, sino conexiones lógicas de dependencia funcional: si un bloque falla (o está fuera de servicio), puede comprometer el desempeño del sistema completo, dependiendo de la lógica de operación.

Este enfoque es aplicable tanto para modelar:

- Confiabilidad $R_i(t)$: Probabilidad de que el equipo i opere sin fallas hasta un tiempo determina t .

- Disponibilidad A_i : Probabilidad de que el equipo i esté operativo en un instante dado.

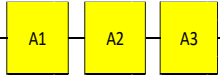
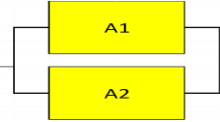
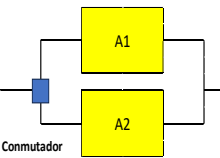
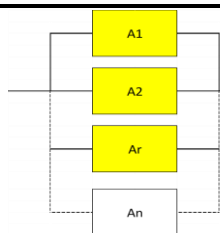
Existen configuraciones básicas en los RBD, cada una con fórmulas propias para determinar la confiabilidad o disponibilidad global del sistema:

- Sistema Serie: una falla en cualquier componente detiene el sistema.
- Sistema Paralelo: el sistema sigue funcionando mientras al menos un componente opere.
- Redundancia en Stand-by: componentes de respaldo entran en operación si falla un activo principal.
- Configuración fraccionada K de N: el sistema cumple su función si al menos K de los N componentes funcionan correctamente.

Cada configuración puede aplicarse tanto a funciones de confiabilidad como a disponibilidades, permitiendo evaluar el comportamiento global del sistema y la criticidad de cada componente en la operación.

A partir de la lógica de operación representada en un Diagrama de Bloques de Confiabilidad (RBD), es posible calcular la confiabilidad global R_S o la disponibilidad del sistema A_S combinando los valores individuales de cada componente según su ubicación y función dentro del sistema. Las distintas configuraciones (serie, paralelo, redundancia en stand-by y fraccionada tipo K-de-N) definen el impacto que tiene cada componente en el desempeño general. La siguiente Tabla 3 resume las expresiones matemáticas correspondientes a cada configuración, tanto para confiabilidad como para disponibilidad (De la Puente Cáceres, 2016; Stegmaier Bravo, s.f.).

Tabla 3. Esquema comparativo configuraciones RBD con $R_S(t)$ y A_S .

Tipo de Configuración	Descripción Operativa	Fórmula de Disponibilidad A_S	Fórmula de Confiabilidad R_S	Condición de Funcionamiento	Esquema
1. Serie	El sistema falla si falla al menos un componente.	$\prod_{i=1}^n (A_i)$	$\prod_{i=1}^n (R_i)$	Todos los componentes deben operar.	
2. Paralelo	El sistema opera mientras al menos uno esté operativo.	$1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i)$	$1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$	Basta con un componente funcionando.	
3. Stand-by (Redundancia Activa)	Un equipo opera; los otros entran automáticamente si falla. Redundancia por turnos.		$R_1 + \int_0^t f_1(\tau) R_2(t + \tau) d\tau$	Solo uno opera; otros en espera.	
4. Fraccionado (r de n)	El sistema opera si al menos r de n componentes están operativos.	$\sum_{j=r}^n \binom{n}{j} A^j (1 - A)^{n-j}$	$\sum_{j=r}^n \binom{n}{j} R^j (1 - R)^{n-j}$	Opera con mínimo K activos simultáneamente.	

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Stegmaier Bravo (s.f.) y De la Puente Cáceres (2016).

5.2.3. Metodologías de gestión en mantenimiento y confiabilidad

En el ámbito de la gestión de activos industriales, particularmente en minería, es fundamental contar con metodologías que permitan optimizar la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad de los sistemas productivos. Entre las diversas herramientas aplicadas, “DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) se destaca como un enfoque estructurado y altamente efectivo, derivado de Lean Six Sigma, ideal para abordar problemas de variabilidad, fallas recurrentes y cuellos de botella” (Felizzola & Luna, 2014; Presa, 2020; Nathan-Gerges González, 2023).

Su fortaleza radica en integrar el análisis basado en datos, la estandarización de procesos y la mejora continua, lo que lo convierte en un marco idóneo para abordar problemas de variabilidad, fallas recurrentes y cuellos de botella en operaciones críticas como el chancado. En esta investigación, DMAIC se adopta como metodología central, orientando el análisis técnico del circuito de chancado y ofreciendo una visión de referencia para los procesos de aglomerado y apilado en la etapa de caso base.

La Tabla 4 resume las etapas del ciclo DMAIC junto con su descripción y las principales herramientas

Tabla 4. Etapas del ciclo DMAIC y herramientas aplicadas.

Etapa DMAIC	Descripción	Herramientas recomendadas
Definir	Se establece con precisión el problema, los objetivos del proyecto y las variables clave de desempeño (por ejemplo, tasa de falla, disponibilidad, eficiencia). Se identifican los procesos críticos y se delimita el alcance técnico.	Diagrama SIPOC, diagrama de flujo, matriz CTQ, análisis causa-raíz
Medir	Se recopilan datos confiables para construir una línea base del comportamiento del sistema. Se calculan métricas como MTBF, MTTR, OEE.	Hoja de verificación, histogramas, diagrama de Pareto, análisis de capacidad. Cálculos en Excel .
Analizar	Se aplican técnicas estadísticas para identificar las causas raíz de las fallas y los puntos críticos de pérdida de eficiencia.	Diagrama causa-efecto (Ishikawa), análisis de regresión, dispersión, distribuciones Weibull y normal, Jack Knife
Mejorar	Se diseñan e implementan soluciones técnicas. Se consideran modificaciones estructurales, selección de nuevos equipos y simulaciones del sistema.	Simulación de procesos (Sandvik PlantDesigner), análisis de sensibilidad, comparación técnica de configuraciones, evaluación técnico-económica (flujo de caja y simulaciones Monte Carlo).
Controlar	Se implementan mecanismos de seguimiento para asegurar que las mejoras se mantengan en el tiempo.	Ciclo PDCA, KPIs, auditorías internas, paneles de control, documentación técnica estandarizada

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Felizzola y Luna (2014); Presa (2020); Morato (2009); Pineda (2017); ISO 55000 (2014).

Sin embargo, una vez implementadas las soluciones propuestas a través de DMAIC, surge la necesidad de sostener dichas mejoras en el tiempo. En este contexto, el ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) se presenta como una metodología complementaria de mejora continua, que permite dar seguimiento a los resultados obtenidos, ajustar desviaciones y perfeccionar gradualmente las soluciones técnicas aplicadas. “Esta lógica iterativa refuerza especialmente

la fase Controlar del enfoque DMAIC, aportando herramientas prácticas para institucionalizar las mejoras y garantizar su sostenibilidad operativa” (SixSigma.us.)

Desde una perspectiva conceptual, esta integración puede explicarse a partir de los enfoques japoneses de mejora continua:

- PDCA se asocia con el principio de Kaizen, que promueve mejoras incrementales y sostenidas en el tiempo.
- DMAIC responde a una lógica de Kaikaku, orientada a rediseños estructurales de mayor impacto.

Su complementariedad permite abordar transformaciones profundas seguidas de un ciclo continuo de mantenimiento, monitoreo y ajuste.

La relación entre las etapas de DMAIC y las fases del ciclo PDCA se presenta en la Tabla 5, donde se detallan los puntos de convergencia metodológica y las herramientas utilizadas para reforzar la mejora continua:

Tabla 5. Integración entre las etapas de DMAIC y el ciclo PDCA.

Etapa DMAIC	Equivalente PDCA	Relación metodológica clave	Herramientas asociadas
Definir	Plan	La planificación y definición del problema sientan las bases para todo el ciclo de mejora.	SIPOC, CTQ, análisis causa-raíz
Medir	Do	Se recopilan datos operacionales y de confiabilidad, iniciando la ejecución técnica del análisis.	Hojas de verificación, KPIs, histogramas
Analizar	Check	Se contrasta la información recolectada con los objetivos definidos y se detectan desviaciones.	Jack Knife, Weibull, análisis multivariado
Mejorar	Act	Las soluciones se implementan, se estandarizan y se ajustan si es necesario.	AMEF, simulaciones, rediseño estructural
Controlar	PDCA completo	La iteración del ciclo PDCA permite monitorear, ajustar y mantener las mejoras operativas.	Control charts, auditorías, documentación

Fuente: Elaboración propia (2025), con base en SixSigma.us (2022); Imai (1986); ISO 9001 (2015); ISO 55000 (2014); Nathan-Gerges (2023).

5.2.4. Control Estadístico y Capacidad del Proceso

5.2.4.1. Gráficos de Control I-MR

Los gráficos I-MR son una herramienta clave del Control Estadístico de Procesos (SPC), usados cuando solo existen mediciones individuales y no es posible formar subgrupos, como ocurre con indicadores de OEE, disponibilidad o utilización en procesos industriales.

El Gráfico I (Individuals) muestra los valores X_i en el tiempo, permitiendo identificar el comportamiento central del proceso y detectar tendencias, ciclos o puntos fuera de control. Por ejemplo, una baja en la utilización del chancador primario en enero puede reflejar una detención mayor o una contingencia operacional.

Para trazar este gráfico se calculan tres líneas de referencia:

- Línea Central (CL-I): corresponde al promedio general de los datos individuales (\bar{X})

- Límite Superior (UCL-I) y Límite Inferior (LCL-I): se obtienen a partir de la variación estimada en el corto plazo. Dado que aquí no existen subgrupos, la desviación estándar se estima con el promedio de los rangos móviles \overline{MR} y la constante $d_2 = 1,128$

Así, las fórmulas generales son:

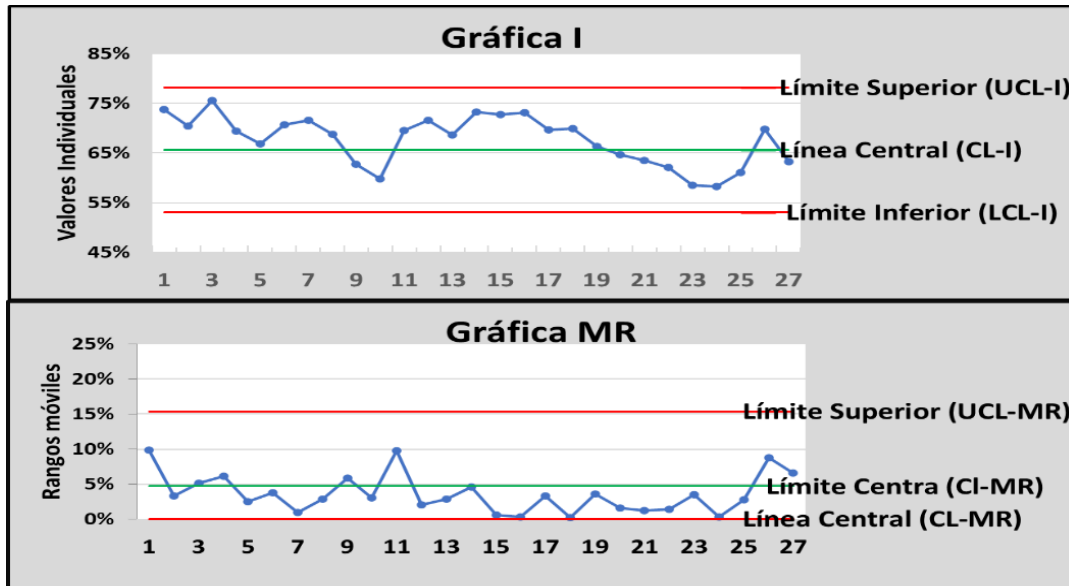
$$UCL - I = \bar{X} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} ; LCL - I = \bar{X} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} ; CL - I = \bar{X}$$

Con esto se establece un “canal de control” dentro del cual deberían permanecer la mayoría de los valores individuales si el proceso está bajo control estadístico.

El Gráfico MR (Moving Range), en cambio, muestra la magnitud de la variación entre dos observaciones consecutivas, calculada como:

$$MR_i = |X_i - X_{i-1}|$$

En este caso también se definen tres líneas de referencia:



- Línea Central (CL-MR): corresponde al promedio de los rangos móviles \overline{MR}
- Límite Superior (UCL-MR): se obtiene multiplicando el promedio de los rangos móviles por unas constantes para $MR(2)$ son $D_3 = 0$ y $D_4 = 3,267$

Así, las fórmulas generales son:

$$UCL - MR = \overline{MR} ; LCL - MR = D_4 * \overline{MR} ; CL - MR = D_3 * \overline{MR}$$

En la figura 3. se observa un gráfico de Control I-MR con sus límites superiores inferiores y centrales.

Figura 3. Gráficos de Control I-MR.

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Felizzola Jiménez y Luna Amaya (2014); Morato Orozco (2009); Wheeler y Chambers (1992).

El gráfico MR permite observar la estabilidad de la dispersión y detectar cambios bruscos en la variabilidad. Si de un mes a otro la disponibilidad cae 15 puntos porcentuales, mostrará un

salto anormal, señal de pérdida de control y necesidad de investigar la causa raíz.

En conjunto, ambos gráficos son complementarios: el Gráfico I sigue la tendencia central y detecta desviaciones en el desempeño, mientras que el MR evalúa la estabilidad de la variación y resalta cambios abruptos. Esta dualidad es clave para asegurar no solo el nivel promedio de los indicadores, sino también la consistencia con que se mantienen en el tiempo.

5.2.4.2. Índices de Capacidad del Proceso

Los índices de capacidad permiten medir qué tan bien un proceso cumple con los límites de especificación, definidos como LEI (Límite de Especificación Inferior) y LES (Límite de Especificación Superior). En la práctica, se trata de evaluar si la variación del proceso, junto con la posición de su media, es adecuada para mantenerse dentro de los rangos que exige el cliente o la norma de operación.

- C_p y P_p – Capacidad Potencial

Los índices C_p y P_p consideran únicamente la anchura de la variación frente a la amplitud de la tolerancia, sin tomar en cuenta si la media del proceso está bien centrada entre los límites.

$$C_p = \frac{LES - LEI}{6\sigma_{corto}} ; P_p = \frac{LES - LEI}{6\sigma_{largo}}$$

- C_p evalúa la capacidad en condiciones de corto plazo, utilizando σ_{corto} (calculada a partir de los rangos móviles). Muestra una visión más “optimista” del proceso, ya que refleja solo la variación natural inmediata.
- P_p evalúa la capacidad a largo plazo, considerando σ_{largo} (la desviación estándar clásica muestral). Representa una visión más realista, porque incluye todas las fuentes de variación que se acumulan con el tiempo, como cambios de turno, condiciones ambientales o ajustes de operación.

En otras palabras, C_p y P_p nos indican qué tan capaz sería el proceso de cumplir con las especificaciones si estuviera perfectamente centrado en la media, pero no nos dicen si efectivamente lo está. Para interpretar los indicadores de capacidad potenciales de utiliza la tabla 6. La Tabla 6 permite interpretar los valores de C_p y P_p , que muestran la capacidad potencial del proceso en función de su variación frente a los límites de especificación. Estos índices representan un escenario “ideal”, ya que no consideran si la media está bien centrada. Un valor inferior a 1,0 indica que la variación del proceso supera el rango permitido y lo hace incapaz. Entre 1,0 y 1,33 el proceso es apenas aceptable, con riesgo frecuente de incumplimiento. En el rango 1,33 a 2,0 se clasifica como capaz y estable, suficiente para la mayoría de operaciones industriales. Finalmente, valores superiores o iguales a 2,0 reflejan un nivel de clase mundial (Six Sigma), donde la dispersión es mínima y prácticamente no se generan productos fuera de especificación.

Tabla 6. Clasificación de la capacidad potencial del proceso (Cp / Pp.)

Valor Cp / Pp	Categoría proceso	Interpretación	Acciones recomendadas
Cp < 0,67	No adecuado	Muy incapaz; gran % fuera de especificación.	Rediseño del proceso/producto, revisar tolerancias, DOE, eliminar causas especiales de variación.
0,67 ≤ Cp < 1,00	Requiere modificaciones serias	Incapaz; la variación supera el ancho de especificación.	Plan de mejora intensivo: reducción de variabilidad, estandarización, mantenimiento, capacitación.
1,00 ≤ Cp < 1,33	Requiere control estricto	Apenas aceptable; riesgo frecuente de incumplimiento.	SPC y control estricto (I-MR/ \bar{X} -R), recentrar el proceso, control de insumos/proveedores.
1,33 ≤ Cp < 2,00	Adecuado (capaz y estable)	Cumple con holgura para la mayoría de operaciones.	Mantener control estadístico, Kaizen y documentación/estandarización.
Cp ≥ 2,00	World Class / Six Sigma	Variación mínima; prácticamente sin defectos.	Sostener el desempeño, prevención de regresión, benchmarking y difusión de mejores prácticas.

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Felizzola Jiménez y Luna Amaya (2014); Pyzdek y Keller (2021); Pande, Neuman y Cavanagh (2002).

- Cpk y Ppk – Capacidad Real

“Los índices Cpk y Ppk son una extensión más realista, ya que sí incorporan la posición de la media \bar{X} con respecto a los límites” (International Lean Six Sigma, 2025). Se calculan como el mínimo entre la distancia de la media al LEI y la distancia de la media al LES, ambas normalizadas en función de la variación.





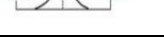
$$C_{pk} = \min\left(\frac{\bar{X} - LEI}{3\sigma_{corto}} ; \frac{LES - \bar{X}}{3\sigma_{corto}}\right) \quad P_{pk} = \min\left(\frac{\bar{X} - LEI}{3\sigma_{largo}} ; \frac{LES - \bar{X}}{3\sigma_{largo}}\right)$$

con $\sigma_{corto} = \frac{\overline{MR}}{d_2}$ y $\sigma_{largo} = \sigma \Rightarrow$ desviación estándar muestral clásica.

- Cpk refleja la capacidad real del proceso en el corto plazo. Si la media está muy cerca de un límite, este índice se reduce incluso si el Cp era alto.
- Ppk refleja la capacidad real en condiciones de largo plazo, incorporando la variación total del proceso en el tiempo.

La Tabla 7 se utiliza para interpretar los índices de Cpk y Ppk, que representan la capacidad real del proceso, ya que consideran tanto la dispersión como el alineamiento de la media con los límites de especificación. Cuando Cpk o Ppk son menores que 0, la media está fuera de los límites y el proceso es totalmente incapaz. Si el valor es igual a 0, la media coincide con un límite, lo que implica que la mitad de la producción queda fuera de especificación. En el rango $0 < Cpk < 1$, la media está dentro, pero la variabilidad es excesiva, por lo que aún se clasifica como incapaz. Con $Cpk = 1$, el proceso cumple justo lo requerido, sin margen de seguridad. Finalmente, valores mayores a 1 indican un proceso capaz, donde la media está centrada y la variación bajo control, siendo este el escenario deseable para asegurar la calidad.

Tabla 7. Clasificación de la capacidad real del proceso (Cpk / Ppk).

Valor Cpk / Ppk	Categoría proceso	Interpretación	Acciones recomendadas	Interpretación grafica
Cpk < 0	Incapaz crítico	La media está fuera de los límites de especificación.	Rediseñar el proceso; revisar parámetros de operación, tolerancias y materiales.	$C_{pk} < 0$ 
Cpk = 0	Incapaz total	La media está exactamente en el límite (50% fuera de especificación).	Corrección inmediata: recentrar la media, ajustar equipos y controles.	$C_{pk} = 0$ 
0 < Cpk < 1	Incapaz	Media dentro de límites, pero dispersión demasiado grande.	Reducir variabilidad: aplicar SPC, mantenimiento preventivo, capacitación.	$0 < C_{pk} < 1$ 
Cpk = 1	Aceptable mínimo	Cumple justo lo requerido; sin margen de seguridad.	Monitoreo continuo y mejora incremental; asegurar estabilidad en el tiempo.	$C_{pk} = 1$ 
Cpk > 1	Capaz y estable	Proceso realmente capaz; media centrada y baja dispersión.	Mantener y estandarizar el desempeño; aplicar mejora continua (Kaizen, lean).	$C_{pk} > 1$ 

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Morato Orozco (2009); Pande, Neuman y Cavanagh (2002); International Lean Six Sigma Institute (2025).

5.2.5. Enfoque en OEE como indicador central.

En un entorno industrial competitivo, las organizaciones destinan crecientes recursos al seguimiento de indicadores clave como la disponibilidad, el rendimiento y la calidad, que permiten evaluar la capacidad de una planta para generar valor. La reducción de pérdidas productivas se ha vuelto esencial, y en este marco, la Eficacia Global de los Equipos (OEE) se ha consolidado como una herramienta de referencia internacional. Diversos estudios señalan que las compañías que implementan el OEE suelen reportar mejoras significativas en la disponibilidad de los equipos, incrementos en el rendimiento y una mayor calidad del producto (Johnson, 2021; Durán Hernández & Guerrero Chávez, 2025).

El OEE surge en el contexto del Mantenimiento Productivo Total (TPM), desarrollado por Seiichi Nakajima en Japón en la década de 1970. A diferencia de enfoques previos, el TPM promueve la participación de todas las áreas en la gestión de activos, buscando cero fallas, cero defectos y cero accidentes. Para ello, se requieren métricas que cuantifiquen con precisión el desempeño real frente al esperado; el OEE cumple esta función al integrar en un solo índice el impacto de las principales pérdidas de producción.

El OEE se construye a partir de tres factores fundamentales:

- Disponibilidad (D): mide el tiempo en que un equipo está en condiciones de operar respecto al calendario. Se descuenta el tiempo no programado para producir (feriados, vacaciones, falta de carga o turnos no asignados) y, dentro del tiempo disponible, las detenciones planificadas (mantenimientos, limpiezas) y no planificadas (fallas, emergencias).

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo Productivo}}{\text{Tiempo Disponible}}$$

- Rendimiento (R): Evalúa el grado de aprovechamiento de la capacidad de producción durante el tiempo en que el equipo estuvo operando. Se calcula como la razón entre la producción real y la producción teórica (capacidad nominal × tiempo productivo).

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Producción Real}}{\text{Producción Esperada}}$$

Las principales causas de pérdidas de rendimiento son:

- Funcionamiento a velocidad reducida: operación bajo la capacidad nominal por restricciones, alimentación limitada o condiciones de seguridad.
- Variabilidad en el flujo de alimentación: caudales inestables o discontinuos que obligan a disminuir la velocidad.
- Desgaste de equipos: pérdida de eficiencia por desalineaciones, holguras o deterioro de componentes.
- Condiciones externas: variaciones en humedad, granulometría o insumos que afectan el procesamiento.

Calidad (Q): Refleja la proporción de producto conforme respecto al total fabricado. Excluye rechazos, reprocesos o unidades defectuosas.

$$Calidad = \frac{Unidades\ Buenas}{Unidades\ Producidas}$$

Las principales causas de pérdidas de calidad son:

- Defectos en el producto final: mineral fuera de especificación granulométrica (ej. P₈₀ superior al definido).
- Reprocesos: necesidad de volver a procesar material por incumplir parámetros de diseño.
- Rechazos: material descartado por baja ley o por no cumplir estándares de recuperación.
- Variabilidad en la alimentación: fluctuaciones en la ley de cabeza o en la granulometría que impactan la recuperación metalúrgica.
- Condiciones inadecuadas de operación: parámetros de proceso fuera de rango (velocidad de correas, ajustes en chancadores, tiempos de retención insuficientes).
- Errores humanos o de control automático: ajustes inadecuados, fallas de instrumentación o configuraciones incorrectas que afectan la calidad del mineral entregado a la siguiente etapa.

La relación se resume en la expresión clásica: $OEE = D * R * Q$

El resultado se expresa como porcentaje y refleja la efectividad integral de los equipos en su contexto operativo. La Figura 4 resume esquemáticamente el sistema OEE.”

Figura 4. Esquema EOO.

Relaciones	Tiempo Calendario	365 días por 24 horas
Disponibilidad B/A	Tiempo Disponible A	Detenciones programadas, fallas mecánicas, acondicionamientos, cambios de turno, otros.
	Tiempo Productivos B	
Rendimiento D/C	Producción Esperada C	Micro-paradas, variabilidad en el flujo de alimentación, pérdida de eficiencia mecánica,
	Producción Real D	
Calidad F/E	Unidades Producidas E	
	Unidades Buenas F	
OEE F/A	OEE=D*R*Q	

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Rojas Alvarado, O. A., Benavidez, J. F., & Pascuas, W. (2023). Cálculo de la Efectividad Global del Equipo (OEE) basado en el concepto de gemelo digital bajo un entorno de transformación digital industrial. Mutis, 13(2), 1–27; y Villalón Lillo, R. (2024). Apuntes Clase IC III MGA USM 2024 – OEE. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Mecánica. Documento interno no publicado.

El valor obtenido permite establecer un diagnóstico del nivel de competitividad de la planta o línea de producción. La Tabla 8, adaptada de Cruelles (2010) y complementada con Villalón (2024), resume los rangos de clasificación del OEE más utilizados en la literatura

especializada y en la práctica docente de ingeniería de mantenimiento.

Tabla 8. Clasificación del OEE.

OEE (%)	Valoración	Descripción
OEE < 65 %	Deficiente (Inaceptable)	Se producen importantes pérdidas económicas. Existe muy baja competitividad.
65 % ≤ OEE < 75 %	Regular	Aceptable solo si se está en proceso de mejora. Se producen pérdidas económicas. Baja competitividad.
75 % ≤ OEE < 85 %	Aceptable	Debe continuar la mejora para alcanzar una buena valoración. Ligeras pérdidas económicas. Competitividad ligeramente baja.
85 % ≤ OEE < 95 %	Buena	Entra en valores de Clase Mundial. Buena competitividad.
95 % ≤ OEE ≤ 100 %	Excelente	Valores de Clase Mundial. Alta competitividad.

Fuente: Elaboración propia (2025). adaptada de Soto Ramírez, F. E. (2014). Medición automatizada de la eficiencia por medio de sistemas de pesaje. Manufactura Avanzada, CIATEQ Campus Sahagún, SYCSA. México; y Rojas Alvarado, O. A., Benavidez, J. F., & Pascuas, W. (2023). Cálculo de la Efectividad Global del Equipo (OEE) basado en el concepto de gemelo digital bajo un entorno de transformación digital industrial. Mutis, 13(2), 1–27.

5.2.6. Chancado, P80 y recuperación metalúrgica en óxidos de cobre

La lixiviación constituye una de las etapas fundamentales del proceso hidrometalúrgico destinado a recuperar cobre a partir de minerales oxidados y, en algunos casos, sulfurados de baja ley. Su objetivo principal es disolver selectivamente los compuestos de cobre mediante una solución acuosa ácida, generando una solución rica, conocida como PLS (Pregnant Leach Solution), que posteriormente alimenta las etapas de extracción por solventes y electro-obtención (Alguacil, 1998; Codelco Educa, 2019).

En el caso de los óxidos de cobre, como los presentes en Faena Franke, el reactivo lixiviante más empleado es el ácido sulfúrico, el cual percola a través de pilas construidas con mineral previamente chancado y aglomerado con ácido y agua. La permeabilidad y la uniformidad granulométrica, directamente ligadas al P80, son factores críticos que determinan la cinética de disolución y el grado de recuperación alcanzable (Duque, 2014; Yáñez, 2025). El éxito del proceso depende de mantener un flujo homogéneo de la solución lixiviante, una adecuada aireación y una distribución de tamaños que asegure una percolación completa a través del lecho mineral. Un P80 demasiado grueso genera canales preferenciales y zonas no lixiviadas, mientras que uno excesivamente fino provoca taponamientos y aumento del consumo de ácido. Por ello, el control granulométrico del material chancado es determinante para alcanzar una recuperación metalúrgica eficiente y sostenida en el tiempo (Chávez, 2019; Rodríguez Coronado y Colab., 2022).

La cinética de extracción está gobernada por la difusión del reactivo a través de la capa porosa del mineral y la reacción química superficial. Factores como la concentración de ácido, la

temperatura, la porosidad, el tiempo de curado y el tamaño de partícula influyen directamente en la velocidad de disolución. En medios clorurados o sulfatados, la presencia de iones férricos y cúpricos actúa como par redox catalítico, favoreciendo la oxidación de sulfuros secundarios y la regeneración del agente lixivante. Este mecanismo se observa con especial relevancia en procesos tipo CuproChlor®, que permiten la disolución controlada de calcocita y covelina bajo condiciones moderadas de temperatura (Duque, 2014).

Los ensayos de columnas realizados por la Superintendencia de Procesos de la Planta Franke en enero de 2025 demuestran que una reducción del P80 desde 13 mm a 9 mm incrementa significativamente la eficiencia de lixiviación y la cinética de extracción de cobre, particularmente en minerales del tipo Barreal Seco y Aguilucho. Las pruebas indican que, a menor granulometría, el ácido se aprovecha mejor y la extracción es más rápida, pese a que teóricamente se esperaba un mayor consumo por parte de la ganga. En consecuencia, se concluye que una disminución controlada del P80 favorece la extracción y reduce los tiempos de lixiviación, manteniendo un consumo ácido dentro de rangos industriales aceptables (Minera Las Cenizas, 2025).

A nivel industrial, se definieron nuevas aperturas de harneros (40/15 mm en el secundario y 20/9 mm en los terciarios) y ajustes de setting de chancadores (secundario 34–35 mm y terciarios 9–10 mm) para lograr una alimentación con P80 cercano a 9 mm, lo que se proyecta elevará la recuperación metalúrgica y reducirá los tiempos de lixiviación. La modelación realizada por Sandvik mediante el software Plant Designer confirmó que esta modificación mantiene la capacidad del circuito y mejora la distribución granulométrica, asegurando una mayor eficiencia operativa y un producto final consistente con los requerimientos del proceso de aglomerado y lixiviación (Sandvik, 2024).

Una vez obtenida la solución rica, el cobre se concentra mediante extracción por solventes, en donde el complejo orgánico capta los iones Cu^{2+} , los transfiere a una fase acuosa y finalmente se recupera por electro-obtención, generando cátodos de alta pureza (99,99 % Cu). Este esquema Lixiviación–SX–EW constituye uno de los mayores avances tecnológicos de la hidrometalurgia moderna, permitiendo alcanzar altos niveles de recuperación con bajo impacto ambiental (Alguacil, 1998; Monardes, 2010). El rendimiento global del proceso puede alcanzar entre 80 y 85 % en óxidos y entre 70 y 80 % en sulfuros secundarios, siempre que la granulometría y la permeabilidad del material lixiviado sean controladas.

De esta forma, el P80 se consolida como una variable crítica de calidad dentro del circuito de chancado y un parámetro clave para la eficiencia global del proceso hidrometalúrgico. La reducción granulométrica adecuada no solo mejora la cinética de disolución y la recuperación de cobre, sino que además optimiza los consumos de ácido, agua y energía, reforzando la sostenibilidad y competitividad del proceso de producción de cátodos en la minería de óxidos de cobre.

6. Aplicación metodología DMAIC.

6.1. Definir

6.1.1. Título del proyecto.

Mejora del desempeño del sistema de chancado en Faena Franke para aumentar OEE y recuperación metalúrgica

6.1.2. Project Charter

6.1.2.1. Caso de negocio

Aplicando lo expuesto en 5.2.5. podríamos definir nuestro OEE de proyecto como

$$OEE = D_{OEE} * R_{Ef} * K_{Rm} \quad 6.1$$

Donde

$$D_{OEE} = \frac{(H_c - H_{dm})}{H_c} * \frac{(H_c - H_{dm} - H_{do})}{(H_c - H_{dm})} = \frac{(H_c - H_{dm} - H_{do})}{H_c} = \frac{H_o}{H_c} = D_m * U_o \quad 6.2$$

$$R_{Ef} = \frac{\frac{T_r}{H_o}}{\frac{T_B}{H_o}} = \frac{Q_r}{Q_B} \quad 6.3$$

$$K_{Rm} = \frac{R_{mr}}{R_{mb}} \quad 6.4.$$

Con el siguiente diagrama OEE Figura 5.

Relaciones	Tiempo Calendario	Formula aplicada	365 días por 24 horas
Disponibilidad B/A	$H_o = H_c - H_{dm} - H_{do}$ $H_c ; D_m = \frac{(H_c - H_{dm})}{H_c} ; U_o = \frac{(H_c - H_{dm} - H_{do})}{(H_c - H_{dm})}$	$D_{OEE} = \frac{H_o}{H_c}$ $= D_m * U_o$	Detenciones operacionales (aseos por derrame, espera alimentación, muestreos), Detenciones por mantenimiento (planificado, no planificado, fallos mecánicos, Inspecciones).
Rendimiento D/C	Tasa alimentación real = $\frac{T_B}{H_o}$ Tasa alimentación real = $\frac{T_r}{H_o}$	$R_{Ef} = \frac{Q_r}{Q_B}$	Micro-paradas, variabilidad en el flujo de alimentación, pérdida de eficiencia mecánica, cambio en humedad o granulometría mineral alimentación.
Calidad F/E	Recuperación real = R_{mr} Recuperación proyectada = R_{mb}	$K_{Rm} = \frac{R_{mr}}{R_{mb}}$	Aumento granulometría mineral, P_{80} mayor al definido calculado proyecto
OEE F/A	$OEE = D_{OEE} * R_{Ef} * K_{Rm}$		

Fuente: Elaboración propia (2025).

Dado que la producción total está condicionada por la OEE, nuestro caso de negocio se puede determinar por el mayor cobre recuperado por aplicación de un análisis OEE Donde el mineral que alimenta las pilas antes de la mejora es:

$$T_r = Q_r * H_o \quad H_o = H_c * U_o * D_m [h] \quad \text{de (6.2)} \quad \Rightarrow \quad T_a = H_c * U_o * D_m * R_{Ef} * Q_b [t] \quad 6.4$$

$$Q_r = R_{Ef} * Q_b \left[\frac{t}{h} \right] \quad \text{de (6.3)}$$

Y el cobre recuperado en las pilas antes de la mejora es:

$$T_r = T_a * G * R_m [t] \Rightarrow T_r = H_c * U_o * D_m * R_{Ef} * Q_b * G * R_m [t] \quad 6.5$$

Donde T_r representa las toneladas recuperadas de cobre. G Ley de cabeza y R_m Recuperación metalúrgica. Para estimar el cobre producido en forma de cátodos, se incorpora la eficiencia de extracción η_f .

$$T_c = T_r * \eta_f [t] \Rightarrow T_c = H_c * U_o * D_m * R_{Ef} * Q_b * G * R_m * \eta_f [t] \quad 6.6$$

Un aumento de la OEE, derivado de los parámetros U_o , D_m , R_{Ef} o R_m , generará una mayor producción de toneladas de cátodos de cobre T_{Mc} .

$$T_{Mc} = Q_b * H_c * \left((U_o + \Delta U_o) * (D_m + \Delta D_m) * (R_{Ef} + \Delta R_{Ef}) \right) G * (R_m + \Delta R_m) * \eta_f [t] \quad 6.7$$

Este aumento en la producción de cátodos de cobre, al multiplicarse por el precio de venta del cobre y descontar el costo por tonelada producida, permite estimar la utilidad neta del caso de negocio.

$$Utilidad\ neta \equiv (T_{Mc} - T_c) [t] * 2204,6 \left[\frac{lb}{t} \right] * \left(Precio\ Cu \left[\frac{USD}{lb} \right] - Costo\ producción \left[\frac{USD}{lb} \right] \right) \quad 6.8$$

H_c	: Horas calendario del período analizado [h].
H_p	: Horas no destinadas a producción (feriados, vacaciones colectivas, turnos no asignados) [h].
H_{dam}	: Horas de detenciones de mantenimiento (planificadas y no planificadas) [h].
H_{do}	: Horas de detenciones operacionales (aseos, esperas de alimentación, muestreos, fallas de operación) [h].
H_c	: Horas operativas reales, después de descontar detenciones de.
D_m	: Disponibilidad ofrecida por mantenimiento (proporción de horas hábiles de los equipos respecto a horas calendario).
U_o	: Utilización ofrecida por operaciones (proporción de horas realmente usadas para producir respecto a horas disponibles).
D_{OEE}	: Disponibilidad OEE, resultado de combinar disponibilidad de mantenimiento y utilización de operaciones (%).
Q_r	: Tasa de alimentación real [t/h].
Q_B	: Tasa de alimentación presupuestada (Budget) [t/h].
R_{Ef}	: Rendimiento efectivo, razón entre la tasa real y la tasa presupuestada.
$D_{OEE} * R_{Ef} = OEE$: OEE tradicional Eficacia Global de los Equipos [%].
R_{mB}	: Recuperación metalúrgica presupuestada (Budget) [%].
R_{mr}	: Recuperación metalúrgica real [%].
K_{Rm}	: Calidad asociada a la recuperación metalúrgica [%].
OEE	: OEE Eficacia Global del proceso [%].
T_a	: Toneladas alimentadas al sistema [t].
T_r	: Toneladas recuperadas de cobre [t].
T_c	: Toneladas de cobre producidas en forma de cátodos [t].
T_{Mc}	: Toneladas de cátodos proyectadas tras la mejora [t].
G	: Ley de cabeza del mineral (proporción de Cu en el mineral alimentado).
η_f	: Eficiencia extracción
$Precio\ Cu$: Precio de venta del cobre [USD/lb].
$Costo\ producción$: Costo por libra de cobre producida [USD/lb].
2204,6	2204,6: Factor de conversión de toneladas métricas (t) a libras (lb).

6.1.2.2. Declaración del problema

Desde el año 2022, la planta Franke ha tenido dificultades para cumplir los KPI de disponibilidad OEE, rendimiento y calidad, entendida esta última como la recuperación metalúrgica. Las principales causas son fallas recurrentes, condiciones operacionales deficientes y estrategias de mantenimiento poco efectivas en equipos que operan desde 2009 sin mejoras, overhaul ni upgrade, lo que ha generado una pérdida progresiva de confiabilidad. A esto se suman la baja utilización de horas disponibles, alimentaciones discontinuas al chancado primario y la pérdida de control del P_{80} , con impacto negativo en la recuperación. Como resultado, no se ha logrado alcanzar el OEE presupuestado, cuyos valores de los últimos 36 meses se presentan en la Tabla 9, lo que ha reducido de manera significativa la utilidad neta del negocio (EBITDA).

Tabla 1. Tabla OEE real y ajustado al beneficio alimentación planta.

OEE _r últimos 36 meses												
Real	Beneficio 36 meses	Dm	Uo	DOEE	Qr	QB	Ref.	OEEt	Rmr	RmB	Krm	OEE
		%	%	%	t/h	t/h	%	%	%	%	%	%
Prim	10.656.611	90,0%	72,8%	65,6%	618,1	600	103,0%	67,6%	60,9%	70%	87,1%	58,9%
Fin	10.094.826	89,3%	84,2%	75,2%	510,5	600	85,1%	64,0%	60,9%	70%	87,1%	55,7%
Aglo	11.100.291	88,2%	78,6%	69,4%	608,5	600	101,4%	70,4%	60,9%	70%	87,1%	61,3%
OEE _A ajustado a la alimentación de la planta (10.656.611 t en 36 meses).												
Prim	10.656.611	90,0%	72,8%	65,6%	618,1	600	103,0%	67,6%	60,9%	70%	87,1%	58,9%
Fin	10.656.611	89,3%	84,2%	75,2%	537,2	600	89,5%	67,4%	60,9%	70%	87,1%	58,7%
Aglo	10.656.611	88,2%	78,6%	69,4%	582,5	600	97,1%	67,4%	60,9%	70%	87,1%	58,7%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke y Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Bases de datos y documentos internos no publicados. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.1.2.3. Declaración de metas

El análisis de este proyecto tiene como fin implementar mejoras que permitan alcanzar un OEE superior al 75 % y una recuperación metalúrgica mínima del 68 % en un año, metas definidas por la organización minera como parte de sus objetivos estratégicos para elevar la eficiencia y la rentabilidad. Para ello se optimizará el control del P_{80} , mejorando la granulometría del producto del chancado, lo que impacta directamente en los procesos de aglomerado y lixiviación, favoreciendo la disolución de cobre, incrementando la eficiencia de extracción y logrando la recuperación proyectada. En este contexto, las metas esperadas (Tabla 10) corresponden a un OEE objetivo de 78,60 % para los tres circuitos (primario, fino y aglomerado) y una recuperación estimada ≥ 68 %.

Tabla 20. Metas esperadas para OEE.

OEE meta proyecto										
Real	Dm	Um	DOEE	Qr.	QB	Ref.	Rmr.	RmB.	Krm	OEE _m
OEE Prim	93,00%	87,00%	80,91%	600	600	100,00%	68,00%	70,00%	97,14%	78,60%
OEE Fin	93,00%	87,00%	80,91%	600	600	100,00%	68,00%	70,00%	97,14%	78,60%
OEE Aglo	93,00%	87,00%	80,91%	600	600	100,00%	68,00%	70,00%	97,14%	78,60%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke y Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Bases de datos y documentos internos no publicados. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.1.2.4. Alcance

El proyecto se desarrollará en las áreas de Chancado Primario y Fino, donde se centrará el análisis técnico y operativo, considerando Aglomerado y Apilado solo como contexto general a partir de algunos indicadores; su ejecución estará a cargo de un equipo multidisciplinario de Metalurgia, Operaciones, Mantenimiento e Ingeniería de Planta, integrando diversas perspectivas para el diagnóstico y las propuestas de mejora.

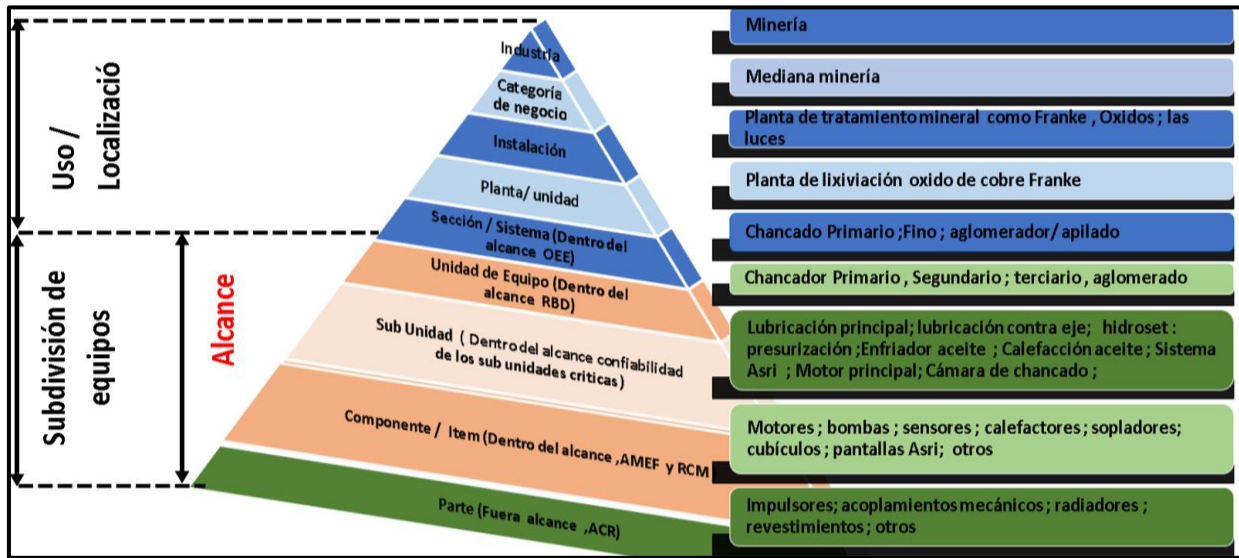
Quedan fuera del alcance:

- El circuito húmedo (lixiviación, SX, patio estanque y EW).
- La extracción y transporte de mineral desde las minas, salvo lo vinculado a la alimentación de la tolva y sus detenciones asociadas.

Marco de referencia según:

- La “Minera Las Cenizas” corresponde a minería mediana en Chile, con 8 instalaciones (3 plantas y 5 yacimientos).
- El estudio se centra en la Planta Franke, específicamente en el área seca de chancado grueso y fino.
- Se evaluarán KPIs de disponibilidad, tasa de falla, MTTR y MTBF en chancadores, harneros, correas y equipos asociados, aplicando metodología RAM para modelar los circuitos y estimar el costo del ciclo de vida.
- A nivel de subunidades críticas (ej. sistemas de lubricación, enfriamiento, ajuste de setting), se aplicará modelamiento RAM y análisis de fallas.
- En los componentes (ej. motor, bomba, intercambiador), se aplicarán herramientas como AMEF y RCM.
- En el nivel más específico de partes (eje, rodamiento, estator, rotor), se realizará Análisis de Causa Raíz (ACR).

Figura 6. Integrantes equipo mejora continua.



Fuente: Elaboración propia (2025).

6.1.2.5. Integrales de los equipos

Tabla 11. Integrantes equipo mejora continua.

Diciplina	Cargo
Metalurgia	Jefe área Metalurgia
Metalurgia	Metalurgita senior
Mantenimiento	Jefe área mantenimiento
Mantenimiento	Supervisor Predictivo
Operaciones	Jefe área operaciones
Operaciones	Jefe turno operaciones
Ing. Planta	ITO Ing. Planta

Fuente: Elaboración propia (2025).

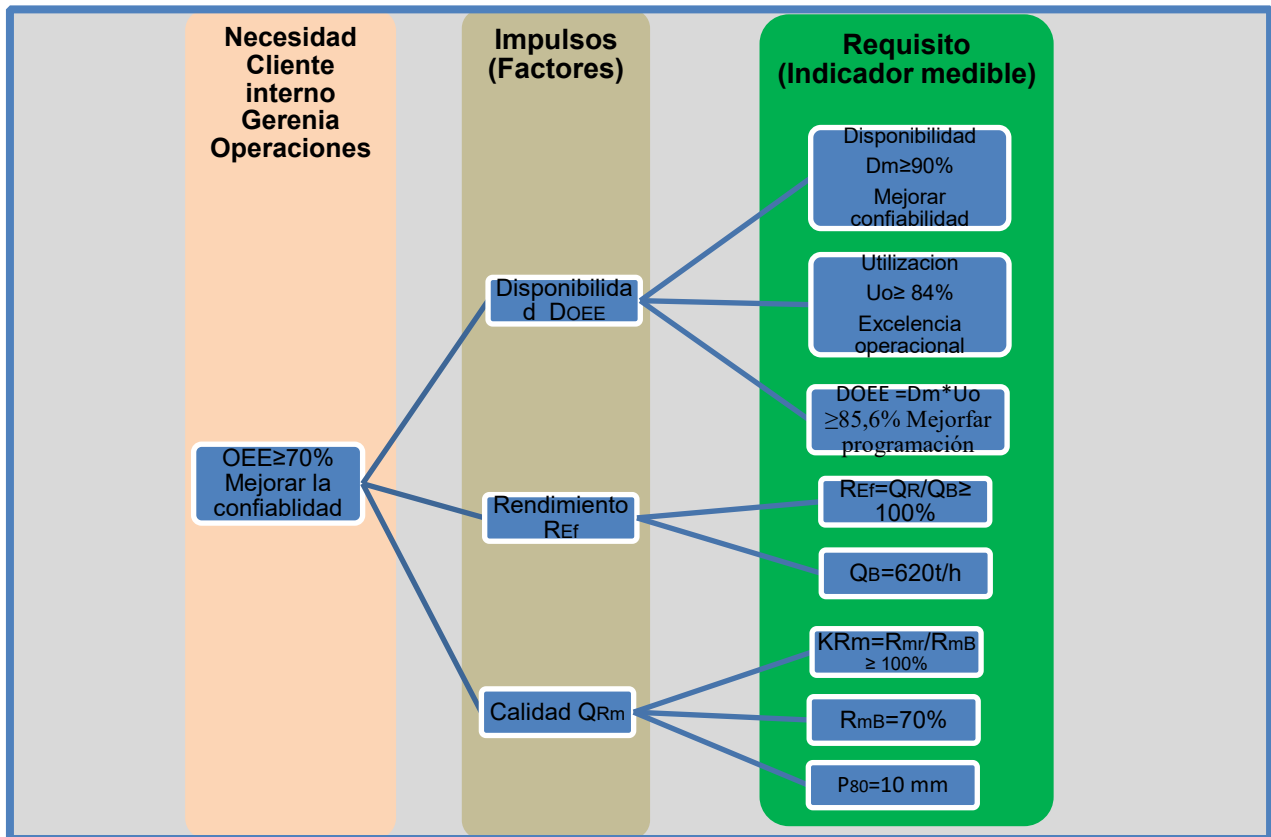
6.1.3. Características críticas de calidad CTQ

Las Características Críticas de Calidad (CTQ) son los atributos del proceso que inciden directamente en los objetivos estratégicos del negocio y, en la planta Franke, se alinean con la meta definida por la Gerencia de Operaciones de alcanzar un OEE $\geq 70\%$, indicador que depende de tres variables principales: la Disponibilidad (D_{OEE}), el Rendimiento efectivo (Ref.) y la Calidad vinculada a la recuperación metalúrgica (QRm), cada una influida por diversos factores operacionales.

$$OEE = f(D_{OEE}, R_{Ef}, K_{Rm})$$

El árbol de calidad del CTQ de este proyecto se observa en la figura 7 donde se indica otra

Figura 7. Árbol de calidad del CTQ.



