

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**PROPUESTA DE MEJORA MEDIANTE ANÁLISIS CAUSA RAÍZ AL SISTEMA
DE MEDICIÓN EN PIQUES DE CHANCADOR SUPERIOR METSO – CODELCO
CHUQUICAMATA**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero/a en MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL.

Alumnos:

Ricardo Sebastián Neira Silva

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González



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: PROPUESTA DE MEJORA MEDIANTE ANÁLISIS CAUSA RAÍZ AL SISTEMA DE MEDICIÓN EN PIQUES DE CHANCADOR SUPERIOR METSO – CODELCO CHUQUICAMATA.

Nombre del candidato(a): Ricardo Sebastian Neira Silva

Carrera / Grado: Ing. Mantenimiento Industrial

Campus: Viña Del Mar **Departamento:** Depto.de Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Baldi González, 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 (marcar una opción)

☒ 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 (**marcar una opción**):

☐ 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: 28-10-2026

CARLOS
ANDRES BALDI
GONZALEZ

Firmado digitalmente por
CARLOS ANDRES BALDI
GONZALEZ
Fecha: 2026.10.28 11:08:26
+03'00'

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20.10.2026 **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

Este trabajo desarrolla una propuesta de mejora para el sistema de medición de nivel en piques del chancador superior METSO (Codelco, Chuquicamata), abordando como capítulo 1, la problemática de inestabilidad y pérdida de señal, que impide el monitoreo continuo y aumenta el riesgo de detenciones, atollos y operación “a ciegas”. La metodología se basa en un Análisis de Causa Raíz (ACR), con enfoque Bow-Tie, levantando evidencias de terreno/SCADA y determinando que el problema se concentra en la vulnerabilidad del circuito eléctrico (cableado y conexiones), afectado por abrasión, impactos y ausencia de canalización adecuada, además de brechas en redundancia y mantenimiento.

En el capítulo 2 y a partir del Bow-Tie, se definen requisitos mínimos (canalización, ruta segregada, redundancia y lógica de respuesta) y se comparan propuestas de tres contratistas, mediante matriz multicriterio con escala tipo Likert.

Para el capítulo 3, y junto con la evaluación, posiciona a Ferrostaal como alternativa recomendada (3,38), y la conveniencia económica se sustenta considerando 45 eventos/año asociados a pérdida de monitoreo, 2 horas por evento (90 h/año) y el costo por hora, obteniendo un impacto anual de \$12.900.221.460 CLP/año; con esto, la inversión seleccionada presenta un payback extremadamente bajo.