Fuente: Elaboración propia (2025).

La recuperación metalúrgica R_m se considera también una variable crítica y dependiente, altamente influenciada por la calidad del producto del chancado, específicamente por la granulometría P_{80}

Desde el punto de vista metalúrgico, el P_{80} es una variable independiente que puede ser modificada a través del rediseño de circuitos, la selección de equipos o ajustes operativos. Su control impacta directamente en la eficiencia de los procesos posteriores (aglomerado y lixiviación), afectando la capacidad de recuperación del cobre disuelto. Excelencia operacional

$$R_m = f(P_{80})$$

6.1.4. Vínculo con la estrategia de la compañía

El proyecto se alinea con la visión de largo plazo del Grupo Minero Las Cenizas, orientada al aumento de producción de cobre fino y la consolidación de sus operaciones. La mejora del OEE y de la recuperación metalúrgica en el chancado de Faena Franke maximiza el uso de los activos existentes, elevando la eficiencia sin requerir grandes inversiones en infraestructura.

Desde la estrategia corporativa, la iniciativa permite:

- Cumplir metas de producción optimizando equipos críticos.

- Asegurar continuidad operacional reduciendo fallas y cuellos de botella.
- Generar valor sostenible con mayor recuperación y mejor EBITDA.
- Impulsar la mejora continua con DMAIC y PDCA.
- Proteger activos y seguridad mediante análisis RAM y gestión proactiva.

La optimización del P_{80} refuerza además los compromisos ESG, al mejorar la eficiencia en el uso del mineral y reducir impactos ambientales. En conjunto, el proyecto se presenta como una solución técnica y estratégica que agrega valor a la compañía, sus trabajadores y comunidades, en línea con una minería sustentable y responsable.

6.1.5. Vínculo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU.

El presente proyecto, orientado a mejorar la eficiencia operativa y la recuperación metalúrgica en el chancado de Faena Franke, se alinea con los principios de sostenibilidad de la ONU y contribuye a los ODS:

- ODS 9: optimiza la infraestructura existente mediante DMAIC, análisis de confiabilidad e innovación en procesos.
- ODS 12: incrementa el OEE y la recuperación, maximizando el uso del mineral y apoyando la eficiencia energética del SGE, en concordancia con la Ley N° 21.305.
- ODS 8: refuerza la seguridad laboral y eleva la productividad al reducir fallas y aumentar la confiabilidad.
- ODS 13: disminuye la intensidad energética por tonelada producida, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono.

6.1.6. Diagrama Flujo

A continuación, se describen los diagramas de flujo de las áreas Chancado primario, chancado fino y aglomerado / apilado.

6.1.6.1. Diagramas de flujo Chancado

La Figura 8 muestra un diagrama de flujo con los equipos instalados en el circuito de chancado de la Planta Franke.

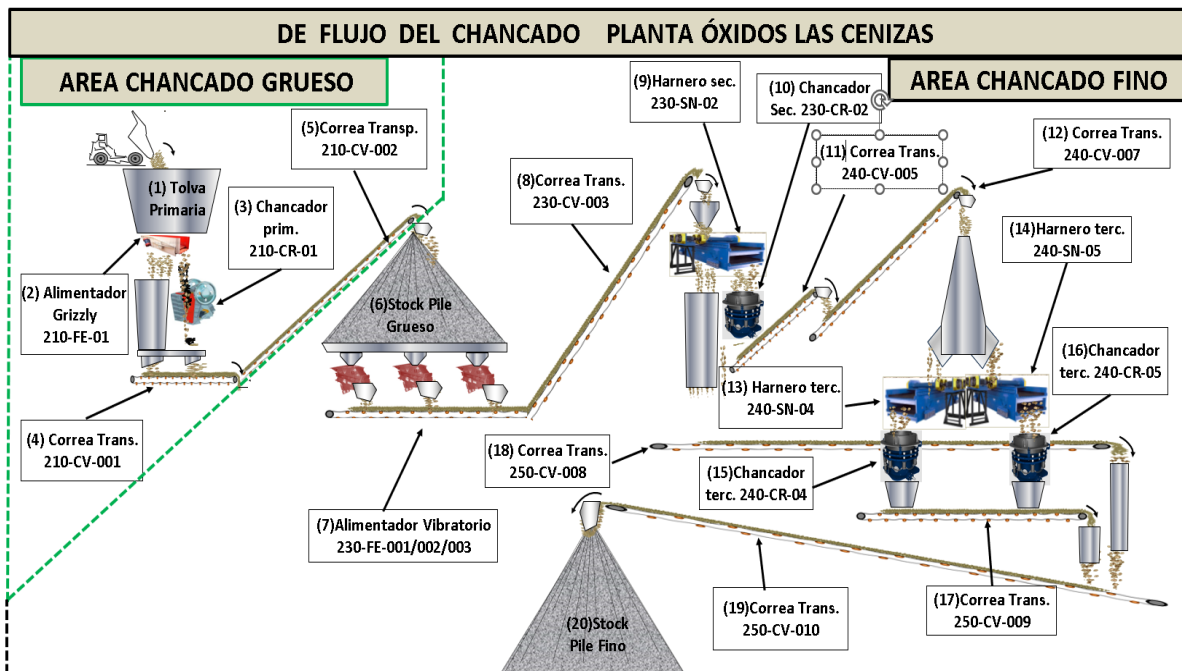
6.1.6.1.1. Chancado grueso:

Es un circuito de chancado abierto con clasificación mediante alimentador Grizzly, compuesto por la tolva primaria (1) de 120 t, que descarga sobre el alimentador vibratorio (2) VGF 56"x26" LIPPMAN. El bajo tamaño pasa por la parrilla de 5", clasificando el mineral al 100 % <5", mientras que el sobre tamaño es alimentado al chancador primario (3) de mandíbula LIPPMAN 50"x62", que con CSS 5" procesa hasta 600 t/h, reduciendo el mineral a 100 % <5". Tanto el bajo tamaño como el producto del chancador primario descargan en la correa 210-CV-001 (4) de 756 t/h, que alimenta la 220-CV-002 (5) también de 756 t/h, conduciendo finalmente al stock pile del grupo (6) con capacidad de 11.000 t vivas.

6.1.6.1.2. Chancado fino:

Dentro del túnel del stock pile grueso (6) existen tres alimentadores vibratorios (7) SP 750 Sandvik, con capacidad máxima de 400 t/h, que descargan sobre la correa 230-CV-003 (8) de 586 t/h. Esta correa alimenta al harnero secundario (9) M1100-F TYCAN 8'x20', con dos deck de 45 y 20 mm y capacidad de 580 t/h. El harnero descarga el sobre tamaño al chancador secundario 230-CR-02 (10) Raptor XL440 FLSMIDTH, con CSS 34 mm, ECC 34 mm y cámara EC, procesando un máximo de 290 t/h, mientras que el bajo tamaño es transportado por la correa 250-CV-008 (18) de 164 t/h. El chancador secundario descarga sobre la correa 240-CV-005 (11) de 239 t/h, que alimenta a la correa 240-CV-007 (12) también de 239 t/h, conduciendo finalmente a la tolva terciaria de 5.500 t. Esta tolva alimenta dos harneros terciarios (13,14) M990-T TYCAN 6'x20', con deck de 22 y 13 mm y capacidad de 257 t/h; el sobre tamaño se descarga en los chancadores terciarios 230-CR-02 (15,16) Raptor XL440 FLSMIDTH, con CSS 10 mm, ECC 34 mm y cámara EC, procesando hasta 290 t/h, mientras que el bajo tamaño retorna a la correa 250-CV-008 (18) de 164 t/h. Los chancadores terciarios descargan sobre la correa 250-CT-009 (17) de 445 t/h, y finalmente las correas 250-CT-008 (18) y 250-CT-009 (17) descargan en la correa 250-CT-010 (19) con capacidad de 586 t/h, que alimenta el stock pile del grupo (20) de 5.500 t.

Figura 8. Circuito chancado primario y secundario Planta óxido minera las Cenizas.



Fuente: Elaboración propia (2025).

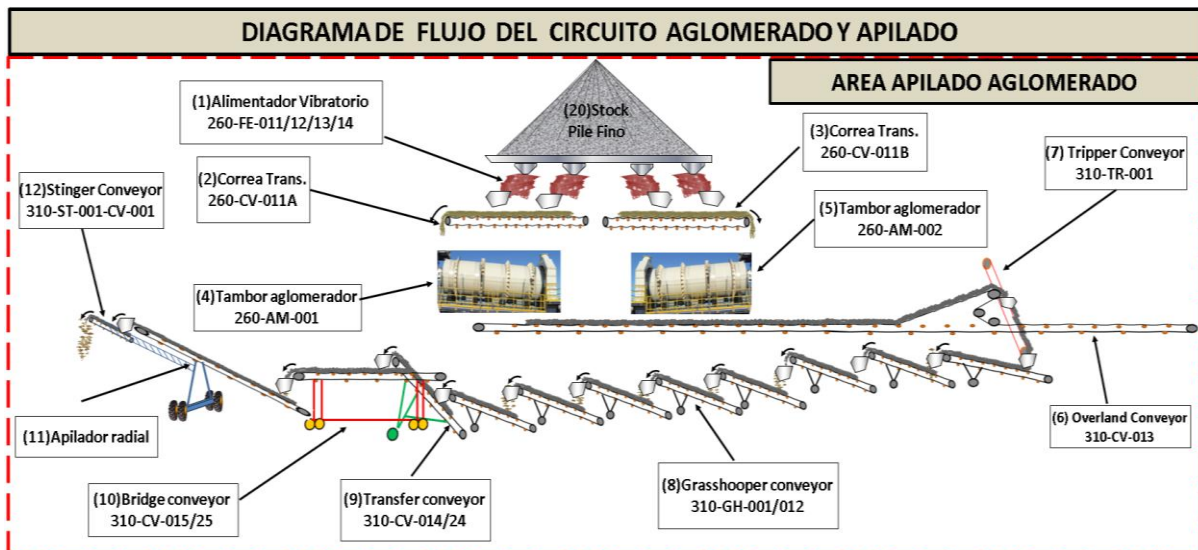
6.1.6.2. Diagramas de flujo Aglomerado Apilado

La Figura 9 muestra un diagrama de flujo que ilustra los equipos instalados en el circuito de aglomerado apilado de la Planta Franke."

Dentro del túnel del stock pile fino existen cuatro alimentadores vibratorios (1) SP 750 Sandvik, con una capacidad máxima de 400 t/h, que descargan sobre las correas 260-CV-011A (02) y 260-CV-011B (2, 3), con una capacidad de diseño de 292 t/h. Estas correas alimentan los tambores aglomeradores 260-AM-001/2 (4, 5), con un diámetro de 20” y una longitud de 49”, cuya capacidad de diseño es de 400 t/h. Los tambores descargan sobre la correa Overland 260-CV-013 (6), con una capacidad de 696 t/h y un largo de 886 metros, que alimenta el área de apilado a través de un equipo tripper 310-TR-001 que se desplaza sobre la correa overland y descarga el mineral mediante la correa Cross tripper 310-TR-001-CV-001 (6) al resto del circuito.

El mineral descargado de la correa 310-TR-001-CV-001 (6) alimenta un circuito dinámico compuesto por hasta 12 “correas Grasshopper” 310-GH-001/012 (02), que a su vez alimentan un sistema compuesto por una “correa de transferencia” 310-CV-014/024 (02) (un stand by), “una correa puente” 310-CV-015/025 (02) (un stand by) y un Apilador Radial 310-ST-002 (02) (un stand by). Este sistema permite cargar los módulos a una capacidad máxima de 696 t/h. Las correas “GrassHopper” 310-GH-001/012 se instalan a lo largo de toda la franja y se retiran a medida que se va cargando dicha franja. Los equipos “apilador radial”, “correa puente” y “correa de transferencia” se trasladan conforme se va completando la franja, y solo se cambian de posición una vez que la franja está completamente cargada.

Figura 9. Circuito aglomerado y apilado Planta Franke minera las Cenizas.



Fuente: Elaboración propia (2025).

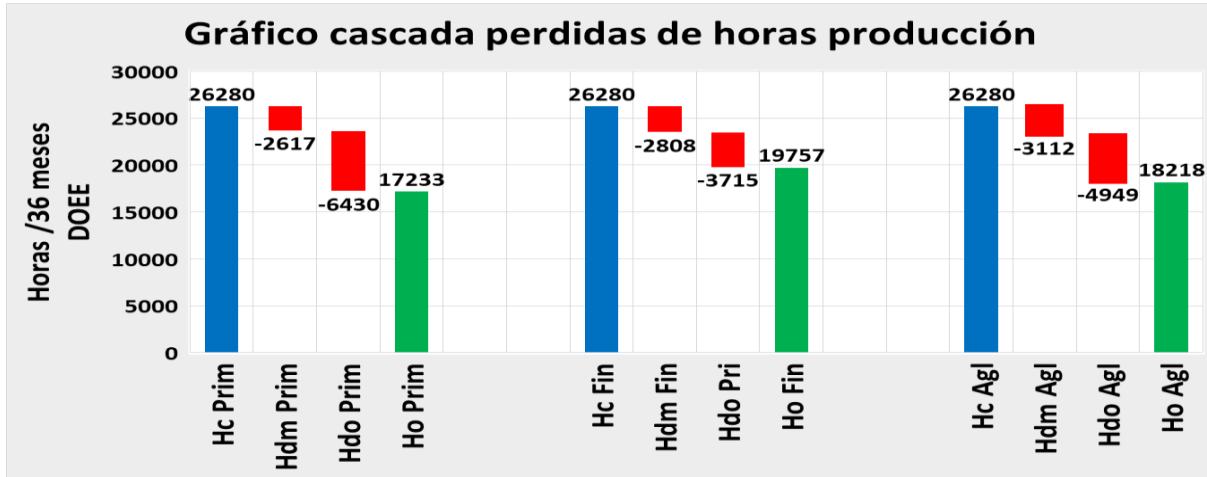
6.2. Medir

6.2.1. Análisis general de datos operacionales por indicadores de desempeño

El análisis, basado en la Tabla 12 de indicadores operacionales de chancado–aglomerado, consolida los valores mensuales de D_m , U_o , $DOEE$, R_{Ef} KRM y OEE global. La comparación de $DOEE$ y Ref. muestra que, aunque los tres circuitos procesan el mismo tonelaje ajustado,

lo hacen con mecanismos distintos: el Primario compensa con mayor rendimiento, el Fino con mayor utilización y el Aglomerado con un equilibrio relativo. Bajo este escenario, la restricción de capacidad se concentra en el chancado Fino, pues su bajo rendimiento efectivo obliga a operar más horas para lograr el mismo throughput, confirmando su rol de cuello de botella en la cadena productiva.

Figura 10. Gráfico cascada pérdidas horas producción Primario, Fino y Aglomerado.



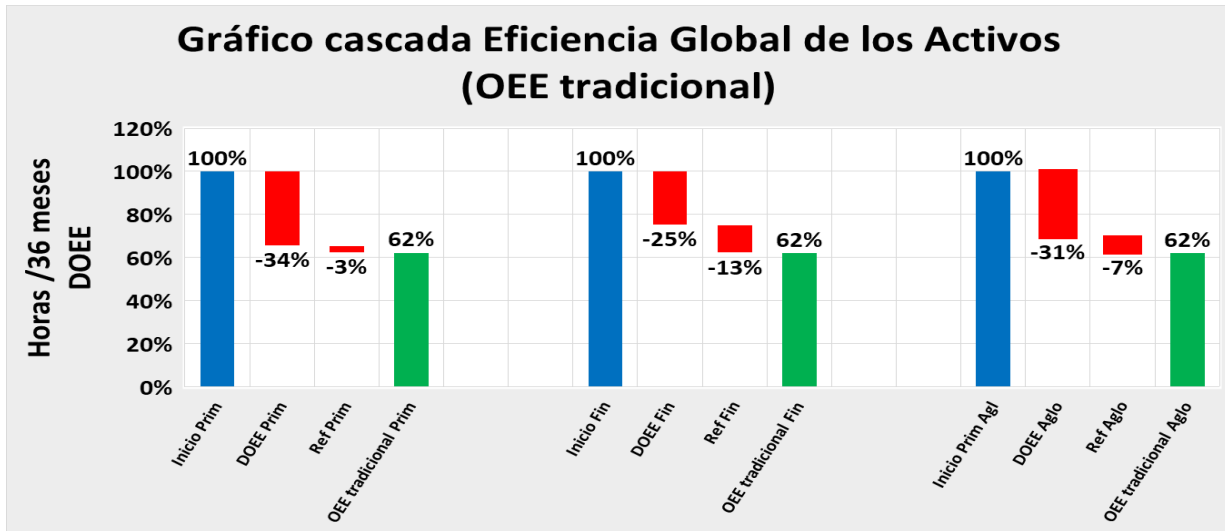
Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

La Figura 10 muestra cómo, partiendo de las horas de calendario (H_c), las pérdidas asociadas a mantenimiento (H_{dm}) y a detenciones operacionales (H_{do}) reducen la capacidad disponible hasta obtener las horas operativas (H_o). El análisis evidencia que, si bien todos los circuitos presentan pérdidas relevantes, el chancado fino registra las menores pérdidas por detenciones operacionales, manteniendo así el mayor DOEE dentro del conjunto analizado.

Esto refleja, en apariencia, una mejor gestión operativa y continuidad de proceso, en contraste con las áreas de chancado primario y aglomerado, donde las detenciones por mantenimiento y operación tienen un impacto más significativo sobre la capacidad efectiva.

No obstante, como se analizará más adelante, el mayor DOEE del circuito Fino se explica principalmente por su bajo rendimiento efectivo, lo que obliga a mantenerlo operando durante más horas para alcanzar los mismos niveles de beneficio diario y mensual que los demás circuitos. En consecuencia, su alta utilización compensa parcialmente su limitada eficiencia, reafirmando la necesidad de priorizar su repotenciación técnica. Por otra parte, el menor DOEE observado en el chancado primario se asocia a una baja utilización operacional provocada por restricciones en la alimentación de mineral proveniente desde las minas, mientras que en el aglomerado–apilado las pérdidas se relacionan con interrupciones operativas y limitaciones de disponibilidad de equipos de apilado, que reducen la continuidad del proceso aguas abajo.

Figura 11. Gráfico cascada Eficiencia Global de los Activos Primario, Fino y Aglomerado.



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

La Figura 11 incorpora el efecto del rendimiento efectivo (R_{Ef}) sobre la Eficiencia Global de los Activos (OEE tradicional). Se observa que, si bien el chancado fino alcanza un DOEE tradicional similar al de los otros circuitos ($\approx 62\%$), este resultado se logra a costa de un mayor número de horas operativas, destinadas a compensar su menor tasa de procesamiento. El bajo rendimiento efectivo del circuito fino, que reduce en torno a un 13% la eficiencia global, obliga a mantener una utilización más intensiva, lo que incrementa el consumo energético específico por tonelada tratada y acelera el desgaste de componentes críticos como el chancador secundario CR002, las correas CV003–CV005 y los harneros SN003–SN004. Esta condición confirma que el mayor DOEE observado en el diagnóstico previo no refleja una eficiencia superior, sino un mayor esfuerzo operativo para alcanzar un mismo nivel de producción, comprometiendo la sostenibilidad del sistema en el mediano plazo.

En síntesis, el OEE resultante converge en torno al 62% para los tres circuitos, evidenciando que la gestión conjunta de disponibilidad, rendimiento y calidad constituye un factor determinante para la mejora global del proceso.

El análisis de este punto se construye a partir de los datos consolidados en la Tabla 12. Indicadores operacionales de chancado aglomerado, que resume los valores mensuales de Disponibilidad ofrecida por mantenimiento, D_m Utilización ofrecida por operaciones (U_o), Disponibilidad $DOEE$, Rendimiento efectivo R_{Ef} , Calidad K_{Rm} y OEE global.

Tabla 12. Indicadores operacionales de chancado-aglomerado, Dm, Uo, DOEE, Ref. KRm y OEE global.

Fecha	Disponibilidad OEE									Rendimiento operacional						Calidad		OEE
	Dr Prim.	Ur Prim.	Dr*Ur Prim.	Dr Fin.	Ur Fin.	Dr*Ur Fin.	Dr Aglo.	Ur Aglo.	Dr*Ur Aglo.	Qr Prim	Refr Prim	Qr Fin	Refr Fin	Qr Aglo	Refr Aglo	% Rm	% Krm	
abr 2025	88,3%	71,5%	63,1%	82,9%	79,1%	65,6%	83,0%	78,3%	65,0%	571,8	95,3%	549,7	91,6%	555,3	95,3%	64,6%	92%	55,52%
mar 2025	82,0%	78,8%	64,6%	76,4%	85,0%	65,0%	86,4%	88,7%	76,6%	520,5	86,8%	517,4	86,2%	438,9	86,8%	65,1%	93%	52,14%
feb 2025	92,3%	74,4%	68,6%	90,0%	77,9%	70,1%	87,0%	76,1%	66,2%	573,1	95,5%	561,2	93,5%	594,5	95,5%	63,3%	90%	59,27%
ene 2025	88,1%	63,3%	55,8%	88,6%	81,8%	72,5%	87,1%	69,0%	60,1%	583,3	97,2%	449,0	74,8%	541,6	97,2%	63,1%	90%	48,90%
dic 2024	86,1%	80,3%	69,1%	84,9%	87,0%	73,8%	85,4%	75,7%	64,7%	554,4	92,4%	518,7	86,4%	592,1	92,4%	62,7%	90%	57,13%
nov 2024	88,8%	73,6%	65,3%	91,3%	86,9%	79,3%	91,0%	76,4%	69,6%	575,9	96,0%	474,6	79,1%	541,0	96,0%	63,4%	91%	56,79%
oct 2024	88,8%	71,2%	63,2%	83,0%	88,6%	73,5%	88,6%	75,2%	66,7%	603,7	100,6%	519,3	86,6%	572,5	100,6%	62,4%	89%	56,67%
sept 2024	93,3%	74,8%	69,8%	89,2%	89,2%	79,5%	86,9%	83,6%	72,7%	630,0	105,0%	552,9	92,2%	605,0	105,0%	51,2%	73%	53,58%
ago 2024	90,0%	67,8%	61,0%	89,4%	89,2%	79,7%	85,9%	75,3%	64,7%	617,5	102,9%	472,7	78,8%	582,6	102,9%	57,2%	82%	51,32%
jul 2024	88,8%	65,6%	58,2%	87,5%	80,7%	70,7%	84,5%	73,7%	62,3%	614,8	102,5%	506,7	84,4%	574,4	102,5%	58,8%	84%	50,10%
jun 2024	89,6%	65,4%	58,6%	90,1%	84,3%	76,0%	88,4%	76,3%	67,4%	627,5	104,6%	483,8	80,6%	545,3	104,6%	61,3%	88%	53,62%
may 2024	90,0%	68,9%	62,0%	87,5%	87,7%	76,8%	82,0%	84,7%	69,5%	652,4	108,7%	527,2	87,9%	582,5	108,7%	64,9%	93%	62,59%
abr 2024	95,6%	66,4%	63,5%	91,9%	83,9%	77,1%	84,6%	79,0%	66,8%	627,3	104,5%	516,3	86,0%	595,6	104,5%	61,4%	88%	58,17%
mar 2024	89,9%	71,9%	64,7%	91,0%	85,4%	77,8%	87,7%	83,9%	73,6%	614,8	102,5%	511,5	85,2%	540,4	102,5%	66,3%	95%	62,80%
feb 2024	87,1%	76,2%	66,3%	88,1%	84,1%	74,0%	82,0%	85,2%	69,8%	641,5	106,9%	574,9	95,8%	609,2	106,9%	64,0%	91%	64,80%
ene 2024	91,0%	76,8%	69,9%	92,8%	87,2%	80,9%	89,0%	85,2%	75,9%	665,0	110,8%	574,7	95,8%	612,7	110,8%	59,6%	85%	65,92%
dic 2023	89,0%	78,3%	69,7%	89,4%	87,5%	78,2%	89,5%	87,5%	78,3%	697,0	116,2%	620,8	103,5%	620,0	116,2%	58,2%	83%	67,35%
nov 2023	92,9%	78,6%	73,0%	90,2%	90,0%	81,2%	91,5%	84,0%	76,9%	633,0	105,5%	569,5	94,9%	601,4	105,5%	60,0%	86%	66,04%
oct 2023	92,9%	78,2%	72,7%	90,2%	89,0%	80,2%	93,6%	83,8%	78,4%	672,8	112,1%	609,3	101,5%	623,8	112,1%	61,4%	88%	71,42%
sept 2023	95,1%	77,1%	73,3%	95,1%	90,7%	86,2%	91,9%	86,5%	79,5%	633,2	105,5%	538,0	89,7%	583,3	105,5%	60,8%	87%	67,21%
ago 2023	90,8%	75,6%	68,7%	91,8%	89,5%	82,2%	91,0%	82,4%	74,9%	635,4	105,9%	530,8	88,5%	582,3	105,9%	63,5%	91%	65,96%
jul 2023	89,3%	80,1%	71,5%	91,2%	88,6%	80,7%	91,5%	82,6%	75,5%	646,4	107,7%	572,8	95,5%	612,3	107,7%	64,2%	92%	70,72%
jun 2023	89,4%	77,8%	69,5%	88,9%	86,2%	76,6%	89,3%	82,7%	73,9%	591,8	98,6%	537,0	89,5%	556,8	98,6%	62,5%	89%	61,22%
may 2023	80,1%	74,6%	59,8%	77,2%	81,5%	62,9%	84,3%	75,2%	63,4%	531,5	88,6%	504,9	84,2%	500,9	88,6%	67,8%	97%	51,29%
abr 2023	87,2%	72,0%	62,8%	90,6%	88,5%	80,2%	87,9%	82,6%	72,6%	575,4	95,9%	450,3	75,0%	497,5	95,9%	66,0%	94%	56,73%
mar 2023	90,3%	76,0%	68,7%	93,1%	86,9%	81,0%	93,4%	78,0%	72,9%	670,7	111,8%	569,0	94,8%	632,3	111,8%	65,4%	93%	71,72%
feb 2023	93,1%	76,9%	71,6%	93,4%	89,2%	83,3%	91,3%	79,7%	72,8%	566,1	94,3%	486,6	81,1%	557,0	94,3%	60,4%	86%	58,31%
ene 2023	89,0%	79,4%	70,6%	89,9%	88,1%	79,1%	91,0%	82,9%	75,4%	660,7	110,1%	589,7	98,3%	618,8	110,1%	62,8%	90%	69,81%
dic 2022	86,3%	77,5%	66,9%	92,2%	83,8%	77,3%	91,3%	77,5%	70,8%	654,4	109,1%	565,9	94,3%	618,2	109,1%	62,7%	90%	65,29%
nov 2022	95,5%	72,6%	69,4%	91,6%	83,9%	76,8%	91,9%	79,1%	72,6%	640,6	106,8%	578,5	96,4%	611,8	106,8%	60,6%	87%	64,12%
oct 2022	93,9%	80,4%	75,5%	90,6%	89,5%	81,1%	93,3%	81,0%	75,6%	638,2	106,4%	594,3	99,1%	637,2	106,4%	54,5%	78%	62,54%
sept 2022	94,3%	74,6%	70,4%	93,3%	80,3%	74,9%	82,4%	81,9%	67,5%	624,2	104,0%	586,3	97,7%	650,4	104,0%	61,6%	88%	64,46%
ago 2022	94,3%	78,1%	73,7%	92,7%	87,5%	81,1%	92,2%	79,5%	73,3%	678,8	113,1%	616,7	102,8%	682,6	113,1%	49,0%	70%	58,37%
jul 2022	94,8%	67,3%	63,8%	92,7%	79,3%	73,5%	88,9%	73,0%	64,9%	648,2	108,0%	562,7	93,8%	636,8	108,0%	53,8%	77%	53,00%
jun 2022	92,0%	58,0%	53,4%	92,0%	65,9%	60,6%	89,5%	60,0%	53,7%	572,7	95,5%	504,3	84,1%	569,3	95,5%	46,3%	66%	33,74%
may 2022	81,5%	41,7%	34,0%	84,7%	46,3%	39,2%	78,4%	44,5%	34,9%	508,3	84,7%	441,2	73,5%	495,6	84,7%	63,3%	90%	26,05%
Promedio	90,0%	72,8%	65,6%	89,3%	84,2%	75,2%	88,2%	78,6%	69,4%	615,4	102,6%	537,2	89,5%	582,5	102,6%	60,9%	87,1%	58,7%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke y Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Bases de datos y documentos internos no publicados. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.2. Análisis de variabilidad de indicadores de desempeño.

La Tabla 13 resume los parámetros estadísticos de control (media, desviación estándar, rango móvil promedio y límites de control) de los principales indicadores del sistema chancado-aglomerado, permitiendo evaluar la tendencia central y la estabilidad de cada KPI en sus valores mensuales y su variabilidad entre periodos.

Tabla 13. Parámetros estadísticos de control.

Indicador	Desviación								
	Media	estándar	MR Prom.	UCL-I	CL-I	LCL-I	UCL-MR	CL-MR	LCL-MR
Dr Primario	90,04%	3,80%	3,48%	99,31%	90,04%	80,78%	11,39%	3,48%	0,00%
Dr Fino	89,31%	4,17%	3,67%	99,08%	89,31%	79,55%	12,00%	3,67%	0,00%
Dr Aglomerado	88,16%	3,74%	3,16%	96,56%	88,16%	79,76%	10,32%	3,16%	0,00%
Ur Primario	72,83%	7,57%	4,66%	85,23%	72,83%	60,42%	15,24%	4,66%	0,00%
Ur Fino	84,17%	8,07%	4,12%	95,14%	84,17%	73,21%	13,47%	4,12%	0,00%
Ur Aglomerado	78,64%	8,10%	4,71%	91,16%	78,64%	66,11%	15,39%	4,71%	0,00%
DOEE Primario ($D_m * U_o$)	65,63%	7,59%	4,70%	78,13%	65,63%	53,13%	15,36%	4,70%	0,00%
DOEE Fino ($D_m * U_o$)	75,25%	8,47%	5,00%	88,55%	75,25%	61,94%	16,35%	5,00%	0,00%
DOEE Aglo. ($D_m * U_o$)	69,43%	8,27%	5,17%	83,19%	69,43%	55,67%	16,90%	5,17%	0,00%
Refr Primario	94,70%	7,10%	5,60%	109,40%	94,70%	79,90%	18,10%	5,60%	0,00%
Refr Fino	82,60%	7,40%	7,00%	101,20%	82,60%	64,10%	22,80%	7,00%	0,00%
Refr Aglomerado	89,60%	7,60%	6,60%	107,20%	89,60%	72,10%	21,50%	6,60%	0,00%
$DOEE * RE_{f_r} = OEE_t$	62,4%	10,0%	6,76%	80,41%	62,43%	44,45%	22,09%	6,76%	0,00%
Calidad (%KR _m)	87,06%	5,20%	6,84%	100,89%	87,06%	73,24%	16,99%	5,20%	0,00%
OEE Global	54,22%	5,05%	8,86%	67,66%	54,22%	40,79%	16,51%	5,05%	0,00%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke y Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Bases de datos y documentos internos no publicados. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.2.1. Aplicación de los gráficos I-MR

Dado que los datos se registran mensualmente y de manera individual (sin subgrupos), se aplicaron gráficos I-MR para monitorear el comportamiento de cada indicador.

- **Gráfico I (Individuales):** Rastrea la tendencia central de cada indicador y detecta desviaciones o cambios abruptos; por ejemplo, en la Utilización del Primario se observan caídas en junio 2024 y enero 2025 por restricciones operativas puntuales.
- **Gráfico MR (Rango Móvil):** Mide la variabilidad entre meses, mostrando estabilidad en Disponibilidad, pero alta dispersión en Utilización y OEE Global, lo que refleja su sensibilidad a las condiciones operativas y de coordinación.
- **Uso conjunto (I-MR):** complementa el análisis al integrar tendencia central y variabilidad.
 - Disponibilidad (Dr): Estable y controlada.
 - Utilización (Ur): variable, dependiente de la carga y la programación operacional.
 - DOEE: Sensible a cambios en disponibilidad y utilización.
 - RE_{f_r} : Estable en el Primario, con mayor dispersión en el Fino.
 - KR_m : Estable en promedio, con episodios de caída crítica.
 - OEE Global: Refleja la acumulación de pérdidas, siendo el indicador de menor estabilidad.

Con este análisis, los gráficos I-MR refuerzan las conclusiones de la Tabla 13: el Fino es la restricción actual del sistema, el Aglomerado se perfila como la siguiente, y la Calidad (KR_m)

es el factor decisivo en la brecha entre el throughput ajustado y el OEE global.

6.2.2.2. Interpretación de puntos fuera de control en gráficos I-MR

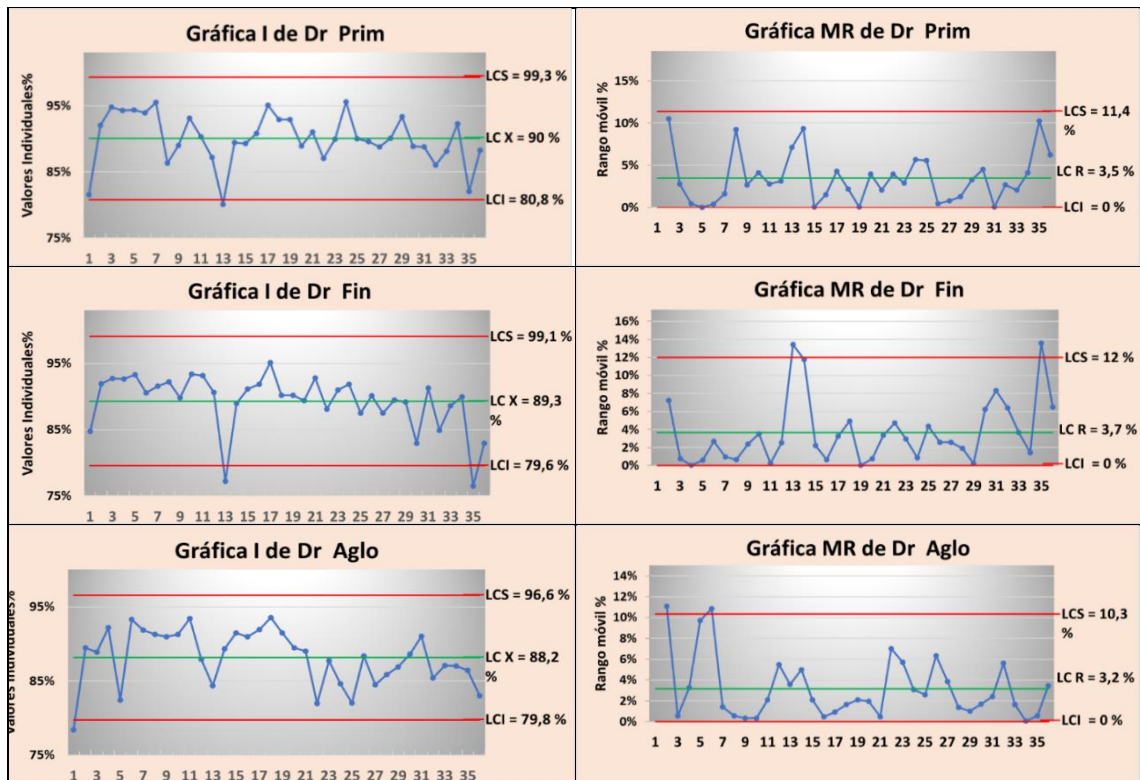
El análisis de los gráficos I-MR complementa la Tabla 13 al mostrar la dinámica mensual. En el gráfico I, los puntos fuera de los límites de control marcan meses críticos: bajo el LCL reflejan caídas severas (ej. Utilización del Primario en junio 2024 y enero 2025) y sobre el UCL, sobrecarga o eficiencia puntual. En el MR, la mayoría de los puntos está bajo la media, lo que indica estabilidad, aunque los que la superan ampliamente revelan cambios abruptos (principalmente en Utilización y OEE Global), actuando como alertas tempranas. En conjunto, los resultados muestran que, si bien la disponibilidad es estable, la principal vulnerabilidad está en la variabilidad de la utilización y su impacto en el OEE.

6.2.2.3. Análisis por KPI

Disponibilidad (*Dr*) gráficos I-MR. Figura 12.

- Los tres circuitos muestran promedios similares en torno al 88–90%, con desviaciones estándar bajas (3,7–4,2%), lo que refleja estabilidad relativa.
- La mayor dispersión se observa en el Fino ($\sigma = 4,2\%$), lo que indica sensibilidad a detenciones no planificadas o variaciones en programación.
- Los límites de control estrechos confirman que, salvo eventos excepcionales, la disponibilidad es consistente en el sistema.

Figura 12. Disponibilidad (*Dr*) gráficos I-MR



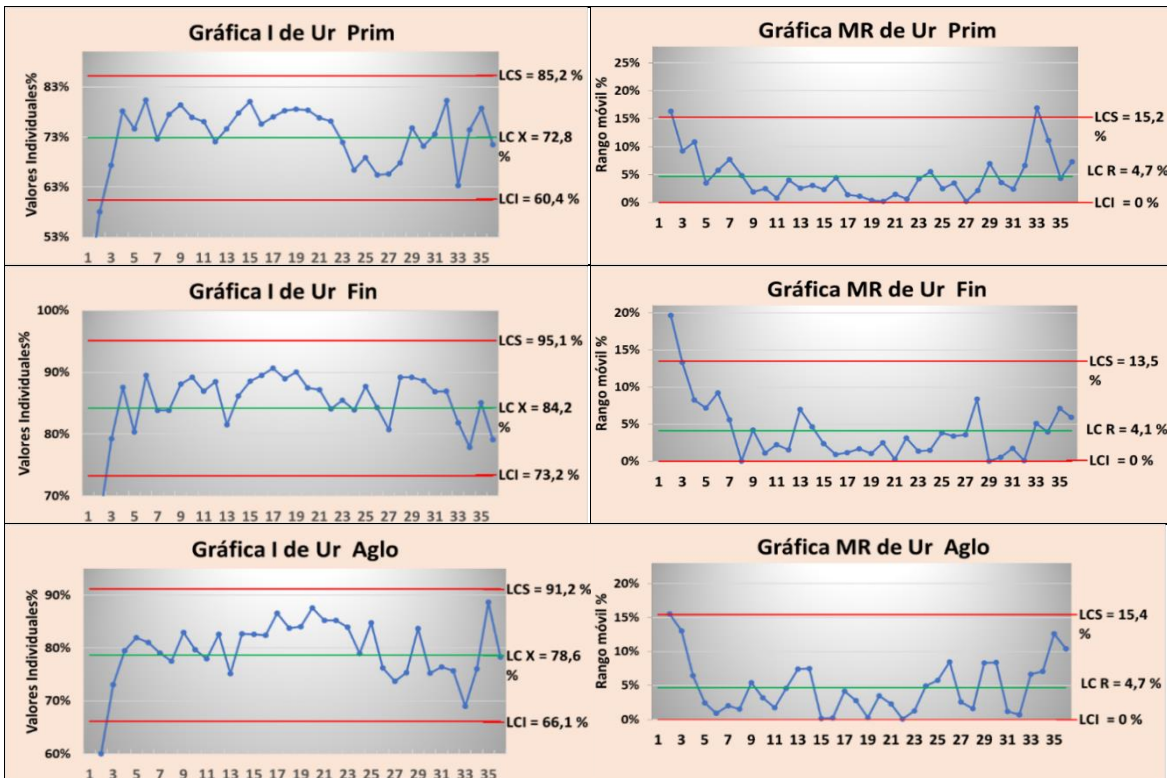
Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Utilización (Ur) gráficos I-MR Figura 13.

- La utilización es el indicador con mayor variabilidad relativa (σ entre 7,6% y 8,1%).
- Primario: Menor promedio (72,8%) y mayor inestabilidad ($\sigma = 7,6\%$), condicionado por alimentación de mina y programación de mantenimientos mayores.
- Fino: Lidera en utilización (84,2%), actuando como un “pulmón operativo”: opera más horas para compensar su bajo rendimiento efectivo ($RE_f = 82,6\%$). Esto asegura throughput, pero implica sobrecarga operacional, desgaste acelerado y mayores costos de mantenimiento.
- Aglomerado: Intermedio (78,6%), con variabilidad moderada. Es previsible que, al liberar al Fino, absorba más carga y se transforme en la siguiente restricción.

En conjunto: el Fino no lidera por eficiencia intrínseca, sino por necesidad operativa, extendiendo horas para suplir sus limitaciones de capacidad.

Figura 13. Utilización (Ur) gráficos I-MR.



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

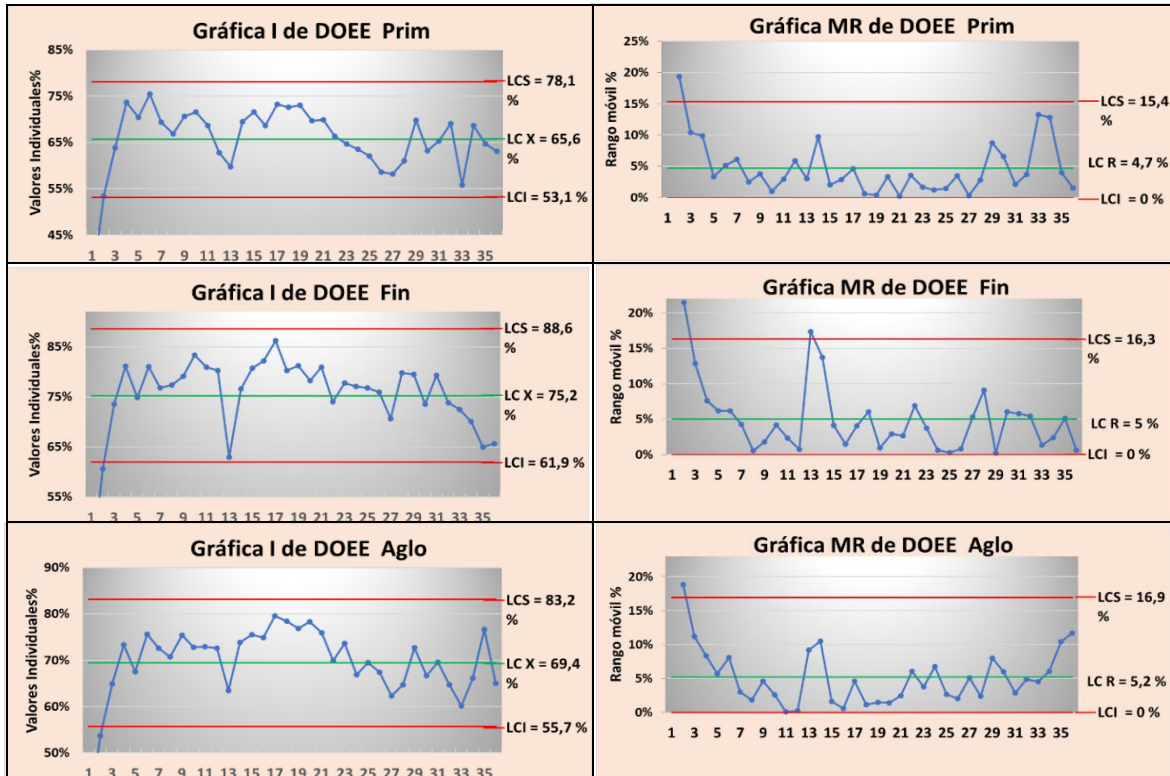
Disponibilidad OEE ($DOEE = D_m * U_o$) gráficos I-MR Figura 14.

- Primario: Menor valor (65,6%), reflejando alta disponibilidad, pero baja utilización.
- Fino: Lidera (75,3%), sosteniendo la operación del sistema a costa de más horas efectivas.
- Aglomerado: Intermedio (69,4%), pero con riesgo de transformarse en la siguiente

restricción.

Los LCL entre 53–56% advierten que, en meses desfavorables, la efectividad puede caer a niveles críticos de sustentabilidad operacional.

Figura 14. Disponibilidad OEE (DOEE = $Dr-Ur$) gráficos I-MR

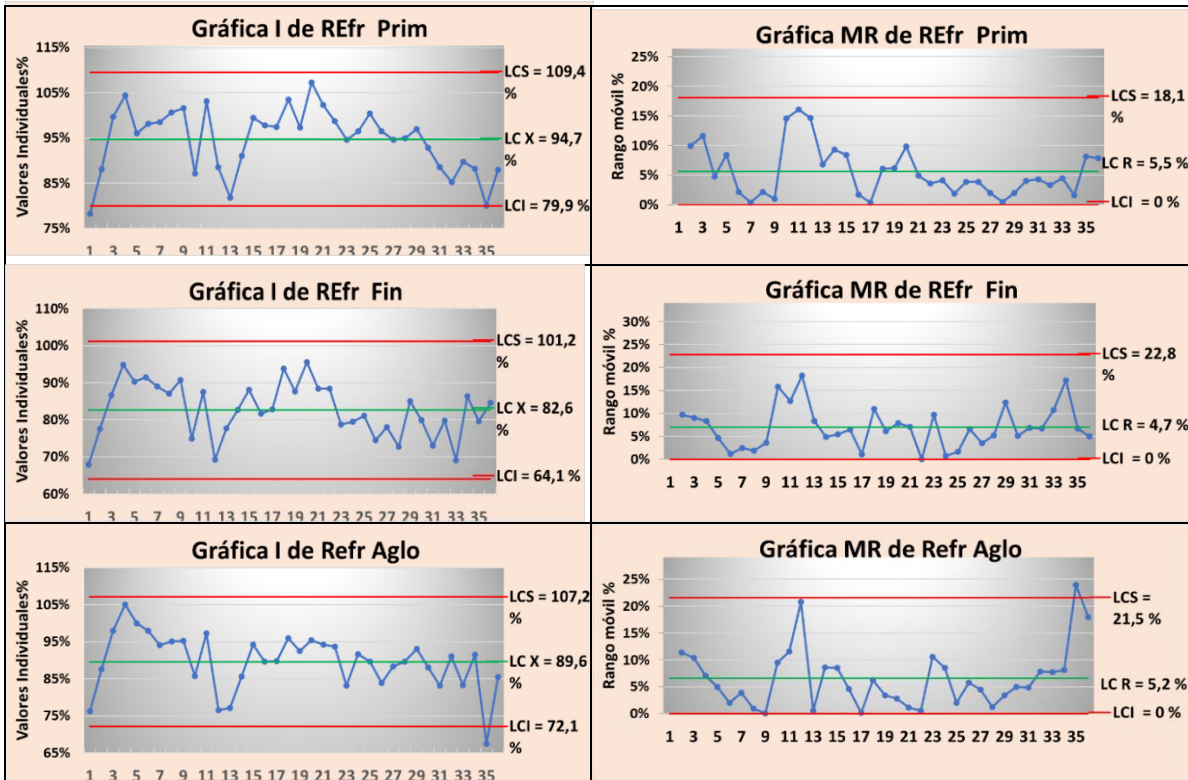


Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Rendimiento efectivo (RE_f) gráficos I-MR Figura 15.

- Primario: mejor desempeño (94,7%) con baja dispersión ($\sigma = 7,1\%$), confirmando que no es restricción inmediata.
- Fino: peor rendimiento (82,6%) con alta variabilidad ($\sigma = 7,4\%$), evidenciando su condición de cuello de botella. Su inestabilidad se asocia a granulometría, recirculación y paradas por sobrecarga.
- Aglomerado: intermedio (89,6%, $\sigma = 7,6\%$), relativamente estable, pero próximo a transformarse en limitante una vez liberado el Fino.

Figura 15. Rendimiento efectivo (Ref.) gráficos I-MR



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

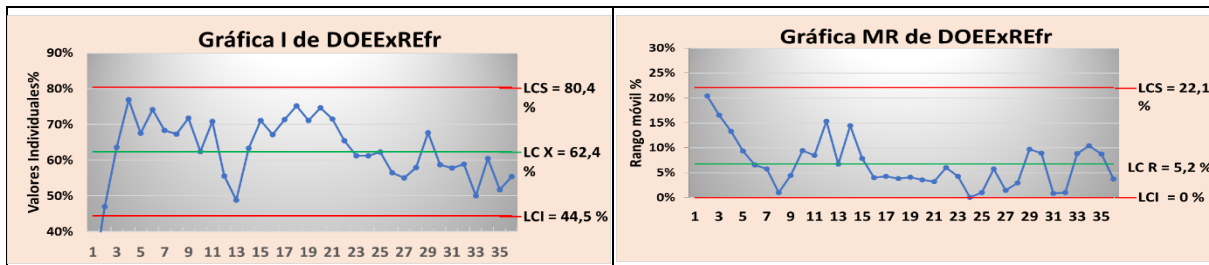
Producto $D_{OEE} \cdot RE_{fr} = OEE_t$ gráficos I-MR Figura 16.

El throughput, se mantiene estable, con una media de 62,4 % y límites de control entre 44,5 % y 80,4 %, sin evidencias de causas especiales de variación. Las gráficas I-MR confirman la estabilidad del proceso, con fluctuaciones móviles inferiores al 22,1 %.

- Primario: Compensa baja utilización con alto rendimiento.
- Fino: Compensa bajo rendimiento con mayor uso horario.
- Aglomerado: Intermedio, con riesgo de asumir la siguiente restricción.

Este comportamiento valida que la diferencia final del OEE global no proviene de la capacidad instalada, sino de la calidad metalúrgica KR_{mr} .

Figura 16. Producto $D_{OEE} \cdot RE_{fr}$. Ref. gráficos I-MR.



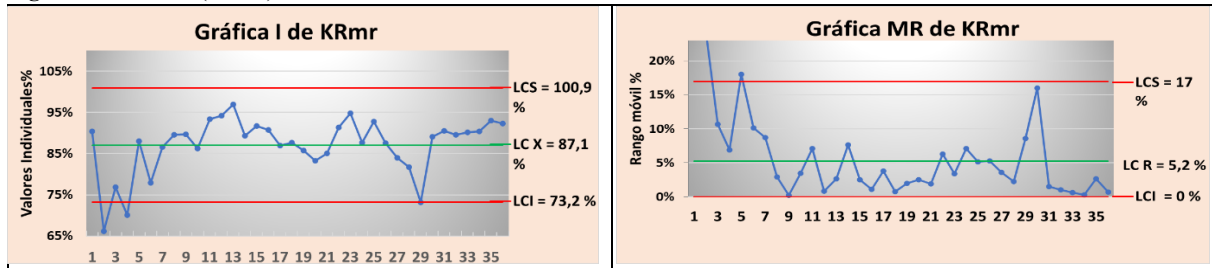
Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Calidad (KR_{mr}) gráficos I-MR Figura 17.

Promedio alto (87,1%) con variabilidad moderada ($\sigma = 5,2\%$).

- Al ser único para el sistema, explica la brecha entre $D_{OEE} \cdot RE_f$ y el OEE global.
- Su sensibilidad indica que pequeñas desviaciones en granulometría o P80 del Fino amplifican pérdidas aguas abajo.
- La mejor evaluación de este indicador se logra con estudios granulométricos y simulaciones con software especializado (ej. Sandvik PlantSim, Crusher Mapper), que permiten correlacionar CSS, recirculación y recuperación metalúrgica.

Figura 17. Calidad (KR_{mr}).



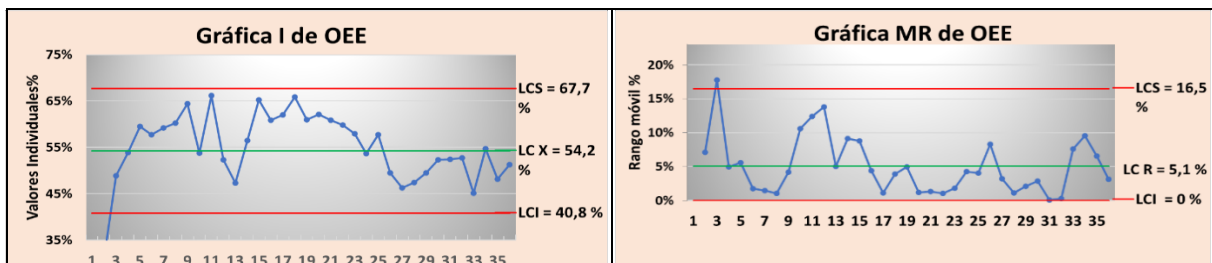
Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

OEE Global gráficos I-MR Figura 18.

- Promedio del sistema: 54,2%, con límites de control entre 40,8% y 67,7%, reflejando alta variabilidad.
- Representa la acumulación de todas las pérdidas (Disponibilidad, Utilización, Rendimiento y Calidad).
- La brecha frente al potencial (>80%) evidencia oportunidades de mejora en:
 - Confiabilidad de equipos críticos.
 - Coordinación operacional para reducir sobrecargas en Fino.
 - Control granulométrico y calidad de alimentación (CSS Primario, P80 Fino).

En síntesis, el OEE global refleja que el sistema está muy lejos de su potencial y requiere una estrategia integral: técnica (fiabilidad y rediseño de flujos), operacional (gestión de horas efectivas) y metalúrgica (optimización granulométrica).

Figura 18. OEE Global gráficos I-MR.



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke y Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Bases de datos y documentos internos no publicados. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.2.4. Síntesis Aplicación de los gráficos I-MR.

El análisis de variabilidad mediante gráficos I-MR permitió identificar las diferencias de estabilidad estadística entre los tres circuitos del proceso de conminución.

El chancado fino presentó el mayor promedio de rangos móviles (7,38 %) y el menor valor medio de rendimiento (82,6 %), frente al primario (94,7 %) y al aglomerado-apilado (89,6 %), evidenciando una alta dispersión y menor estabilidad operacional.

El rango de control equivalente a $\pm 3\sigma = 18,6\%$ confirma una fluctuación intermensual más amplia que la observada en el primario ($\pm 14,8\%$) y el aglomerado ($\pm 17,5\%$), validando la mayor variabilidad del Fino en el desempeño mensual.

En contraste, el indicador de utilización mostró un comportamiento inverso: el Fino registra el menor MR promedio (4,12 %) pero la mayor media (84,2 %), reflejando un uso intensivo y constante para compensar su menor eficiencia. Este patrón sugiere una exigencia operacional sostenida, con sobrecargas y recirculaciones que derivan en detenciones no planificadas y pérdida de continuidad.

En disponibilidad, las diferencias son menores —Primario = 90,0 %; Fino = 89,3 %; Aglomerado = 88,2 %—, con rangos de control de aproximadamente $\pm 3\sigma = 9\%$, lo que indica consistencia operativa similar entre las tres etapas. La calidad metalúrgica ($K_r R_m$) mantuvo una variabilidad moderada (media = 87,1 %; $\pm 3\sigma = 13,8\%$), permaneciendo dentro de los límites de control y confirmando estabilidad del proceso en este parámetro.

El OEE global mostró la media más baja (54,2 %) y el mayor MR promedio (8,86 %), con un rango de control de $\pm 3\sigma = 13,4\%$, lo que evidencia una alta dispersión acumulada y la influencia directa de las pérdidas de rendimiento y utilización del circuito Fino sobre el desempeño global.

Finalmente, la recuperación metalúrgica (R_{mr}) —fuertemente influenciada por la estabilidad del chancado fino— presentó fluctuaciones de 1,5 a 2 puntos porcentuales asociadas a la dispersión del rendimiento ($\pm 3\sigma = 18,6\%$). Esto demuestra que la estabilización del rendimiento del circuito Fino es la palanca principal de mejora simultánea del OEE y la recuperación metalúrgica global.

En conjunto, los gráficos I-MR permiten establecer que:

- El chancado fino concentra la mayor fuente de inestabilidad,
- El aglomerado-apilado opera con variabilidad media y tendencia a transformarse en la siguiente restricción, y
- El chancado primario mantiene la menor dispersión ($\sigma \approx 3,8\%$) y la mayor estabilidad.

Por tanto, la secuencia lógica de mejora por etapas debe seguir la ruta Fino → Aglomerado-Apilado → Primario, priorizando la reducción de la variabilidad del circuito fino como eje inicial del enfoque DMAIC, para luego reforzar la capacidad aguas abajo y consolidar el control estadístico del proceso completo.

6.2.2.5. Evaluación de la Capacidad y Calidad del Proceso

El análisis de capacidad se desarrolla mediante los índices Cp, Cpk, Pp y Ppk aplicados a los principales indicadores (Disponibilidad, Utilización, DOEE, Rendimiento, Calidad y OEE Global), diferenciando la variabilidad a corto plazo (σ corta, rangos móviles) y a largo plazo (σ larga, desviación estándar). Esto permite medir la capacidad teórica frente a los límites de especificación (LES y LEI), el alineamiento de la media y las brechas críticas donde la dispersión o el descentrado afectan calidad y confiabilidad. La Tabla 14 resume medias, desviaciones estándar e índices, constituyendo la base del análisis posterior para identificar brechas de capacidad y desalineamientos respecto a las metas.

Tabla 14. Indicadores operacionales con valores de media, desviaciones estándar (σ corta y σ larga) e índices Cp, Cpk, Pp y Ppk.

d2	1,128								
Indicador	Media	Desv.Std σ larga	Desv.Std σ corta	LES	LEI	Cp	Cpk	Pp	Ppk
Dr Primario	90,0%	3,48%	3,37%	93%	90,00%	0,162	0,005	0,132	0,004
Dr Fino	89,3%	3,67%	3,70%	93%	90,00%	0,154	-0,070	0,120	-0,055
Dr Aglomerado	88,2%	3,16%	3,32%	93%	90,00%	0,179	-0,219	0,134	-0,164
Ur Primario	72,8%	4,66%	6,71%	85%	80,00%	0,202	-0,578	0,110	-0,316
Ur Fino	84,2%	4,12%	7,15%	85%	80,00%	0,228	0,075	0,103	0,034
Ur Aglomerado	78,6%	4,71%	7,18%	85%	80,00%	0,200	-0,109	0,103	-0,056
DOEE Primario (Dr-Ur)	65,6%	4,70%	6,73%	80%	75,00%	0,200	-0,749	0,110	-0,412
DOEE Fino (Dr-Ur)	75,2%	5,00%	7,51%	80%	75,00%	0,188	0,018	0,098	0,010
DOEE Aglomerado (Dr-Ur)	69,4%	5,17%	7,33%	80%	75,00%	0,182	-0,405	0,101	-0,225
Refr Primario	94,7%	5,55%	6,27%	100%	95,00%	0,169	-0,022	0,118	-0,016
Refr Fino	82,6%	6,99%	6,55%	100%	95,00%	0,134	-0,665	0,113	-0,558
Refr Aglomerado	89,6%	6,59%	6,70%	100%	95,00%	0,143	-0,307	0,110	-0,237
DOEE-Refr	62,4%	6,76%	8,88%	80%	75,00%	0,139	-0,699	0,188	-0,594
Calidad (%KRm)	87,1%	5,20%	6,07%	100%	93,00%	0,253	-0,429	0,170	-0,289
OEE Global	54,2%	5,05%	7,85%	80%	70,00%	0,372	-1,174	0,083	-0,418

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

El análisis de capacidad y calidad del proceso demostró que los tres circuitos —Primario, Fino y Aglomerado— presentan una capacidad real insuficiente, con índices Cp, Cpk, Pp y Ppk muy por debajo del valor mínimo aceptable (≥ 1). Esto confirma una incapacidad estructural y alta variabilidad, asociada a la falta de control estadístico, desalineamientos operativos y condiciones irregulares de operación. En conjunto, la planta opera con una capacidad efectiva real del 54,2 %, muy por debajo del nivel de referencia del 70 %, evidenciando un desempeño inestable y una calidad inconsistente en la cadena de conminución, beneficio y aglomeración.

En el Primario, la disponibilidad muestra Cp y Pp entre 0,16 y 0,20, con Cpk cercano a cero, lo que refleja un proceso apenas capaz de cumplir las especificaciones mínimas. La utilización y el DOEE son críticos (Cpk $\approx -0,75$ y $-0,58$) debido a esperas de alimentación desde mina; sin embargo, podrían mejorar mediante una mejor planificación de reservas y coordinación con operaciones. El rendimiento efectivo (Ref. $\approx -0,02$) se mantiene en el límite y podría sostenerse sin requerir inversiones significativas.

En el Fino, la utilización es la única variable con desempeño aceptable ($C_p \approx 0,23$; $C_{pk} = 0,07$), alcanzando valores de 80–85 %, aunque con alta dispersión ($\sigma > 7$ %). El resto de los indicadores —especialmente Ref. $\approx -0,66$ — continúan siendo incapaces, demostrando que la variabilidad del proceso limita el logro del 95 % de rendimiento esperado. Este resultado confirma la necesidad de reforzar el control de granulometría, el circuito cerrado y la estabilidad de los equipos críticos.

En el Aglomerado, las brechas son mayores (C_p y $P_p \approx 0,18-0,20$; C_{pk} negativos), reflejando una fuerte desalineación respecto a las metas. El $DOEE \approx -0,40$ y el $R_{Ef} \approx -0,31$ se ven afectados por baja disponibilidad de stock fino, descartes del sistema GrassHopper y traslados de equipos. Estas condiciones pueden mitigarse con una mejor gestión operacional y mayor continuidad de alimentación desde el Fino.

En síntesis, ningún indicador supera C_p o $P_p \geq 0,5$, y los valores negativos de C_{pk}/P_{pk} confirman que el sistema en su conjunto no cumple con los requisitos de capacidad ni de calidad estadística. El OEE global (54,2 %), frente al 70 % de referencia, evidencia las brechas acumuladas de disponibilidad, utilización, rendimiento y calidad, representando una incapacidad sistemática del proceso. Este análisis no busca identificar restricciones físicas de capacidad, sino evaluar la calidad, estabilidad y control estadístico de los procesos, proporcionando una base técnica para orientar acciones de mejora enfocadas en reducir la dispersión, recentrar los indicadores y consolidar el control estadístico bajo el enfoque DMAIC–SPC, promoviendo la mejora continua y la confiabilidad operacional del sistema.

El detalle completo de los cálculos y valores se presenta en la Tabla 15 y 16.

Tabla 15. Resumen de índices de capacidad por área (Primario, Fino y Aglomerado).

Área / Indicador	C_p	P_p	Clasificación (Tabla 6)	C_{pk}	P_{pk}	Clasificación (Tabla 7)	Interpretación final
Dr Primario	0,16	0,13	No adecuado	0,005	0,004	Incapaz	Proceso sin capacidad; la media apenas toca el límite inferior.
Ur Primario	0,2	0,11	No adecuado	-0,578	-0,316	Incapaz crítico	La media está por debajo del LEI; incapaz en corto y largo plazo.
DOEE Primario	0,2	0,11	No adecuado	-0,749	-0,412	Incapaz crítico	Incapacidad severa; el promedio está fuera del rango permitido.
Refr Primario	0,17	0,12	No adecuado	-0,022	-0,016	Incapaz crítico	Proceso crítico, la media apenas alcanza el límite inferior.
Dr Fino	0,15	0,12	No adecuado	-0,070	-0,055	Incapaz crítico	Incapaz; la media se encuentra por debajo del LEI.
Ur Fino	0,23	0,1	No adecuado	0,075	0,034	Incapaz	Media cumple con la meta, pero la variabilidad es demasiado alta.
DOEE Fino	0,19	0,1	No adecuado	0,018	0,01	Incapaz	Proceso incapaz; media justo en el umbral inferior.
Refr Fino	0,13	0,11	No adecuado	-0,665	-0,558	Incapaz crítico	Muy incapaz; media muy por debajo del LEI de 95%.

Dr Aglomerado	0,18	0,13	No adecuado	-0,219	-0,164	Incapaz crítico	Proceso incapaz; promedio no alcanza especificación mínima.
Ur Aglomerado	0,2	0,1	No adecuado	-0,109	-0,056	Incapaz crítico	Media desplazada bajo el LEI, incapacidad estructural.
DOEE Aglomerado	0,18	0,1	No adecuado	-0,405	-0,225	Incapaz crítico	Proceso muy incapaz; media fuera de rango y alta dispersión.
Refr Aglomerado	0,14	0,11	No adecuado	-0,307	-0,237	Incapaz crítico	Proceso incapaz; promedio muy por debajo de 95% exigido.

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 16. Resumen de índices de capacidad globales (DOEE-Refr, Calidad y OEE Global).

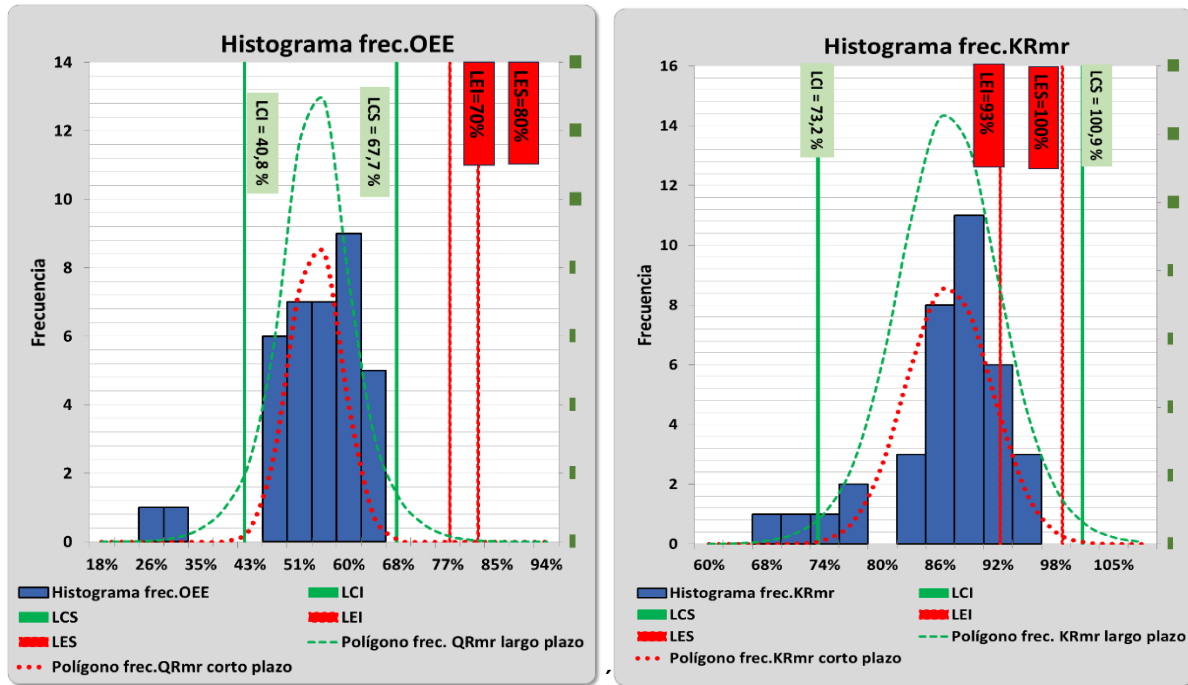
Indicador	Cp	Pp	Clasificación (Tabla 6)	Cpk	Ppk	Clasificación (Tabla 7)	Interpretación final
DOEE-Refr=OEEt	0,14	0,19	No adecuado	-0,699	-0,594	Incapaz crítico	Proceso incapaz crítico; tanto la media como la dispersión lo alejan de la meta (75-80%).
Calidad (%KRm)	0,25	0,17	No adecuado	-0,429	-0,289	Incapaz crítico	La media (87,1%) está por debajo del LEI=93%; incapaz crítico, aunque con menor dispersión que otros indicadores.
OEE Global	0,37	0,08	No adecuado	-1,174	-0,418	Incapaz crítico	Es el indicador más crítico; la media (54,2%) está muy por debajo del LEI=70%, reflejando incapacidad sistemática.

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke y Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Bases de datos y documentos internos no publicados. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.2.6. Aplicación gráficos de capacidad.

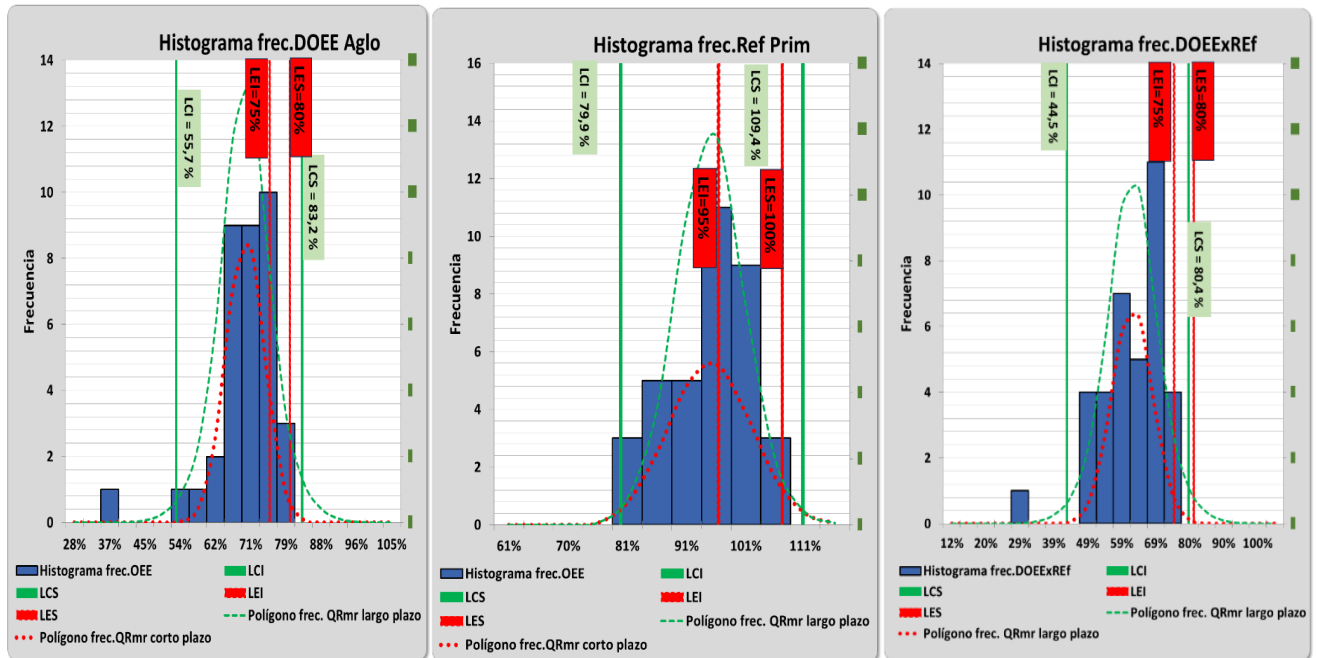
Los cinco gráficos de capacidad complementan las tablas al mostrar la relación entre distribuciones y límites de especificación, figura 19 y 20. Se evidencia un desalineamiento severo en el OEE Global, mientras que DOEE Fino y Aglomerado muestran medias bajas y fuera de rango. En Recuperación Fino, la media alejada de la meta anula la capacidad, y en Calidad (%KRm), aunque la dispersión es menor, el promedio sigue bajo lo aceptable. Estos gráficos permiten interpretar con claridad el centrado, la dispersión y comunicar mejor los resultados.

Figura 19. Histograma de capacidad.



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke y Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Bases de datos y documentos internos no publicados. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 20. Histograma de capacidad.



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke y Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Bases de datos y documentos internos no publicados. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.3. Medición de parámetros granulométricos y metalúrgicos – análisis integrado

La disminución del tamaño de partícula en chancado constituye un factor crítico para el desempeño hidrometalúrgico de los minerales oxidados de cobre. El parámetro P80, definido como la abertura de malla por la cual pasa el 80 % del material, incide de manera directa en tres variables fundamentales: la cinética de disolución, el consumo de ácido y la recuperación metalúrgica. Cuanto más fino es el P80, mayor es la superficie específica de contacto, lo que se traduce en una extracción más rápida de cobre, una utilización más eficiente de los reactivos y, en consecuencia, un mejor desempeño económico de la planta. Este efecto, sin embargo, solo es sostenible si la reducción granulométrica no compromete la capacidad instalada ni la estabilidad operacional del circuito de chancado. (Sandvik Mining and Rock Solutions, 2024).

Durante 2024 se llevaron a cabo ajustes menores en los harneros terciarios, consistentes principalmente en la optimización de mallas y parámetros de operación. Dichos cambios lograron mejorar parcialmente la eficiencia de clasificación y contribuyeron a acercarse al P80 a los valores objetivo. No obstante, no fue posible alcanzar un $P80 \leq 10$ mm manteniendo simultáneamente la tasa nominal de 650 tph. El análisis operacional permitió concluir que la limitación estructural no radicaba exclusivamente en la etapa de clasificación, sino también en la capacidad de reducción de los chancadores secundarios y terciarios, lo que obliga a considerar un rediseño más profundo del circuito secundario–terciario. (Sandvik Mining and Rock Solutions, 2024).

En paralelo, la Superintendencia de Procesos ejecutó un programa de pruebas de lixiviación en columnas con muestras de Aguilucho, Barreal Seco y Altamira, sometidas a granulometrías controladas de $P80 = 9, 11$ y 13 m.m. Los resultados completos se presentan en el Informe Anexo 1, mientras que en el cuerpo del presente documento se destaca el caso de Barreal Seco (Figura 21), por ser el mineral con mejor desempeño metalúrgico. En este caso, se obtuvo una recuperación de cobre soluble cercana al 72 % con $P80 = 9$ mm, lo que evidencia el beneficio directo de operar con granulometrías más finas. Como referencia comparativa, Aguilucho alcanzó una recuperación de ≈ 67 % y Altamira de ≈ 60 % bajo las mismas condiciones experimentales. Esta diferencia confirma la ventaja relativa de Barreal Seco, no solo por su mejor cinética de disolución y menor consumo ácido, sino también por la existencia de reservas que aseguran un comportamiento estable en el tiempo. (Minera Las Cenizas, 2025).

Complementariamente, la simulación del circuito realizada por Sandvik (Figura 22) permitió dimensionar el efecto de las aberturas de malla, el CSS y la capacidad de reducción en el P80 final. A partir de la granulometría del stockpile se estimó un $P80 \approx 12$ mm en la condición base (Tabla 17), lo que limita la recuperación global de la planta a un rango de 63–65 %. Esta cifra representa entre 5 y 7 puntos porcentuales menos que lo obtenido en las pruebas a 9 mm, configurándose como una brecha significativa desde el punto de vista metalúrgico y económico. (Sandvik Mining and Rock Solutions, 2024).

En síntesis, la integración de resultados de planta, pruebas metalúrgicas y modelamiento

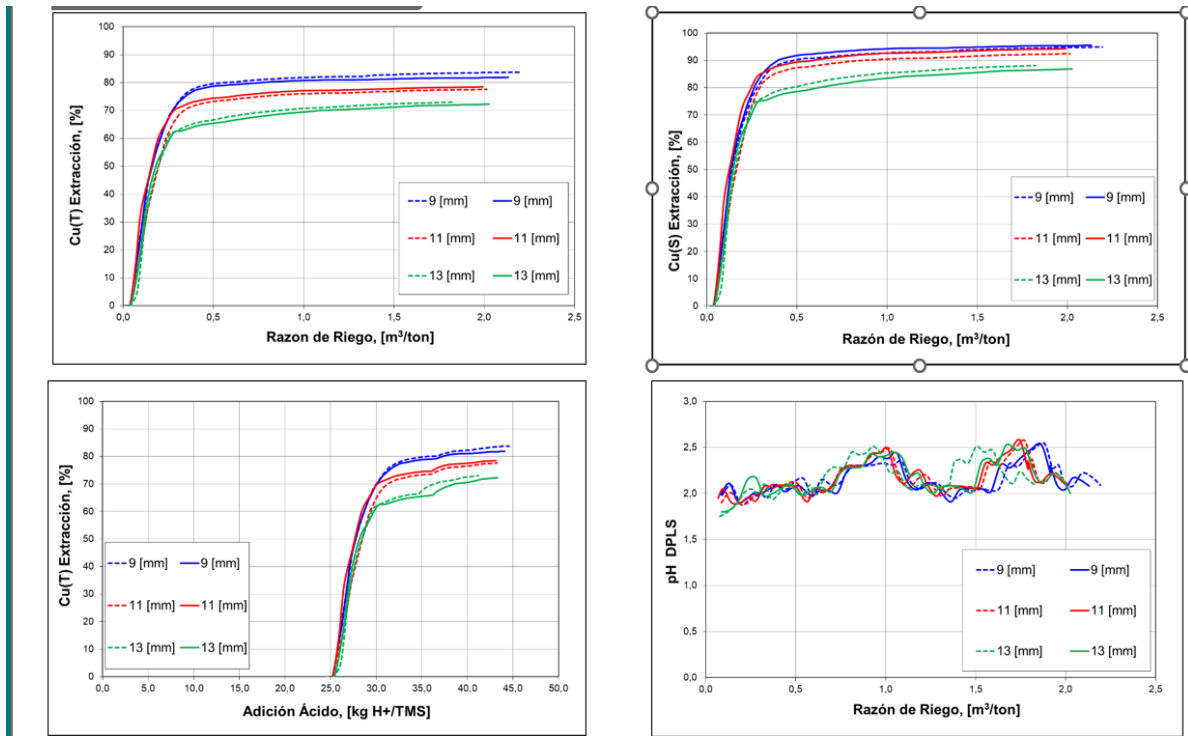
confirma que alcanzar un P80 de 9–9,5 mm constituye la palanca más efectiva para elevar la recuperación de cobre soluble a un rango de 65–70 %, con valores máximos cercanos al 72 % en Barreal Seco. Este control granulométrico, además de optimizar la cinética de disolución y el uso de ácido, permite establecer un estándar operativo sustentable, siempre que se acompañe de ajustes estructurales en CSS, configuración de cámaras y capacidad de reducción de los chancadores. (Sandvik Mining and Rock Solutions, 2024).

Tabla 17. Resultados de pruebas de lixiviación en columnas: recuperación de cobre soluble (CuS %) según P80 y tipo de mineral

Mineral	P80 (mm)	Recuperación CuS %	Comentario (ES)
Aguilucho	9	~67 %	Cinética intermedia, sensible a adición de ácido
Aguilucho	11	~63 %	Caída moderada de recuperación
Aguilucho	13	~59 %	Recuperación más baja con partículas gruesas
Barreal Seco	9	~72 %	Mejor cinética, bajo consumo ácido
Barreal Seco	11	~68 %	Recuperación estable, ligera caída
Barreal Seco	13	~64 %	Aún buena recuperación, pero menor que en 9 mm
Altamira	9	~60 %	Cinética lenta, alto consumo ácido
Altamira	11	~56 %	Baja recuperación relativa
Altamira	13	~52 %	Muy baja recuperación, elevado consumo de ácido

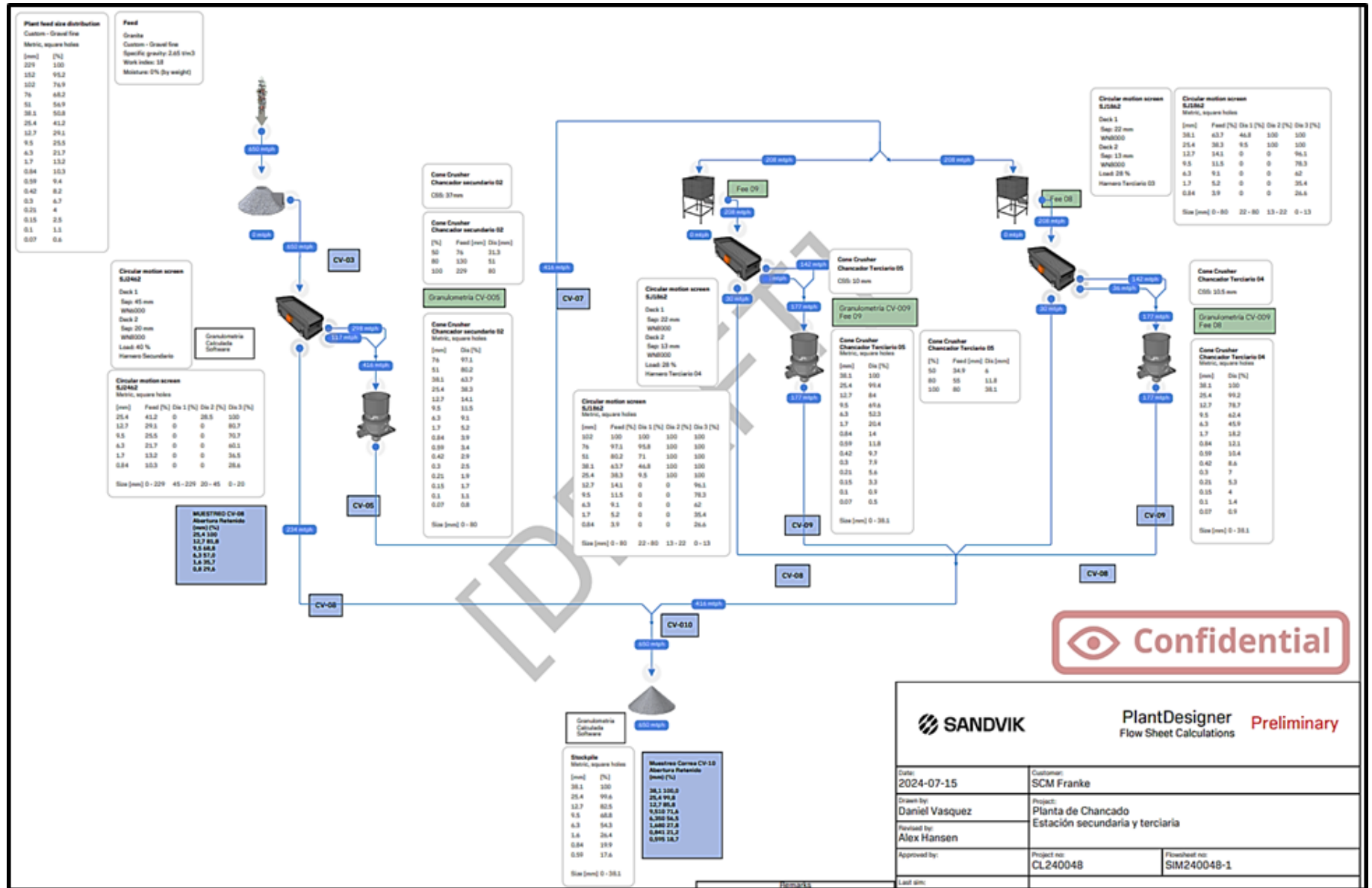
Fuente: Elaboración propia (2025)., con base en Superintendencia de Procesos – Evaluación P80 (Minera Las Cenizas, 2025) y Análisis de Proceso Planta Franke – Revisión A (Sandvik Mining and Rock Solutions, 2024).

Figura 21. Resultados de pruebas en columnas cerradas – Mineral Barreal Seco (alta ley).



Fuente: Minera Las Cenizas. (2025). Evaluación de P80 y pruebas de lixiviación – Planta Franke. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura. 22 simulación del circuito secundario-terciario en Plant Designer (caso base, Sandvik, 2024).

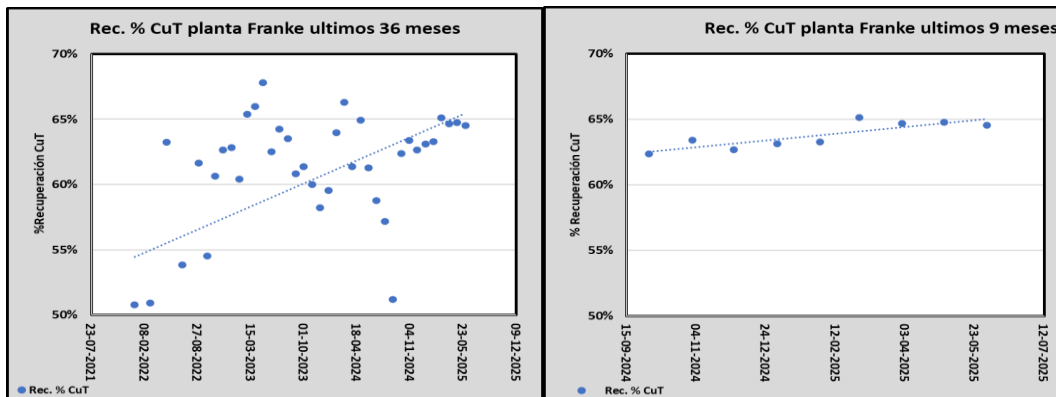


Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de Sandvik Mining and Rock Solutions. (2024). Análisis de Proceso Planta Franke – Revisión A. Informe técnico confidencial.

6.2.3.1. Análisis general de granulometrías

La figura 23 muestra la evolución de la recuperación de cobre total (CuT) en dos escalas temporales. (a) Tendencia de los últimos 36 meses, con un incremento desde ≈52 % en 2022 hasta ≈65 % en 2025, atribuible a la implementación de mallas más finas y al control operacional del chancado fino. (b) Comportamiento de los últimos 9 meses, con valores estables entre 63–65 %. La menor dispersión confirma que la reducción parcial del P80 ha mejorado tanto la recuperación promedio como su consistencia, en concordancia con el 96 % de avance en cambios de paneles de harrereros y con la estandarización de ajustes de CSS en chancadores secundarios y terciarios.

Figura 23. Evolución de la recuperación de cobre total (CuT) en la Planta Franke. Últimos 9 y 36 meses.



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.4. Análisis datos operacionales por tipos de detención

De acuerdo con la ISO 14224, el análisis en chancado primario y fino se desarrollará hasta nivel de subunidad, ya que allí se concentran los equipos críticos que afectan directamente el P80. En contraste, en aglomerado–apilado el alcance será solo a nivel de unidad, dado que la mayoría de las detenciones se deben a dinámicas operacionales como cambios de franja o descarte de módulos, y no a indisponibilidad técnica de componentes. Todas las áreas comparten la misma base de 26.280 h calendario; la diferencia radica en cómo se distribuyen entre operación efectiva y detenciones operacionales, de mantenimiento, mina, externas o enclavamientos.

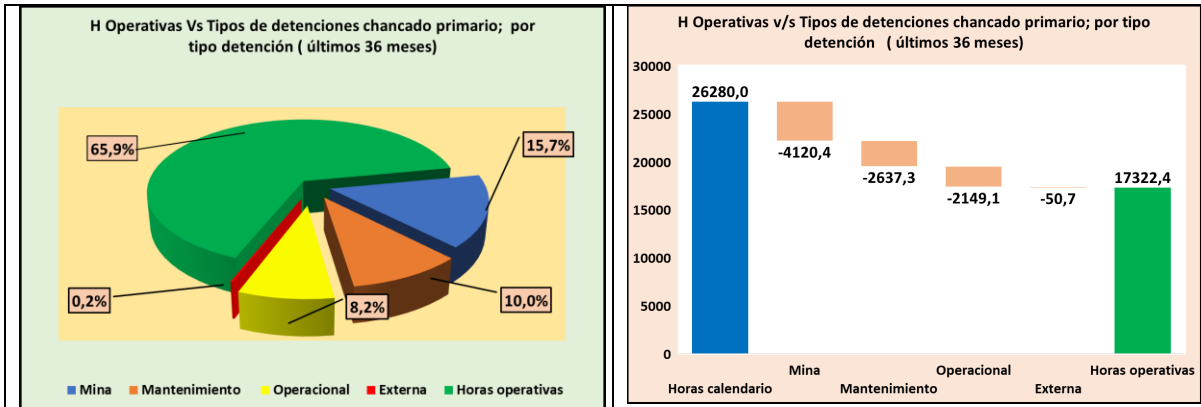
6.2.4.1. Análisis general de datos operacionales por tipos de detención

En la interpretación de los resultados es importante partir de la visión general de las horas calendario. Todas las áreas analizadas, Primario, Fino y Aglomerado Apilado, operan bajo una misma base de 26.280 h calendario. La diferencia radica en cómo se distribuyen esas horas entre operación efectiva y detenciones clasificadas como operacionales, de mantenimiento, externas, de mina o por enclavamiento.

- Chancado Primario

La Figura 24 muestra la distribución de pérdidas horarias en el circuito primario. El equipo acumula 17.322,4 h operativas (65,9 %), mientras que las detenciones se desglosan en mina (15,7 %), mantenimiento (10,0 %), operación (8,2 %) y externas (0,2 %). En términos absolutos, estas pérdidas suman 8.957,5 h, reduciendo las 26.280,0 h calendario a las 17.322,4 h operativas observadas: 4.120,4 h por mina, 2.637,3 h por mantenimiento, 2.149,1 h por operación y 50,7 h por causas externas.

Figura 24. Gráficos de distribución porcentual y absoluta de horas de detención por tipo en el área de chancado primario.

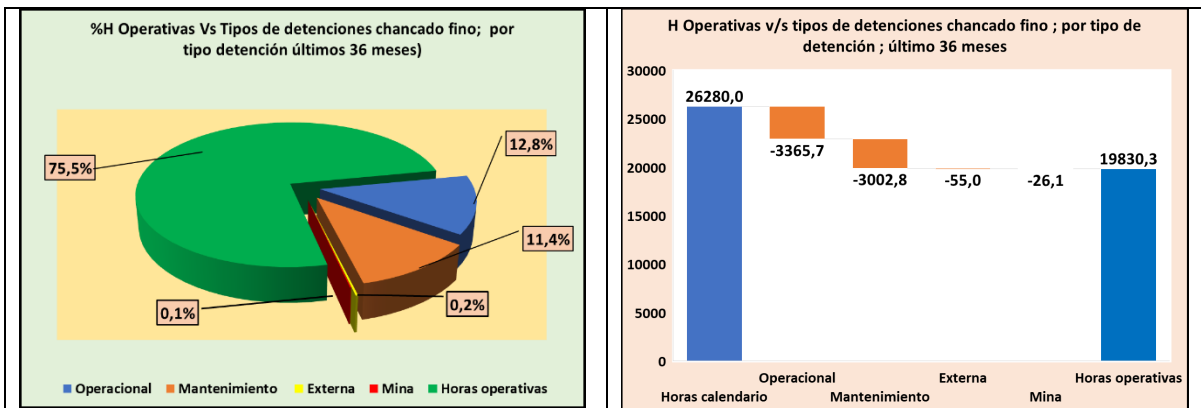


Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

- Chancado Fino

El área de chancado fino presenta el mejor desempeño de las tres, acumulando 19.830 h operativas (75 %). Las principales causas de detención corresponden a operación (13 %) y mantenimiento (11 %), mientras que las externas y mina son marginales (<1 %). Estos resultados se observan en la Figura 25, que integra los gráficos de distribución porcentual y absoluta de horas de detención por tipo en el área de chancado fino.

Figura 25. Gráficos de distribución porcentual y absoluta de horas de detención por tipo en el área de chancado fino.



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

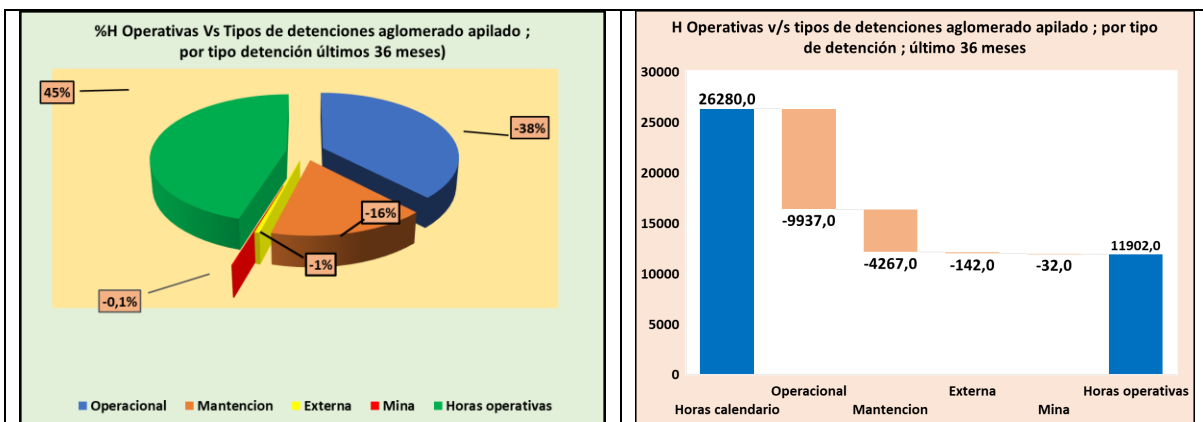
- Aglomerado–Apilado.

El área de aglomerado apilado es la de menor desempeño, con 11.902 h operativas (45 %) respecto de las 26.280 h calendario de los últimos 36 meses. Las detenciones se distribuyen

en 38 % por causas operacionales, 16 % por mantenimiento, 1 % por factores externos y 0,1 % por mina, lo que en términos absolutos equivale a 9.937 h por operación, 4.267 h por mantenimiento, 142 h por externas y 32 h por mina. Estos resultados se presentan en la Figura 26, que integra los gráficos de distribución porcentual y absoluta de horas de detención por tipo en el área de aglomerado–apilado.

A primera vista, este resultado sugiere un potencial cuello de botella en el circuito. Sin embargo, una fracción importante de estas horas correspondería a actividades propias de la dinámica del apilamiento, como el descarte de módulos y el cambio de franja, que son intervenciones programadas y no atribuibles directamente a la indisponibilidad técnica de los equipos. Esta hipótesis se profundizará en el apartado siguiente, mediante un análisis detallado por tipos de detención.

Figura 26. Gráficos de distribución porcentual y absoluta de horas de detención por tipo en el área aglomerado y apilado.

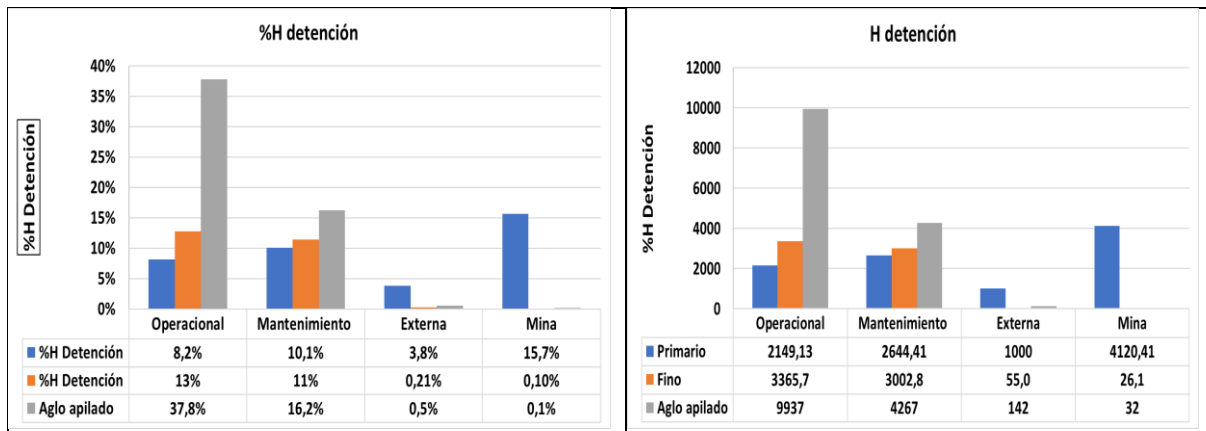


Fuente: Elaboración propia (2025) con datos de *Minera Las Cenizas*. (2025). *Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento*. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

La comparación global entre las tres áreas evidencia que aglomerado–apilado concentra la mayor carga de detenciones, mientras que el área de fino alcanza el mejor desempeño. Estos resultados se presentan en la Figura 27, que integra los gráficos de distribución porcentual y absoluta de horas de detención en las áreas de chancado primario, fino y aglomerado apilado.

- En términos generales:
- El Primario depende fuertemente de la alimentación desde mina, lo que explica que un 15,7% de sus horas de detención estén asociadas a este factor (4.120 h), sumado a paradas por mantenimiento (10,1%) y causas operacionales (8,2%), resultando en una disponibilidad operativa de 62,3%.
- El Fino se posiciona como el área más confiable, alcanzando un 75% de horas operativas, con menores pérdidas por mina (0,1%) y externas (0,2%). Sus principales oportunidades de mejora se concentran en optimizar mantenimientos (11%) y reducir detenciones operacionales (13%).
- El Aglomerado–Apilado, aunque presenta la menor proporción de horas operativas (45,3%), no debe interpretarse exclusivamente como un problema de confiabilidad. Una gran parte de sus detenciones corresponde a su dinámica operacional inherente (37,8%), asociada a descartes de módulo, cambios de turno y actividades de preparación de superficie, más que a fallas técnicas.

Figura 27. Comparación de horas de detención (porcentuales y absolutas) entre Primario, Fino y Aglomerado–Apilado.



Fuente: Elaboración propia (2025) con datos de *Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento.* Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.4.2. Análisis cuello de botella analizando detenciones por área

6.2.4.2.1. Aglomerado apilado

Utilización: Las pérdidas provienen mayoritariamente de dinámicas operacionales y no de limitaciones de infraestructura. Destacan el descarte de GrassHopper (1.955 eventos; 2.077 h), el traslado de equipos móviles por cambio de franja o módulo (1.772 eventos; 1.038 h) y el bajo nivel de stock fino (3.118,8 h). Estas tres causas superan el 67% de las detenciones, reflejando la dependencia directa de la alimentación desde chancado (Figs. 28 y 29).

Disponibilidad: En mantenimiento se registran 1.805 h programadas (353 eventos) y 1.055 h no programadas (1.084 eventos), muchas asociadas a intervenciones de oportunidad durante traslados, lo que sobreestima fallas reales. (Figs. 30 y 31).