ÍNDICE

RESUMEN	2
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	8
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVO GENERAL	10
OBJETIVO ESPECÍFICO	10
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.	12
1.1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.	14
1.2. Producción de Cobre.	16
1.3. Planteamiento del problema.	17
1.4. Visualización y monitoreo continuo.	30
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.	32
2 ACTIVIDADES PRELIMINARES	33
2.5.1. Línea de tiempo del evento (Tabla 2)	35
2.5.2. Clasificación de factores	36
2.6 Determinación de la causa raíz	38
2.7. Acciones correctivas	41
2.8. Acciones de mejora continua	43
2.9 Verificación de efectividad	44
2.10. Comunicación	45
CAPÍTULO 3: Evaluación técnica-económica.	47
3.1. Alcance de la licitación	48
3.2. Requisitos técnicos mínimos (derivados del BowTie)	49
3.3. Descripción de propuestas recibidas	50
3.4. Descripción de propuestas recibidas	55
3.4. Comparativa técnica (matriz multicriterio)	56
3.5.1 Criterios y ponderaciones	56
3.5.2 Valorización de los proveedores	57
3.6. Evaluación costo–beneficio de la alternativa seleccionada	59
Conclusión	61
Bibliografía	63
Anexos	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación Geográfica del Proyecto.	14
Figura 1-2. Carta de valores.	16
Figura 1-3. Venta de cobre por región.	16
Figura 1-4. Diagrama de flujo de ACR.	19
Figura 1-5. Diagrama Causa-Efecto.	21
Figura 1-6. Diagrama de los 5 Porqués.	22
Figura 1-7: Etapas metodología AMEF.	23
Figura 1-8. Diagrama Bow-Tie Codelco.	24
Figura 1-9. Ilustración del equipo completo con la señalización de sus principales componentes.	25
Figura 1-10. Extracto de diagrama de flujo	26
Figura 1-11. Ilustración Sistemas blindaje piques.	27
Figura 1-12. Montaje blindaje piques.	27
Figura 1-13. Micropilot FMR67B: sensor de radar de 80 GHz.	28
Figura 1-14. Sistema de medición actual	28
Figura 1-15. Interruptores de Atollo tipo TILT Serie CT	29
Figura 1-16. Transductor de desplazamiento Magtrol DI 605–610 / 011	30
Figura 1-17. Portal operacional Chuquicamata subterránea	31
Figura 2-1. BOWTIE	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Producción por divisiones	16
Tabla 2-1 – Evidencias obtenidas en terreno y registros	34
Tabla 2-2 – Línea de tiempo evento	36
Tabla 2-3 – Factores identificados	37
Tabla 2-4 Acciones correctivas BOW TIE	41
Tabla 2-5 Acciones correctivas totales	42
Tabla 2-5 Mejora continua	43
Tabla 2-6 Verificación de efectividad	44
Tabla 3-1 Criterios y ponderaciones	56
Tabla 3-2 Valorización de los proveedores	57
Tabla 3-3 Resultados de la comparación	58
Tabla 3-4 Impacto por evento/año	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos	55
ANEXO-A Ficha técnica sensor Ender Hauser Micropilot FMR67B	65
ANEXO-B. Ficha técnica Interruptores de Atollo tipo TILT Serie CT	66
ANEXO-C. Ficha técnica Transductor de desplazamiento Magtrol DI 605–610	67
ANEXO D. Canalización sensores nivel chancador	68
ANEXO E. Diagrama de conexión de instrumentación de nivel descarga ch	69
ANEXO F. Registro de forces en plataforma oficial	69
ANEXO G. Estándar de operación de piques.	70
ANEXO H. Especificaciones técnicas de piques y silos PMCHS	71
ANEXO I Levantamientos y mejoras anteriores a sistema de medición	75
ANEXO J. Formulario de reserva sensor nivel pique	78
ANEXO K. Resolución de problemas -junio 2022	80
ANEXO L. Cotización de nuevo blindaje	82
ANEXO M. Cotización empresa Holdas	83
ANEXO N. Cotización empresa Salfa SA	86
ANEXO O. Cotización empresa Ferrostaal.	88

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de los equipos que operan en la producción de las plantas de minería es una actividad crítica en el proceso productivo minero, sobre todo porque éstos son requeridos en forma intensiva, por esta razón la mantención es un tema fundamental en la actividad minera. Los programas de mantención, deben considerar la disminución de los tiempos de detención y la seguridad de los trabajadores que deben realizar esta tarea con equipos complejos y muchas veces de gran tamaño. A esto, se suma el escenario actual, donde las compañías mineras están focalizadas en mayor productividad y menores costos en todo lo que involucra su operación.

La teoría tradicional, consideraba al mantenimiento como un mal necesario, la principal preocupación de las direcciones industriales, radicaba en disminuir los costos de mantenimiento, contribuyendo de esta manera a la deducción de costos general de la empresa (Moubray, J. (1997). Reliability-Centered Maintenance. Butterworth-Heinemann). Pero puede verse que un mantenimiento inadecuado, afecta a la totalidad del funcionamiento de la empresa ya que, puede limitar los volúmenes de producción, ocasionar accidentes, generar costos indirectos que superan largamente el costo tradicional de mantenimiento, tales como alquiler de equipos, contratación de servicios de reparaciones, etc.

No basta con hacer las tareas de mantenimiento correctamente, sino que esas tareas de mantenimiento deben ser las correctas.

En la producción, de la minería el escenario de detenciones por fallas de equipos es traducidas en toneladas de mineral el cual no se procesa.

El tonelaje mencionado en el proyecto minero Chuquicamata subterránea (PMCHS) es medido con el sistema "One mine" el cual mide el tiempo en que las palas (LHD) tardan en suministrar el mineral desde el punto de recolección a la tolva que alimenta al chancador, estas distancias, monitoreadas a través de pódicos (TAG) distribuidos en los distintos puntos de extracción. Con este tiempo establecido y el tonelaje, por balde promedio de una pala (14 toneladas) se calcula la pérdida de producción cuando una línea de producción se encuentra detenida.

Una línea, en producción con la disponibilidad de LHD estable (90%) tomando la línea 2 como referencia se obtiene un promedio de unas 1600 (T/h), con una ley del 0.9 % esto hace referencia que de 1600 T/h de mineral obtendríamos 1440 toneladas de cobre fino.