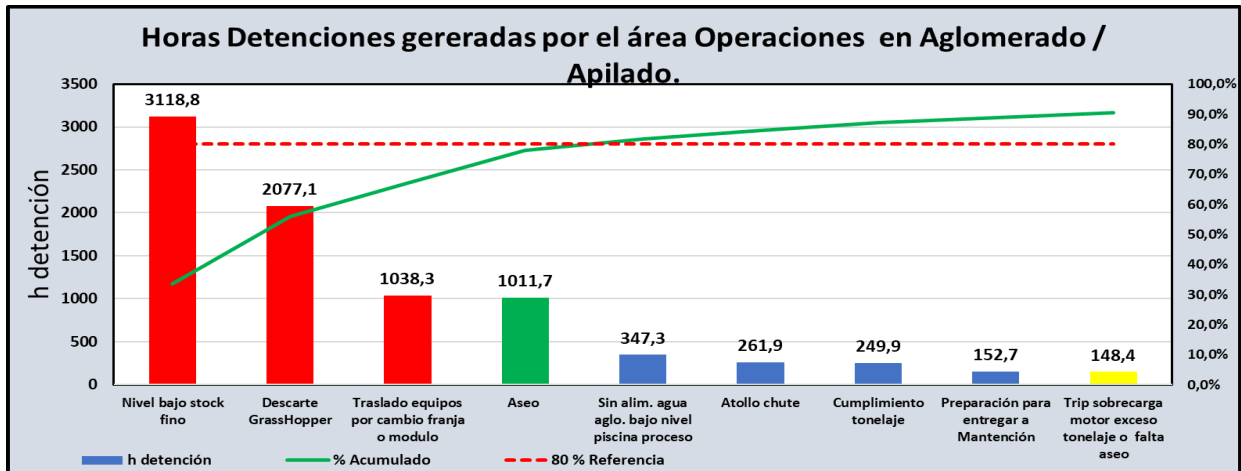
En síntesis, Aglomerado–Apilado no constituye un cuello estructural, sino un área condicionada por variabilidad de alimentación, actividades de apilamiento y criterios de clasificación de detenciones en Oracle/OT. Las mejoras deben enfocarse en optimizar traslados, reforzar mantenimiento eléctrico/mecánico en montaje y puesta en marcha, y diferenciar intervenciones oportunistas de fallas efectivas.

Tabla 18. Horas Detenciones generadas por el área Operaciones en Aglomerado / Apilado.

Horas Detenciones generadas por el área Operaciones en Aglomerado / Apilado.	h detención	% Acumulado	%
Nivel bajo stock fino	3118,8	33,5%	33,5%
Descarte GrassHopper	2077,1	55,9%	22,3%
Traslado equipos por cambio franja o modulo	1038,3	67,0%	11,2%
Aseo	1011,7	77,9%	10,9%
Sin alim. agua Aglo. bajo nivel piscina proceso	347,3	81,7%	3,7%
Atollo chute	261,9	84,5%	2,8%
Cumplimiento tonelaje	249,9	87,2%	2,7%
Preparación para entregar a Mantención	152,7	88,8%	1,6%
Trip sobrecarga motor exceso tonelaje o falta aseo	148,4	90,4%	1,6%

Fuente: Elaboración propia (2025) con datos de *Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento.* Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 28. Horas Detenciones generadas por el área Operaciones en Aglomerado / Apilado.



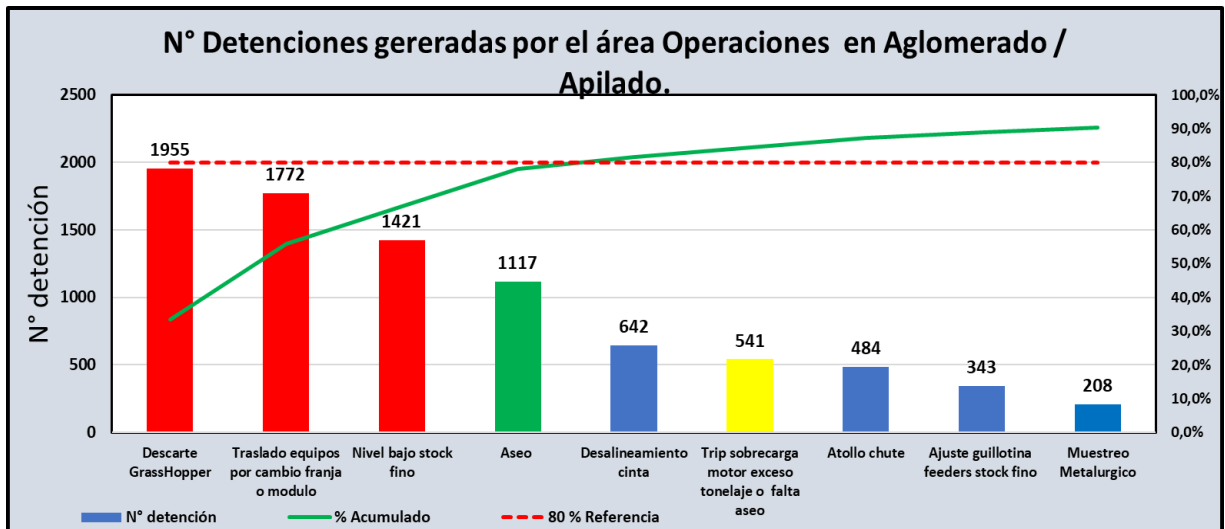
Fuente: Elaboración propia (2025) con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 19. N° Detenciones generadas por el área Operaciones en Aglomerado / Apilado.

N° Detenciones generadas por el área Operaciones en Aglomerado / Apilado.	N° detención	% Acumulado	%
Descarte GrassHopper	1955	19,7%	19,7%
Traslado equipos por cambio franja o modulo	1772	37,5%	17,8%
Nivel bajo stock fino	1421	51,8%	14,3%
Aseo	1117	63,0%	11,2%
Desalineamiento cinta	642	69,5%	6,5%
Trip sobrecarga motor exceso tonelaje o falta aseo	541	75,0%	5,4%
Atollo chute	484	79,8%	4,9%
Ajuste guillotina feeders stock Fino	343	83,3%	3,5%
Muestreo Metalurgico	208	85,4%	2,1%
Chequeo y puesta en marcha de equipos	198	87,4%	2,0%
Preparación para entregar a Mantención	190	89,3%	1,9%
Sin alim. agua Aglo. bajo nivel piscina proceso	187	91,2%	1,9%

Fuente: Elaboración propia (2025) con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 29. Detenciones generadas por el área Operaciones en Aglomerado / Apilado.



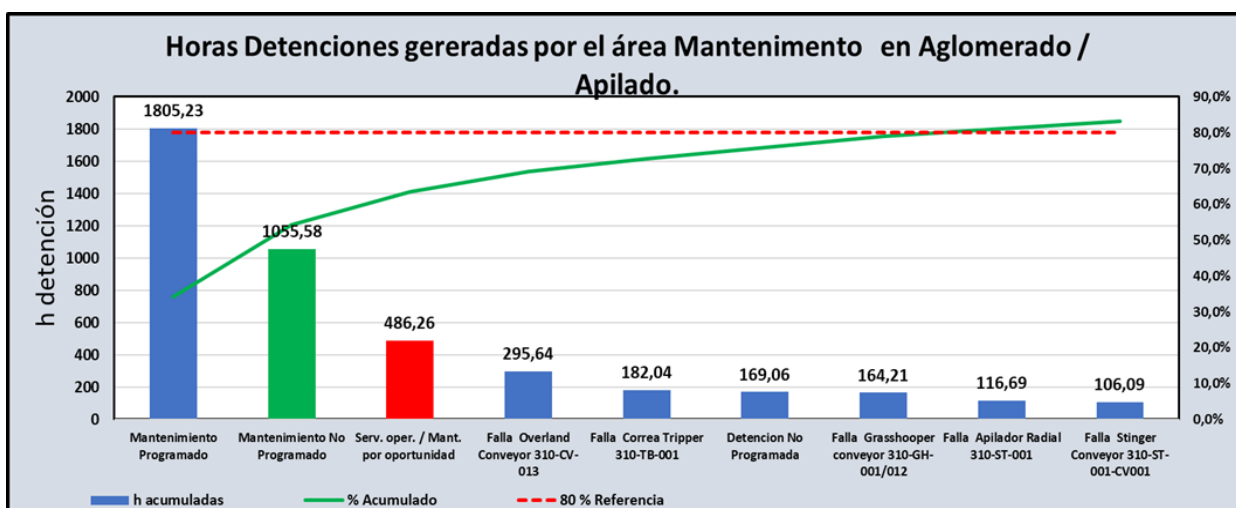
Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 20. Horas Detenciones generadas por el área Mantenimiento en Aglomerado / Apilado.

Horas Detenciones generadas por el área Mantenimiento en Aglomerado / Apilado.	h acumuladas	% Acumulado	%
Mantenimiento Programado	1805,23	34,3%	34,3%
Mantenimiento No Programado	1055,58	54,3%	20,0%
Serv. Oper. / Mant. por oportunidad	486,26	63,5%	9,2%
Falla Overland Conveyor 310-CV-013	295,64	69,2%	5,6%
Falla Correa Tripper 310-TB-001	182,04	72,6%	3,5%
Detención No Programada	169,06	75,8%	3,2%
Falla Grasshooper Conveyor 310-GH-001/012	164,21	78,9%	3,1%
Falla Apilador Radial 310-ST-001	116,69	81,2%	2,2%
Falla Stinger Conveyor 310-ST-001-CV001	106,09	83,2%	2,0%
Falla Transfer Conveyor 310-CV-014	97,64	85,0%	1,9%
Falla Stinger Conveyor 310-ST-002-CV002	96,83	86,9%	1,8%
Falla Apilador Radial 310-ST-002	96,79	88,7%	1,8%
Falla Tambor aglomerado 260-AM-002	88,34	90,4%	1,7%

Fuente: Elaboración propia (2025)., con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 30. Horas Detenciones generadas por el área Mantenimiento en Aglomerado / Apilado.



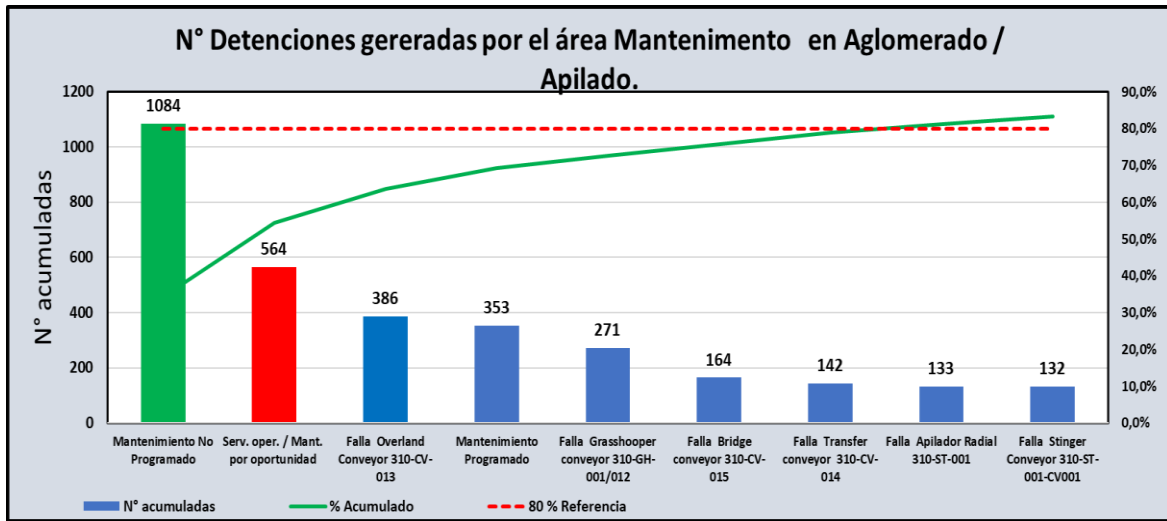
Fuente: Elaboración propia (2025)., con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 21. Detenciones generadas por el área Mantenimiento en Aglomerado / Apilado.

N° Detenciones generadas por el área Mantenimiento en Aglomerado / Apilado.	N° acumuladas	% Acumulado	%
Mantenimiento No Programado	1084	25,4%	25,4%
Serv. Oper. / Mant. por oportunidad	564	38,6%	13,2%
Falla Overland Conveyor 310-CV-013	386	47,7%	9,0%
Mantenimiento Programado	353	55,9%	8,3%
Falla Grasshooper Conveyor 310-GH-001/012	271	62,3%	6,4%
Falla Bridge Conveyor 310-CV-015	164	66,1%	3,8%
Falla Transfer Conveyor 310-CV-014	142	69,5%	3,3%
Falla Apilador Radial 310-ST-001	133	72,6%	3,1%
Falla Stinger Conveyor 310-ST-001-CV001	132	75,7%	3,1%
Falla Correa Tripper 310-TB-001	131	78,7%	3,1%
Falla Stinger Conveyor 310-ST-002-CV002	123	81,6%	2,9%
Falla Apilador Radial 310-ST-002	113	84,3%	2,6%
Falla Transfer Conveyor 310-CV-024	109	86,8%	2,6%
Falla Bridge Conveyor 310-CV-025	92	89,0%	2,2%
Detención No Programada	88	91,0%	2,1%

Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 31. N° Detenciones generadas por el área Mantenimiento en Aglomerado / Apilado.



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.4.2.2. Chancado Fino

Disponibilidad

La mayor carga proviene de mantenimientos programados (1.461,8 h; 50,9%), seguidos por fallas en CV-003 (228 h), chancador secundario 240-CR-002 (207 h) y harnero 230-SN-001 (201,2 h), que en conjunto superan el 22%. Otras correas, como CV-010 (147,8 h), CV-007 (55,8 h) y CV-008 (52,1 h), completan el 93,6% acumulado (Tabla 22 y Figura 32).

Utilización

Predominan condiciones de alimentación y limpieza: nivel bajo stock grueso (843,9 h; 24,1%), nivel alto stock fino (818,8 h; 23,3%) y aseo (507,9 h; 14,5%). Junto con tolva terciaria, cambio de módulos, sobrecargas (167,9 h) y atollos concentran el 83,4% acumulado (Tabla 23 y Figura 33).

Se registran más de 300 eventos de sobrecarga, concentrados en CV-003 (57,8 h; 114 eventos) y CV-008 (64,7 h; 75 eventos), que explican casi el 70% del total (Tabla 24). A nivel de componentes destacan los pull cords en CV-003 (192 eventos; 34,6 h), bombas de lubricación en CR-002 (94 eventos; 69,1 h), desalineamientos en CV-010 (61,1 h; 78 eventos) y CV-003 (18,3 h; 32 eventos), además de múltiples Micro-paradas ligadas a polines, faldones y guarderas (Tabla 25).

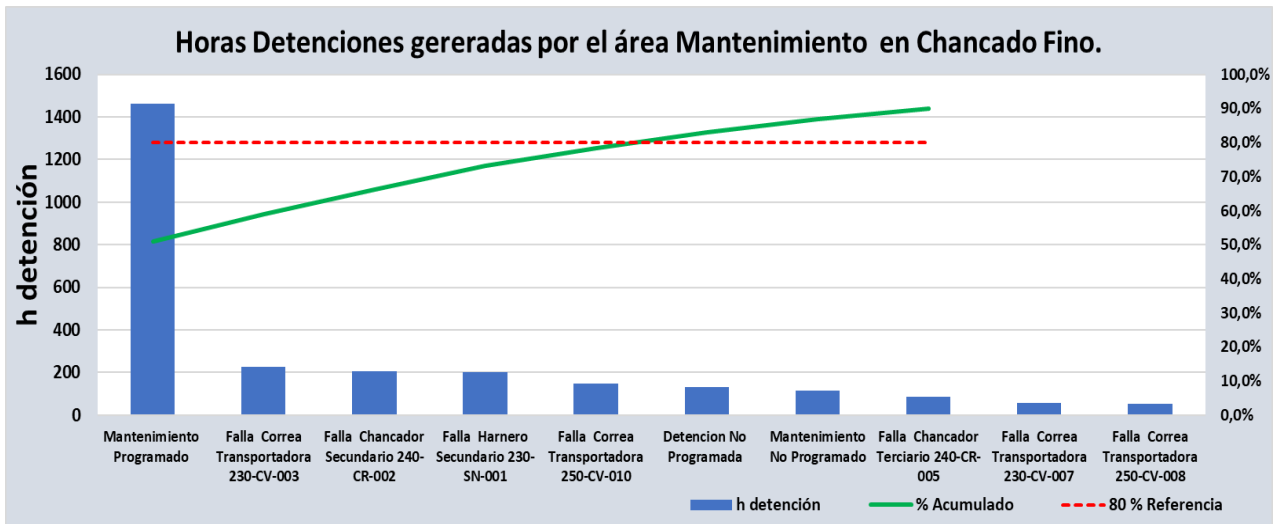
En síntesis, el chancado fino combina pérdidas de disponibilidad (fallas y mantenimientos en equipos críticos) con pérdidas de utilización (condiciones operacionales y housekeeping). La gestión debe enfocarse en (i) optimizar housekeeping para reducir sobrecargas y Micro-paradas y (ii) coordinar tasas de alimentación con Primario y Aglomerado para mitigar stocks extremos y picos de tonelaje.

Tabla 22. Horas Detenciones generadas por el área mantenimiento chancado fino.

Horas Detenciones generadas por el área Mantenimiento en Chancado Fino.	h detención	% Acumulado	%
Mantenimiento Programado	1461,8	50,9%	50,9%
Falla Correa Transportadora 230-CV-003	228,0	58,9%	7,9%
Falla Chancador Secundario 240-CR-002	207,0	66,1%	7,2%
Falla Harnero Secundario 230-SN-001	201,2	73,1%	7,0%
Falla Correa Transportadora 250-CV-010	147,8	78,3%	5,2%
Detención No Programada	132,6	82,9%	4,6%
Mantenimiento No Programado	114,5	86,9%	4,0%
Falla Chancador Terciario 240-CR-005	86,6	89,9%	3,0%
Falla Correa Transportadora 230-CV-007	55,8	91,8%	1,9%
Falla Correa Transportadora 250-CV-008	52,1	93,6%	1,8%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 32. Horas Detenciones generadas por el área mantenimiento chancado fino.



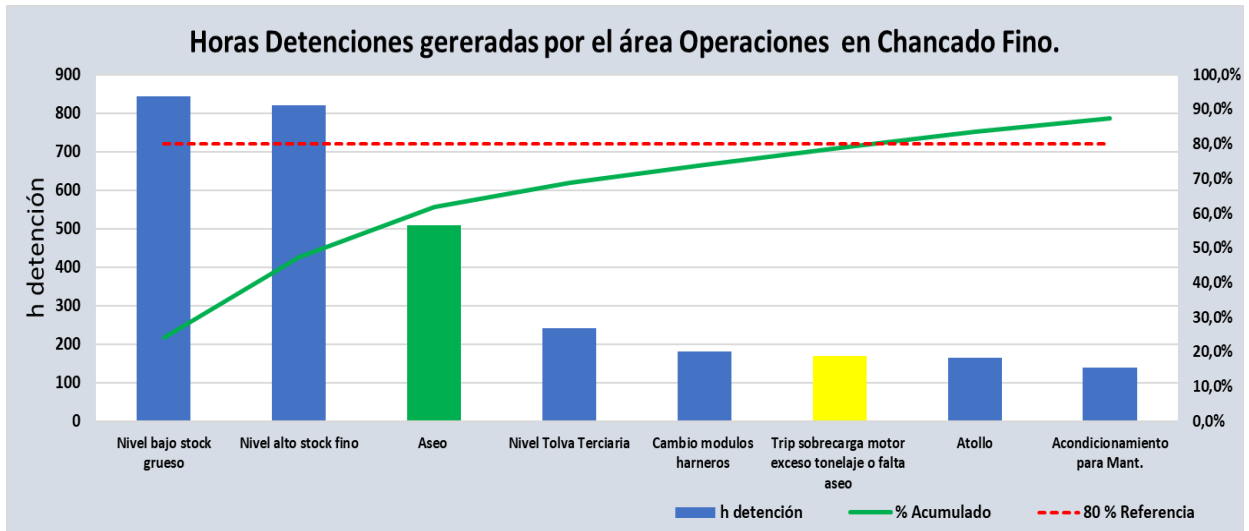
Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 23. Horas Detenciones generadas por el área operaciones chancado fino.

Horas Detenciones generadas por el área Operaciones en Chancado Fino.	h detención	% Acumulado	%
Nivel bajo stock grueso	843,93	24,1%	24,1%
Nivel alto stock fino	818,76	47,4%	23,3%
Aseo	507,91	61,9%	14,5%
Nivel Tolva Terciaria	240,50	68,8%	6,9%
Cambio módulos harneros	181,66	73,9%	5,2%
Trip sobrecarga motor exceso tonelaje o falta aseo	167,91	78,7%	4,8%
Atollo	164,21	83,4%	4,7%
Acondicionamiento para Mant.	139,43	87,4%	4,0%
Chequeo y puesta en marcha equipos	77,40	89,6%	2,2%
Activación detector metales	61,21	91,3%	1,7%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 33. Horas Detenciones generadas por el área operaciones chancado fino.



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 24. Detenciones por Trip sobrecarga motor exceso tonelaje o falta aseo chancado fino

Trip sobrecarga motor exceso tonelaje o falta aseo	Horas detención	N° detenciones
Sist. Eléctrico Alim. Motor CV-003	57,8	114
Sist. Eléctrico Alim. Motor CV-010	21,3	83
Sist. Eléctrico Alim. Motor CV-008	64,7	75
Sist. Eléctrico Alim. Motor CV-007	4,9	16
Sist. Eléctrico Alim. Motor CV-009	10,6	8
Sist. Eléctrico Alim. Motor CR-002	2,8	6
Sist. Eléctrico Alim. Motor CV-005	1,7	6
(en blanco)	1,9	3
Sist. Eléctrico Alim. Motor SN-001	1,6	3
Sist. Eléctrico Alim. Motor SN-001	0,6	1

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 25. Detenciones por componente chancado fino

Tipo detención por componente	Horas detención	N° detenciones	% Acumulado	%
Activación pull cord CV003	34,6	192	14,7%	14,7%
Perdida eficiencia desgaste bomba lub. CR002	69,1	94	21,9%	7,2%
Desalineamiento cinta CV010	61,1	78	27,9%	6,0%
Desalineamiento cinta CV003	18,3	32	30,3%	2,5%
Cambio rosta SN001	45,8	30	32,6%	2,3%
Instalación grampa CV003	38,0	28	34,8%	2,1%
Desalineamiento cinta CV008	16,3	25	36,7%	1,9%
Reparación Sist. de Transmisión Interna CR-005	11,5	21	38,3%	1,6%
Reposición faldones Tolvín alimentación CR002	14,8	17	39,6%	1,3%
Reposición guarderas SN001	14,2	14	40,7%	1,1%
Ajuste sensor de nivel tolva CR002	2,3	14	41,8%	1,1%
Cambio polines CV003	15,6	13	42,8%	1,0%
Activación pull cord CV007	3,3	11	43,6%	0,8%
Cambio polines CV008	10,0	11	44,4%	0,8%
Tensado correas transmisión CR002	6,8	10	45,2%	0,8%
Cambio flexible SN001	6,8	10	46,0%	0,8%
Reparación guillotina FE003	11,5	9	46,7%	0,7%
Cambio pernos contrapeso SN004	5,6	9	47,4%	0,7%
Tensado correas transmisión SN001	4,9	9	48,0%	0,7%
Cambio polines CV010	5,4	8	48,7%	0,6%

Instalación grampa CV005	8,1	8	49,3%	0,6%
Perdida eficiencia desgaste Bomba lub. CR005	6,5	8	49,9%	0,6%
Cambio correas transmisión SN001	6,4	8	50,5%	0,6%
Activación switch corte correa CV003	3,6	8	51,1%	0,6%
Reparación chute pantalón HO002	4,3	8	51,7%	0,6%
Activación pull cord CV008	2,2	7	52,3%	0,5%
Atollo por caída faldón SN001	11,1	7	52,8%	0,5%
Falla relé motor ventilador CR002	2,9	7	53,3%	0,5%
Cambio Seat liner CR005	4,0	7	53,9%	0,5%
Reparación en frío CV003	10,7	7	54,4%	0,5%
Falla Sist. PLC Scada SR001	0,8	6	54,9%	0,5%
Falla rodamiento Eje SN001	23,6	6	55,3%	0,5%

Fuente: Elaboración propia (2025) con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.4.2.3. Chancado Primario.

Utilización

Las principales pérdidas provienen de la dinámica operacional y la dependencia de la mina. La espera por alimentación a la tolva alcanza 2.390 h (38,1%), seguida por la espera de camiones mina (1.730 h; 27,6%) y el nivel alto de stock grueso (835 h; 13,3%). Estas tres causas superan el 79% de las horas registradas (Tabla 26, Figura 34). El detalle confirma que las restricciones de stock condicionan el desempeño, pues el circuito se detiene preventivamente al alcanzar límites de almacenamiento, actuando como pulmón del sistema, pero también como área sensible a la variabilidad de producción y consumo (Tabla 27, Figura 35).

Disponibilidad

Predominan las detenciones programadas (1.335 h; 50,5%), seguidas por fallas de la correa CV-002 (314 h; 11,9%), del chancador CR-001 (190 h; 7,2%) y del alimentador Grizzly FE-001 (158 h; 6,0%). En conjunto, estos activos representan más del 75% de las detenciones de mantenimiento (Tabla 28, Figura 36). El análisis por componente refuerza la criticidad de la correa CV-002 (29,2%), junto con elementos del chancador y alimentador (Tabla 29).

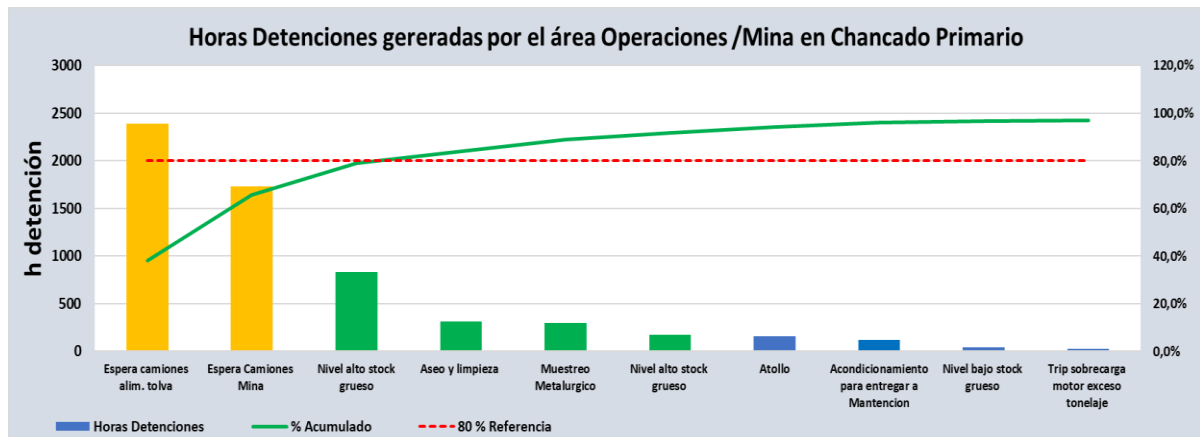
En síntesis, el chancado primario no constituye un cuello de botella por diseño, pero sí es vulnerable a las pérdidas de utilización (esperas operacionales) y a la disponibilidad de sus equipos críticos.

Tabla 26. Horas Detenciones generadas por el área operaciones y Mina chancado primario.

Horas Detenciones generadas por el área Operaciones /Mina en Chancado Primario	Horas Detenciones	% Acumulado	%
Espera camiones alim. tolva	2390,35	38,1%	38,1%
Espera Camiones Mina	1730,06	65,7%	27,6%
Nivel alto stock grueso	835,28	79,0%	13,3%
Aseo y limpieza	315,88	84,1%	5,0%
Muestreo Metalurgico	295,4	88,8%	4,7%
Nivel alto stock grueso	177,34	91,6%	2,8%
Atollo	154,61	94,1%	2,5%
Acondicionamiento para entregar a mantención	120,39	96,0%	1,9%
Nivel bajo stock grueso	43,22	96,7%	0,7%
Trip sobrecarga motor exceso tonelaje	22,99	97,1%	0,4%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 34. Horas Detenciones generadas por el área operaciones y Mina chancado primario.



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

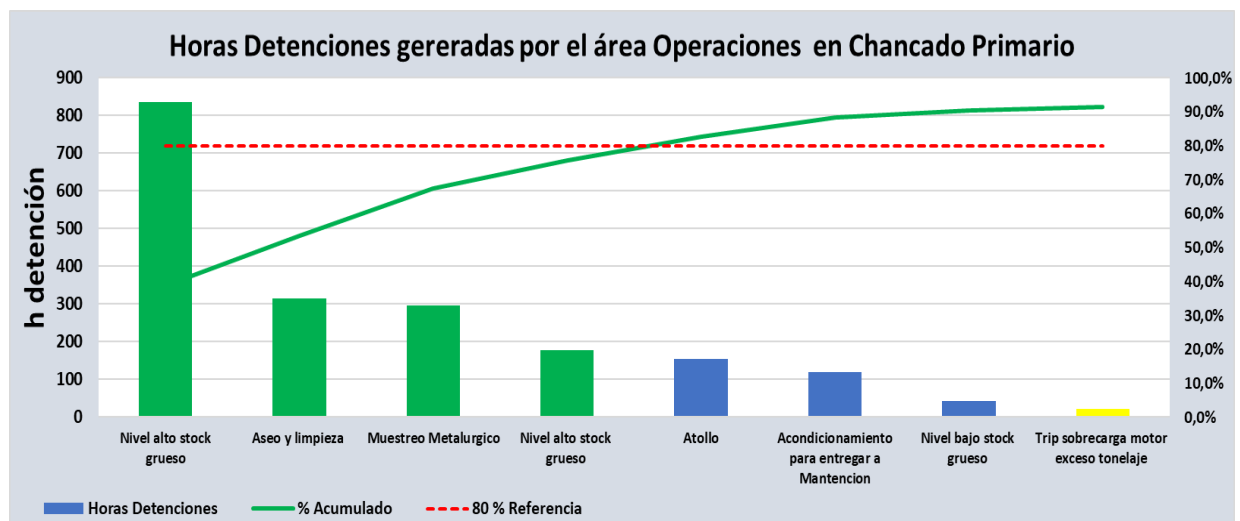
Tabla 27. Horas Detenciones generadas por el área operaciones chancado primario.

Horas Detenciones generadas por el área Operaciones en Chancado Fino.

Categoría	h detención	% Acumulado	%
Nivel bajo stock grueso	843,93	24,1%	24,1%
Nivel alto stock fino	818,76	47,4%	23,3%
Aseo	507,91	61,9%	14,5%
Nivel Tolva Terciaria	240,50	68,8%	6,9%
Cambio módulos harneros	181,66	73,9%	5,2%
Trip sobrecarga motor exceso tonelaje o falta aseo	167,91	78,7%	4,8%
Atollo	164,21	83,4%	4,7%
Acondicionamiento para Mant.	139,43	87,4%	4,0%
Chequeo y puesta en marcha equipos	77,40	89,6%	2,2%
Activación detector metales	61,21	91,3%	1,7%
Otra Causa	59,17	93,0%	1,7%
Ajuste guillotina feeders' stock grueso	47,71	94,4%	1,4%
Ajuste / Chequeo / Setting CR002	40,74	95,5%	1,2%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 35. Horas Detenciones generadas por el área operaciones chancado primario.



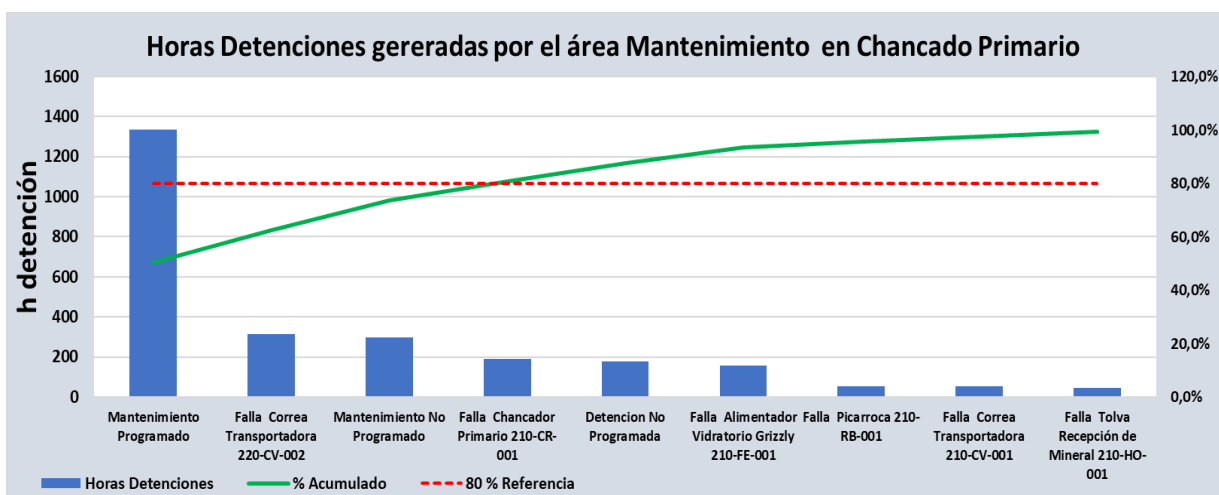
Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 28. Horas Detenciones generadas por el área mantenimiento chancado primario.

Horas Detenciones generadas por el área	Horas Detenciones	% Acumulado	%
Mantenimiento en Chancado Primario			
Mantenimiento Programado	1335,8	50,5%	50,5%
Falla Correa Transportadora 220-CV-002	313,5	62,4%	11,9%
Mantenimiento No Programado	298,1	73,6%	11,3%
Falla Chancador Primario 210-CR-001	189,8	80,8%	7,2%
Detención No Programada	177,0	87,5%	6,7%
Falla Alimentador Vibratorio Grizzly 210-FE-001	158,2	93,5%	6,0%
Falla Picarroca 210-RB-001	55,0	95,6%	2,1%
Falla Correa Transportadora 210-CV-001	53,6	97,6%	2,0%
Falla Tolva Recepción de Mineral 210-HO-001	46,7	99,4%	1,8%
Falla Electro Imán Correa 210-MS-001	9,1	99,7%	0,3%
Falla Correa transportadora 220-CV-002	4,5	99,9%	0,2%
Falla Sistema Iluminación general	3,0	100,0%	0,1%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 36. Horas Detenciones generadas por el área mantenimiento chancado primario.



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 29. Detenciones por componente chancado primario.

Tipo detención por componente	Horas Detenciones	% Acumulado	%
Cinta Transp. CV002	243,1	29,2%	29,2%
Flexible/Cilindro sist. hidra. /CR001	45,1	34,6%	5,4%
Unidad vibratoria FE001	24,1	37,5%	2,9%
Perno tensor CR001	21,6	40,1%	2,6%
Plano inclinado CR001	19,4	42,4%	2,3%
Hopper / Frame FE001	18,8	44,6%	2,3%
Flexible hidráulico RB001	18,1	46,8%	2,2%
Cinta Transp. CV001	17,3	48,9%	2,1%
Sufridera /CR001	17,0	50,9%	2,0%
Cajas laterales FE001	13,9	52,6%	1,7%
Placas madre tolva HO001	13,0	54,2%	1,6%
Correas transmisión FE001	12,2	55,6%	1,5%
Guarderas / Bastidor/ FE001	12,1	57,1%	1,5%
Correa transmisión FE001	11,4	58,4%	1,4%
Chute Fino FE002	10,7	59,7%	1,3%
Tope camiones HO-001	10,5	61,0%	1,3%

Planchas laterales/ Bastidor/ FE001	10,4	62,2%	1,2%
Cable alimentación FE001	9,5	63,4%	1,1%
Correas transmisión CR001	9,1	64,5%	1,1%
Motor CV002	8,4	65,5%	1,0%
Bomba lubricación CR001	8,3	66,5%	1,0%
Cinta trans MS001	8,0	67,4%	1,0%
Compresor / Pulmón/ CR001	8,0	68,4%	1,0%
Pasador principal RB001	7,8	69,3%	0,9%
Manguito/ Polea cola/ CV002	7,5	70,2%	0,9%
Polea cola CV002	6,8	71,0%	0,8%
Relé sobre carga/CCM/ CV001	6,7	71,8%	0,8%
Eje/polea deflectora/ CV002	6,6	72,6%	0,8%
Mantenimiento No Programado	6,4	73,4%	0,8%
Cable alimentación CR001	6,2	74,1%	0,7%
Cajón Guía CV001	5,9	74,8%	0,7%
Pulmón CR001	5,4	75,5%	0,6%
Reductor CV002	5,3	76,1%	0,6%

Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.4.2.4. Síntesis de análisis cuello de botella analizando detenciones por área

Desde el punto de vista del cuello de botella, los datos de detenciones permiten cuantificar y confirmar que el área de chancado fino concentra las principales restricciones operativas del sistema, tanto por frecuencia como por duración de eventos. En el período analizado, esta área registró más de 1.460 horas de mantenimiento programado (50,9 %), acompañadas de fallas críticas en la correa CV-003 (228 h), el chancador secundario CR-002 (207 h) y el harnero SN-001 (201 h), lo que representa más del 22 % de las horas detenidas solo por mantenimiento. A esto se suman pérdidas de utilización de 843,9 h por bajo stock grueso y 818,8 h por alto stock fino, más 507,9 h por aseo, que en conjunto superan el 60 % de las detenciones operacionales. Este patrón confirma que el circuito fino actúa como la principal restricción dinámica, combinando limitaciones internas (fallas y sobrecargas) y externas (variabilidad de alimentación) que afectan la continuidad global del sistema.

En contraste, el Aglomerado–Apilado registró 3.118 h por bajo nivel de stock fino, 2.077 h por descarte GrassHopper y 1.038 h por traslado de equipos móviles, causas que acumulan más del 67 % de las detenciones. Esto refleja que su restricción depende de la irregularidad del flujo proveniente del Fino más que de su propia capacidad instalada.

Finalmente, el Primario concentró sus pérdidas en esperas por alimentación (2.390 h; 38 %) y por camiones mina (1.730 h; 27 %), alcanzando 79 % del total de horas detenidas. Sus fallas principales (CV-002, CR-001 y FE-001) representaron el 75 % de las horas de mantenimiento, pero sin comprometer de forma estructural la capacidad de procesamiento.

En síntesis, los valores muestran que el chancado fino limita el flujo estable del sistema, mientras que Primario y Aglomerado–Apilado actúan como áreas dependientes de su desempeño. Desde la óptica del cuello de botella, la restricción del sistema es operacional y fluctuante, con epicentro en el Fino, donde se concentran las mayores pérdidas de horas, sobrecargas, desalineamientos y Micro-paradas, confirmando su condición de etapa crítica para la continuidad y eficiencia del proceso global.

6.2.5. Síntesis de resultados de la etapa Medir para definir el área donde se aplicará las mejoras.

El análisis de variabilidad mediante gráficos I-MR permitió comparar la estabilidad estadística de los tres circuitos del proceso de conminución. El chancado fino presentó el mayor promedio de rangos móviles (7,38 %) y el menor valor medio de rendimiento (82,6 %), frente al primario (94,7 %) y el aglomerado-apilado (89,6 %), evidenciando alta dispersión e inestabilidad operacional. El rango de control de $\pm 3\sigma = 18,6$ % confirma fluctuaciones mensuales más amplias que en el primario ($\pm 14,8$ %) y el aglomerado ($\pm 17,5$ %). En contraste, el fino mostró mayor utilización (84,2 %) con menor MR promedio (4,12 %), reflejando un uso intensivo para compensar su menor eficiencia, lo que genera sobrecargas, recirculaciones y detenciones no planificadas. La disponibilidad es similar entre áreas ($\approx 89-90$ %), mientras que la calidad metalúrgica (KRm) = 87,1 %) mantiene variabilidad controlada ($\pm 3\sigma \approx 13,8$ %). El OEE global (54,2 %) y su dispersión ($\pm 3\sigma = 13,4$ %) evidencian la influencia directa de las pérdidas del circuito fino sobre el desempeño total de planta.

El análisis de capacidad y calidad del proceso confirmó que los tres circuitos operan con incapacidad estructural, presentando índices Cp, Cpk, Pp y Ppk $< 0,5$, lo que refleja alta variabilidad y falta de control estadístico. La planta trabaja con una capacidad efectiva real del 54 %, inferior al 70 % de referencia, mostrando un desempeño inestable y una calidad inconsistente. El primario mantiene la mejor estabilidad ($\sigma \approx 3,8$ %) y un rendimiento alto (94,7 %), mientras que el aglomerado-apilado opera con variabilidad media y tiende a transformarse en la siguiente restricción una vez optimizado el fino.

Los registros operacionales confirman que el chancado fino concentró más del 60 % de sus detenciones internas, principalmente por sobrecargas, recirculaciones y activaciones de protecciones, acumulando 1 100 h/año de paradas y 1 400 h de mantenimiento programado. Esta combinación de alta utilización y frecuencia de eventos ratifica su condición de restricción dinámica principal. En contraste, el aglomerado-apilado registró 3 100 h por bajo stock fino y 2 000 h por descarte GrassHopper, evidenciando dependencia directa del fino, mientras que el primario concentró pérdidas por esperas de alimentación y transporte, sin comprometer estructuralmente la capacidad del proceso.

Desde el punto de vista metalúrgico, el control del P80 es una variable crítica: alcanzar P80 ≈ 9 mm eleva la recuperación de cobre soluble a 70–72 % y mejora el uso de ácido, siempre que se mantenga la estabilidad del circuito. Las pruebas y simulaciones de Sandvik confirmaron que, con la configuración actual, el circuito fino no puede sostener P80 ≤ 10 mm a 650 t/h, evidenciando una limitación estructural en el chancador secundario y la clasificación.

En conjunto, los gráficos I-MR, el análisis de capacidad (Cp/Cpk), los datos de detenciones y las pruebas metalúrgicas convergen en un mismo resultado:

- El chancado fino es el cuello de botella operativo y económico de la planta, combinando la mayor variabilidad, exigencia de utilización y frecuencia de eventos críticos.
- Por tanto, la secuencia de mejora debe priorizar: Fino ;Aglomerado/Apilado ;Primario,

6.2.6. Análisis Estadístico General de TBF y TTR

Con el fin de caracterizar el desempeño del circuito de chancado, se desarrolló un análisis de confiabilidad y mantenibilidad a partir de registros de fallas (TBF) y reparaciones (TTR). Se aplicaron pruebas de bondad de ajuste mediante Kolmogorov–Smirnov (K-S) (6.3.1.2), determinándose que la distribución Weibull modela la mayoría de los TBF, mientras que en TTR la Log-Normal ofreció en algunos casos un ajuste representativo (Tablas 30 y 31). Con estos modelos se calcularon los MTBF, interpretando β y α para identificar patrones de falla en cada equipo (6.3.1.2). En paralelo, la mantenibilidad (MTTR) se evaluó mediante estadística descriptiva y contrastes de ajuste, observándose alta dispersión en correas y alimentadores frente a mayor homogeneidad en chancadores y harneros (6.3.1.3). Finalmente, se presenta una síntesis (6.3.1.4) que integra estos hallazgos y orienta estrategias diferenciadas de mantenimiento y operación.

6.2.6.1. Bondad de ajuste de distribuciones para datos TBF y TTR

Para modelar la confiabilidad y mantenibilidad, los datos de TBF y TTR se contrastaron con distribuciones teóricas (Weibull, Exponencial, Normal y Log-Normal). Las Tablas 30 y 30 presentan parámetros estimados (β , α , λ , μ , σ), valores de R^2 y la verificación mediante Kolmogorov–Smirnov (K-S).

Los resultados destacan:

- Weibull es la distribución más representativa, con altos R^2 y cumplimiento de K-S en equipos críticos como CR-001, CR-002, CV-010 y SN-001.
- Log-Normal es alternativa válida en casos puntuales, como CV-007 y CV-008, donde existen asimetrías y colas largas.
- Exponencial y Normal solo logran ajustes parciales, sin validez general.
- Un R^2 alto no garantiza validez si K-S falla, como en CV-003 ($Dn=0,212 > 0,085$).
- Lo contrario ocurre en CV-008, donde un R^2 moderado y K-S válido confirmaron el ajuste Weibull.
- En equipos con pocos datos (SN-001 con 4 fallas; FE-008 con 2 fallas), la validación es frágil.
- En síntesis, Weibull es el modelo más consistente, pero requiere corroboración con K-S y suficiente volumen de datos.

6.2.6.2. Confiabilidad – MTBF bajo distribución Weibull

En la Tabla 30 se observan los MTBF de cada equipo bajo distribución Weibull. Los parámetros β (forma) y α (escala) permiten caracterizar los patrones de falla:

- $\beta < 1$ (fallas tempranas/aleatorias): en chancadores secundarios (CR-002, CR-003) y correas cortas (CV-003, CV-005), con eventos recurrentes y alta sensibilidad operativa.
- $\beta \approx 1$ (tasa de falla constante): en correas largas (CV-010, CV-013), con riesgo estable sujeto a operación y monitoreo.
- $\beta > 1$ (fallas por desgaste): en harneros (SN-001, SN-004) y alimentadores (FE-001,

FE-008), con ciclos de vida más predecibles y necesidad de mantenimiento preventivo.

Los valores de α (escala) refuerzan esta lectura:

- α bajos (<200 h): en chancadores (ej. CR-002), evidenciando alta criticidad.
- α medios (200–900 h): en correas largas (CV-010, CV-013), con confiabilidad moderada.
- α altos (>1000 h): en alimentadores y harneros (FE-001, SN-004), con largos periodos operativos, aunque sujetos a desgaste.

En síntesis, la confiabilidad del circuito es heterogénea: equipos con $\beta < 1$ requieren controles operacionales y análisis de causa raíz, mientras que aquellos con $\beta > 1$ demandan programas preventivos/predictivos para evitar fallas críticas.

6.2.6.3. Mantenibilidad – MTTR por estadística descriptiva

Con base en la Tabla 31, se observa que:

- La mayoría de las reparaciones son rápidas (medianas <1 h), especialmente en chancadores y harneros.
- La alta dispersión ($CV > 1$) se concentra en correas transportadoras (ej. CV-003, CV-008) y en alimentadores (ej. FE-001, FE-008), lo que refleja falta de estandarización en procedimientos de reparación.
- La presencia de outliers en TTR afecta principalmente a correas largas y alimentadores, vinculándose a problemas de gestión de repuestos o disponibilidad de cuadrillas en algunos eventos.

En síntesis, la mantenibilidad global es aceptable, pero requiere reducir la variabilidad de los TTR en correas y alimentadores, mediante protocolos de reparación más homogéneos, gestión de inventarios críticos y capacitación de cuadrillas.

6.2.6.4. Síntesis

La integración de los análisis muestra que la confiabilidad (TBF) está mejor representada por la distribución Weibull, aunque con diferencias marcadas entre equipos: chancadores secundarios (CR-002, CR-003) y correas cortas (CV-003, CV-005) presentan $\beta < 1$, asociado a fallas tempranas y repetitivas, mientras que harneros (SN-001, SN-004) y alimentadores (FE-001, FE-008) muestran $\beta > 1$, reflejando desgaste progresivo. El contraste entre R^2 y K-S evidencia que un ajuste no es válido solo por un R^2 elevado: por ejemplo, CV-003 falló en K-S pese a su alto R^2 , mientras que CV-008 validó Weibull con R^2 moderado, confirmando la robustez del test K-S. En la mantenibilidad (TTR), las reparaciones suelen ser rápidas (medianas <1 h), pero con dispersión alta en correas y alimentadores. Finalmente, en equipos con pocos datos (SN-001, FE-008), las conclusiones son exploratorias. Estos hallazgos alimentan la etapa Analizar (DMAIC) y serán complementados con la modelación de disponibilidad mediante R

Tabla 30. Bondad de ajuste de distribuciones para datos TBF por equipo.

Equipos	Ch Sec. CR002	Ch Terc. CR004	Ch Terc. CR005	Correa CV003	Corre CV005	Correa CV007	Correa CV008	Correa CV009	Correa CV010	Har. Sec. SN001	Har. Sec. SN003	Har. Sec. SN004	Alim Vib. FE001	Alim Vib. FE002	Alim Vib. FE003	Alim. Feeder FE008	Alim. Feeder FE009	
N°	234	38	100	322	33	44	65	24	131	127	4	17	15	11	14	2	10	
Dist. Weibull																		
R²	95,4%	97,2%	97,2%	96,8%	97,9%	92,6%	89,2%	98,1%	90,8%	92,1%	96,5%	88,8%	83,3%	92,6%	83,5%	100,0%	88,2%	
Beta	0,4	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	1,1	0,3	0,3	0,7	0,3	0,5	0,3	0,3	1,4	0,1	
Alfa	51,8	210,5	55,1	50,1	255,9	367,8	244,2	763,7	100,8	97,2	2495,8	82,7	1425,2	738,5	1335,2	2686,2	446,6	
MTBF	205,6	2760,6	416,9	90,4	927,2	940,8	2512,8	736,7	810,3	802,9	3316,1	1403,1	3029,1	9642,7	16207,9	2441,1	6151364,7	
Nivel de significancia	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Estadístico KS D n	0,10	0,10	0,08	0,08	0,12	0,17	0,16	0,10	0,13	0,17	0,31	0,18	0,29	0,25	0,23	0,42	0,31	
Valor crítico D n, α	0,10	0,22	0,14	0,08	0,23	0,20	0,17	0,32	0,14	0,17	0,62	0,32	0,34	0,39	0,35	0,84	0,41	
0 ≤ Dn, α-Dn	0,00	0,12	0,06	0,00	0,11	0,03	0,01	0,22	0,01	0,00	0,32	0,14	0,05	0,14	0,12	0,43	0,10	
Tipo Distribución	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	
Dist. Exp.																		
R²	89,6%	95,6%	88,7%	95,6%	94,2%	67,3%	97,0%	97,2%	91,4%	92,1%	99,8%	89,7%	93,3%	96,1%	96,7%	100,0%	92,2%	
λ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
MTBF	158,5	903,9	418,0	92,2	657,0	1198,7	444,9	781,8	269,5	271,6	2743,8	1433,7	1369,7	1698,4	1902,1	2068,4	1950,2	
Nivel de significancia	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Estadístico KS D n	0,35	0,41	0,47	0,26	0,32	0,44	0,28	0,10	0,36	0,36	0,21	0,56	0,12	0,30	0,25	0,49	0,35	
Valor crítico D n, α	0,10	0,22	0,14	0,08	0,23	0,20	0,17	0,27	0,14	0,17	0,62	0,32	0,34	0,39	0,35	0,84	0,41	
0 ≤ Dn, α-Dn	-0,25	-0,19	-0,33	-0,17	-0,09	-0,24	-0,11	0,17	-0,21	-0,19	0,41	-0,24	0,22	0,09	0,10	0,36	0,06	
Tipo Distribución	No Dist. Exp.	No Dist. Exp.	No Dist. Exp.	No Dist. Exp.	No Dist. Exp.	No Dist. Exp.	No Dist. Exp.	Dist. Exp.	No Dist. Exp.	No Dist. Exp.	Dist. Exp.	No Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	
Dist. Normal																		
R²	58,6%	71,0%	57,7%	67,4%	76,6%	43,3%	73,6%	79,5%	62,3%	62,6%	96,3%	61,8%	74,0%	77,8%	73,6%	100,0%	81,4%	
μ	83,1	509,4	191,2	60,9	412,3	448,1	294,8	745,7	148,3	150,6	2147,9	691,8	1154,3	1159,8	1273,8	2191,6	1406,4	
σ	191,4	980,8	498,4	107,7	678,1	1403,5	485,7	829,8	315,6	318,4	2384,8	1638,9	1451,8	1758,9	2051,9	1673,0	1924,0	
MTBF	83,1	509,4	191,2	60,9	412,3	448,1	294,8	745,7	148,3	150,6	2147,9	691,8	1154,3	1159,8	1273,8	2191,6	1406,4	
Kolmogorov-Smirnov	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Nivel de significancia	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Estadístico KS D n	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	0,54	1,00	
Valor crítico D n, α	0,10	0,22	0,14	0,08	0,23	0,20	0,17	0,32	0,14	0,17	0,62	0,32	0,34	0,39	0,35	0,84	0,41	
0 ≤ Dn, α-Dn	-0,90	-0,78	-0,86	-0,92	-0,77	-0,80	-0,83	-0,64	-0,86	-0,83	-0,32	-0,68	-0,66	-0,61	-0,65	0,30	-0,59	
Tipo Distribución	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	
Dist. Log-Normal																		
R²	84,4%	89,1%	92,2%	85,5%	90,8%	82,0%	76,3%	96,3%	79,0%	80,6%	91,8%	92,3%	69,6%	81,7%	69,5%	100,0%	76,0%	
μ	2,4	3,4	2,2	2,8	4,2	4,7	3,6	6,1	2,8	2,7	7,1	2,3	6,1	4,6	5,2	7,6	2,0	
σ	3,6	4,6	4,1	2,5	3,3	3,0	4,6	1,1	4,4	4,4	1,8	4,6	2,8	4,7	4,8	0,8	10,0	
MTBF	6,9E+03	1,4E+06	4,2E+04	4,4E+02	1,5E+04	9,0E+03	1,5E+06	8,9E+02	2,2E+05	2,2E+05	6,5E+03	4,1E+05	2,4E+04	6,9E+06	2,0E+07	2,8E+03	2,6E+22	
Nivel de significancia	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Estadístico KS D n	0,33	0,30	0,35	0,29	0,27	0,37	0,27	0,19	0,32	0,32	0,25	0,34	0,21	0,25	0,27	0,42	0,23	
Valor crítico D n, α	0,10	0,18	0,14	0,08	0,23	0,20	0,17	0,32	0,14	0,17	0,62	0,32	0,34	0,39	0,35	0,84	0,41	
0 ≤ Dn, α-Dn	-0,23	-0,12	-0,21	-0,20	-0,04	-0,17	-0,10	0,13	-0,18	-0,15	0,37	-0,02	0,12	0,14	0,08	0,43	0,18	
Tipo Distribución	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	Dist. Normal	Dist. Normal	Dist. Normal	Dist. Normal	

Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Tabla 31. Bondad de ajuste de distribuciones para datos TTR por equipo.

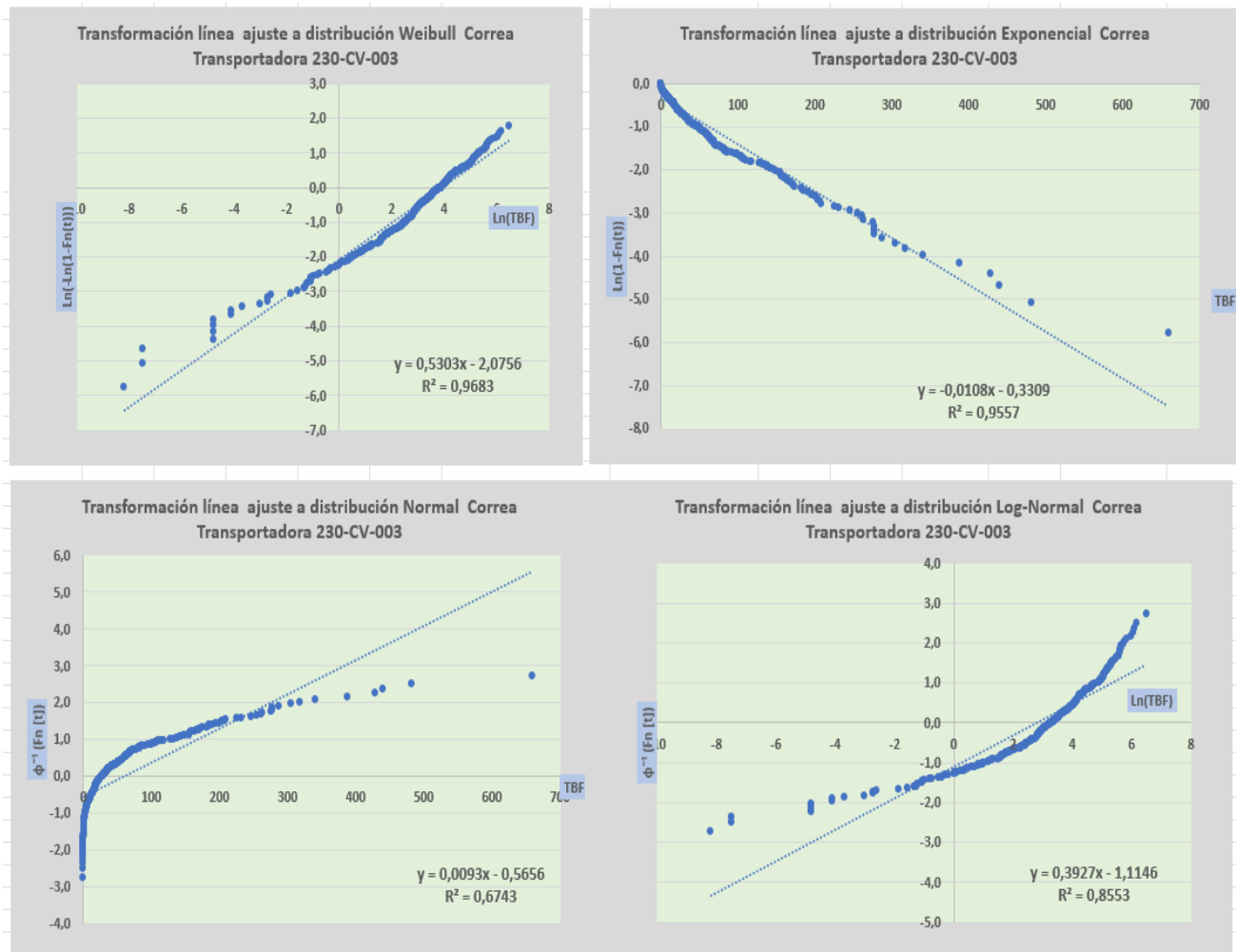
Equipos	Chanc. Sec. CR002	Chanc. Terc. CR004	Chanc. Terc. CR005	Correa Trans. CV003	Correa Trans. CV005	Correa Trans. CV007	Correa Trans. CV008	Correa Trans. CV009	Correa Trans. CV010	Har. Sec. SN001	Har. Sec. SN003	Har. Sec. SN004	Alim Vib. FE001	Alim Vib. FE002	Alim Vib. FE003	Alim. Feeder FE008	Alim. Feeder FE009	
N°	238	39	101	338	34	48	70	25	141	140	4	17	16	11	14	3	12	
Dist. Weibull																		
R ²	93%	98%	96%	71%	97%	79%	86%	96%	87%	96%	92%	97%	92%	87%	93%	99%	80%	
Beta	1,36	1,30	1,26	0,99	1,26	1,07	1,50	1,40	1,14	1,13	1,24	2,06	1,20	1,38	1,50	2,61	1,05	
Alfa	0,83	0,75	0,88	0,54	1,06	1,00	0,77	1,24	0,96	1,33	1,15	0,64	0,93	1,08	1,25	0,22	0,95	
MTTR	0,76	0,69	0,82	0,55	0,98	0,97	0,70	1,13	0,92	1,27	1,07	0,57	0,87	0,98	1,13	0,20	0,93	
Nivel de significancia	0,01	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Estadístico KS D n	0,10	0,07	0,09	0,23	0,07	0,17	0,14	0,12	0,14	0,10	0,26	0,21	0,17	0,14	0,14	0,33	0,23	
Valor crítico D n, α	0,11	0,21	0,14	0,11	0,23	0,19	0,16	0,26	0,16	0,11	0,62	0,32	0,33	0,39	0,35	0,71	0,38	
0 ≤ Dn, α-Dn	0,01	0,14	0,05	-0,13	0,16	0,02	0,02	0,15	0,02	0,02	0,36	0,10	0,16	0,25	0,21	0,38	0,15	
Tipo Distribución	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	No Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	Dist. Weibull	
Dist. Exp.																		
R ²	99%	98%	98%	78%	98%	67%	98%	97%	85%	89%	98%	94%	91%	88%	96%	94%	77%	
λ	1,25	1,48	1,09	0,64	1,12	0,33	1,86	1,08	0,57	0,50	1,01	2,95	1,06	0,75	1,10	9,94	0,46	
MTTR	0,80	0,68	0,91	1,56	0,89	3,05	0,54	0,92	1,75	2,01	0,99	0,34	0,95	1,33	0,91	0,10	2,18	
Nivel de significancia	0,01	0,05	0,05	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Estadístico KS D n	0,12	0,15	0,11	0,49	0,16	0,52	0,28	0,26	0,30	0,22	0,31	0,50	0,14	0,21	0,32	0,71	0,42	
Valor crítico D n, α	0,11	0,21	0,14	0,09	0,23	0,19	0,16	0,26	0,16	0,11	0,62	0,32	0,33	0,39	0,35	0,71	0,38	
0 ≤ Dn, α-Dn	-0,02	0,06	0,02	-0,40	0,06	-0,33	-0,11	0,01	-0,15	-0,11	0,31	-0,18	0,19	0,18	0,02	0,00	-0,05	
Tipo Distribución	No Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	No Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	No Dist. Exp.	Dist. Exp.	No Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	No Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	Dist. Exp.	No Dist. Exp.	No Dist. Exp.	
Dist. Normal																		
R ²	79%	83%	77%	44%	89%	40%	42%	90%	55%	61%	92%	90%	81%	64%	88%	99%	50%	
μ	0,80	0,69	0,85	0,67	0,97	1,16	0,74	1,14	1,04	1,39	0,97	0,57	0,90	1,03	1,13	0,19	1,07	
σ	0,85	0,69	0,99	2,03	0,88	3,73	1,54	0,92	2,11	2,34	0,87	0,33	0,95	1,46	0,89	0,08	2,54	
MTTR	0,80	0,69	0,85	0,67	0,97	1,16	0,74	1,14	1,04	1,39	0,97	0,57	0,90	1,03	1,13	0,19	1,07	
Nivel de significancia	0,01	0,05	0,05	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Estadístico KS D n	0,92	0,91	0,96	0,90	0,88	0,96	0,74	0,90	0,96	0,98	0,70	0,73	0,89	0,86	0,77	0,29	0,93	
Valor crítico D n, α	0,11	0,21	0,14	0,09	0,23	0,19	0,16	0,26	0,16	0,11	0,62	0,32	0,33	0,39	0,35	0,71	0,38	
0 ≤ Dn, α-Dn	-0,81	-0,69	-0,83	-0,81	-0,65	-0,77	-0,58	-0,63	-0,81	-0,86	-0,08	-0,41	-0,56	-0,47	-0,42	0,42	-0,56	
Tipo Distribución	No Dist. Normal	Dist. Normal	Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	No Dist. Normal	
Dist. Log-Normal																		
R ²	99%	98%	99%	88%	97%	91%	95%	96%	98%	99%	95%	94%	96%	95%	96%	97%	91%	
μ	-0,60	-0,71	-0,57	-1,18	-0,37	-0,52	-0,63	-0,19	-0,53	-0,21	-0,25	-0,72	-0,54	-0,33	-0,15	-1,68	-0,58	
σ	0,91	0,95	0,98	1,15	0,97	1,09	0,79	0,89	1,04	1,10	0,95	0,61	1,01	0,86	0,82	0,46	1,10	
MTTR	0,83	0,77	0,92	0,59	1,11	1,08	0,73	1,24	1,01	1,48	1,22	0,59	0,97	1,04	1,21	0,21	1,03	
Nivel de significancia	0,01	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Estadístico KS D n	0,20	0,18	0,20	1,00	0,17	0,39	0,35	0,16	0,32	0,28	0,24	0,14	0,20	0,28	0,16	0,32	0,36	
Valor crítico D n, α	0,11	0,21	0,14	0,11	0,23	0,19	0,16	0,26	0,16	0,11	0,62	0,32	0,33	0,39	0,35	0,71	0,38	
0 ≤ Dn, α-Dn	-0,09	0,03	-0,07	-0,89	0,06	-0,20	-0,19	0,10	-0,17	-0,17	0,39	0,18	0,12	0,11	0,19	0,39	0,02	
Tipo Distribución	Dist. Normal	Es Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	Es Dist. Normal	No Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	No Dist. Normal	Dist. Normal	Es Dist. Normal	Es Dist. Normal	Es Dist. Normal	Es Dist. Normal	Es Dist. Normal	Es Dist. Normal	Es Dist. Normal	

Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.6.5. Gráficos ajustados linealmente según el tipo de distribución

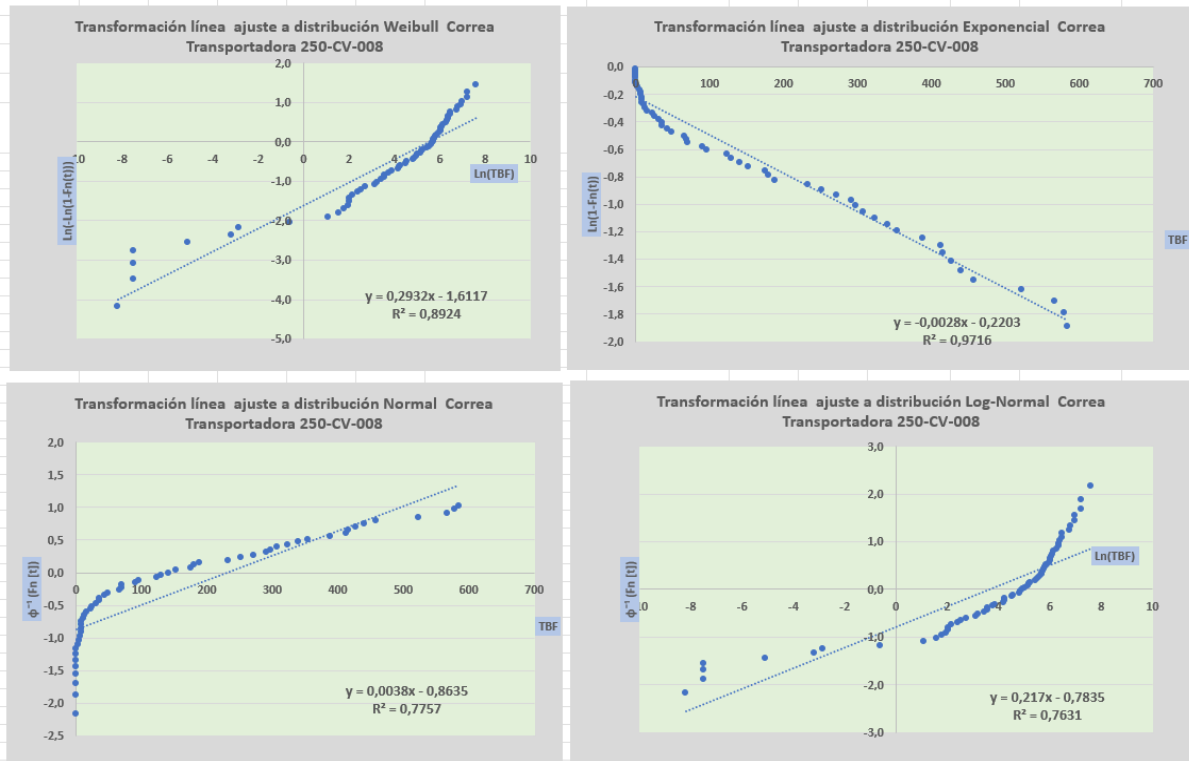
Las figuras presentan los ajustes lineales de TBF con las distribuciones Weibull, Exponencial, Normal y Log-Normal para equipos críticos del chancado fino: correas 230-CV-003 y 250-CV-008, el chancador secundario 240-CR-002 y el harnero secundario 230-SN-001. En general, Weibull entrega los mejores ajustes ($R^2 > 0,9$), mientras que Normal y Exponencial muestran un desempeño limitado, confirmando que las fallas no son puramente aleatorias. En las correas CV-003 y CV-008, los valores $\beta < 1$ evidencian fallas tempranas y recurrentes por condiciones operativas y polución, mientras que en CR-002 y SN-001, los $\beta \approx 1$ reflejan un comportamiento más aleatorio condicionado por desgaste y variabilidad operacional. Estos resultados constituyen la base para la modelación de confiabilidad y disponibilidad (RBD) del circuito, focalizando las acciones de mejora en dichos equipos.

Figura 37. Gráficos ajustados linealmente según el tipo de distribución 230-CV-003.



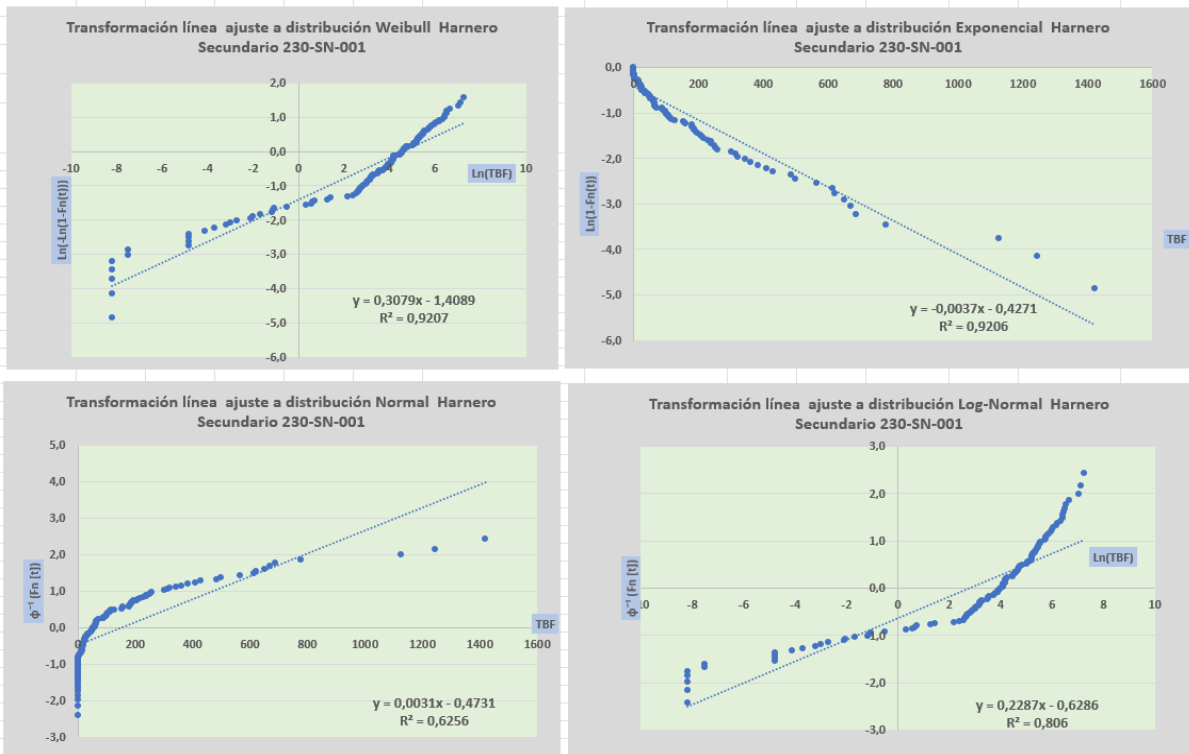
Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 38. Gráficos ajustados linealmente según el tipo de distribución 250-CV-008.



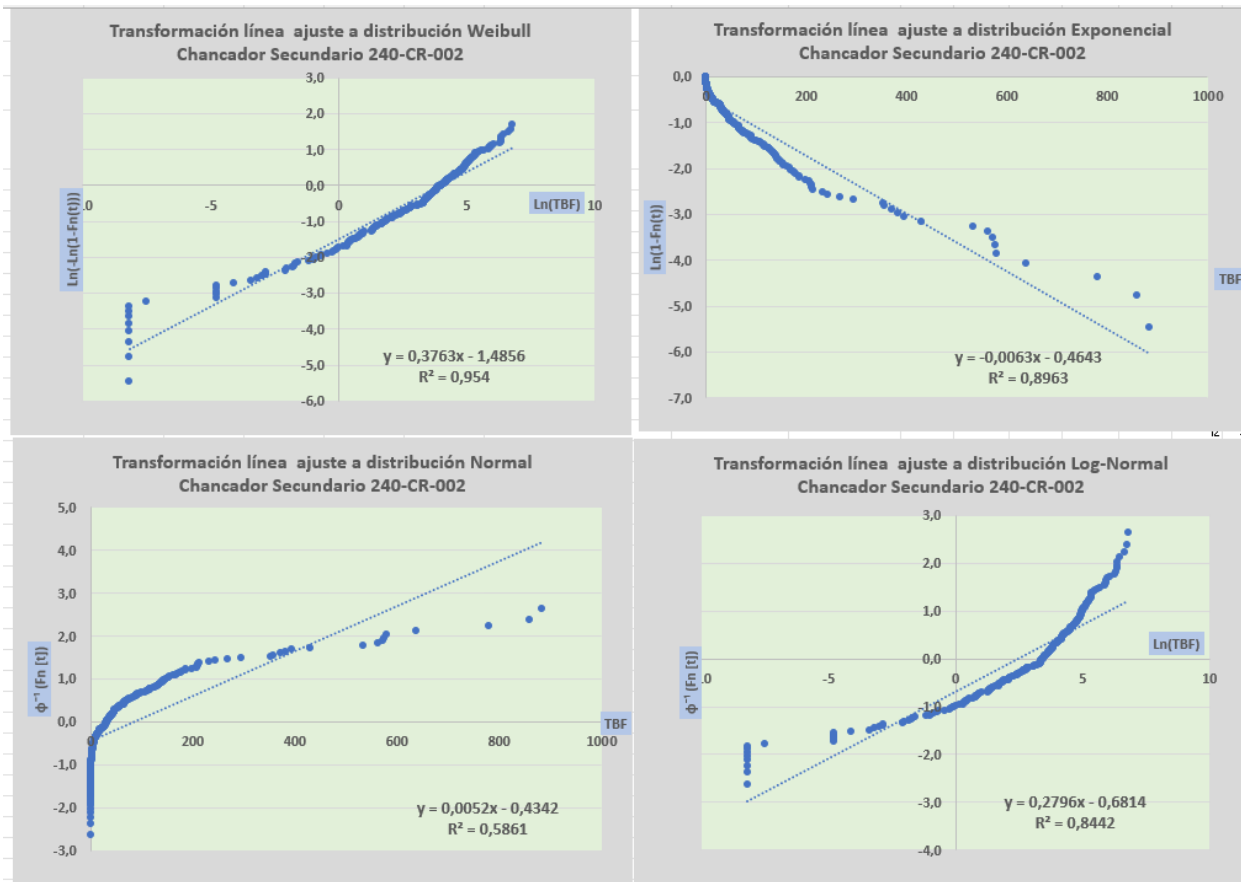
Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 39. Gráficos ajustados linealmente según el tipo de distribución 230-SN-001.



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Figura 40. Gráficos ajustados linealmente según el tipo de distribución 240-CR-00.



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.7. Disponibilidades equivalentes del circuito de chancado fino (análisis RBD)

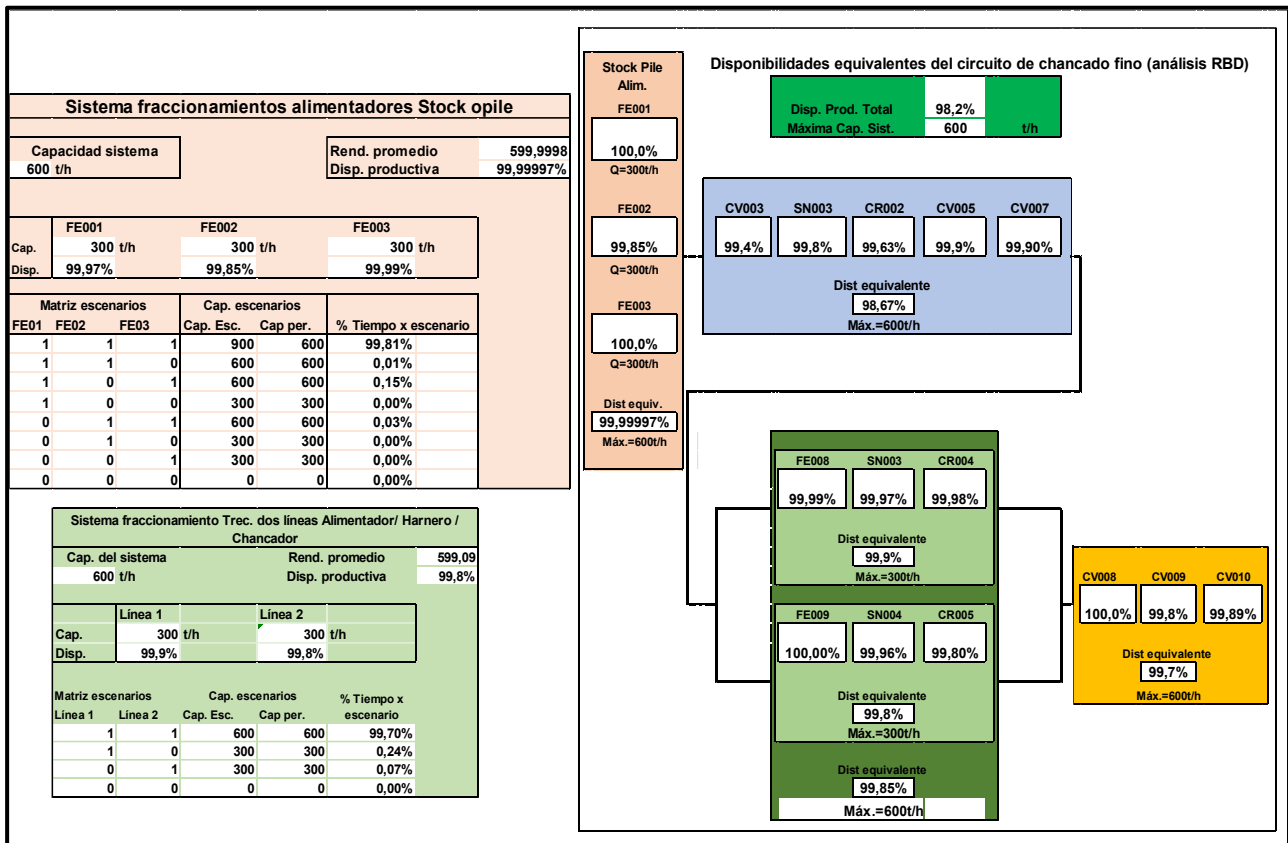
El RBD del chancado fino (Figura 41) permite calcular las disponibilidades equivalentes por bloques e identificar las restricciones más relevantes del sistema. El bloque de alimentación (FE001–FE003) alcanza un 100 %, descartándose como limitante. La rama azul (CV003–SN003–CR002–CV005–CV007) presenta la menor confiabilidad, con 98,67 %, siendo CV003 (99,4 %) y CR002 (99,63 %) los equipos más críticos. La rama verde (FE008–SN003–CR004 y FE009–SN004–CR005) muestra una confiabilidad de 99,85 %, aunque condicionada por el desempeño de CR005 (99,8 %). En tanto, las correas finales (CV008–CV009–CV010) alcanzan 99,7 %, con participación marginal de CV009 y CV010.

De este análisis se desprende que la disponibilidad global del circuito se sitúa en torno a 98,2 %, condicionada principalmente por la rama azul. Los escenarios de sensibilidad “what-if” confirman que una mejora en CV003 hasta 99,8 % y en CR002 hasta 99,9 % permitiría elevar la disponibilidad total en aproximadamente 0,62 puntos porcentuales, mientras que las acciones aplicadas en las correas finales aportarían apenas 0,16 puntos porcentuales. En la rama verde, un incremento en la confiabilidad de CR005 de 99,8 % a 99,9 % contribuiría a reforzar la redundancia del sistema.

A partir de estos resultados, la priorización técnica se orienta hacia CV003 y CR002 como focos principales de intervención, proponiendo acciones específicas de alineación, limpieza, control de transferencia y disponibilidad de repuestos críticos en el primero, y estrategias predictivas y de gestión de repuestos en el segundo. De forma complementaria, se recomiendan mejoras en CV010 y CR005, considerando que la CV009 no se incorpora en el escenario de circuito cerrado inverso y, por lo tanto, no constituye un objetivo de intervención futura.

En síntesis, el RBD confirma que el desempeño del circuito depende principalmente de la confiabilidad de CV003 y CR002, por lo que las acciones de mejora deben concentrarse en estos equipos para elevar la disponibilidad global y asegurar la estabilidad del P80.

Figura 41. Capacidad por escenarios y disponibilidades equivalentes por bloque del circuito de chancado fino (análisis RBD)



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.8. Confiabilidad de misión del circuito de chancado fino (RBD, R(t=744h))

El análisis de misión mediante RBD (Figura 42) evidencia que la rama azul constituye la principal limitante de la confiabilidad global, con un R(t) mensual de apenas 0,00086 %. Dentro de esta rama, los equipos CV003 y CR002 concentran los valores más bajos ($\approx 1,5\%$ y $\approx 6,6\%$, respectivamente), arrastrando el desempeño del bloque en serie. La cadena final de correas también presenta una confiabilidad reducida ($\approx 1,5\%$), condicionada principalmente

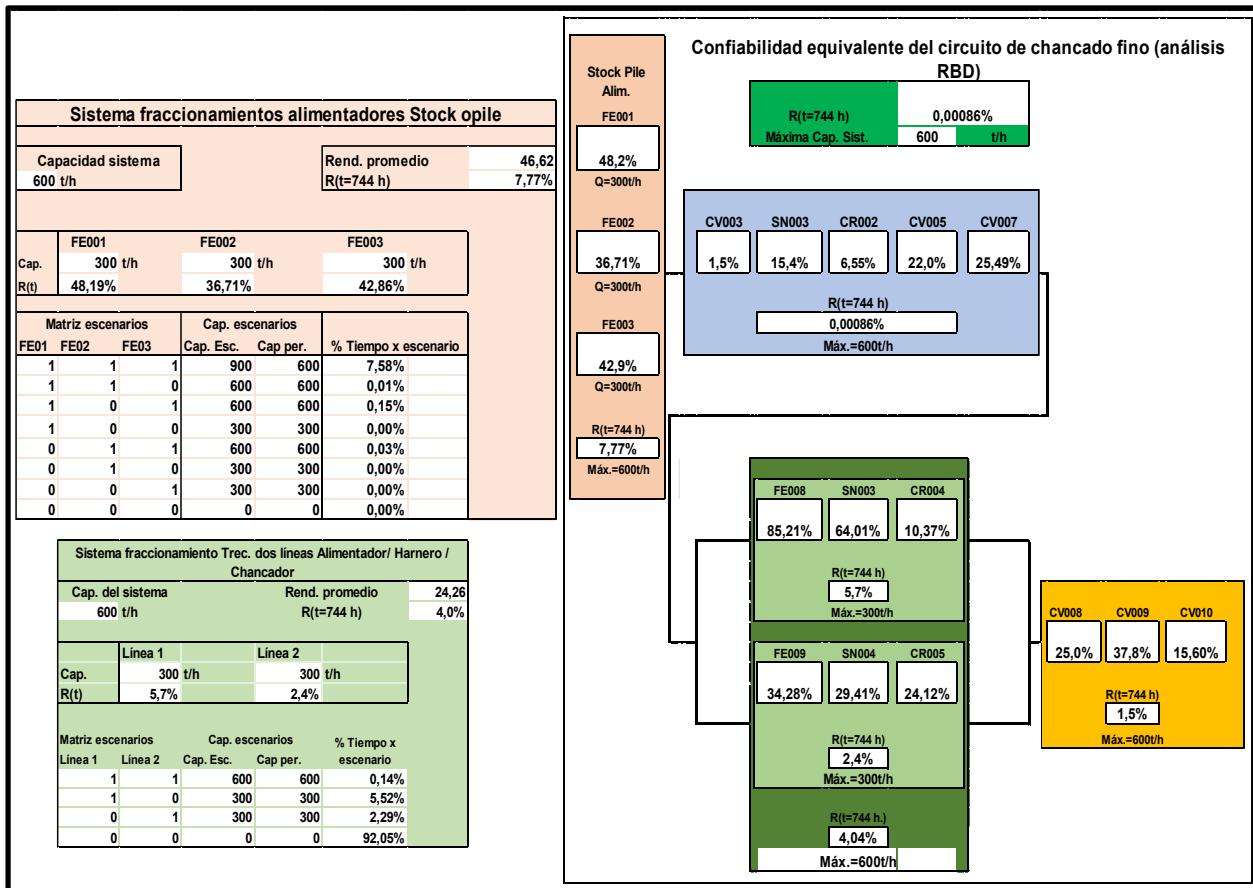
por CV010, mientras que la rama verde, aun con redundancia, alcanza solo 4,04 %, restringida por SN004 y CR005.

Los escenarios de sensibilidad “what-if” muestran que mejoras específicas en CV003 y CR002 generan incrementos multiplicativos en la confiabilidad del bloque azul ($\times 3,3$ y $\times 1,8$, respectivamente), y en conjunto podrían sextuplicar su $R(t)$. En la cadena final, elevar la confiabilidad de CV010 hasta un 30 % prácticamente duplicaría la del bloque, aunque con impacto menor a nivel de sistema.

En consecuencia, la priorización técnica preliminar debe centrarse en CV003 y CR002, reforzando limpieza, alineación, estrategias predictivas y gestión de repuestos críticos; complementariamente, se recomiendan acciones sobre CV010 y CR005 para robustecer la cadena final y la redundancia de la rama verde. La estrategia de misión también debiera considerar horizontes más cortos (< 744 h) para elevar $R(t)$ en ventanas operativas semanales o por turno.

En síntesis, la confiabilidad de misión del circuito está condicionada por pocos equipos críticos, y las acciones de mejora sobre ellos constituyen la vía principal para aumentar la estabilidad y disponibilidad efectiva en la etapa Mejorar del DMAIC.

Figura 42. Confiabilidad equivalente $R(t=744h)$ del circuito de chancado fino mediante RBD, con fraccionamiento de alimentadores y dos líneas Alimentador–Harnero–Chancador (capacidad base 600 t/h).



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.9. Análisis de confiabilidad temporal por equipos ($R(t)$ de 1 h a 31 días)

En esta subsección se analiza la evolución de la confiabilidad $R(t)$ de los equipos del circuito de chancado fino en horizontes desde 1 h hasta 31 días, utilizando como base el mapa de calor de la Figura 43. Esta herramienta permite observar cómo se degradan los equipos y bloques a lo largo del tiempo, diferenciando aquellos componentes que presentan un comportamiento más robusto de aquellos que condicionan de manera crítica la confiabilidad del sistema. El recurso gráfico no solo entrega una visión global del sistema, sino que facilita la identificación de tendencias específicas y equipos cuya intervención es prioritaria.

Los resultados muestran que la pérdida de confiabilidad es mucho más marcada en las primeras horas de operación, particularmente entre 1 y 72 h, donde los valores de $R(t)$ caen de manera acelerada. Posteriormente, la curva tiende a estabilizarse en niveles bajos a medida que se amplía el horizonte de análisis. En el caso de los alimentadores (FE001–FE003), la degradación es progresiva: a 24 h mantienen niveles medios-altos, mientras que entre 7 y 28 días cruzan la barrera del 50 %. Dentro de este grupo, FE002 se presenta como el equipo más exigido, mientras que FE001 evidencia un desempeño más robusto, lo que indica una heterogeneidad incluso dentro del mismo subsistema.

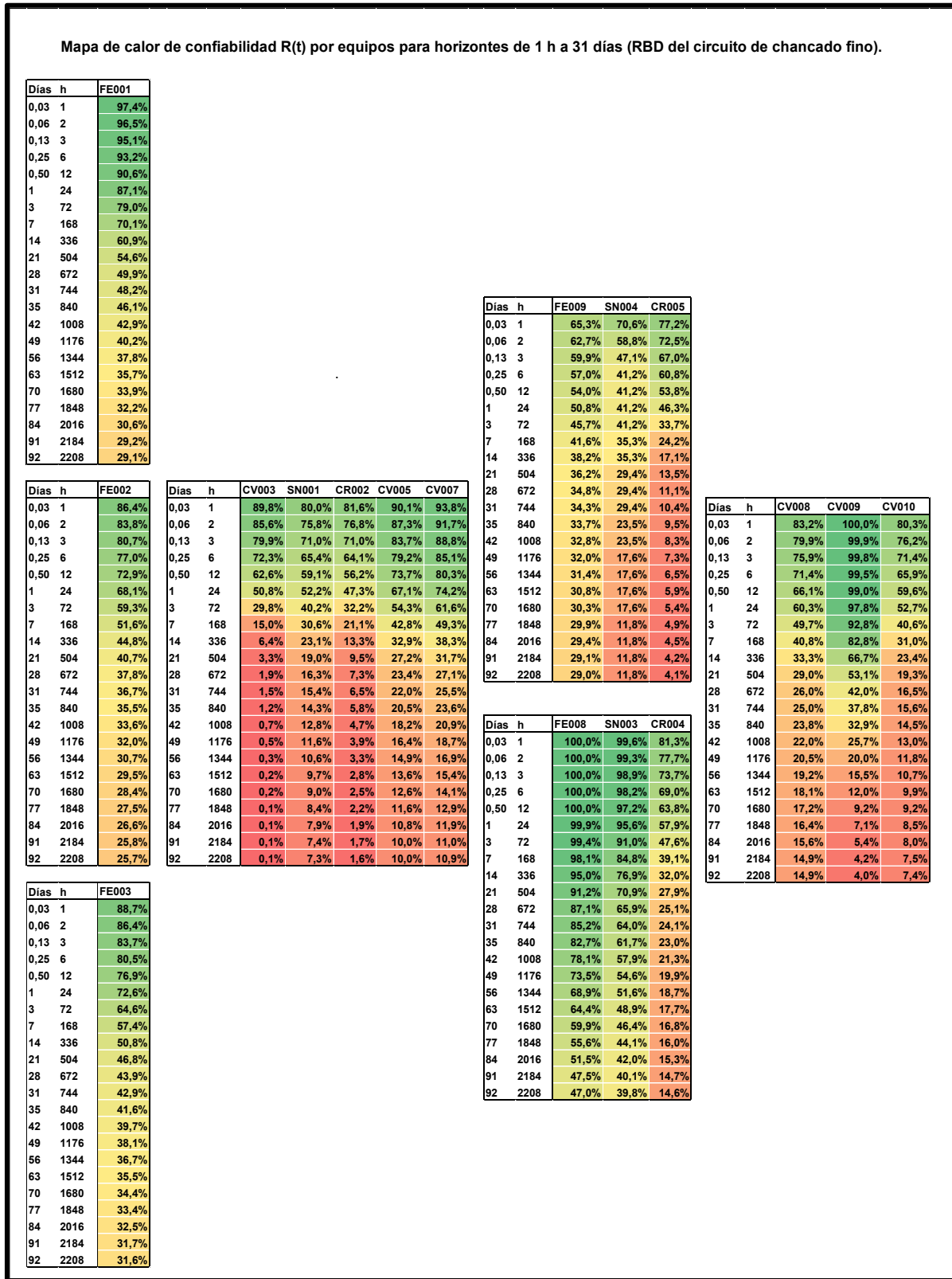
La rama azul (CV003–SN003–CR002–CV005–CV007) constituye el principal cuello de confiabilidad, ya que a 31 días los valores de CV003 y CR002 se sitúan apenas en torno al 1,5 % y 6–7 %, respectivamente, arrastrando al conjunto del bloque en serie. SN003, aunque presenta un comportamiento inicial aceptable (≈ 77 % a 3 días), desciende de manera pronunciada hasta ubicarse bajo el 40 % al mes, mientras que CV005 y CV007 se mantienen en niveles intermedios (22–25 %), insuficientes para sostener el bloque.

En la rama verde, conformada por dos líneas paralelas, la redundancia suaviza parcialmente la caída, aunque cada sub-línea opera en serie. En la línea A, FE008 logra conservar valores altos (≥ 80 % a 31 días), pero el desempeño de CR004 se convierte en el factor limitante. En la línea B, en tanto, FE009 cruza rápidamente bajo el 30 % mensual y se combina con las restricciones ya existentes en SN004–CR005, debilitando el potencial de la redundancia.

Las correas finales (CV008–CV010) también reflejan niveles bajos de confiabilidad hacia el mes, con CV009 mostrando un comportamiento estable y superior al 90 %, aunque neutralizado por CV010, que apenas alcanza un 15–16 %, consolidándose como el equipo más débil de esta etapa.

En síntesis, la lectura del mapa de calor permite establecer prioridades técnicas claras: (i) atacar la criticidad de CV003 y CR002 en la rama azul; (ii) reforzar la confiabilidad de CV010 y, en segundo plano, de CV008 en la cadena final; (iii) elevar el desempeño de CR004 y del conjunto SN004–CR005 para que la redundancia de la rama verde sea efectiva; y (iv) gestionar la operación en horizontes más cortos (≤ 168 h), dado que la pérdida de confiabilidad es más intensa en los primeros días que tras la primera semana

Figura.43 Mapa de calor de confiabilidad R(t) por equipos para horizontes de 1 h a 31 días (RBD del circuito de chancado fino).



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.10. Análisis Jack-Knife del circuito de chancado fino (equipos, subsistemas y componentes; horizonte 36 meses)

A continuación, se caracteriza el comportamiento observado durante 36 meses mediante diagramas Jack-Knife por equipos, subsistemas y componentes, usando como cortes de referencia 40 eventos (frecuencia) y 1,0 h (MTTR). Las Figuras 45–47, en distintos niveles jerárquicos (ISO 14224), ubican los equipos del circuito —CV003, CV008, CV010, CR002 y SN003, entre otros— en los cuadrantes Agudo-Crónico, Crónico, Agudo y Leve. La lectura se integra con lo mostrado en $R(t)$ y con la estructura del sistema representada en el RBD.

6.2.10.1. Lectura por equipos

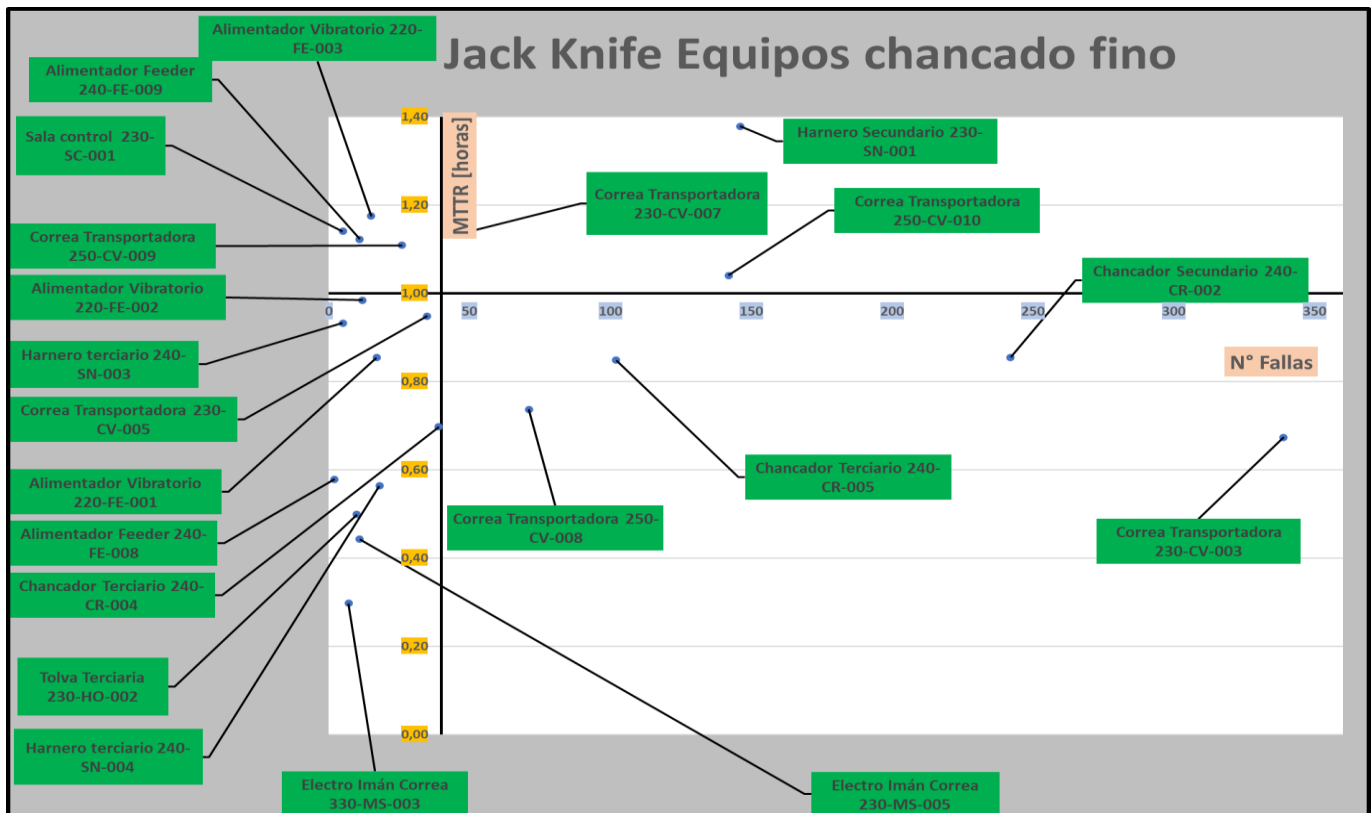
Observando el gráfico Jack-Knife de la Figura 44 (nivel de equipos), se distinguen claramente los cuadrantes definidos por frecuencia (40 eventos) y tiempo medio de reparación (1,0 h):

- Agudo-Crónico (≥ 40 eventos y $\geq 1,0$ h): sobresalen CV010 (147,8 h MTR) y SN-001 (201,4 h), con alto número de fallas y duraciones prolongadas.
- Crónico (< 40 eventos y $\geq 1,0$ h): destaca CV009 (28,9 h), con baja frecuencia, pero detenciones largas.
- Agudo (≥ 40 eventos y $< 1,0$ h): predominan CV003 (228,4 h) y CR002 (207,0 h), seguidos por CR005 y CV008, cuya recurrencia de fallas cortas acumula una fracción importante del tiempo perdido.
- Leve (< 40 eventos y $< 1,0$ h): aparecen CV005 y CR004, junto a algunos auxiliares, con baja ocurrencia y rápida recuperación.

El MTR agregado del conjunto es $\approx 1\ 158,6$ h. Los cuatro equipos con mayor impacto —CV003, CR002, SN-001 y CV010— explican cerca del 67,7 % del total, y al incluir CR005 se alcanza $\sim 75,2$ %. Por cuadrantes, Agudo concentra 57,8 % de los eventos y 49,6 % del MTR; Agudo-Crónico, 25,8 % y 35,0 %; Crónico, 4,4 % y 5,6 %; y Leve, 12,0 % y 9,9 %, confirmando que las pérdidas se concentran en Agudo y Agudo-Crónico.

La lectura mantiene consistencia con el análisis RBD, donde CV003, CV008, CV010 y CR002 ya habían sido identificados como críticos. En harneros, el Jack-Knife refuerza la importancia de SN-001 en Agudo-Crónico, mientras que SN-003 aparece como leve en el histórico; esta diferencia obedece a la variabilidad del período y a la nomenclatura empleada en la representación lógica del sistema.

Figura 44. Jack-Knife por equipos (N.º de fallas vs MTTR).



Fuente: Elaboración propia (2025), con datos de Minera Las Cenizas, (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

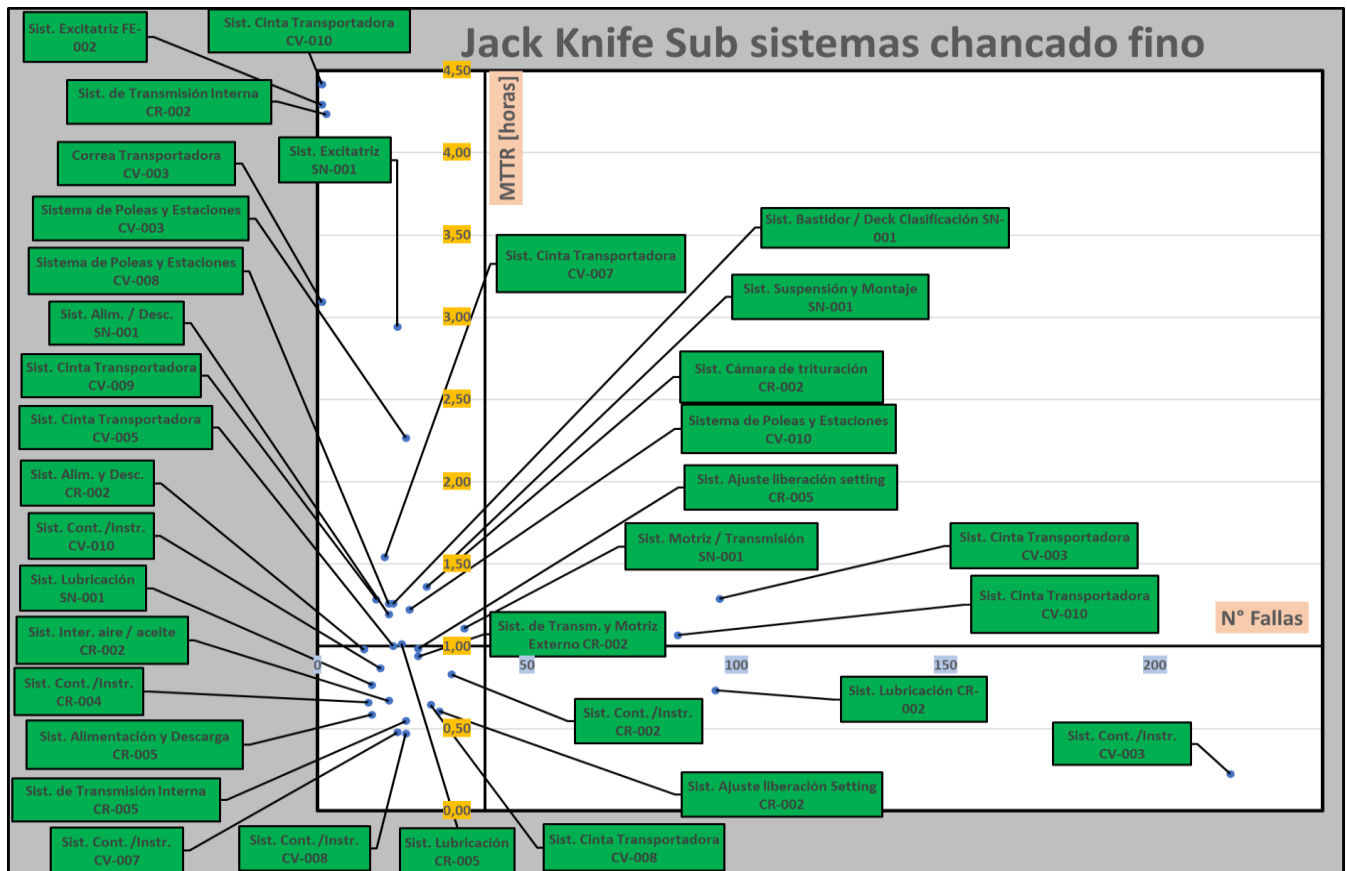
6.2.10.2. Lectura por subsistemas

Analizando el gráfico Jack-Knife de la Figura 45 (nivel de subsistemas), se observa:

- Agudo-Crónico (alta frecuencia, alto MTTR): sobresalen las correas del circuito, con el Sist. Cinta CV-003 (96 eventos; MTTR=1,29 h; MTR=123,8 h) y el Sist. Cinta CV-010 (86; 1,07 h; 91,8 h).
- Agudo (alta frecuencia, bajo MTTR): destacan el Sist. Cont./Instr. CV-003 (218; 0,23 h; 49,4 h) y el Sist. Lubricación CR-002 (95; 0,73 h; 69,7 h), cuya alta recurrencia explica un aporte significativo al tiempo perdido.
- Crónico (baja frecuencia, alto MTTR): los harneros SN-001 (Motriz/Transmisión, Suspensión-Montaje, Excitatriz y Bastidor/Deck) muestran MTTR $\geq 1-2$ h con frecuencia media; en chancado, la Cámara de trituración CR-002 alcanza 1,36 h de MTTR; en correas, se ubican las Poleas/Estaciones de CV-003 y CV-010 y los sistemas de Cinta en CV-007/009/005, todos con MTTR ≥ 1 h.
- Leve (baja frecuencia, bajo MTTR): aparecen subsistemas de control/instrumentación y alimentación/descarga en CR-002/CR-005, control en CV-008/007/010 y lubricación en SN-001, todos bajo ambos umbrales.

En síntesis, los subsistemas que concentran MTR corresponden a los mismos nodos señalados por el RBD (correos CV003–CV010, chancador CR002 y harnero SN-001), confirmando su criticidad estructural en el circuito de chancado fino.

Figura 45 Jack-Knife por subsistemas (N.º de fallas vs MTTR).



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

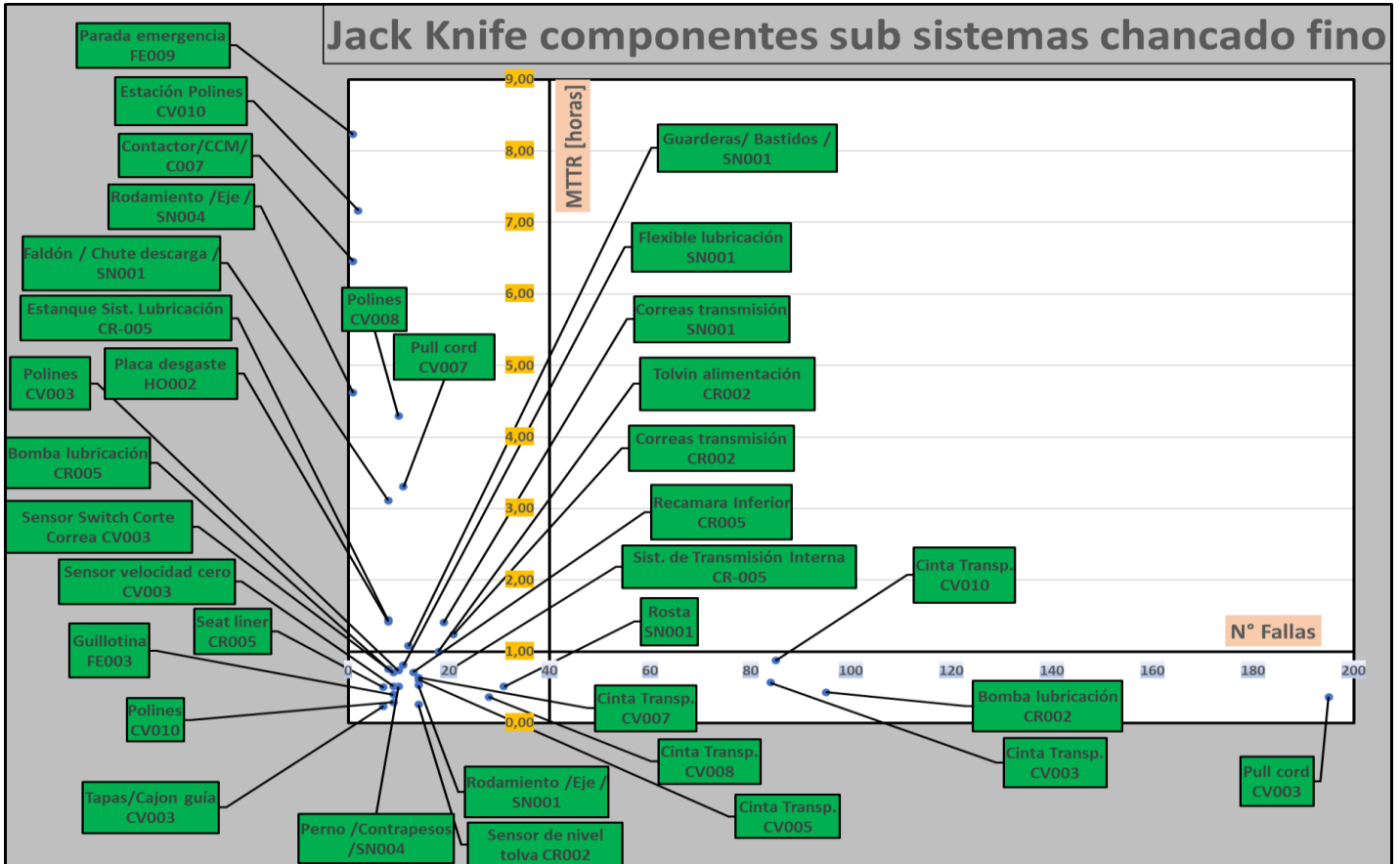
6.2.10.3. Lectura por componentes

Observando el gráfico Jack-Knife de la Figura 46 (nivel de componentes), se indica:

- Agudo-Crónico (alta frecuencia, alto MTTR): no se registran componentes que superen simultáneamente $N \geq 40$ y $MTTR \geq 1,0$ h en el horizonte de 36 meses. La severidad se reparte entre “muchas fallas cortas” (Agudo) y “pocas fallas largas” (Crónico).
- Agudo (alta frecuencia, bajo MTTR): destacan el Pull-cord CV003 (195 eventos; $MTTR=0,37$ h; $MTR=71,5$ h), la Bomba de lubricación CR002 (95; 0,43 h; 40,8 h), además de las Cintas CV010 (85; 0,87 h; 74,2 h) y CV003 (84; 0,57 h; 47,6 h). También aparecen elementos recurrentes asociados a CV003/CV010 y al CR002.
- Crónico (baja frecuencia, alto MTTR): resaltan las Correas de transmisión en SN001 (19; 1,40 h; 26,7 h) y CR002 (21; 1,24 h; 26,0 h), el Tolvin de alimentación CR002 (18; 1,00 h; 18,0 h), los Polines CV008 (10; 4,29 h; 42,9 h) y las Guarderas/Bastidores SN001 (12; 1,08 h; 12,9 h). Se suman ítems puntuales de CV010 (bastón de desalineamiento, estaciones de polines) con MTTR elevado y baja frecuencia.
- Leve (baja frecuencia, bajo MTTR): un conjunto amplio de elementos de rápida recuperación, como la Rosta SN001, la Transmisión interna CR005, la Cinta CV008, además de sensores y rodamientos en CV003/CV010.

Relación con el circuito y el RBD (síntesis): los componentes que dominan por frecuencia y/o MTR se concentran en las correas CV003–CV010 (rama azul y bloque final), el chancador CR002 y el harnero SN001, en coherencia con la estructura en serie del RBD y con lo observado en la confiabilidad R(t).

Figura 46. Jack-Knife por componentes (N.º de fallas vs MTR).



Fuente: Elaboración propia (2025). con datos de Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.2.11. Analizar – Escenarios de chancado secundario–terciario

El análisis de 2024 había evidenciado que el circuito abierto presentaba limitaciones para garantizar la estabilidad del P80 frente a variaciones en la granulometría de la alimentación. La simulación realizada en Sandvik PlantDesigner (10/09/2025) amplió este diagnóstico evaluando distintas configuraciones de chancadores secundarios y terciarios, incluyendo el escenario de circuito cerrado con CH860i, no considerado en el estudio base. Los resultados de estas simulaciones se ilustran en las Figuras 47 a 51.

Los resultados comparativos se resumen en la Tabla 32, que contrasta cinco escenarios de operación:

Tabla 32. Resultados comparativos de simulaciones en circuito secundario–terciario (Sandvik PlantDesigner, 10/09/2025)

Escenario	Configuración	Throughput máx. (t/h)	P80 (mm)	Comentarios
-----------	---------------	-----------------------	----------	-------------

1. Terciario cámara media	CSS 13 mm, circuito abierto	650	11,3	Mantiene capacidad, no cumple meta de P80 ≤ 10 mm
2. Terciario cámara fina	CSS 10 mm, circuito abierto	500	9	Cumple meta granulométrica, pero reduce capacidad global
3. Secundario CH660	CSS 42 mm, circuito abierto	650	11,2	Terciarios con baja carga, no cumple meta de P80
4. Secundario CH860i	CSS 32 mm, circuito abierto	650	10,5	Mejora hacia la meta, capacidad constante
5. Secundario CH860i cerrado (sin CV009)	CSS 32 mm, circuito cerrado	750	9,4	Cumple meta de P80 y aumenta capacidad; nuevos cuellos en harneros terciarios

Fuente: Elaboración propia (2025), con base en Sandvik Mining and Rock Solutions. (2024). Simulación de circuito de chancado secundario–terciario – PlantDesigner SIM240048-2 (Caso Base, Cámaras Media y Fina, Circuitos Abierto y Cerrado CH660/CH860i, Condición CAP PEAK). Informe técnico preliminar, proyecto CL240048, Planta de Chancado Secundario y Terciario, SCM Franke.

La comparación muestra que los cambios de cámara en el chancador terciario (escenarios 1 y 2) permiten reducir la granulometría, pero sin constituir una solución integral: con cámara media no se cumple el $P80 \leq 10$ mm, y con cámara fina, aunque se alcanza $P80 = 9,0$ mm, la capacidad global se reduce a 500 t/h. Las configuraciones con secundario CH660 y CH860i en circuito abierto (escenarios 3 y 4) mantienen 650 t/h, pero no logran cumplir con la meta de P80, quedando en 11,2 y 10,5 mm respectivamente.

El escenario con CH860i en circuito cerrado (escenario 5), representado en la Figura 42, constituye la alternativa estructural más robusta, al lograr simultáneamente un aumento de capacidad a 750 t/h y un P80 de 9,4 mm, cumpliendo con la meta operacional definida en 6.2.4. Una ventaja adicional es que este circuito cerrado asegura la granulometría final de manera independiente a la variabilidad de la alimentación, ya que todo el material es clasificado en los harneros antes de ser enviado al stockpile. La Tabla 33 detalla la distribución de flujos en este escenario, evidenciando la sobrecarga de las correas principales.

Tabla 33. Distribución de flujos por correa en escenario CH860i cerrado (sin CV009) – Simulación Sandvik PlantDesigner (10/09/2025)

Correa	Cap. nominal (t/h)	Flujo simulado (t/h)	Utilización (%)	Comentarios
CV003	586	≈750	≈128 %	Alimentación desde stockpile → cuello, requiere repotenciamiento.
CV005	239	≈375	≈157 %	Descarga a terciario (split 1/2) → sobrecarga, requiere repotenciamiento.
CV007	239	≈375	≈157 %	Paralela a CV005 (split 1/2) → sobrecarga, requiere repotenciamiento.
CV008	164	≈750	≈457 %	Única línea de producto tras eliminar CV009 → repotenciamiento mayor o reemplazo.
CV009	—	—	—	Eliminada en este escenario.
CV010	586	≈750	≈128 %	Transporte a stockpile final → sobrecarga, requiere repotenciamiento.

Fuente: Elaboración propia (2025), con base en Sandvik Mining and Rock Solutions. (2024). Simulación de circuito de chancado secundario–terciario – PlantDesigner SIM240048-2 (Caso Base, Cámaras Media y Fina, Circuitos Abierto y Cerrado CH660/CH860i, Condición CAP PEAK). Informe técnico preliminar, proyecto CL240048, Planta de Chancado Secundario y Terciario, SCM Franke.

El CH860i en circuito cerrado fue la opción seleccionada para el rediseño del circuito, pues combina de mejor forma granulometría, capacidad y recuperación metalúrgica (65–70 %, con máximos de ≈72 % en Barreal Seco). No obstante, su implementación exige un plan de repotenciamiento de correas y la optimización de harneros terciarios, para evitar que estos se conviertan en el nuevo cuello de botella y asegurar así la estabilidad operacional.

Figura 47. Simulación del circuito secundario-terciario en PlantDesigner (caso base Sandvik, 2024).

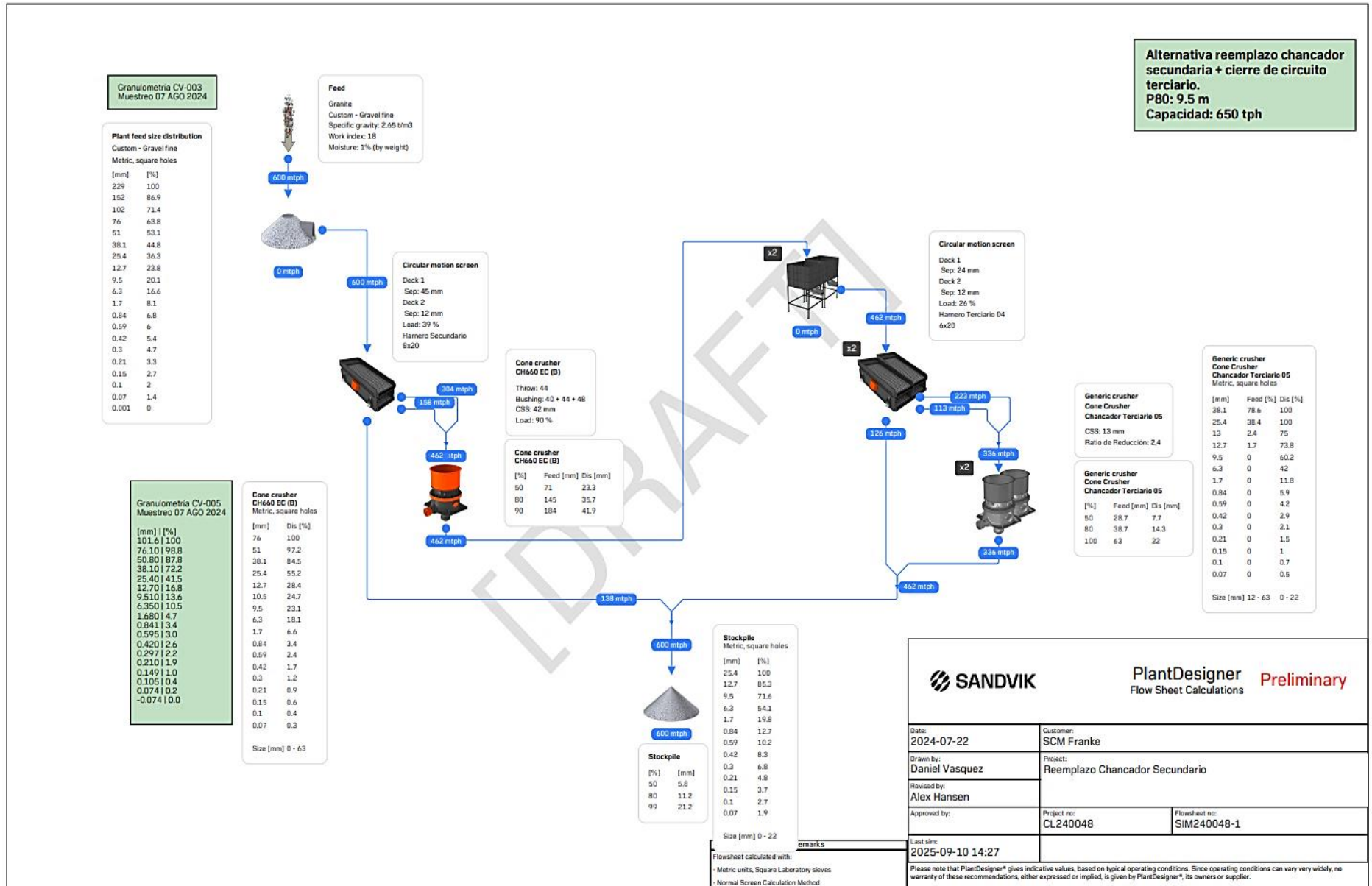
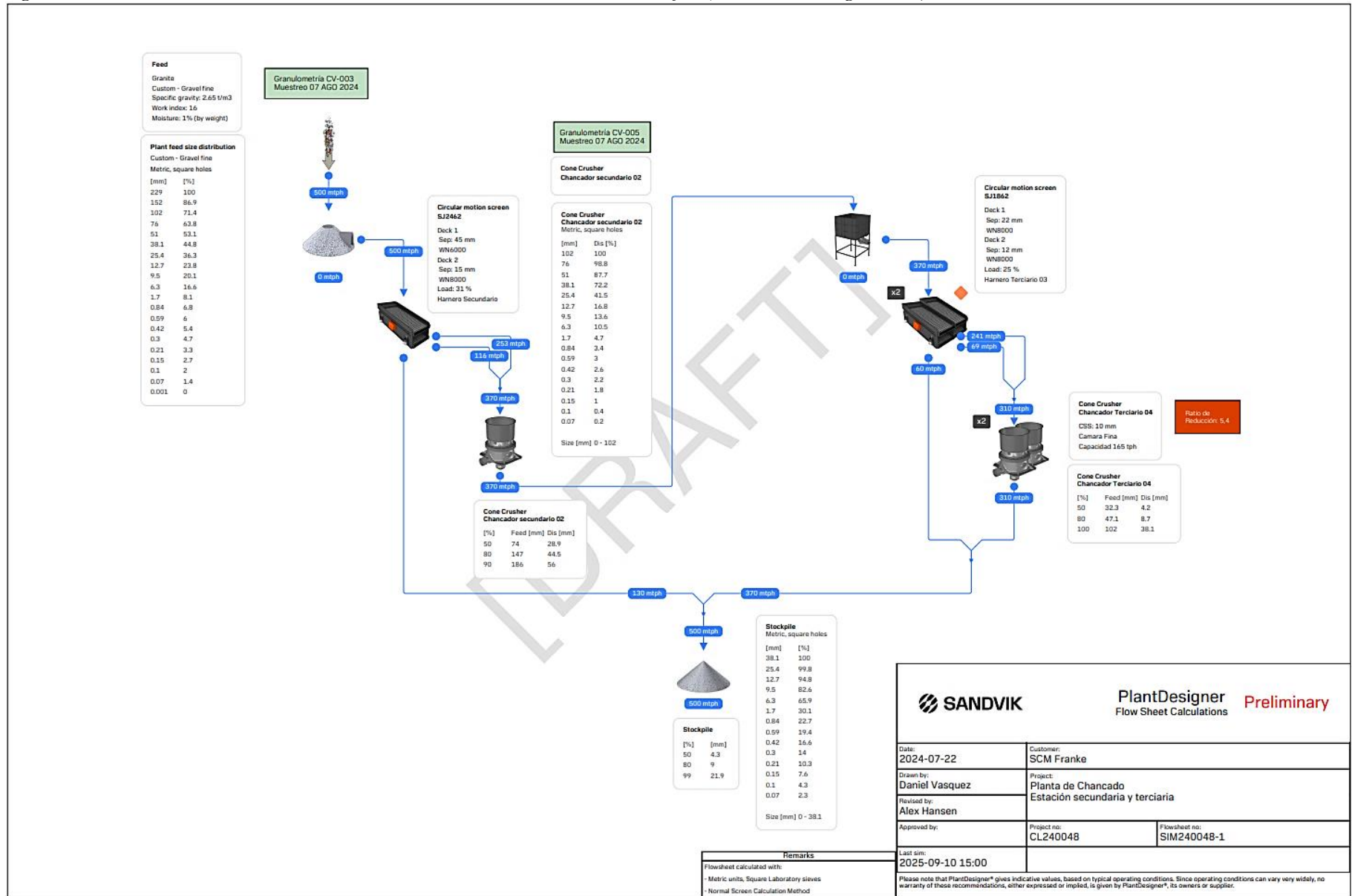
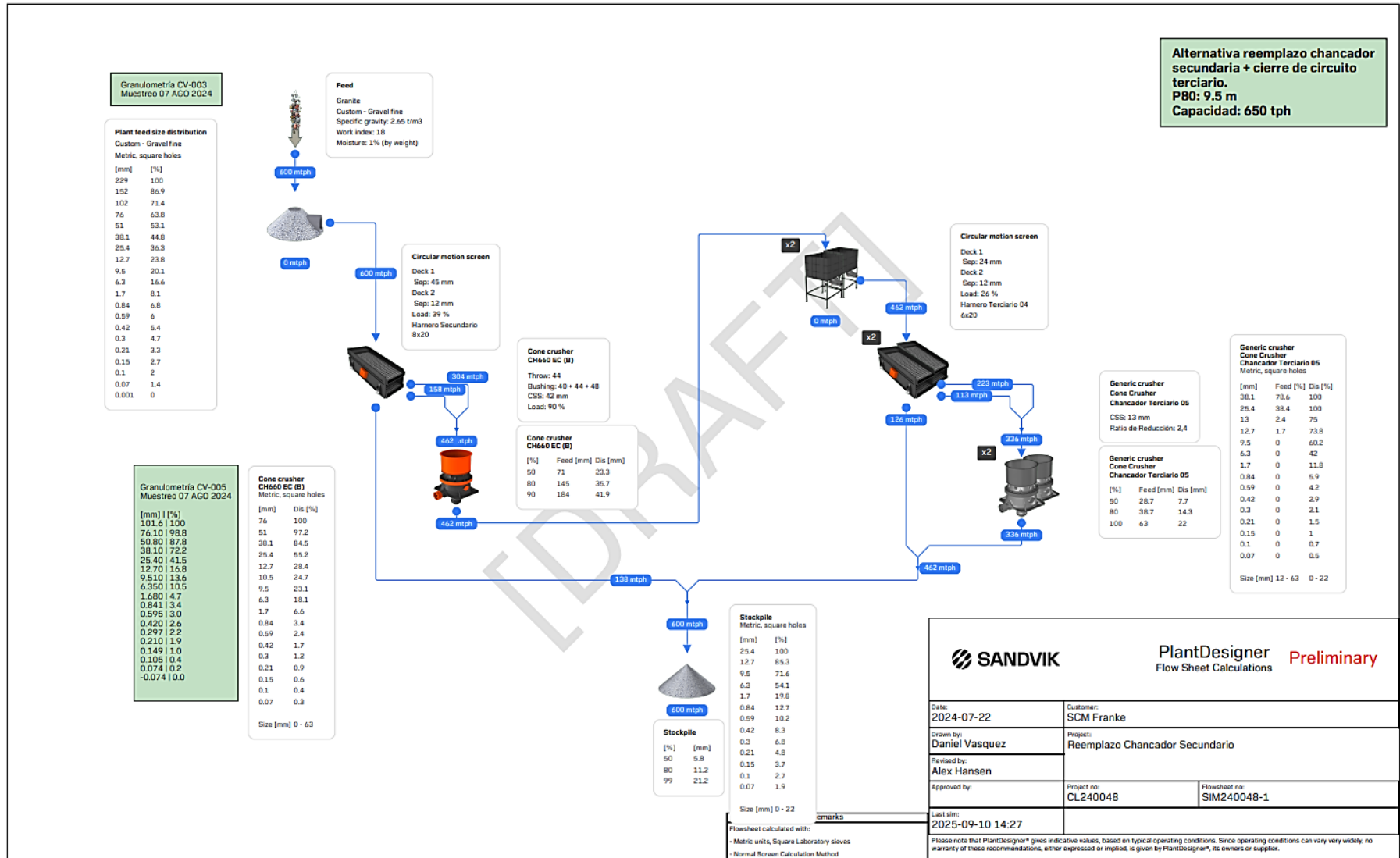


Figura 48. Simulación del circuito secundario–terciario con chancador terciario en cámara fina (Sandvik PlantDesigner, 2025).



Fuente: Sandvik Mining and Rock Solutions. (2024). Simulación de circuito de chancado secundario–terciario – PlantDesigner SIM240048-1 (Caso Base: Raptor XL400, Cámara Fina CSS 10 mm, Circuito Abierto). Informe técnico preliminar, proyecto CL240048, Planta de Chancado Secundario y Terciario, SCM Franke.

Figura 49. Simulación del circuito secundario-terciario con chancador secundario CH660 en circuito abierto (Sandvik PlantDesigner, 2025).



Fuente: Sandvik Mining and Rock Solutions. (2024). Simulación de circuito de chancado secundario-terciario - PlantDesigner SIM240048-1 (Caso Base: CH660 EC (B), CSS 42 mm, Circuito Abierto). Informe técnico preliminar, proyecto CL240048, Planta de Chancado Secundario y Terciario, SCM Franke.

Figura 50. Simulación del circuito secundario–terciario con chancador secundario CH860i en circuito abierto (Sandvik PlantDesigner, 2025).

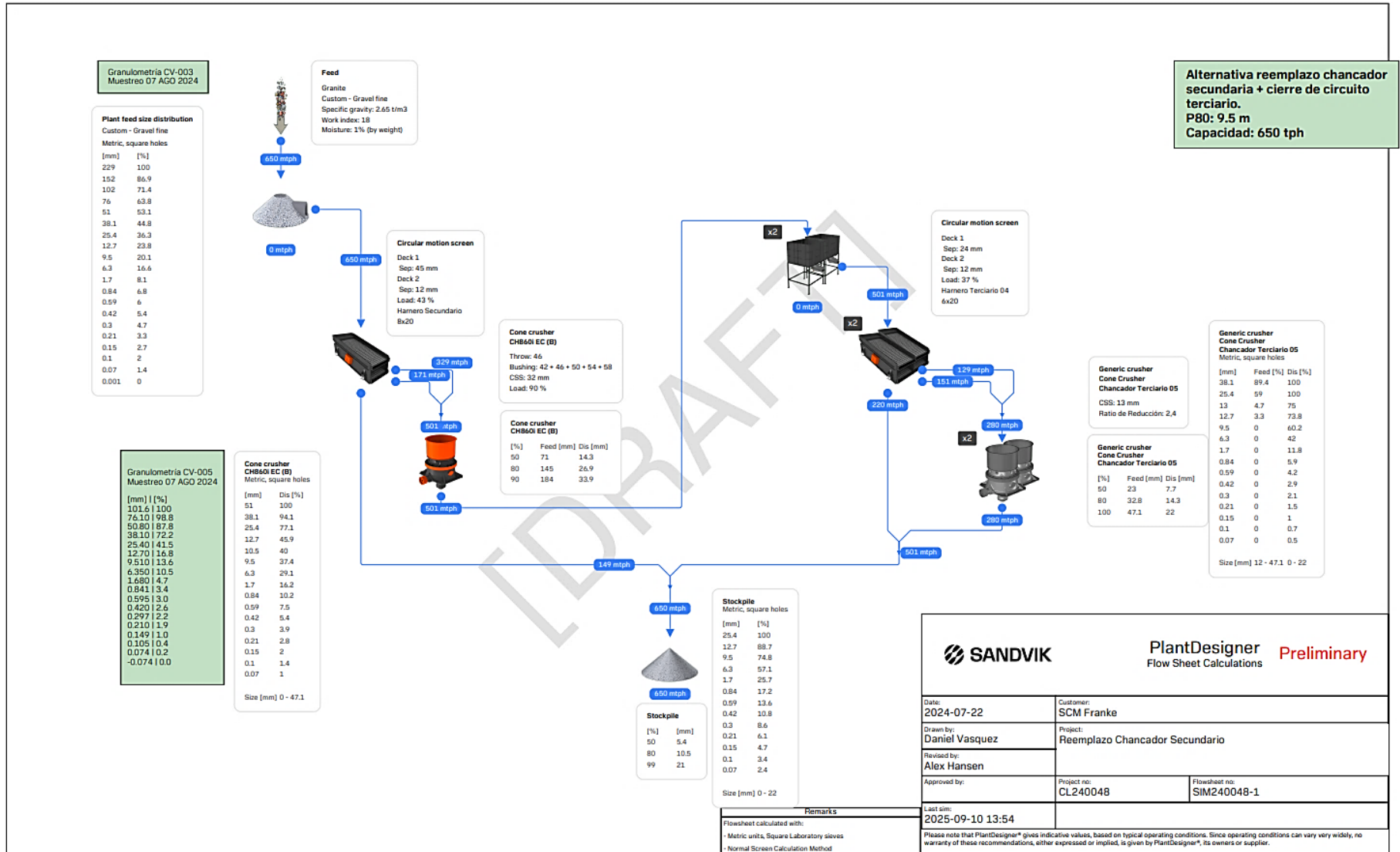
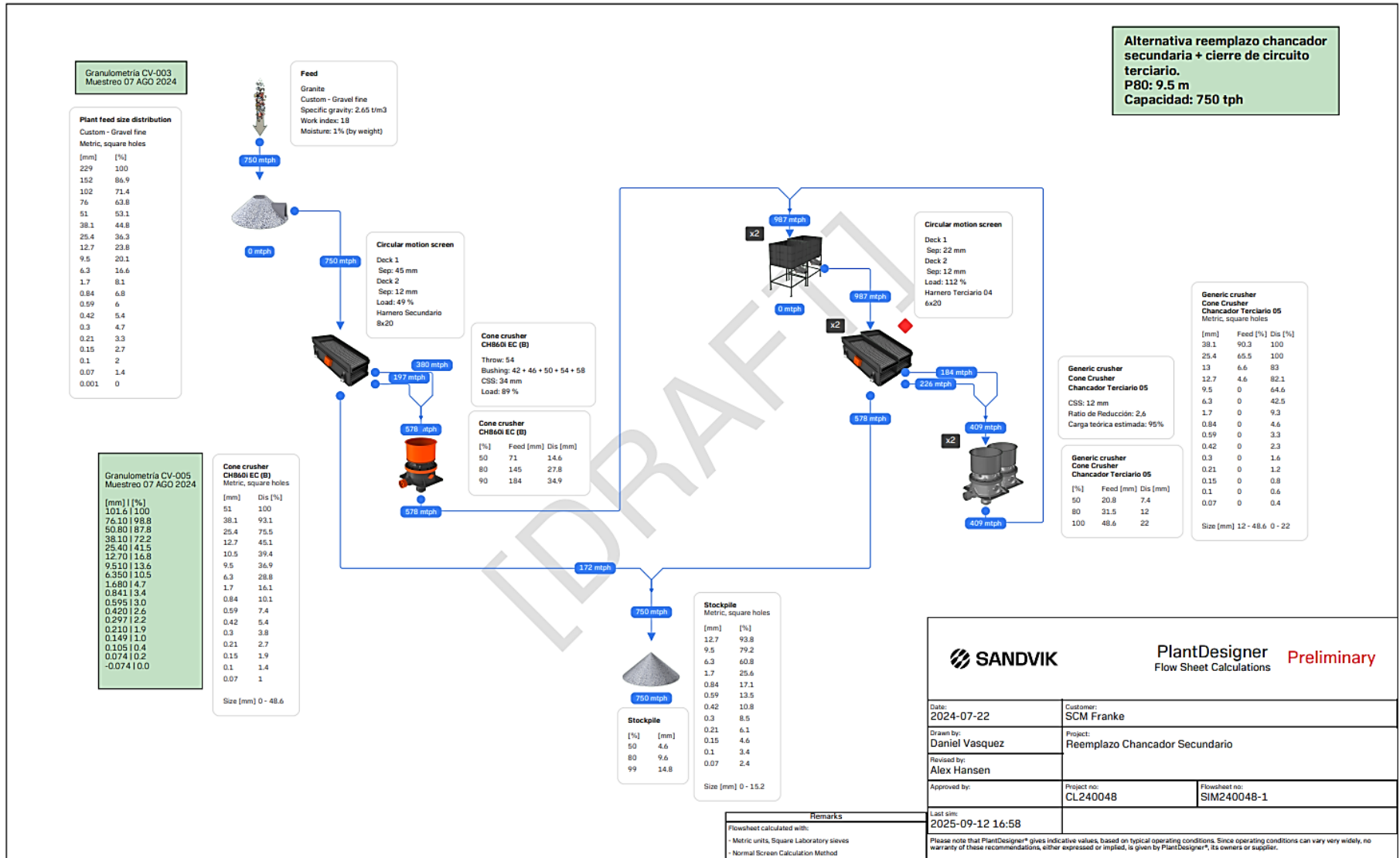


Figura 51. Simulación del circuito secundario-terciario con chancador secundario CH860i en circuito cerrado CAP PEAK (Sandvik PlantDesigner, 2025).



6.3. Mejorar

6.3.1. Punto de partida (resumen de Medir y Analizar)

El análisis se sustenta en 36 meses de operación ajustados a la alimentación efectiva de tolva (10,66 Mt) e integra tres miradas: el RBD del circuito, el mapa de confiabilidad $R(t)$ para horizontes de 1 h a 31 días y los diagramas Jack-Knife por niveles ISO 14224. La lectura conjunta ubica al chancado fino como restricción de capacidad, al concentrar detenciones y pérdida de rendimiento. En desempeño, el OEE histórico promedio se sitúa en 58,84 % considerando Primario, Fino y Aglomerado, normalizados a 10,66 Mt; desde aquí, toda mejora se orienta a cerrar esa brecha.

En el RBD, la disponibilidad equivalente de la rama azul es 98,67 % y la de las correas finales 99,7 %, situando la disponibilidad global en 98,2 %. En serie destacan CV003 y CR002 en la rama azul, mientras que la descarga CV009–CV010 explica la merma marginal del bloque final. El modelo indica que llevar CV003 a 99,8 % y CR002 a 99,9 % añadiría +0,62 pp de disponibilidad, y optimizar CV009–CV010 hasta 99,9–99,95 % sumaría +0,16 pp adicionales. La confiabilidad mensual R ($t = 744$ h) confirma la criticidad de la serie azul (CV003, CR002 y CV005–CV007) y revela el rol de CV010, cuyo $R(t)$ mensual bordea 15,6 %. Proyecciones muestran que elevar CV010 a ~30 % y CV008 a 35–40 % casi duplicaría la confiabilidad del bloque de salida.

Los Jack-Knife refuerzan lo anterior: CV003, CV008 y CV010 exhiben alta frecuencia de eventos; CR002 concentra volumen en el cuadrante Agudo y el harnero SN-001 destaca en Agudo-Crónico por sus tiempos de reparación. En síntesis, el circuito pierde por dos mecanismos paralelos: muchas paradas cortas en correas y pocas paradas largas en chancador y harnero, afectando disponibilidad, rendimiento y calidad. De aquí se definió operar en circuito cerrado inverso para asegurar $P80 \leq 10$ m.m Esta configuración elimina CV009, reduce nodos en serie y estabiliza la granulometría, alineando capacidad, estabilidad y control de calidad con la meta de elevar el OEE del circuito fino.

6.3.2. Enfoque OEE como eje de la mejora (A–P–Q)

El objetivo de esta etapa es elevar el OEE del circuito fino desde un histórico cercano al 58,84 % hasta la meta de proyecto 78,60%, actuando explícitamente sobre sus tres factores: Disponibilidad ($A = Dm \cdot Uo$), Rendimiento ($P = Ref.$) y Calidad ($Q = Qr$). Las intervenciones se seleccionan y priorizan a partir de lo medido en 6.2 y lo analizado en 6.3 (RBD, $R(t)$ y Jack-Knife), de modo que cada frente contribuya a A–P–Q de forma directa y comprobable.

6.3.2.1. Rama azul: CV003, CV005 y CV007

La rama azul condiciona la disponibilidad global (98,67 % en el RBD). CV003 presenta alta frecuencia de eventos y confiabilidad mensual muy baja ($R(t) \approx 1,5$ %), mientras que CV005–CV007 tienen confiabilidades intermedias (22–25 %), pero en serie con CR002 degradan el desempeño.

La mejora se centra en tres ejes comunes: (i) refuerzo del sistema motriz (motor,

reductor/variador, transmisión), (ii) robustecimiento de polines, rodamientos, chutes, faldones y guarderas para controlar derrames y atochamientos, y (iii) ajustes de parámetros operacionales como velocidad de cinta y tensión. CV005 se extenderá para asumir la descarga de los terciarios y reemplazar funcionalmente a CV009 en el esquema cerrado inverso. Además, se incorporan acciones de saneamiento eléctrico e instrumentación (velocidad cero, desalineamiento, pull-cord).

El efecto esperado es reducir detenciones por atascos y sobrecargas, elevar la confiabilidad mensual de la rama y capturar la ganancia conjunta CV003–CR002 prevista en el RBD ($\approx +0,62$ pp en la disponibilidad global).

6.3.2.2. Bloque final: CV008 y CV010 (con eliminación de CV009)

En el bloque de salida, CV010 muestra confiabilidad mensual muy baja ($\approx 15,6$ %) y CV008 se ubica en torno al 25–35 %. Se repotenciarán sus sistemas motrices y mecánicos, se optimizarán las transferencias y se revisará la instrumentación asociada. Al retirar CV009 del tren final y cerrar el circuito, se elimina un nodo en serie y se estabiliza la granulometría de descarga. Con estas medidas, se espera elevar la confiabilidad mensual del bloque (objetivo: CV010 ≈ 30 % y CV008 ≈ 35 –40 %), aportando cerca de $+0,16$ pp adicionales en la disponibilidad global, con menor variabilidad de tamaño y menos Micro-paradas.

6.3.2.3. Chancador secundario: reemplazo CR002 → CH860(i)

CR002 concentra eventos cortos (Jack-Knife) y condiciona el P80 del circuito. Será reemplazado por un CH860(i) operando en circuito cerrado inverso. La simulación CAP PEAK muestra P80 $\approx 9,4$ mm y tasas cercanas a 750 tph, trasladando la restricción hacia la clasificación.

Esta intervención exige obras de mayor inversión: modificación estructural y de fundaciones, rediseño de chutes, servicios auxiliares, repotenciamiento eléctrico, integración a sistemas de control, resguardos de seguridad y pruebas de puesta en marcha.

El efecto esperado es asegurar $P80 \leq 10$ mm de forma estable, reducir la carga circulante y reprocesos incidentales, y mejorar la alimentación al terciario. En conjunto con CV003, esta acción captura la mejora combinada estimada en $\approx +0,62$ pp de disponibilidad global, además de reforzar el rendimiento del circuito (≈ 750 tph efectivos).

6.3.2.4. Harnero secundario SN-001 (mantenibilidad)

SN-001 se ubica en zona Agudo-Crónico por altos tiempos de reparación en excitatriz, suspensión y bastidores. Aunque su frecuencia de fallas es menor que la de las correas, cada intervención prolonga el tiempo fuera de servicio.

Se habilitarán accesos e izaje seguros, kits de repuestos por tarea y protocolos estandarizados de montaje y desmontaje. Estas medidas de bajo costo reducen el MTTR y estabilizan el flujo hacia las correas de salida, aumentando la disponibilidad y regularidad operativa.

6.3.3. Disponibilidades equivalentes y Análisis de confiabilidad temporal por equipos (R(t) de 1 h a 31 días) posterior al proyecto de mejoras área chancado fino

6.3.3.1. La rama azul (CV003–SN003–CR002–CV005–CV007):

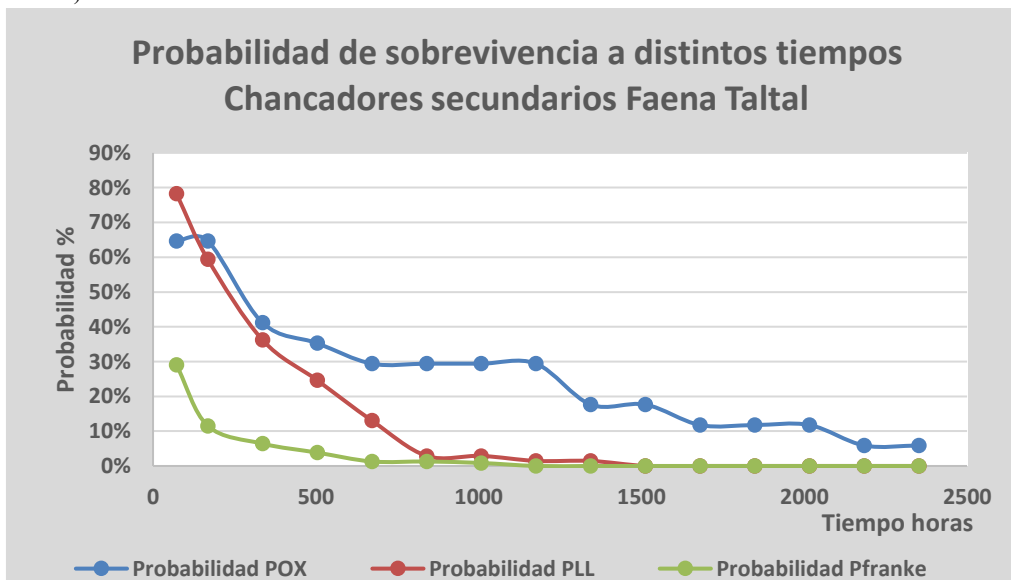
Chancador CR002: En este caso se realiza un benchmarking con las plantas PLL y POX de la minera, las cuales operan con chancadores Sandvik CH440, de tamaño similar a un Raptor XL400 y menores que un Sandvik CH860i, aunque comparables en funcionamiento, diseño estructural, control e instrumentación. En la planta POX se procesa mineral óxido con características de dureza W_i y granulometrías semejantes, y cuyo equipo entró en operación en 2011, el mismo año en que se instalaron los chancadores de Franke, mientras que la planta PLL procesa mineral de sulfuros de mayor dureza W_i y se encuentra en operación desde el año 2000. Considerando estas condiciones, se adopta como referencia la información estadística de disponibilidad y confiabilidad del chancador de POX para estimar el comportamiento esperado del CH860i que será instalado en la planta Franke. Tabla 34, figuras 53 y 54.

Tabla 34. Comparación de parámetros de confiabilidad y disponibilidad de chancadores en plantas de referencia (POX, PLL y Franke).

Faena	Ai	Beta	Alfa	MTBF	MTTR
POX	99,75%	0,60	514,9	779,4	1,96
Pfranke	99,63%	0,38	51,8	205,6	0,76
PLL	99,09%	1,05	328,7	322,0	2,96

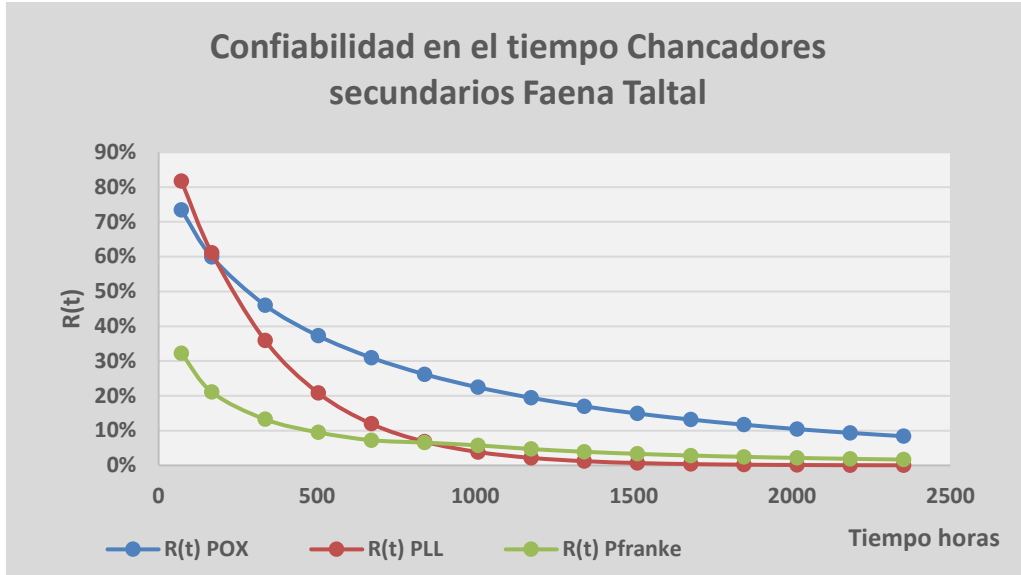
Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Minera Las Cenizas (2025) – Datos operacionales de las plantas RLV, POX y PLL (Áreas de Mantenimiento y Planificación).

Figura 52. Probabilidad de sobrevivencia a distintos tiempos para chancadores secundarios en Faena Taltal (POX, PLL y Franke).



Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Minera Las Cenizas (2025) – Datos operacionales de las plantas RLV, POX y PLL (Áreas de Mantenimiento y Planificación).

Figura 53. Confiabilidad en el tiempo $R(t)$ para chancadores secundarios en Faena Taltal (POX, PLL y Franke).



Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Minera Las Cenizas (2025) – Datos operacionales de las plantas RLV, POX y PLL (Áreas de Mantenimiento y Planificación).

Correa CV003: Se realiza una filtración de modos mitigables de falla como activación de pull cord, desalineamiento de cinta y otros, obteniendo las siguientes disminuciones estimadas:

- Activación pull cord: reducción a 4,1 %
- Desalineamiento de cinta: reducción a 13 %
- Instalación de grampa: reducción a 13 %
- Otros tipos de fallas: reducción a 20 %

Con estas medidas, la cantidad de eventos se reduce de 338 a 30 en un periodo de 36 meses, lo que corresponde a un 8,9 % del valor actual.

Para reducir el tamaño de las muestras y hacer que sean más representativas y aleatorias, se utiliza el complemento Análisis de datos de Excel, específicamente la herramienta de Muestreo, que permite seleccionar subconjuntos de datos de manera controlada y estadísticamente válida.

Equipos SN001–CV005–CV007: En este caso, al no identificarse modos de falla mitigables con un peso significativo respecto del total, se opta por aplicar una disminución general de las fallas en el rango de 20 % a 30 %:

- Harnero SN001 disminución a un 22%
- Correa CV005 disminución a un 29%
- Correa CV007 disminución a un 31,3%

Para ello, se utiliza también el complemento Análisis de datos de Excel, lo que permite obtener las siguientes disminuciones estimadas, las cuales podrían alcanzarse con la implementación de las mejoras propuestas.

6.3.3.2. Rama verde (FE008–SN003–CR004 // FE009–SN004–CR005)

En este caso se estima que, al implementar mejoras operacionales y optimizar el chute pantalón, la alimentación al circuito FE009–SN004–CR005 podrá igualarse al flujo másico de FE008–SN003–CR004, lo que permitiría obtener disponibilidades y confiabilidades equiparables en ambos ramales. No obstante, para efectos del análisis se asume que FE009–SN004–CR005 presentará un desempeño levemente inferior, con una confiabilidad y disponibilidad consideradas ligeramente menores respecto a la rama FE008–SN003–CR004.

6.3.3.3. Rama Amarilla (CV008 –CC010)

Correa CV008: Se realiza una filtración del modo mitigable desalineamiento de cinta y otros, obteniendo las siguientes disminuciones estimadas, en este caso también se utiliza el complemento Análisis de datos de Excel:

- Desalineamiento de cinta: reducción a 7 %
- Otros tipos de fallas: reducción a 20,4 %
-

Con estas medidas, la cantidad de eventos se reduce de 130 a 18 en un periodo de 36 meses, lo que corresponde a un 14 % del valor actual.

Correa CV010: Se realiza una filtración del modo mitigable desalineamiento de cinta y otros, obteniendo las siguientes disminuciones estimadas, en este caso también se utiliza el complemento Análisis de datos de Excel:

- Desalineamiento de cinta: reducción a 17%
- Activación pull cord: reducción a 29%
- Cambio polines: reducción a 22%
- Otros tipos de fallas: reducción a 16%

Con estas medidas, la cantidad de eventos se reduce de 65 a 11 en un periodo de 36 meses, lo que corresponde a un 16,9% del valor actual.

6.3.3.4. Resultado Disponibilidad mejorada.

Rama Azul (CV003–SN003–CR002–CV005–CV007)

En la rama azul se aprecia una mejora leve en la disponibilidad equivalente, que aumenta de 98,67 % en el escenario actual a 98,75 % con las optimizaciones. Este avance se relaciona con la mayor confiabilidad alcanzada en las correas CV005 y CV007, que reducen Micro-paradas y estabilizan el flujo de mineral hacia el chancador secundario. Aunque el efecto cuantitativo es moderado, su aporte es relevante en términos de continuidad operacional, ya que asegura una base más estable para el resto del circuito.

Rama Verde (FE008–SN003–CR004 y FE009–SN004–CR005)

En la rama verde se evidencia un progreso más significativo, especialmente al reducirse la diferencia de desempeño entre los ramales paralelos. La disponibilidad equivalente asciende de 99,85 % a 99,93 %, como resultado de la optimización del chute pantalón y de mejoras operacionales que permiten equiparar la alimentación de FE009–SN004–CR005 con la de FE008–SN003–CR004. De esta forma, ambos ramales alcanzan indicadores de confiabilidad prácticamente equivalentes, consolidando un esquema más balanceado y menos vulnerable a descompensaciones de flujo.

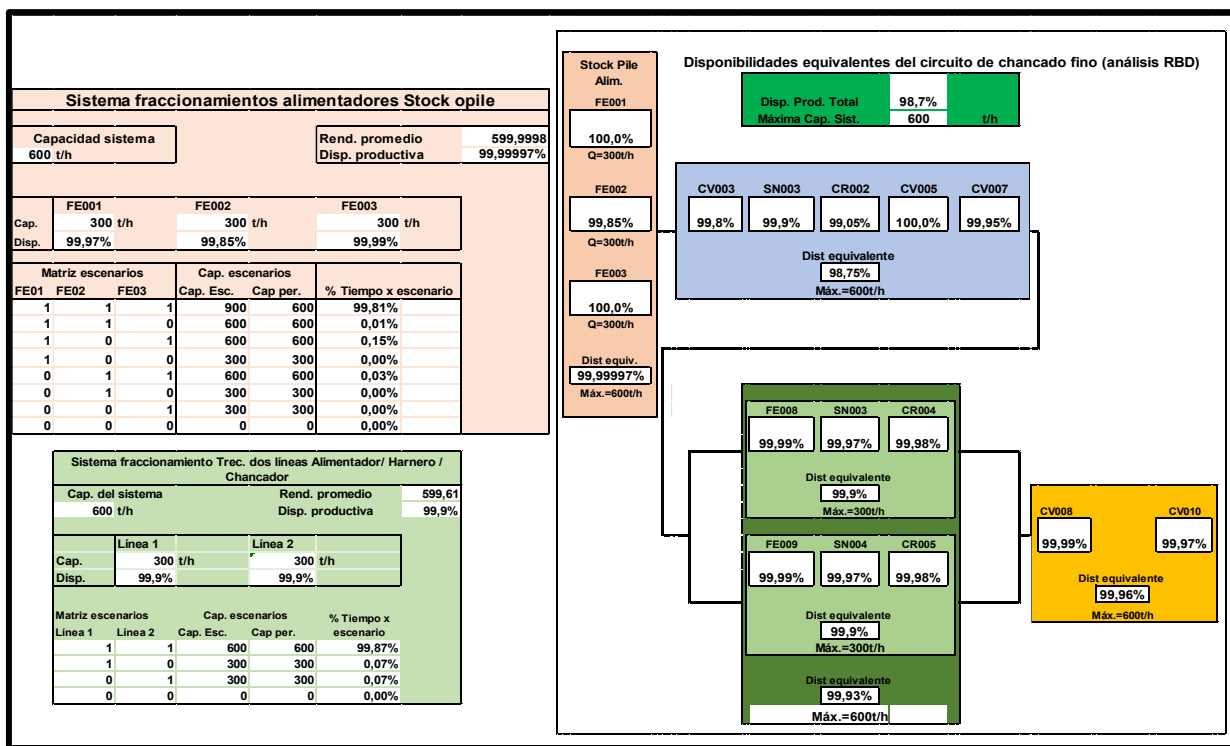
Rama Amarilla (CV008–CV010)

La rama amarilla es la que presenta la mejora más notoria, pasando de 99,7 % a 99,96 % en disponibilidad. El salto se explica por la eliminación del CV009 en la nueva configuración de circuito cerrado, lo que simplifica la línea y elimina un punto de potenciales fallas. En este escenario, la operación se concentra en CV008 y CV010, cuyos niveles de confiabilidad se aproximan al 100 %, transformando a esta rama en una de las más sólidas del sistema. Con ello se minimizan los riesgos de detenciones no planificadas y se asegura una mayor estabilidad operacional.

En síntesis, Las intervenciones proyectadas elevan la disponibilidad productiva total del chancado fino de 98,2 % a 98,7 %, lo que representa una recuperación significativa de horas operativas en un área crítica de la planta. En términos relativos, la rama azul aporta una mejora marginal pero estable, la rama verde confirma la convergencia de desempeño entre ramales paralelos y la rama amarilla logra el mayor impacto gracias a la simplificación estructural. En conjunto, los resultados validan la hipótesis de que optimizaciones puntuales y de bajo costo pueden generar beneficios medibles en la confiabilidad global del sistema.

La Figura 54. muestra una disponibilidad productiva total de 98,7 % para 600 t/h, donde la rama azul alcanza 98,75 %, la verde 99,93 % y la amarilla 99,96 %, confirmando la mejora global del sistema.

Figura 54. Disponibilidades equivalentes del circuito de chancado fino (RBD) mejorado



Fuente: Elaboración propia (2025).

6.3.3.5. Resultado confiabilidad mejorada

Rama Azul (CV003–SN001–CR002–CV005–CV007)

En la rama azul se observa una mejora moderada en los perfiles de confiabilidad a lo largo del horizonte analizado. En el escenario base, los equipos críticos —particularmente la correa CV003 y el alimentador SN001— experimentaban caídas abruptas de confiabilidad, descendiendo por debajo del 50 % en apenas siete días, lo que generaba una alta probabilidad de interrupciones. Las intervenciones implementadas permiten que, en el escenario mejorado, la confiabilidad se sostenga por encima del 60 % en plazos equivalentes, aliviando la presión sobre la operación continua. Adicionalmente, los equipos CV005 y CV007 muestran una reducción significativa en Micro-paradas, con un comportamiento más estable y menos disperso de R(t), lo cual contribuye a mantener la continuidad operativa del ramal. Si bien el impacto global puede considerarse acotado en magnitud comparado con otras ramas, el efecto es relevante porque estabiliza un eslabón históricamente vulnerable de la línea, reduciendo riesgos de interrupción y entregando una base más confiable para la operación del circuito fino.

Rama Verde (FE008–SN003–CR004 y FE009–SN004–CR005)

En la rama verde se aprecia un avance más notorio, reflejado en la convergencia de desempeño entre los dos ramales paralelos. En el escenario actual, las diferencias eran marcadas: el ramal conformado por FE009–SN004–CR005 mostraba descensos de confiabilidad hacia niveles de 30–40 % a los siete días, mientras que el ramal paralelo FE008–SN003–CR004 se mantenía por encima del 60 %. Con las mejoras introducidas, ambos ramales exhiben un comportamiento mucho más alineado, con trayectorias de confiabilidad que se mantienen dentro del rango de 70–80 % durante el mismo horizonte temporal. Este

efecto no solo evidencia la efectividad de las acciones aplicadas, sino que también refuerza la estabilidad global del sistema al reducir la brecha de desempeño entre caminos paralelos. La homogeneidad alcanzada limita el riesgo de que un ramal se convierta en el eslabón débil del sistema, asegurando mayor robustez frente a variaciones operacionales y minimizando la probabilidad de fallas asimétricas en la línea de chancado fino.

Rama Amarilla (CV008–CV010)

La rama amarilla es la que muestra el salto más significativo en términos de confiabilidad. En la situación inicial, la presencia de CV009 generaba una fuerte caída en la curva $R(t)$, arrastrando la confiabilidad de la línea a valores inferiores al 40 % en apenas una semana de operación. Este patrón implicaba un comportamiento crítico, pues aumentaba el riesgo de detenciones recurrentes en un lapso corto. La estrategia de mejora consistió en eliminar dicho componente y concentrar la operación en las correas CV008 y CV010, lo cual simplificó la configuración y permitió un desempeño más robusto. Como resultado, la confiabilidad de la rama se mantiene de manera consistente por encima del 60 % en horizontes de siete días, extendiendo además trayectorias más estables hasta los 31 días. Esta simplificación estructural convierte a la rama en una de las más sólidas del sistema y representa un cambio cualitativo en el control de riesgos, al eliminar un punto de falla crítico que comprometía de forma recurrente la continuidad operacional del circuito.

En síntesis, las intervenciones aplicadas generan un aumento sostenido en los perfiles de confiabilidad del chancado fino, reduciendo la velocidad de deterioro de $R(t)$ en los horizontes considerados. La rama azul mejora su estabilidad al contener la caída temprana de equipos sensibles, la rama verde equilibra el desempeño de ramales paralelos reduciendo asimetrías críticas, y la rama amarilla presenta la ganancia más destacada gracias a la eliminación de un componente problemático. Estas tendencias, sintetizadas en el mapa de calor, validan que las mejoras operacionales y estructurales refuerzan la confiabilidad global del sistema y consolidan la continuidad del proceso. La Figura 56, titulada “Mapa de calor de confiabilidad $R(t)$ para ramas Azul, Verde y Amarilla en escenario actual y mejorado”, ilustra de manera comparativa la evolución de las curvas en cada ramal, mostrando de forma visual el impacto de las acciones implementadas sobre la estabilidad del chancado fino.

La Figura 55 muestra el mapa de calor de confiabilidad $R(t)$ para las ramas Azul, Verde y Amarilla, comparando escenarios actual y mejorado. Se observa que las mejoras reducen la caída rápida de confiabilidad en equipos críticos, equilibran el desempeño entre ramales y eliminan puntos débiles como CV009. En conjunto, la figura evidencia un fortalecimiento de la confiabilidad global del chancado fino.

Figura 55. Mapa de calor de confiabilidad R(t) en ramas Azul, Verde y Amarilla.

Mapa de calor de confiabilidad R(t) por equipos para horizontes de 1 h a 31 días (RBD del circuito de chancado fino).

Días	h	FE001
0,03	1	97,4%
0,06	2	96,5%
0,13	3	95,1%
0,25	6	93,2%
0,50	12	90,6%
1	24	87,1%
3	72	79,0%
7	168	70,1%
14	336	60,9%
21	504	54,6%
28	672	49,9%
31	744	48,2%
35	840	46,1%
42	1008	42,9%
49	1176	40,2%
56	1344	37,8%
63	1512	35,7%
70	1680	33,9%
77	1848	32,2%
84	2016	30,6%
91	2184	29,2%
92	2208	29,1%

Días	h	FE002
0,03	1	86,4%
0,06	2	83,8%
0,13	3	80,7%
0,25	6	77,0%
0,50	12	72,9%
1	24	68,1%
3	72	59,3%
7	168	51,6%
14	336	44,8%
21	504	40,7%
28	672	37,8%
31	744	36,7%
35	840	35,5%
42	1008	33,6%
49	1176	32,0%
56	1344	30,7%
63	1512	29,5%
70	1680	28,4%
77	1848	27,5%
84	2016	26,6%
91	2184	25,8%
92	2208	25,7%

Días	h	FE003
0,03	1	88,7%
0,06	2	86,4%
0,13	3	83,7%
0,25	6	80,5%
0,50	12	76,9%
1	24	72,6%
3	72	64,6%
7	168	57,4%
14	336	50,8%
21	504	46,8%
28	672	43,9%
31	744	42,9%
35	840	41,6%
42	1008	39,7%
49	1176	38,1%
56	1344	36,7%
63	1512	35,5%
70	1680	34,4%
77	1848	33,4%
84	2016	32,5%
91	2184	31,7%
92	2208	31,6%

Días	h	CV003	SN001	CR002	CV005	CV007
0,03	1	96,7%	93,7%	98,0%	82,9%	93,8%
0,06	2	95,2%	91,8%	97,0%	79,7%	91,8%
0,13	3	93,0%	89,2%	95,5%	75,9%	89,2%
0,25	6	90,0%	85,9%	93,2%	71,6%	85,8%
0,50	12	85,7%	81,7%	89,9%	66,6%	81,6%
1	24	79,8%	76,5%	85,2%	61,1%	76,2%
3	72	66,2%	65,7%	73,4%	51,2%	65,2%
7	168	51,8%	55,1%	59,9%	42,8%	54,4%
14	336	38,3%	45,3%	46,1%	35,8%	44,5%
21	504	30,1%	39,2%	37,3%	31,6%	38,3%
28	672	24,5%	34,9%	31,0%	28,7%	33,9%
31	744	22,6%	33,4%	28,8%	27,7%	32,4%
35	840	20,4%	31,6%	26,2%	26,5%	30,6%
42	1008	17,3%	28,8%	22,5%	24,7%	27,8%
49	1176	14,8%	26,6%	19,4%	23,3%	25,6%
56	1344	12,8%	24,7%	17,0%	22,0%	23,7%
63	1512	11,2%	23,0%	14,9%	20,9%	22,0%
70	1680	9,8%	21,6%	13,2%	20,0%	20,6%
77	1848	8,7%	20,3%	11,7%	19,1%	19,3%
84	2016	7,7%	19,2%	10,4%	18,4%	18,2%
91	2184	6,9%	18,1%	9,3%	17,7%	17,2%
92	2208	6,7%	18,0%	9,2%	17,6%	17,0%

Días	h	FE009	SN004	CR005
0,03	1	99,5%	99,1%	80,8%
0,06	2	99,5%	98,8%	77,2%
0,13	3	99,5%	98,4%	73,2%
0,25	6	99,5%	97,7%	68,5%
0,50	12	99,5%	96,7%	63,3%
1	24	99,4%	95,1%	57,4%
3	72	98,9%	90,5%	47,1%
7	168	97,6%	84,3%	38,6%
14	336	94,5%	76,4%	31,5%
21	504	90,7%	70,4%	27,4%
28	672	86,6%	65,4%	24,6%
31	744	84,7%	63,5%	23,6%
35	840	82,2%	61,2%	22,5%
42	1008	77,6%	57,4%	20,8%
49	1176	73,0%	54,1%	19,4%
56	1344	68,4%	51,1%	18,2%
63	1512	63,9%	48,4%	17,2%
70	1680	59,4%	45,9%	16,3%
77	1848	55,1%	43,6%	15,5%
84	2016	51,0%	41,5%	14,8%
91	2184	47,0%	39,6%	14,2%
92	2208	46,5%	39,3%	14,1%

Días	h	FE008	SN003	CR004
0,03	1	100,0%	99,6%	81,3%
0,06	2	100,0%	99,3%	77,7%
0,13	3	100,0%	98,9%	73,7%
0,25	6	100,0%	98,2%	69,0%
0,50	12	100,0%	97,2%	63,8%
1	24	99,9%	95,6%	57,9%
3	72	99,4%	91,0%	47,6%
7	168	98,1%	84,8%	39,1%
14	336	95,0%	76,9%	32,0%
21	504	91,2%	70,9%	27,9%
28	672	87,1%	65,9%	25,1%
31	744	85,2%	64,0%	24,1%
35	840	82,7%	61,7%	23,0%
42	1008	78,1%	57,9%	21,3%
49	1176	73,5%	54,6%	19,9%
56	1344	68,9%	51,6%	18,7%
63	1512	64,4%	48,9%	17,7%
70	1680	59,9%	46,4%	16,8%
77	1848	55,6%	44,1%	16,0%
84	2016	51,5%	42,0%	15,3%
91	2184	47,5%	40,1%	14,7%
92	2208	47,0%	39,8%	14,6%

Días	h	CV008	CV010
0,03	1	87,6%	91,6%
0,06	2	85,1%	89,4%
0,13	3	82,1%	86,7%
0,25	6	78,5%	83,3%
0,50	12	74,4%	79,2%
1	24	69,6%	74,2%
3	72	60,7%	64,5%
7	168	52,8%	55,3%
14	336	45,8%	47,0%
21	504	41,6%	41,8%
28	672	38,5%	38,1%
31	744	37,4%	36,8%
35	840	36,1%	35,2%
42	1008	34,2%	32,9%
49	1176	32,5%	30,9%
56	1344	31,1%	29,2%
63	1512	29,9%	27,7%
70	1680	28,8%	26,4%
77	1848	27,8%	25,2%
84	2016	26,9%	24,1%
91	2184	26,1%	23,2%
92	2208	25,9%	23,1%

Fuente: Elaboración propia (2025).

6.3.4. Análisis de sensibilidad de la producción de cátodos por pares de variables operacionales

Con el fin de evaluar la influencia de los factores operacionales sobre la producción de cátodos de cobre, se realizó un análisis de sensibilidad considerando pares de variables críticas. Este enfoque permite observar tanto los efectos individuales como la interacción entre ellas, identificando zonas de mayor impacto económico. Los pares analizados fueron: Recuperación Metalúrgica (KRm) vs. Rendimiento del chancado (Ref.), KRm vs. Disponibilidad Operacional (OEE) y OEE vs. Ref. El estudio, enmarcado en la fase Analizar del ciclo DMAIC, aporta insumos cuantitativos para priorizar mejoras en la etapa Mejorar y para sustentar la proyección de flujo de caja de las alternativas.

El cruce entre KRm y Ref. demuestra que la variable más sensible es la recuperación, pues cada punto porcentual adicional equivale a 180–200 t/año de cátodos. El Ref., en cambio, modula la eficiencia, permitiendo que los beneficios metalúrgicos se materialicen en producción efectiva. La (Figura 56) muestra cómo la recuperación domina el efecto sobre el beneficio, mientras el rendimiento asegura la concreción operativa.

En la combinación KRm y OEE, se confirma la fuerte influencia de la recuperación, aunque el OEE garantiza continuidad y estabilidad. El análisis conjunto evidencia que la estrategia óptima es fortalecer la recuperación, respaldada por mejoras en disponibilidad que sostengan los incrementos, como se aprecia en la (Figura 57).

Por último, el cruce entre OEE y Ref. exhibe impactos más graduales, pero relevantes para la estabilidad del sistema: el OEE aporta horas efectivas y el Ref. throughput real. Su interacción proyecta 300–400 t/años adicionales en escenarios realistas (Figura 58).

En síntesis, la Recuperación Metalúrgica es la variable de mayor impacto económico, mientras que Ref. y OEE cumplen roles habilitadores. La ruta de priorización apunta a mejoras metalúrgicas como eje central, con iniciativas en chancado y disponibilidad que aseguren beneficios sostenidos.

Figura 56. Sensibilidad de la producción de cátodos variando Recuperación Metalúrgica (KRm) vs. Rendimiento del chancado (Ref.), manteniendo fijo el $DOEE \approx 75,17\%$

		3.626	3.659	3.691	3.724	3.757	3.790	3.823	3.856	3.889	3.922	3.955	3.988	4.021	4.054		
	Kt/año	9.933	10.023	10.114	10.204	10.294	10.385	10.475	10.565	10.655	10.746	10.836	10.926	11.017	11.107		
	t/día	550	555	560	565	570	575	580	585	590	595	600	605	610	615		
	t/h	91,7%	92,5%	93,3%	94,2%	95,0%	95,8%	96,7%	97,5%	98,3%	99,2%	100,0%	100,8%	101,7%	102,5%		
	Ref	Análisis sensibilidad producción, t cátodos de cobre, variando calidad recuperacion metalúrgica (ΔKRm) y Rendimiendo chancado (ΔRef) manteniendo fijo $DOEE \approx 75,17\%$															
RmCu	KMr	62%	88,6%	12.398	12.511	12.624	12.736	12.849	12.962	13.074	13.187	13.300	13.412	13.525	13.638	13.751	13.863
		63%	90,0%	12.598	12.713	12.827	12.942	13.056	13.171	13.285	13.400	13.514	13.629	13.743	13.858	13.972	14.087
		64%	91,4%	12.798	12.914	13.031	13.147	13.263	13.380	13.496	13.612	13.729	13.845	13.961	14.078	14.194	14.311
		65%	92,9%	12.998	13.116	13.234	13.352	13.471	13.589	13.707	13.825	13.943	14.061	14.180	14.298	14.416	14.534
		66%	94,3%	13.198	13.318	13.438	13.558	13.678	13.798	13.918	14.038	14.158	14.278	14.398	14.518	14.638	14.758
		67%	95,7%	13.398	13.520	13.642	13.763	13.885	14.007	14.129	14.251	14.372	14.494	14.616	14.738	14.860	14.981
		68%	97,1%	13.598	13.722	13.845	13.969	14.092	14.216	14.340	14.463	14.587	14.710	14.834	14.958	15.081	15.205
		69%	98,6%	13.798	13.923	14.049	14.174	14.300	14.425	14.550	14.676	14.801	14.927	15.052	15.178	15.303	15.429
		70%	100,0%	13.998	14.125	14.252	14.380	14.507	14.634	14.761	14.889	15.016	15.143	15.270	15.398	15.525	15.652

Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura 57. Sensibilidad de la producción de cátodos variando Recuperación Metalúrgica (KRm) vs. Disponibilidad Operacional (OEE), manteniendo fijo el Ref. ≈ 89,8%.

Kt/año		3.611	3.632	3.653	3.674	3.694	3.715	3.736	3.757	3.778	3.800	3.821	3.842	3.863	3.885
DOEE		76,5%	76,9%	77,4%	77,8%	78,3%	78,7%	79,1%	79,6%	80,0%	80,5%	80,9%	81,4%	81,8%	82,3%
Dm		90,0%	90,3%	90,5%	90,8%	91,0%	91,3%	91,5%	91,8%	92,0%	92,3%	92,5%	92,7%	93,0%	93,2%
Uo		85,0%	85,3%	85,5%	85,8%	86,0%	86,3%	86,5%	86,8%	87,0%	87,2%	87,5%	87,7%	88,0%	88,2%
Rm Cu	KMr	Análisis sensibilidad producción, t cátodos de cobre, variando calidad recuperación metalúrgica (ΔKRm) y Disponibilidad operacional OEE (ΔDOEE), manteniendo fijo Ref. =89,8%													
62%	88,6%	12.350	12.420	12.491	12.562	12.634	12.705	12.777	12.849	12.921	12.993	13.066	13.139	13.212	13.285
63%	90,0%	12.549	12.621	12.693	12.765	12.838	12.910	12.983	13.056	13.130	13.203	13.277	13.351	13.425	13.499
64%	91,4%	12.748	12.821	12.894	12.968	13.041	13.115	13.189	13.263	13.338	13.413	13.488	13.563	13.638	13.713
65%	92,9%	12.947	13.021	13.096	13.170	13.245	13.320	13.395	13.471	13.546	13.622	13.698	13.775	13.851	13.928
66%	94,3%	13.146	13.222	13.297	13.373	13.449	13.525	13.601	13.678	13.755	13.832	13.909	13.986	14.064	14.142
67%	95,7%	13.346	13.422	13.499	13.576	13.653	13.730	13.807	13.885	13.963	14.041	14.120	14.198	14.277	14.356
68%	97,1%	13.545	13.622	13.700	13.778	13.856	13.935	14.014	14.092	14.172	14.251	14.330	14.410	14.490	14.571
69%	98,6%	13.744	13.823	13.902	13.981	14.060	14.140	14.220	14.300	14.380	14.461	14.541	14.622	14.703	14.785
70%	100,0%	13.943	14.023	14.103	14.183	14.264	14.345	14.426	14.507	14.588	14.670	14.752	14.834	14.916	14.999

Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura 58. Sensibilidad de la producción de cátodos variando Disponibilidad Operacional (OEE) vs. Rendimiento del chancado (Ref.), manteniendo fijo KRm≈60,95%

t/año		3.856	3.891	3.926	3.961	3.997	4.032	4.067	4.102	4.137	4.172	4.207	4.242	4.277	4.312	
Qr		550	555	560	565	570	575	580	585	590	595	600	605	610	615	
Ref		91,7%	92,5%	93,3%	94,2%	95,0%	95,8%	96,7%	97,5%	98,3%	99,2%	100,0%	100,8%	101,7%	102,5%	
Dm Uo	DOEE	Análisis sensibilidad producción, t cátodos de cobre, variando rendimiento chancado (Ref.) y Disponibilidad operacional OEE (DOEE) manteniendo fijo KRm =60,95%														
90,0%	85,0%	76,5%	12.391	12.503	12.616	12.729	12.841	12.954	13.066	13.179	13.292	13.404	13.517	13.630	13.742	13.855
90,3%	85,3%	76,9%	12.462	12.575	12.688	12.801	12.915	13.028	13.141	13.255	13.368	13.481	13.594	13.708	13.821	13.934
90,5%	85,5%	77,4%	12.533	12.647	12.761	12.875	12.988	13.102	13.216	13.330	13.444	13.558	13.672	13.786	13.900	14.014
90,8%	85,8%	77,8%	12.604	12.719	12.833	12.948	13.062	13.177	13.292	13.406	13.521	13.635	13.750	13.864	13.979	14.094
91,0%	86,0%	78,3%	12.676	12.791	12.906	13.021	13.137	13.252	13.367	13.482	13.598	13.713	13.828	13.943	14.058	14.174
91,3%	86,3%	78,7%	12.747	12.863	12.979	13.095	13.211	13.327	13.443	13.559	13.675	13.790	13.906	14.022	14.138	14.254
91,5%	86,5%	79,1%	12.819	12.936	13.052	13.169	13.286	13.402	13.519	13.635	13.752	13.868	13.985	14.101	14.218	14.334
91,8%	86,8%	79,6%	12.892	13.009	13.126	13.243	13.360	13.478	13.595	13.712	13.829	13.946	14.064	14.181	14.298	14.415
92,0%	87,0%	80,0%	12.964	13.082	13.200	13.318	13.435	13.553	13.671	13.789	13.907	14.025	14.143	14.260	14.378	14.496

Fuente: Elaboración propia (2025).

6.3.5. Análisis de proyección de costos aplicando % ponderado al Δ% de aumento de beneficio

En esta sección se analiza cómo cada ítem de costo responde a un aumento del beneficio productivo, considerando que no todos evolucionan de forma proporcional al incremento de cátodos de cobre. Para ello, se definió un factor ponderado aplicado al Δ% de beneficio, que refleja la sensibilidad de cada gasto frente a variaciones en la producción. Un valor de 100 % implica un incremento equivalente al beneficio (ej.: reactivos de planta); un valor intermedio (10–90 %) corresponde a costos parcialmente dependientes de la operación (ej.: lubricantes, repuestos, agua de proceso); y un valor de 0 % identifica costos fijos sin variación (ej.: remuneraciones, seguros, vigilancia). Este modelo permite realizar una proyección económica más realista, evitando sobrestimaciones: en la práctica, un aumento de 3 % en el beneficio con un ítem ponderado en 50 % se traduce en solo 1,5 % de alza en su costo, mientras que uno con 0 % permanece constante. La Tabla 35 resume los factores de ponderación, donde los costos variables directos presentan valores cercanos al 100 %, los costos fijos se mantienen en 0 % y los costos mixtos exhiben niveles intermedios de crecimiento asociado al beneficio.

Tabla 35. % ponderado aplicado al $\Delta\%$ de aumento de beneficio.

Ítem	% Ponderado aplicado al $\Delta\%$ aumento beneficio	Causa o Justificación
100. D-I) Remuneraciones	0%	No requiere más personal, se opera con las mismas áreas y equipos.
311. Petróleo	20%	Por aumentos de flujos de electrolito que es calentado en intercambiadores en EW. Solo podría aumentar hasta un +20% eventual por ajustes operativos, proporcional al beneficio.
313. Lubricantes	88%	Proporcional al aumento de beneficio en chancado (80%) y aglomerado (8%).
331. Reactivos Planta	100%	Proporcional 100% al aumento de cobre procesado en área húmeda.
334. Ácido Sulfúrico (POX)	100%	Proporcional 100% al cobre mineral en pila y % de beneficio.
335. Reactivos SX (POX)	100%	Proporcional 100% al aumento de cobre procesado en área húmeda.
351. Fierros	74%	Proporcional al aumento de beneficio en chancado (63%) y aglomerado (7%).
352. Gomas y Polietileno	100%	Asociado 100% al aumento de beneficio por mayor desgaste de revestimientos en tambores de aglomeradores.
353. Soldaduras	18%	Proporcional al aumento de beneficio en chancado (14%) y aglomerado (4%).
354. Materiales HDPE	90%	Proporcional al beneficio en aglomerado 34% y lixiviación 56% por drenes.
361. Elementos de Seguridad y Ropa	0%	Costos fijos, no asociados a beneficio.
381. Repuestos Mecánicos	86%	Proporcional al aumento de beneficio en chancado (56%) y aglomerado (30%).
382. Repuestos Eléctricos	61%	Proporcional al aumento de beneficio en chancado (30%) y aglomerado (31%).
412. Gastos Bancarios/Notariales	100%	Proporcional 100% al aumento de cátodos producidos.
413. servicios de Vigilancia	0%	Servicios fijos, no asociados a beneficio.
416. Agua Potable/Proceso	10%	Proporcional al beneficio, al aumento de consumo en RO para producir agua permeada y controlar cloruros.
418. Transporte Materiales/Insumos	100%	Proporcional 100% al aumento de cátodos producidos.
421. Suscripciones/Avisos	0%	Costos fijos, no asociados a beneficio.
431. Asesorías y Estudios	42%	Aumento parcial (40–45%) proporcional al beneficio por apoyo externo en aglomerado/apilado.
462. Mantenimiento Equipos Planta	81%	Proporcional al beneficio por mayor uso de equipos en chancado y aglomerado.
481. Transporte Producción (cátodos)	100%	Proporcional 100% al aumento de cátodos producidos.
482. Mantenimiento Infraestructura	0%	Costos fijos, no asociados a beneficio.
486. Arriendo Equipos/Vehículos	0%	Arriendos fijos, no asociados a beneficio.
487. Otros Servicios Producción	100%	Proporcional al aumento de beneficio en apilamiento y resquebrado.
511. Consumo de Energía	73%	Proporcional al beneficio en chancado, apilado y aumento de corriente en EW.
521, Seguros	0%	Costos fijos, no asociados a beneficio.

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Minera Las Cenizas. (2025). Budget 2025 – Producción y costos operacionales de plantas y minas. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

A partir de los ponderadores definidos en la Tabla 35, se construyó la Tabla 36, que muestra la evolución de los costos directos y distribuidos para escenarios de aumento de beneficio entre 0,9 % y 11,8 %, considerando como base una producción de 3.626 Kt/año de cátodos. Se aprecia que los costos totales presentan una tasa de crecimiento significativamente menor al incremento del beneficio, pasando de 48.458 KUSM en la base a 50.367 KUSM en el escenario máximo (+11,8 %), lo que equivale a un aumento acumulado de 3,9 % en costos, frente al incremento de 11,8 % en beneficio.

Tabla 36. Proyección de costos directos y distribuidos en función del aumento de beneficio.

Beneficio Kt/ año	Base	3.626	3.900	4.150	4.200	4.250	4.300	4.350	4.400	4.450	4.500
% Aumento beneficio			7,6%	14,5%	15,8%	17,2%	18,6%	20,0%	21,4%	22,7%	24,1%
	Costo actual Budget	% Ponderado aplicado al Δ% aumento beneficio									
Remuneraciones											
D-I) Remuneraciones	5.143	0%	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143
Total, Remuneraciones	5.143		5.143	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143	5.143
Insumos											
311- I) Petróleo	806	20%	818	829	831	833	836	838	840	842	844
313- I) Lubricantes	43	88%	46	49	49	50	50	51	51	52	53
331- D) Reactivos Planta	259	100%	278	296	300	303	307	310	314	318	321
333- I) Reactivos y elementos de Laboratorio Químico	132		132	132	132	132	132	132	132	132	132
334- D) Ácido Sulfúrico (POX)	17.729	100%	19.072	20.294	20.539	20.783	21.028	21.272	21.517	21.761	22.006
335- D) Reactivos SX (POX)	303	100%	325	346	350	355	359	363	367	371	376
351- I) Fierros	82	74%	86	91	91	92	93	94	95	96	96
352- I) Gomas y Polietileno	207	100%	223	237	240	243	246	248	251	254	257
353- I) Soldaduras	36	18%	36	37	37	37	37	37	37	37	37
354- I) Materiales HDPE	714	90%	763	807	816	825	834	843	852	860	869
361- I) Elementos de Seguridad y Ropa de Trabajo	86	0%	86	86	86	86	86	86	86	86	86
381- I) Repuestos y Materiales Mecánicos	1.636	86%	1.743	1.840	1.859	1.879	1.898	1.918	1.937	1.957	1.976
382- I) Repuestos y Materiales Eléctricos	277	61%	290	302	304	306	309	311	313	315	318
391- I) Útiles de Escritorio y Aseo	13	0%	13	13	13	13	13	13	13	13	13
392- I) Otros Materiales Menores	93	0%	93	93	93	93	93	93	93	93	93
Total, Insumos	22.417		22.417	22.417	22.417	22.417	22.417	22.417	22.417	22.417	22.417
Servicios de terceros											
412- I) Gastos Bancarios, Notariales, Legales y Otros (cátodos)	180	100%	193	206	208	211	213	216	218	221	223
413- I) Servicios de Vigilancia; Aseo Industrial, Campamentos.	367	0%	367	367	367	367	367	367	367	367	367
416- I) Agua Potable, Energía Eléctrica Oficinas, Gas	1.350	10%	1.360	1.370	1.372	1.373	1.375	1.377	1.379	1.381	1.383
418- I) Transporte de Materiales, Equipos e Insumos	3.256	100%	3.502	3.727	3.772	3.817	3.861	3.906	3.951	3.996	4.041
421- I) Suscripciones, Avisos, Publicaciones, Fotos Videos.	58	0%	58	58	58	58	58	58	58	58	58
431- I) Asesorías Técnicas y Estudios	1.937	42%	1.998	2.054	2.065	2.077	2.088	2.099	2.110	2.122	2.133
462- I) Mantenimiento y Reparación Equipos Planta	1.778	81%	1.887	1.987	2.007	2.027	2.046	2.066	2.086	2.106	2.126
481- D) Transporte de Producción (cátodos)	1.678	100%	1.805	1.921	1.944	1.967	1.990	2.013	2.036	2.059	2.083
482- I) Mantenimiento y Reparación Infraestructura e Instalaciones	117		117	117	117	117	117	117	117	117	117
486- I) Arriendo Equipos, Vehículos y Maquinaria Producción	500		500	500	500	500	500	500	500	500	500
487- D) Otros Servicios de la Producción	5.855	100%	6.298	6.702	6.783	6.863	6.944	7.025	7.106	7.186	7.267
Total, Servicios de terceros	17.075		18.087	19.008	19.192	19.376	19.560	19.745	19.929	20.113	20.297
Seguros y Energía											
511- D) Consumo de Energía	3.823	73%	4.034	4.227	4.265	4.304	4.342	4.381	4.419	4.458	4.496
521- I) Seguros		0%									
Total, Seguros y Energía	3.823		4.034	4.227	4.265	4.304	4.342	4.381	4.419	4.458	4.496
Total, Costos Directos + Distribuidos	48.458		49.681	50.794	51.017	51.239	51.462	51.685	51.908	52.130	52.353

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Minera Las Cenizas. (2025). Budget 2025 – Producción y costos operacionales de plantas y minas. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

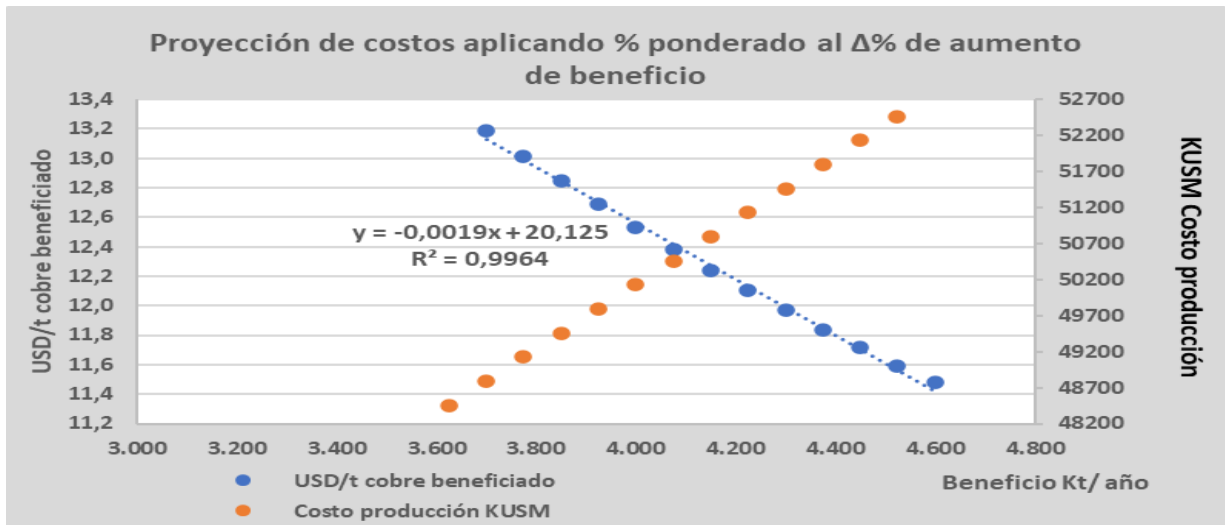
La Figura 59 complementa la Tabla 36. Y, mostrando cómo el modelo ponderado impacta en la proyección de costos. A medida que el beneficio aumenta hasta un +11,8 %, el costo unitario (USD/t) disminuye, mientras que el costo total (KUSM) crece en forma más moderada, alcanzando solo un +3,9 %.

Este comportamiento refleja que la permanencia de costos fijos y el crecimiento parcial de costos mixtos atenúan la pendiente de los costos frente al incremento del beneficio. Así, el

aumento del tonelaje procesado reduce de manera relativa el costo unitario, validado por el ajuste lineal mostrado en el gráfico ($R^2 = 0,9964$), lo que respalda la consistencia del modelo.

El análisis conjunto de tablas y figura confirma que el uso de ponderadores entrega una proyección económica más realista. La diferenciación entre costos fijos, variables y mixtos evita asignar incrementos homogéneos y demuestra que el escalamiento de producción genera un margen robusto ante mayores beneficios.

Figura 59. Relación entre beneficio y costo de producción con modelo ponderado.



Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Minera Las Cenizas. (2025). Budget 2025 – Producción y costos operacionales de plantas y minas. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

6.3.6. Inversiones y estimación de costos (pre-FEED)

La estimación de costos se realizó bajo el estándar Clase 4 (AACE), utilizando cotizaciones reales cuando estuvieron disponibles y, en su defecto, métodos paramétricos basados en factores de instalación, potencia instalada, extensión de correas y bloques de proceso. Este enfoque permite obtener rangos de inversión adecuados en etapa pre-FEED y constituye la base para la evaluación de factibilidad económica del programa.

En el caso de las correas transportadoras, el repotenciamiento se calculó en función del incremento de caudal (t/h) proyectado en el lazo cerrado inverso, aplicando proporcionalidad directa entre flujo másico y potencia requerida. Para la correa CV-5 se consideró además un ajuste por el alargue de +50 m, consistente con prácticas de estimación Clase 4, dejando los cálculos de detalle (tensiones, frenos, etc.) para la etapa siguiente.

Los principales ítems considerados son:

- CR002 CH860(i): cotización real del equipo (1,3 MUS\$), multiplicada por factores de instalación (1,8–2,1) y chutes/obras complementarias 2,65–3,30 MUS\$.
- CV003: costo modular (drive, mecánica, transferencias, E&I) 0,65–1,05 MUS\$.
- CV005: alargue +50 m ($\approx 0,045$ – $0,075$ MUS\$) + repower de drive y refuerzos mecánicos 1,00–1,70 MUS\$.
- CV007, CV008 y CV010: estimación paramétrica por potencia y transferencias 0,45–0,80 MUS\$ (CV007) y 0,55–0,95 MUS\$ (CV008/010).

- CV009 (retiro): suma alzada por alcance acotado 0,10–0,20 MUS\$.
- SN-001: mejoras de mantenibilidad y accesos (suma alzada) 0,08–0,20 MUS\$.
- Integración CCM/PLC/SCADA: paquetes por bloques eléctricos y de control 0,55–0,90 MUS\$.

Los resultados se consolidan en la Tabla 37, donde se presentan los rangos de inversión por ítem, su alcance, la base de estimación y el rango de costo total instalado directo (TIC). Estos costos directos se complementan con Ingeniería & Gestión (I&G) y contingencias acordes al nivel pre-FEED. Se adoptan rangos de I&G = 8–12 % y Contingencia = 15–25 % aplicados sobre el subtotal (TIC + I&G).

Con ello, la Tabla 38 presenta un rango total del programa entre 8,2 y 14,1 MUS\$, consistente con una estimación Clase 4 (AACE).

Tabla 37. Resumen de inversiones (TIC directo)

Ítem	Alcance principal	Base de estimación	TIC directo (MUS\$)
CR002 CH860(i)	Chancador secundario completo en circuito cerrado inverso (sin CV009): equipo + base/subestructura + chutes + servicios + E&I	Equipo cotizado 1,3 MUS\$ × factor 1,8–2,1 + chutes/estructuras/E&I	2,65 – 3,30
CV003	Repotenciar drive; refuerzo polines/rodamientos; chutes/faldones/guarderas; saneo E&I	Drive (0,20–0,35) + mecánico (0,20–0,35) + transferencias (0,15–0,25) + E&I (0,08–0,12)	0,65 – 1,05
CV005 (alargue + repower)	Alargar +50 m para reemplazar CV009; repotenciar drive; refuerzo mecánico; chutes nuevos	Estructura 0,9–1,5 kUS\$/m (45–75 kUS\$) + drive (0,25–0,40) + transferencias (0,20–0,35) + E&I (0,08–0,12)	1,00 – 1,70
CV007	Repower drive; refuerzos; transferencias; E&I	Paramétrico similar a CV003, menor alcance	0,45 – 0,80
CV008	Repower drive; refuerzo mecánico; chutes; E&I	Paramétrico por potencia instalada y transferencias	0,55 – 0,95
CV010	Repower drive; refuerzo mecánico; chutes; E&I	Paramétrico por potencia instalada y transferencias	0,55 – 0,95
CV009 (retiro)	Desmontaje, sellos de traspasos, by-pass definitivo	Suma alzada por bajo alcance	0,10 – 0,20
SN-001 (mantenibilidad)	Accesos/izaje, kits por tarea, 5S, orden & limpieza	Suma alzada de bajo costo	0,08 – 0,20
Integración CCM/PLC/SCADA	Nuevas celdas CCM, variadores, PLC/SCADA, interbloqueos/señales	Por bloques (rama azul, bloque final y chancado)	0,55 – 0,90

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 38. Estimación total del programa de inversiones (MUS\$) — factores reducidos.

Concepto	Mínimo (MUS\$)	Máximo (MUS\$)	Base de cálculo
Subtotal TIC directo	6,6	10,1	Suma de ítems (Tabla 6.4.6)
Ingeniería & Gestión (8–12%)	0,53	1,21	% sobre TIC directo
Subtotal TIC + I&G	7,11	11,26	Suma anterior
Contingencia (15–25%)	1,07	2,81	% sobre Subtotal TIC + I&G
Total, programa estimado	8,17	14,07	≈ 8,2 – 14,1

Fuente: Elaboración propia (2025).

6.3.7. Resultados económicos y financieros del Proyecto N°1

6.3.7.1. Diagnóstico base y evolución de indicadores

La Tabla 39 muestra la evolución de los principales indicadores bajo un programa de mejoras orientado a fortalecer la confiabilidad operativa. El proceso se enmarca en el método DMAIC, con fases iniciales de alto impacto (Kaikaku) y una etapa final de Control basada en mejora continua (Kaizen) mediante ciclos PDCA, que permiten consolidar y ajustar las modificaciones implementadas en los circuitos.

El incremento de la disponibilidad mecánica (Dm) y la utilización operacional (Uo), junto con el repotenciamiento de sistemas, el mayor throughput efectivo y la reducción del P80, constituyen los ejes técnicos que impulsan la mejora de la recuperación metalúrgica.

- Fase 1 (2026): se prioriza la reducción de Micro-paradas y la estabilización de la operación. Las mejoras en confiabilidad y el repotenciamiento inicial permiten aumentar las horas efectivas (ho) y alcanzar $Q_p \approx 560$ t/h. El inicio del reemplazo del chancador mejora la conminución y reduce parcialmente el P80, elevando la recuperación a 64 %. El salto en Dm y Uo habilita la capacidad real del circuito, garantizando que los KPI se alcancen de manera sostenible.
- Fase 2 (2027): la optimización de clasificación y conminución, ya con el nuevo chancador en régimen, consolida la reducción del P80. Esto eleva la recuperación metalúrgica (Rmr) a 66 %, mejora el factor de calidad (KRm) y estabiliza la operación. El throughput aumenta a $Q_p \approx 580$ t/h, con una efectividad de producción de 96,7 %.
- Fase 3 (2028–2031): la consolidación del control granulométrico y la operación estable permiten alcanzar el objetivo de $Rmr = 68$ % (límite operativo seguro), mientras el circuito sostiene $Q_p \approx 600$ t/h y $Ref. = 100$ %. El OEE llega a 78,6 %, reflejando la sinergia entre confiabilidad, horas efectivas y calidad metalúrgica.

En síntesis, la reducción del P80 es la palanca técnica que impulsa el aumento de Rmr y KRm, mientras que Dm y Uo aseguran el throughput y las horas efectivas necesarias. El diseño metodológico considera que, tras las mejoras de alto impacto, la etapa de Control con enfoque Kaizen–PDCA será clave para mantener la estabilidad de los resultados en el largo plazo.

Tabla 39. Indicadores operacionales y metalúrgicos aplicador la proyecto y su flujo de caja.

Indicador		Budget	fase 1 - año 2026	fase 2 - año 2027	fase 3 años - 2028 al 2031
Dmr.	%	89,31%	91,00%	92,00%	93,00%
Uor.	%	84,17%	85,00%	86,00%	87,00%
DOEE	%	75,17%	77,35%	79,12%	80,91%
Qr	t/h	538,9	560	580	600
Qb.	t/h	600	600	600	600
Refr	%	89,82%	93,33%	96,67%	100,00%
Rmr	%	60,95%	64,00%	66,00%	68,00%
Rmp.	%	70,00%	70,00%	70,00%	70,00%
KRm	%	87,07%	91,43%	94,29%	97,14%
OEEr.	%	58,79%	66,01%	72,11%	78,60%
Hc.	h	8760	8760	8760	8760
Ho.	h	6585,09	6775,86	6930,91	7087,72

Fuente: Elaboración propia (2025).

6.3.7.2. Parámetros de conversión y supuestos económicos

Para la estimación de la producción de cobre fino y la valorización de los ingresos proyectados, se definieron parámetros base de conversión y económicos. Estos valores permiten transformar las toneladas métricas tratadas en libras de cobre comercializables, considerando el precio de referencia y los factores de eficiencia propios del proceso de electro-obtención (EW)

Tabla 40. *Parámetros de conversión y supuestos económicos. Valores base utilizados en el cálculo de ingresos y flujos de caja proyectados*

Concepto	Unidad	Valor
Conversión de unidades	lb/ton	2.204,60
Precio del cobre (Cu)	US\$/lb	4,05
Premio por cátodo	US\$/ton	110
Ley de alimentación (Cu)	%	0,59
Eficiencia	%	93

Fuente: Elaboración propia (2025). con base en Minera Las Cenizas. (2025). Budget 2025 – Producción y costos operacionales de plantas y minas. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Estos parámetros fueron aplicados directamente en la construcción del flujo de caja proyectado (Tabla 41) y en la valorización de los indicadores financieros que se presentan en la subsección siguiente.

6.3.7.3. Resultados económicos – Flujo de caja proyectado

La evaluación económica integra los costos operacionales de la planta y la mina, considerando la Tabla 36 Proyección de costos directos y distribuidos en función del aumento de beneficio, la Tabla 35 – % ponderado aplicado al $\Delta\%$ de aumento de beneficio y la Figura 59 – Relación entre beneficio y costo de producción con modelo ponderado, que sirvieron de base para estimar el costo unitario por tonelada adicional procesada

A partir de dichas referencias se determinó que la operación planta y operación mina representan el 66,3 % del costo total, mientras que los costos administrativos generales corresponden al 19,6 %. Dentro de los costos mineros, las Preparaciones, los Desarrollos (Pre-Stripping) y los Proyectos Greenfield o Brown Field representan respectivamente el 9 %, 4 % y 6 %. A este marco se suma la aplicación del Impuesto Específico a la Actividad Minera (IEAM) vigente en Chile.

Bajo este esquema de costos y mejoras proyectadas, los flujos netos estimados para 2025–2031 (MMUS\$) son: –21,53 en 2025 (inversión inicial), seguidos de ingresos positivos de 16,57 en 2026; 21,7 en 2027; 27,17 en 2028; 27,05 en 2029; 26,9 en 2030; y 44,5 en 2031.

El MOM evoluciona de 21 % a 28 %, mientras que el EBITDA crece de 25,4 a 40,3 MMUS\$, en línea con los flujos netos proyectados.

Lectura. Los resultados muestran un playback temprano ($\approx 1,6$) y una trayectoria de flujo creciente hasta 2031. El aumento progresivo de Q_p (560 \rightarrow 580 \rightarrow 600 t/h), que eleva REf (93,3 % \rightarrow 96,7 % \rightarrow 100 %), junto con la mejora del RM_r hacia 68 % (sustentada en el control de P80), sostienen la mejora simultánea en ingresos y márgenes.

Tabla 41. Flujo de caja proyectado 2025–2031.

Periodo Beneficio	Kt	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
		3.548.703	3.794.482	4.019.929	4.252.630	4.252.630	4.252.630	4.252.630
			6,9%	13,3%	19,8%	19,8%	19,8%	19,8%
Cobre Contenido	Kt	20.830	22.272	23.596	24.961	24.961	24.961	24.961
Cobre recuperado	Kt	12.696	14.254	15.573	16.974	16.974	16.974	16.974
Cátodos de cobre	Kt	11.807	13.256	14.483	15.786	15.786	15.786	15.786
Ingresos								
Ingresos venta cátodos	MUS\$	105.421	118.363	129.314	140.945	140.945	140.945	140.945
Bono los cátodo	MUS\$	1.299	1.458	1.593	1.736	1.736	1.736	1.736
Ingresos Ventas	MUS\$	106.720	119.822	130.908	142.682	142.682	142.682	142.682
Costos Operacionales								
Costos mina 66,3% costo planta		66,3%	-33834,0	-35398,0	-37012,4	-37012,4	-37012,4	-37012,4
Costo Administrativo 19,6% costo planta		19,6%	-9514,7	-9514,7	-9514,7	-9514,7	-9514,7	-9514,7
Remuneraciones								
100D-I) Remuneraciones		-5143	-5.143	-5.143	-5.143	-5.143	-5.143	-5.143
Total Remuneraciones		-5143	-5143	-5143	-5143	-5143	-5143	-5143
Insumos								
311- I) Petróleo		-805,6	-816,7	-826,9	-837,5	-837,5	-837,5	-837,5
313- I) Lubricantes		-43,4	-46,0	-48,4	-50,9	-50,9	-50,9	-50,9
331- D) Reactivos Planta		-258,8	-276,7	-293,1	-310,1	-310,1	-310,1	-310,1
333- I) Reactivos y elementos de Laboratorio		-132,1	-132,1	-132,1	-132,1	-132,1	-132,1	-132,1
334- D) Acido Sulfúrico (POX)		-17729,5	-18957,4	-20083,7	-21246,3	-21246,3	-21246,3	-21246,3
335- D) Reactivos 5X (POX)		-302,5	-323,5	-342,7	-362,6	-362,6	-362,6	-362,6
351- I) Fierros		-81,8	-86,0	-89,8	-93,8	-93,8	-93,8	-93,8
352- I) Gomas y Polietileno		-207,1	-221,4	-234,6	-248,2	-248,2	-248,2	-248,2
353- I) Soldaduras		-35,9	-36,3	-36,8	-37,2	-37,2	-37,2	-37,2
354- I) Materiales HDPE		-714,2	-758,7	-799,6	-841,7	-841,7	-841,7	-841,7
361- I) Elementos de Seguridad y Ropa de Tra		-85,9	-85,9	-85,9	-85,9	-85,9	-85,9	-85,9
381- I) Repuestos y Materiales Mecánicos		-1636,5	-1734,0	-1823,4	-1915,7	-1915,7	-1915,7	-1915,7
382- I) Repuestos y Materiales Eléctricos		-277,1	-288,8	-299,5	-310,6	-310,6	-310,6	-310,6
391- I) Útiles de Escritorio y Aseo		-13,4	-13,4	-13,4	-13,4	-13,4	-13,4	-13,4
392- I) Otros Materiales Menores		-93,3	-93,3	-93,3	-93,3	-93,3	-93,3	-93,3
Total Insumos		-22417,0	-23870,2	-25203,3	-26579,2	-26579,2	-26579,2	-26579,2
Servicios de terceros								
Total Servicios de terceros		-17075,5	-18000,6	-18849,2	-19725,0	-19725,0	-19725,0	-19725,0
Consumo de Energía								
Total Consumo de Energía		-3822,9	-4016,2	-4193,5	-4376,5	-4376,5	-4376,5	-4376,5
Total Costo planta		-48458,2	-51029,8	-53388,8	-55823,6	-55823,6	-55823,6	-55823,6
Total Costo Operacional		-90101,9	-94378,6	-98301,5	-102350,7	-102350,7	-102350,7	-102350,7
Préstamo								
Cuota Crédito	MUS\$	-23.000	-2.258	-2.258	-2.258	-2.258	-2.258	-2.258
Depreciación								
Cambio e instalación Chancador CR2	MUS\$		-660	-660	-660	-660	-660	-660
Repower drive; refuerzo mecánico; chutes CV003 CV005 CV007 CV008 CV010 CV009	MUS\$		-1130	-1130	-1130	-1130	-1130	-1130
Accesos/izaje SN1	MUS\$		-40	-40	-40	-40	-40	-40
Integración CCM/PLC/SCADA	MUS\$		-180	-180	-180	-180	-180	-180
Ingeniería & Gestión (8–12%)	MUS\$		-241,2	-241,2	-241,2	-241,2	-241,2	-241,2
Contingencia (25%)	MUS\$		-562,8	-562,8	-562,8	-562,8	-562,8	-562,8
Desarrollos (Pre-Stripping Inicio Rajo)	MUS\$		-609	-609	-609	-609	-609	-609
Exploraciones	MUS\$		-271	-271	-271	-271	-271	-271
Continuidad Operacional	MUS\$		-612	-612	-612	-612	-612	-612
Total depreciación	MUS\$		-4306	-4306	-4306	-4306	-4306	-4306
Utilidad antes de Impuesto	MUS\$		18878,4	26041,5	33766,7	33766,7	33766,7	38072,7
Impuesto Primera Categoría (27%)	MUS\$		-5097,2	-7031,2	-9117,0	-9117,0	-9117,0	-10279,6
Impuesto Específico a la Actividad Menora (IEAM); Chile								
EBITDA								
Toneladas Métricas de cobre Fino Equivaler t			25.442,9	32.606,0	40.331,2	40.331,2	40.331,2	40.331,2
Caso 1 : Menor a 12 ktmcf			13,4	14,7	16,0	16,0	16,0	16,0
Caso 1 : Tasa IEAM (aplicada sobre EBITDA)			0,05%	0,09%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%
Caso 2 : Sobre a 12 ktmcf y <=50 ktmcf			1	1	1	1	1	1
Caso 2 : Tasa IEAM (aplicada sobre EBITDA)			0,05%	0,09%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%
Caso 3 : >50 ktmcf			0	0	0	0	0	0
MOM: Margen Operacional Minero : (EBITDA/Ingresos)*100			21,2	24,9	28,3	28,3	28,3	28,3
MOM redondeado (Para Tabla IEM_50)			21	25	28	28	28	28
Caso 3: Tasa EBITDA			6,2%	6,3%	6,9%	7,2%	7,4%	7,5%
Tasa IEAMA			0,05%	0,09%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%
IEAM	MUS\$		-13	-30	-63	-63	-63	-63
Utilidad antes de Impuesto	MUS\$		13.767,8	18.980,7	24.587,1	24.587,1	24.587,1	27.730,5
Gastos no desembolsables (Depreciaciones L	MUS\$		4.306	4.306	4.306	4.306	4.306	0
Flujo de Caja Operacional	MUS\$		18.074	23.287	28.893	28.893	28.893	27.731
Inversiones (CAPEX)								
Cambio e instalación Chancador CR2	MUS\$		-3300					
Repower drive; refuerzo mecánico; chutes CV003 CV005 CV007 CV008 CV010 CV9	MUS\$		-5650					
Accesos/izaje SN1	MUS\$		-200					
Integración CCM/PLC/SCADA	MUS\$		-900					
Subtotal TIC directo	MUS\$		-10050					
Ingeniería & Gestión (8–12%)	MUS\$		-1206					
Contingencia (25%)	MUS\$		-2814					
Desarrollo minero y planta (CAPEX inicial)			-14070					
Preparaciones	MUS\$		-3045					
Desarrollos (Pre-Stripping)	MUS\$		-1353					
Proyectos Greenfield o Brownfield	MUS\$		-3062					
Total Inversiones	MUS\$		-21530					
Capital de Trabajo 20% Opex primer año	MUS\$		-18876					
Crédito								
Amortizaciones de la deuda	MUS\$		-1.505	-1.610	-1.723	-1.844	-1.973	-2.111
Egresos no afectos a impuestos			-40406	-1505	-1610	-1723	-1844	-1973
PRÉSTADO			10.765					
Recuperación capital de trabajo								18876
Beneficios no Afectos a Impuestos			10.765	0	0	0	0	18.876
Flujo de caja	MUS\$		-29.641	16.569	21.676	27.170	27.050	26.921
Flujo de caja acumulado	MUS\$		-29.641	-13.072	8.605	35.775	62.824	89.745
Proyecto N°1				1	2	3	4	5
r	10%	Cuota		2.258	2.258	2.258	2.258	2.258
VAN incremental	84.057	Interés		754	648	535	415	286
TIR	70,3%	Amortización		1.505	1.610	1.723	1.844	1.973
TIRM	37,6%	Saldo insoluto	10.765	9.260	7.650	5.927	4.083	2.111
IVAN	3,9							
Payback años	1,6							
Capital de Trabajo 20% Opex primer año	20%	Impuesto Primera Categoría	27%					
Interés	7%	Capital de Trabajo 20% Ope	20%					
Cantidad de periodos	6							

Fuente: Elaboración propia (2025).

6.3.7.4. Ratios financieras

Con base en el flujo proyectado (Tabla 43) y aplicando una tasa de descuento del 10 %, los indicadores financieros obtenidos fueron:

- VAN incremental: 84.1 MMUS\$
- TIR: 70,3 %
- TIRM: 37,6 %
- IVAN: 3,9
- Playback: 1,6 años (\approx segundo trimestre de 2026)

Lectura. Los indicadores confirman la solidez del caso de negocio:

- VAN incremental = 84,1 MMUS\$. Con una inversión cercana a 10 MUS\$, el VAN es más de 8 veces el CAPEX, lo que refleja una creación de valor muy alta.
- TIR = 70,3 %. Muy superior al costo de oportunidad (10 %), lo que indica una rentabilidad extraordinaria para un proyecto minero de este tamaño.
- TIRM = 37,6 %. Ajustada por reinversión a la tasa de descuento, sigue siendo varias veces mayor al 10 %, confirmando la solidez del retorno.
- IVAN = 3,9. Por cada dólar invertido, se generan 3,9 dólares de valor, lo que lo clasifica como un proyecto de altísima eficiencia en la inversión.
- Playback = 1,6 años. La recuperación de la inversión ocurre antes de 2 años, lo que reduce fuertemente el riesgo financiero y de mercado.

Desde el punto de vista del negocio y de los inversionistas, estos resultados se traducen en:

- Mayor capacidad de generación de caja operativa (dividendos y reinversión),
- Fortalecimiento del patrimonio contable vía utilidades retenidas, y
- Un proyecto atractivo y de bajo riesgo frente a potenciales socios o financistas.

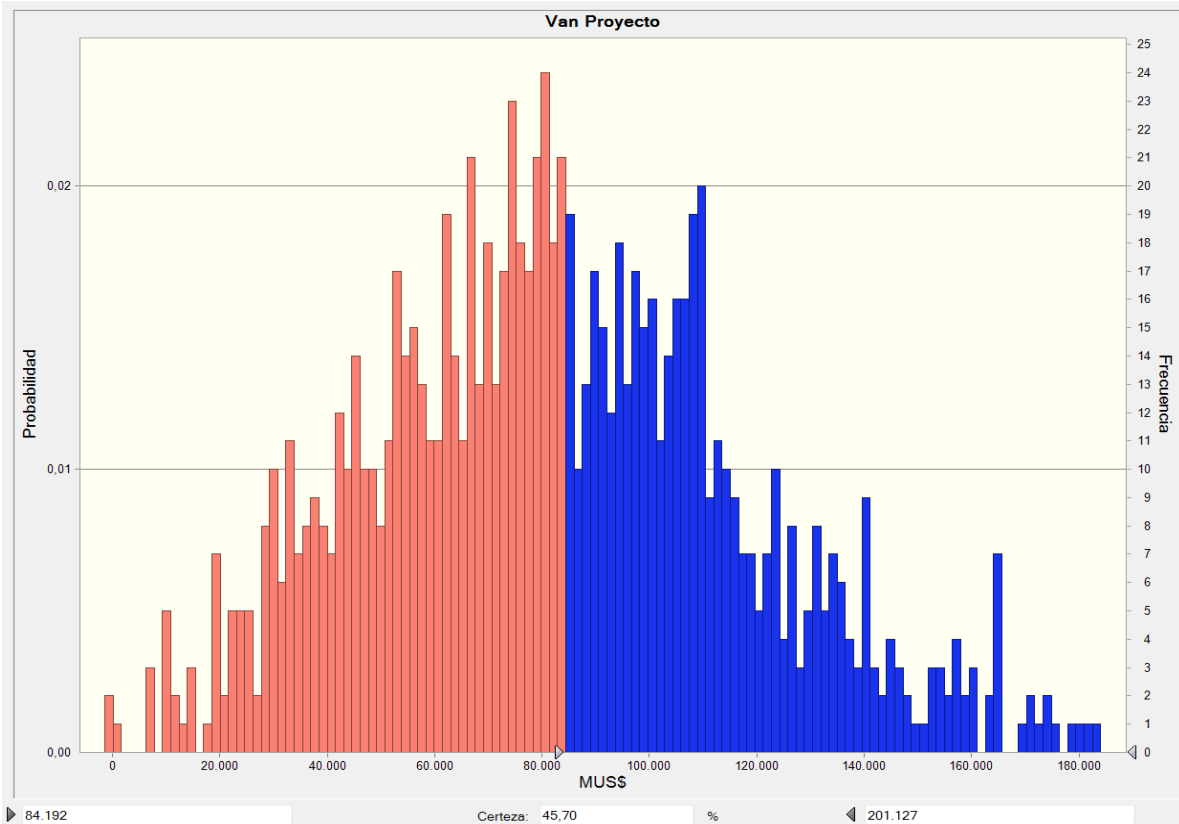
En consecuencia, el Proyecto N°1 asegura no solo un retorno temprano, sino también una posición competitiva y sostenible en el largo plazo.

6.3.7.5. Incertidumbre y sensibilidad

El análisis de riesgo se realizó con simulaciones de Monte Carlo (1.000 iteraciones) en Crystal Ball, herramienta que modela la incertidumbre en variables críticas y cuantifica su efecto en los resultados económicos. Este enfoque, ampliamente usado en minería, evalúa la robustez del proyecto frente a la variabilidad operacional y metalúrgica.

La simulación arrojó una distribución probabilística del VAN, con un rango probable entre 84 y 201 MUS\$ y una certeza del 45,7 % de que el proyecto se ubique en ese intervalo. En términos prácticos, implica una probabilidad de 4,6 de cada 10 de alcanzar un VAN positivo robusto dentro de dicho rango. Figura 60.

Figura 60. Distribución de resultados del VAN proyectado mediante simulación Monte Carlo (Crystal Ball).



Fuente: Elaboración propia (2025). a partir de simulación Monte Carlo realizada en Oracle Crystal Ball® con datos del Budget 2025 – Producción y costos operacionales de plantas y minas, Minera Las Cenizas (2025).

Figura 61. Estadísticos descriptivos y percentiles de VAN proyectado (1.000 iteraciones).

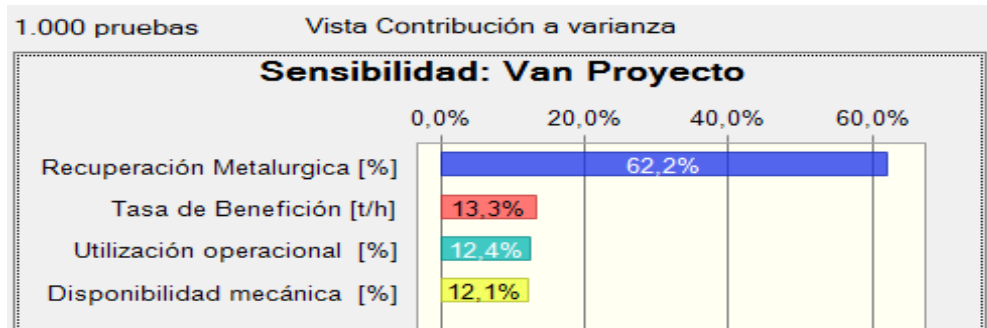
Percentil		Valores de previsión		Estadística		Valores de previsión	
0%			-1.445	Pruebas			1.000
10%			38.169	Caso base			84.057
20%			53.169	Media			83.422
30%			63.562	Mediana			80.973
40%			73.634	Modo			---
50%			80.961	Desviación estándar			35.917
60%			90.276	Varianza			1.290.023.359
70%			100.327	Sesgo			0,4345
80%			110.104	Curtoisía			3,35
90%			130.564	Coficiente de variación			0,4305
100%			227.528	Mínimo			-1.445
				Máximo			227.528
				Error estándar medio			1.138

Fuente: Elaboración propia (2025). a partir de simulación Monte Carlo realizada en Oracle Crystal Ball® con datos del Budget 2025 – Producción y costos operacionales de plantas y minas, Minera Las Cenizas (2025).

La media del VAN proyectado es de 83,4 MMUS\$ y la mediana de 81,0 MMUS\$, ambas cercanas al caso base (84,1 MMUS\$), lo que confirma la consistencia del modelo. La desviación estándar ($\approx 35,9$ MMUS\$) refleja la dispersión de los resultados, siendo significativa pero proporcional al valor central, lo que entrega confianza en la estabilidad del proyecto. Los percentiles permiten fijar umbrales de probabilidad para la gestión de riesgos: existe un 10 % de probabilidad de que el VAN sea inferior a 38,2 MMUS\$, mientras que en el 90 % de los escenarios supera los 130,6 MMUS\$. Estas métricas definen bandas de riesgo y confianza útiles para la toma de decisiones estratégicas (Figura 61).

En cuanto a la sensibilidad de las variables, la recuperación metalúrgica (R_{mr}) es la de mayor incidencia en la varianza del VAN, con una contribución de 62,2 %, al depender de la estabilidad del P80 y de la eficiencia en la conminución. En segundo plano, la tasa de beneficio (Ref. = 13,3 %), la utilización operacional ($U_o = 12,4$ %) y la disponibilidad mecánica ($D_m = 12,1$ %) presentan participaciones menores pero equilibradas, influyendo en la estabilidad de las horas efectivas (h_o) y en el throughput del circuito (Figura 62).

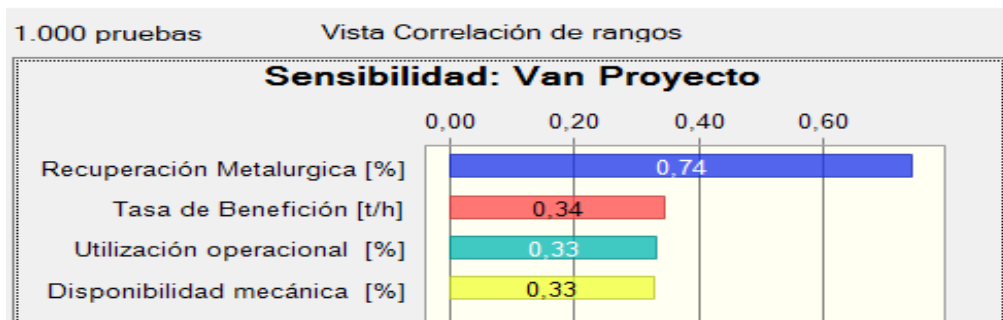
Figura 62. Contribución a la varianza (Crystal Ball).



Fuente: Elaboración propia (2025). a partir de simulación Monte Carlo realizada en Oracle Crystal Ball® con datos del Budget 2025 – Producción y costos operacionales de plantas y minas, Minera Las Cenizas (2025).

La mayor correlación positiva corresponde a la recuperación metalúrgica (R_{Mr}), con un coeficiente de 0,74, lo que confirma su carácter decisivo en la creación de valor económico del proyecto. En segundo plano, la tasa de beneficio ($REf = 0,34$), la utilización operacional ($U_o = 0,33$) y la disponibilidad mecánica ($D_m = 0,33$) presentan correlaciones positivas más bajas pero similares. Estas variables, aunque menos influyentes que la recuperación, resultan igualmente relevantes como habilitadores de la estabilidad operacional y del throughput del circuito. Figura 63.

Figura 63. Correlación de rangos (Crystal Ball).



Fuente: Elaboración propia (2025). a partir de simulación Monte Carlo realizada en Oracle Crystal Ball® con datos del Budget 2025 – Producción y costos operacionales de plantas y minas, Minera Las Cenizas (2025).

La varianza del VAN está fuertemente determinada por la cercanía al límite metalúrgico del 70 %. El salto de recuperación desde 60,95 % hasta 68 % (Fase 3) explica la mayor parte del incremento económico, mientras que el avance de 68 % a 70 % aporta solo un beneficio marginal (~2 p.p.). El uso de Crystal Ball permitió: (i) cuantificar la probabilidad de éxito económico, estimada en 45,7 % de certeza dentro del rango 84,192–201,127 MUS\$; (ii) identificar las variables críticas, siendo la recuperación metalúrgica la más influyente; y (iii) delimitar escenarios de riesgo mediante percentiles, estableciendo umbrales claros de decisión para la gerencia. En consecuencia, la estrategia de riesgos debe enfocarse en

preservar la estabilidad operacional (para mantener Ref. ≈ 100) y en el control granulométrico y del aglomerado (para sostener Rmr = 66–68 %). En este contexto, la reducción del P80 se consolida como la palanca técnica decisiva, al fortalecer el factor de calidad (KRm) y capturar plenamente el beneficio económico proyectado. No obstante, los indicadores DOEE y la tasa de beneficio (Ref.) cumplen un rol habilitador: el DOEE combina disponibilidad y utilización, asegurando más horas efectivas (ho) para sostener la operación continua, mientras que Ref. = Qp/Qb garantiza que el throughput real se mantenga al nivel de diseño. De este modo, DOEE y Ref. constituyen el piso operacional que asegura estabilidad y régimen de procesamiento, mientras que la reducción del P80 determina el techo económico, definiendo cuántas toneladas procesadas se convierten efectivamente en cobre fino pagable y, por ende, en valor económico.

6.4. Controlar

La fase Controlar no se ejecutó dentro del alcance del presente trabajo, ya que su implementación requiere un horizonte temporal posterior a la puesta en marcha de las mejoras propuestas. No obstante, resulta fundamental establecer lineamientos que permitan garantizar la sostenibilidad de los beneficios obtenidos en la etapa Mejorar y que orienten a la organización hacia un proceso de mejora continua.

6.4.1. Integración metodológica y enfoque de mejora continua

Se propone la implementación del ciclo PDCA (Planificar – Hacer – Verificar – Actuar) como mecanismo iterativo complementario al DMAIC. Este enfoque permite institucionalizar un proceso de retroalimentación continua en el cual cada acción de mejora se planifica, ejecuta, monitorea y ajusta de manera sistemática.

Tal como se describe en el punto 6.4.6, la evolución progresiva de los principales indicadores evidencia que las fases iniciales del método DMAIC se orientan a mejoras de alto impacto (Kaikaku), asociadas a rediseños estructurales del circuito y repotenciamiento de equipos. En cambio, la etapa final de Control incorpora un enfoque de mejora continua (Kaizen), mediante ciclos sucesivos de PDCA destinados a ajustar y consolidar las modificaciones implementadas.

De esta forma, el aumento de la disponibilidad mecánica (Dm) y de la utilización operacional (Uo), junto con el repotenciamiento de sistemas, el incremento del throughput efectivo y la reducción del P80, constituyen los ejes técnicos que, bajo un esquema de mejora continua, permiten sostener en el tiempo el avance de la recuperación metalúrgica.

En este marco, el ciclo de gestión de mantenimiento ya existente en la faena constituye la plataforma natural para insertar el PDCA:

- Confiabilidad define políticas, estándares y prioriza equipos críticos.
- Planificación transforma esas directrices en planes preventivos, predictivos y de mejora.
- Programación organiza la secuencia y oportunidad de ejecución, optimizando recursos

y ventanas operativas.

- Ejecución materializa las tareas, asegurando calidad, seguridad y cumplimiento de plazos.
- Retroalimentación registra los resultados y alimenta nuevamente a Confiabilidad, cerrando el ciclo.

De este modo, Controlar no crea un sistema paralelo, sino que refuerza y actualiza el plan de mantenimiento existente, integrando confiabilidad, planificación, programación y ejecución dentro de un esquema de mejora continua.

6.4.2. Seguimiento de indicadores clave (KPIs)

Es indispensable establecer un sistema de control de KPIs que actúe como referencia objetiva del desempeño post-intervención y que se integre al ciclo de gestión de mantenimiento. Los indicadores deben cubrir de manera equilibrada las dimensiones de Operaciones, Mantenimiento y Metalurgia, permitiendo evaluar tanto la estabilidad operacional como el impacto en la recuperación metalúrgica y en los costos asociados.

- Operaciones: OEE y DOEE como indicadores globales, utilización operacional (U_o) y horas de detención no programada.
- Mantenimiento: MTBF, MTTR, backlog de órdenes de trabajo y cumplimiento de planes preventivos. Confiabilidad utiliza estos datos para redefinir estrategias, Planificación los traduce en planes, Programación asegura la calendarización y Ejecución válida la efectividad de las intervenciones.
- Metalurgia: P80 del producto chancado, recuperación metalúrgica global, calidad de aglomerado y consumo específico de ácido.

Los registros deben consolidarse en el Process Reporting Site SCM Franke como fuente única de datos, asegurando trazabilidad y transparencia. Asimismo, deben complementarse con gráficos de control I-MR que permitan verificar la estabilidad estadística de los procesos, detectar tendencias anómalas y gatillar acciones correctivas tempranas.

En este esquema, la retroalimentación es esencial: los resultados de los KPIs alimentan periódicamente al área de Confiabilidad para ajustar estrategias, a Planificación para reformular planes, a Programación para mejorar la asignación de recursos y a Ejecución para reforzar la disciplina operativa.

6.4.3. Frecuencia de control y trazabilidad

Para garantizar la sostenibilidad de las mejoras implementadas, es indispensable definir una frecuencia de control diferenciada por nivel de gestión, de manera que los indicadores puedan ser revisados de forma oportuna y con la profundidad adecuada. La Tabla 42 resume los distintos niveles de control desde el seguimiento operacional diario hasta las revisiones estratégicas anuales, especificando la herramienta utilizada, los responsables de cada etapa y los productos esperados. Este esquema asegura que la información fluya de manera ordenada y trazable, permitiendo detectar desviaciones a corto plazo y, al mismo tiempo,

retroalimentar la planificación estratégica de la faena.

Tabla 42. Frecuencia de control y trazabilidad.

Nivel de control	Frecuencia	Herramienta	Responsable	Producto esperado
Operacional diario	Cada turno	Process Recording Site	Jefatura de Turno (Operaciones)	Reporte diario de producción, detenciones y comentarios operativos
Semanal	Cada lunes	Check list de mantenibilidad / Operación	Supervisores de Mantenimiento y Operaciones	Informe semanal de desempeño: detenciones, backlog, cumplimientos preventivos
Mensual	Comité mensual de gestión	Check Link mensual	Superintendencias de Metalurgia, Mantenimiento y Operaciones	Consolidado de KPIs, análisis de desviaciones, acuerdos y plan de acciones correctivas
Semestral	Auditorías internas	Auditoría RAM y OEE	Gerencia de Operaciones	Informe de auditoría: hallazgos, planes de mejora, evaluación técnico-económica
Anual (opcional)	Budget y cierre de año	Comité estratégico / ERP corporativo	Gerencia General y áreas técnicas	Evaluación global de KPIs, revisión de metas de OEE, planificación CAPEX/OPEX

Fuente: Elaboración propia (2025).

6.4.4. Estandarización operativa y de mantenimiento

La sostenibilidad de las mejoras exige avanzar hacia la documentación y estandarización de procedimientos operativos y de mantenimiento, incluyendo:

- Check lists de operación y seguridad.
- Protocolos de inspección y lubricación.
- Instrucciones de ajuste y setting de chancadores y harneros.
- Procedimientos de gestión de desvíos y fallas repetitivas.

Estos documentos deben mantenerse bajo gestión controlada en el ERP corporativo, con responsables asignados (Confiabilidad para su actualización, Planificación para su incorporación en planes, Ejecución para su cumplimiento). Además, se requiere un programa de capacitación periódica para operadores y mantenedores, asegurando que los estándares se apliquen de forma consistente en terreno.

6.4.5. Revisión periódica y auditorías internas

Finalmente, se sugiere la implementación de un esquema de auditorías semestrales, con participación cruzada de Metalurgia, Operaciones y Mantenimiento. Estas revisiones deben evaluar tanto resultados técnicos (KPIs) como económicos (flujo de caja incremental), contrastando con las metas de la etapa Mejorar.

Cada auditoría debe generar un plan de acción con responsables y plazos definidos, cuya ejecución será monitoreada en el comité mensual de gestión. Adicionalmente, se recomienda incorporar auditorías externas corporativas en un ciclo de 2 a 3 años, con el fin de validar objetivamente la eficacia de los estándares y fortalecer la mejora continua.

7. Conclusiones

El desarrollo de esta tesis permitió diagnosticar integralmente el desempeño del proceso de conminución de la Faena Franke, identificando las principales causas de ineficiencia y proponiendo mejoras sustentadas en la metodología DMAIC, integrada con herramientas RAM (Reliability, Availability, Maintainability) y un enfoque Lean Six Sigma orientado a la mejora continua y la rentabilidad del proceso.

El análisis de variabilidad mediante gráficos I-MR permitió identificar diferencias de estabilidad estadística entre los tres circuitos. El chancado fino presentó el mayor promedio de rangos móviles (7,38 %) y el menor valor medio de rendimiento (82,6 %), frente al primario (94,7 %) y al aglomerado-apilado (89,6 %), evidenciando su alta dispersión y menor estabilidad operacional. El rango de control equivalente a $\pm 3\sigma = 18,6$ % confirmó una fluctuación intermensual más amplia que la observada en el primario ($\pm 14,8$ %) y el aglomerado ($\pm 17,5$ %), validando la mayor variabilidad del Fino en el desempeño mensual.

En contraste, el indicador de utilización mostró un comportamiento inverso: el Fino registró el menor MR promedio (4,12 %) y la mayor media (84,2 %), reflejando un uso intensivo y constante para compensar su menor eficiencia, lo que deriva en sobrecargas, recirculaciones y pérdidas de continuidad. En disponibilidad, las diferencias fueron menores —Primario = 90,0 %; Fino = 89,3 %; Aglomerado = 88,2 %—, con rangos de control de aproximadamente $\pm 3\sigma = 9$ %, lo que evidencia consistencia operativa similar entre etapas. El OEE global mostró la media más baja (54,2 %) y el mayor MR promedio (8,86 %), confirmando que las pérdidas de rendimiento y utilización del Fino impactan directamente el desempeño global del sistema.

El análisis de capacidad y calidad del proceso demostró que los tres circuitos presentan una capacidad real insuficiente, con índices C_p , C_{pk} , P_p y $P_{pk} < 1$, lo que refleja alta variabilidad y falta de control estadístico. En conjunto, la planta opera con una capacidad efectiva del 54,2 %, muy por debajo del 70 % de referencia. En el Fino, la utilización es la única variable con desempeño aceptable ($C_p \approx 0,23$; $C_{pk} = 0,07$), mientras que el rendimiento ($C_{pk} \approx -0,66$) confirma la necesidad de reforzar el control de granulometría y estabilidad de equipos críticos.

Desde el punto de vista metalúrgico, el control del P_{80} se ratificó como variable crítica: alcanzar $P_{80} \approx 9$ mm permite elevar la recuperación de cobre soluble a 70–72 % y optimizar la eficiencia del ácido, siempre que se mantenga la estabilidad del circuito. Las pruebas metalúrgicas y simulaciones de Sandvik demostraron que, con la configuración actual, el Raptor 400 no puede sostener $P_{80} \leq 10$ mm a 650 t/h, evidenciando limitaciones estructurales de capacidad y clasificación.

La evaluación técnica verificó que el chancador secundario Raptor 400, actualmente en operación, presenta limitaciones estructurales de capacidad y estabilidad granulométrica que impiden alcanzar de forma sostenida un $P_{80} \leq 10$ m.m Las simulaciones comparativas con los modelos Sandvik CH660 y CH860i, en configuraciones de circuito abierto y cerrado, demostraron que la alternativa CH860i en circuito cerrado cumple simultáneamente con los objetivos de capacidad (≈ 750 t/h) y calidad ($P_{80} \approx 9,4$ mm), constituyendo la solución estructural más eficiente y sostenible para la planta.

Asimismo, el análisis Jack-Knife aplicado al circuito de chancado fino permitió cuantificar el aporte individual de cada equipo y subsistema a la disponibilidad global, validando estadísticamente la criticidad de la correa CV003, el harnero SN004 y el chancador Raptor 400 como los principales puntos de falla. Esta evidencia respaldó la priorización técnica de las acciones de mejora implementadas en la fase Analizar y la selección del equipo sustituto propuesto.

En términos de desempeño operacional, las mejoras proyectadas permiten incrementar la disponibilidad de 89,3 % a 92,1 %, el rendimiento de 84,2 % a 87,9 % y la calidad de 85,0 % a 88,0 %, alcanzando un OEE global de 73,4 %, equivalente a una mejora relativa del 7,1 % en la efectividad operativa del circuito Fino.

El análisis económico-financiero mediante simulación Monte Carlo (Crystal Ball), con un horizonte de seis años, arrojó un VAN incremental de 84,06 MMUS\$, una TIR de 70,3 %, una TIRM de 37,6 %, un IVAN de 3,9 y un playback de 1,6 años (\approx segundo trimestre 2026), demostrando la viabilidad técnica y económica de la propuesta. La integración de DMAIC, Lean Six Sigma y RAM, complementada con el enfoque PDCA, permitió vincular los resultados operacionales y de confiabilidad con la rentabilidad esperada, estableciendo una base técnica sólida para la toma de decisiones de inversión dentro del presupuesto corporativo 2025–2026.

Se concluye que la sustitución del chancador Raptor 400 por un Sandvik CH860i en circuito cerrado no solo optimiza la confiabilidad, el rendimiento y la calidad del chancado fino, sino que además representa una oportunidad de alto retorno económico con riesgo controlado. El enfoque metodológico aplicado constituye una base replicable para futuras etapas del proceso —especialmente en Aglomerado y Apilado—, garantizando la continuidad de la mejora continua y la sostenibilidad de los resultados alcanzados en la Faena Franke.

Finalmente, los resultados, indicadores y simulaciones se sustentan en registros operacionales internos del Grupo Minero Las Cenizas, correspondientes a la Faena Franke (Región de Antofagasta) y a la Faena Taltal (Planta Las Luces, POX y PLL), validados por las áreas de Mantenimiento y Planificación. Esto asegura la trazabilidad y confiabilidad de los datos utilizados. En consecuencia, los resultados ofrecen a la Gerencia Corporativa y a potenciales inversionistas un alto nivel de confianza técnica y financiera, al estar respaldados por datos reales y análisis probabilístico, minimizando la incertidumbre del retorno esperado y confirmando que la inversión propuesta es técnicamente sustentable, económicamente viable y estratégicamente alineada con los objetivos corporativos 2025–2026.

Por lo tanto, se confirma el cumplimiento íntegro del objetivo general y de los objetivos específicos definidos en esta investigación: se diagnosticó el desempeño del proceso de conminución, se identificó el área crítica de mejora (chancado fino), se aplicaron herramientas de análisis de confiabilidad (RBD y Jack-Knife), se evaluó y seleccionó la alternativa más eficiente (CH860i en circuito cerrado), y se demostró su viabilidad técnica, económica y estratégica bajo el marco metodológico planteado.

8. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas, metodológicas y estratégicas, orientadas a consolidar y ampliar los beneficios alcanzados en la Faena Franke del Grupo Minero Las Cenizas:

- Profundizar en el modelamiento integral del proceso de conminución.

Se recomienda extender la aplicación de la metodología DMAIC y del enfoque RAM hacia los circuitos de aglomerado y apilado, los cuales fueron analizados de forma general en esta etapa. Esto permitirá cuantificar la disponibilidad combinada del sistema, modelar interdependencias operacionales y estimar su impacto sobre la eficiencia metalúrgica y la recuperación global de cobre, fortaleciendo la visión integral del proceso.

- Incorporar metodologías de análisis de criticidad (AMEF/FMECA).

Durante el desarrollo del estudio no se aplicaron formalmente las herramientas de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) ni el Análisis Modal de Fallas, Efectos y Criticidad (FMECA), fundamentales para jerarquizar los modos de falla según su severidad, frecuencia y detectabilidad. Su implementación en futuras fases fortalecerá las etapas Definir y Analizar del ciclo DMAIC, mejorando la priorización de riesgos y estableciendo programas de mantenimiento centrado en la criticidad (RCM) plenamente integrados al modelo RAM.

- Ampliar y digitalizar la base de datos de mantenimiento y confiabilidad.

Se sugiere implementar un sistema digital de registro y trazabilidad de eventos de falla, reparaciones y detenciones operacionales, completamente integrado al software de gestión de mantenimiento corporativo. Esta digitalización permitirá aumentar la exactitud de los parámetros MTBF y MTTR, optimizar el análisis estadístico de confiabilidad y generar insumos para modelos predictivos de mayor precisión.

- Aplicar herramientas de analítica avanzada y mantenimiento predictivo.

Se recomienda incorporar modelos de aprendizaje automático (machine learning) sobre las series históricas de operación y mantenimiento, con el fin de anticipar fallas críticas, optimizar la programación preventiva y reducir de forma sostenida los tiempos medios de reparación (MTTR) y los costos de intervención. Esta línea de desarrollo favorecerá la transición hacia una gestión predictiva basada en datos (data-driven Maintenance).

- Actualizar periódicamente la evaluación económica y el análisis de riesgo.

Es aconsejable recalibrar anualmente el modelo de simulación Monte Carlo (Crystal Ball), incorporando escenarios actualizados de precios del cobre, costos energéticos, inflación y tasas de descuento. Mantener la vigencia de estas variables garantizará que los indicadores VAN, TIR, TIRM, IVAN y playback reflejen con precisión la realidad financiera del proyecto y respalden decisiones de inversión informadas y oportunas.

- Desarrollar una evaluación integral CAPEX/OPEX para próximos presupuestos.

En coherencia con el Plan Corporativo de Inversiones 2025–2026, se recomienda realizar una evaluación comparativa del impacto económico de las mejoras implementadas, considerando la relación entre costo de inversión, ahorro operativo y beneficio productivo. Este enfoque

permitirá priorizar proyectos de mayor retorno técnico-económico y menor exposición al riesgo, fortaleciendo la gestión estratégica del portafolio de activos.

- Fortalecer la cultura de mejora continua y gestión de activos.

Finalmente, se sugiere institucionalizar la metodología DMAIC–RAM, integrándola con los sistemas de monitoreo, control de desempeño, seguridad operacional y gestión del conocimiento. Esta estandarización asegurará la sostenibilidad de los resultados, la trazabilidad de las decisiones y la alineación con los objetivos corporativos de productividad, confiabilidad y eficiencia, consolidando una cultura de excelencia operacional en la Faena Franke.

9. Bibliografía

- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2010–2023). Anuario de la minería de Chile. Santiago, Chile: SERNAGEOMIN.
- Comisión Chilena del Cobre. (2010–2023). Estadísticas y precios del cobre. Santiago, Chile: COCHILCO
- Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2011). Maintenance: An Evolutionary Perspective. En E. Ben-Daya, S. O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic & D. Ait-Kadi (Eds.), *Handbook of Maintenance Management and Engineering* (pp. 21–47). Springer.
- Yáñez, M., Gómez de la Vega, H., Semeco Soto, K., & Medina, N. (s.f.). *Confiabilidad integral. Tomo I: Ingeniería de Confiabilidad – Equipos*.
- Jiménez, R. A. (2014). Seguimiento a modelos de riesgo de crédito para microempresarios [Memoria de título, Universidad de Chile]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial.
- De la Puente Cáceres, H. I. (2016). Desarrollo de una metodología para sistemas multiestado y análisis de confiabilidad en baterías de Li-ion para un vehículo eléctrico [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio Digital USM. <http://hdl.handle.net/11673/23287>.
- Stegmaier Bravo, R. (s.f.). *Ingeniería en Confiabilidad I – RAM: Base Conceptual del Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM)*. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Industrias.
- Felizzola Jiménez, H., & Luna Amaya, C. (2014). Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 22(2), 263–277.
- Presa García, S. (2020). *Aplicación de la metodología Lean Six Sigma en la mejora continua de procesos: un estudio de caso*. Universidad Autónoma de México.
- Morato Orozco, J. S. (2009). Reducción de gasto energético eléctrico usando Seis Sigma. *Producción + Limpia*, 4(2), 91–100.
- Pineda Gutiérrez, S. C. (2017). *Aplicación de la metodología DMAIC para la reducción de paros en línea de moldeo de tabletas de chocolate*. Universidad de Chile.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2014). *ISO 55000: Gestión de activos – Principios y terminología*. ISO.
- SixSigma.us. (2022). *DMAIC vs PDCA: How the two continuous improvement models complement each other*. SixSigma.us Learning Portal.
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2015). *ISO 9001: Sistemas de gestión de la calidad – Requisitos*. ISO.

- Nathan-Gerges González, A. (2023). DMAIC y Six Sigma en la gestión industrial minera. *Revista de Ingeniería y Gestión Industrial*, 5(1), 45–57.
- Wheeler, D. J., & Chambers, D. S. (1992). *Understanding Statistical Process Control*. SPC Press.
- Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2021). *The Six Sigma Handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2002). *Six Sigma Fundamentals*. McGraw-Hill
- International Lean Six Sigma Institute. (2025). *Process Capability and Control Metrics Guide*. ILSSI Press.
- Cruelles, A. (2010). Cálculo de la Efectividad Global del Equipo (OEE). *Revista Gestión Industrial*, 6(1), 15–22.
- Durán Hernández, F., & Guerrero Chávez, L. A. (2025). Overall Equipment Effectiveness (OEE): Una herramienta clave para la eficiencia en la producción. *Revista Conrado*, 9(3), 5971–5989.
- Johnson, M. (2021). El impacto del OEE en la Industria 4.0. *Industrial Management Review*, 38(2), 78–90.
- Rojas Alvarado, O. A., Benavidez, J. F., & Pascuas, W. (2023). Cálculo de la Efectividad Global del Equipo (OEE) basado en el concepto de gemelo digital bajo un entorno de transformación digital industrial. *Mutis*, 13(2), 1–27.
- Villalón Lillo, R. (2024). *Apuntes Clase IC III MGA USM 2024 – OEE*. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Mecánica. Documento interno no publicado.
- Soto Ramírez, F. E. (2014). *Medición automatizada de la eficiencia por medio de sistemas de pesaje*. Manufactura Avanzada, CIATEQ Campus Sahagún, SYCSA. México.
- Minera Las Cenizas. (2025). *Evaluación de P80 y pruebas de lixiviación – Planta Franke*. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.
- Villalón Lillo, R. (2024). *Apuntes Clase IC III MGA USM 2024 – OEE*. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Mecánica. Documento interno no publicado.
- Chávez, J. (2019). Optimización del proceso de chancado y control de P80 en plantas de óxidos de cobre. *Revista Minera del Norte*.
- Alguacil, F. J. (1998). La recuperación de cobre mediante lixiviación-extracción con disolventes-electrólisis: hacia el siglo XXI. *Revista de Metalurgia, CENIM-CSIC, Madrid*.
- Codelco Educa. (2019). *Lixiviación “El Riego”*. Material educativo técnico.
- Duque, R. A. (2014). *Lixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley en columnas unitarias utilizando la tecnología CuproChlor®*. Universidad de Chile.
- Minera Las Cenizas. (2025). *Evaluación de P80 y pruebas de lixiviación Planta Franke*. Documento interno no publicado.
- Monardes, J. F. (2010). *Pre-estudio técnico-económico de la aplicación de energía solar para pilas de*

biolixiviación. Universidad de Chile.

Rodríguez Coronado, P., & Colaboradores. (2022). Efecto del P80 en la recuperación metalúrgica de óxidos de cobre en pilas de lixiviación. Universidad Nacional de Ingeniería.

Yáñez, B. M. (2025). Estudio de la recuperación de los contenidos sulfurados de cobre mediante procesos de lixiviación oxidativa en medio clorurado y sulfatado asistido por yoduro. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas.

Sandvik Mining and Rock Solutions. (2024). Análisis de Proceso Planta Franke – Revisión A. Informe técnico confidencial.

Sandvik Mining and Rock Solutions. (2024–2025). *Simulación de circuito de chancado secundario–terciario – PlantDesigner SIM240048-1 (Casos base 2024: Raptor XL400 Cámara Media CSS 13 mm y Cámara Fina CSS 10 mm; CH660 EC (B) CSS 42 mm; CH860i EC (B) CSS 32 mm, Circuitos Abiertos; y Simulación 2025: CH860i EC (B) CSS 34 mm, Circuito Cerrado – Condición CAP PEAK)*. Informes técnicos preliminares. Proyecto CL240048, Planta de Chancado Secundario y Terciario, SCM Franke.

Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Minera Las Cenizas. (2025). Process Reporting Site SCM Franke: Base de datos operacional interna. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas. Documento interno no publicado.

Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Metalurgia. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas.

Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta RLV – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Franke, Grupo Minero Las Cenizas

Minera Las Cenizas. (2025). Datos operacionales de Planta POX – Área Mantenimiento / Planificación. Documento interno no publicado. Faena Taltal (POX), Grupo Minero Las Cenizas.

Minera Las Cenizas. (2025). *Datos operacionales de Planta PLL – Área Mantenimiento / Planificación*. Documento interno no publicado. Faena (PLL), Grupo Minero Las Cenizas.