En promedio por anillos en los buzones se obtiene un promedio, de 2-3 horas de detención dependiendo de las dimensiones; Estas son valoradas \$20.430.597

pesos chilenos en una hora. Cabe destacar que en ocasiones se han llegado a tener días con la línea detenida por estas situaciones. Por esta razón , es necesario el no sólo atacar una falla en los equipos ni tener un buen mantenimiento, sino que también la importancia de saber el “porque”, de estas situaciones, de ahí la necesidad de analizar la causa raíz de esta problemática, dándole el foco a la metodología alineada a la división, como el levantamiento del proceso y del sistema actual (condiciones del pique/buzón, instrumentación, lógica y operación); caracterización del problema con datos.(registros OneMine, historial de detenciones y antecedentes de mantenimiento/operación);análisis de causa raíz y evaluación de riesgos, utilizando herramientas como Bow-Tie (y técnicas complementarias, cuando corresponda);definición de requisitos de diseño para un sistema de medición confiable (exactitud requerida, disponibilidad de señal, redundancia, protección mecánica, accesibilidad para mantenimiento); proposición y comparación de alternativas de mejora, con criterios técnicos y de mantenibilidad, la evaluación del impacto esperado mediante indicadores y análisis costo–beneficio

(por ejemplo, horas evitadas, disponibilidad del sistema de medición, reducción de detenciones y valorización asociada). Con ello, se busca entregar una solución replicable y justificable, conectando el diagnóstico con una propuesta concreta y medible.

La compañía minera Codelco, operación Chuquicamata no está exenta de esta situación, aplicando muchas veces mantenimiento correctivo, a su chancador superior Metso, lo que afecta directamente en los volúmenes de producción y en los costos de mantenimiento.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de mejora, al sistema de medición, en piques de chancador superior METSO, mediante la metodología análisis causa raíz– Codelco Chuquicamata , con la finalidad de mitigar el riesgo operacional y financiero , mediante una solución de ingeniería.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Caracterizar la situación actual del sistema, mediante un levantamiento en terreno determinando los puntos críticos y problemáticas, asociadas al sistema de medición, para establecer una línea base.
- Identificar los modos de falla del sistema de medición, aplicando una metodología análisis causa raíz, para determinar las causas críticas (del equipo y/o operacionales) que generan fallas o inestabilidad en la medición.
- Obtener la relación costo-beneficio, mediante una evaluación técnica-económica para justificar la propuesta.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.

1. ANTECEDENTES GENERALES.

1.1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.

Codelco es el primer productor de cobre del mundo y posee cerca del 9% de las reservas mundiales de cobre. El nombre Codelco representa a la Corporación Nacional del Cobre de Chile, una empresa autónoma del Estado chileno, cuyo negocio principal es la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado, y su posterior comercialización. El Directorio de Codelco está constituido por siete integrantes, los cuales son nombrados por el presidente de la República de Chile. A su vez, el Directorio nombra al presidente ejecutivo que encabeza una administración superior formada por vicepresidencias y gerencias.



Fuente: Codelco.com

Figura 1-1. Ubicación Geográfica del Proyecto.

El proyecto minero se desarrolla en CODELCO, División Chuquibambilla, este yacimiento de cobre se emplaza en la Región de Antofagasta, Provincia de El Loa, a 17 km al norte de la ciudad de Calama, tal como aparece indicado en la figura 1-1.

1.1.1. Divisiones pertenecientes a Codelco.

La Corporación Nacional del Cobre en Chile posee ocho divisiones operativas de cobre y su casa matriz, ubicada en Santiago. Se encuentran ubicadas entre la II, V y VI Región de Chile, las cuales son:

- División Chuquicamata.
- División Radomiro Tomic.
- División Gabriela Mistral.
- División Ministro Hales.
- División Andina.
- División Ventanas.
- División El teniente

1.1.2. Misión

Maximizar el valor económico, ambiental y social de Codelco y su contribución al Estado de manera sostenible a través de la minería del cobre y sus subproductos.

1.1.3. Visión

Ser líder global en la industria del cobre, destacándose por su compromiso con la innovación, la sostenibilidad y la responsabilidad social

1.1.4. Carta de Valores

El momento actual del negocio requiere comportamientos y desempeños diferentes. Hasta 2023 se tenía una carta de valores que ya no se ajustaba al quehacer cotidiano y no impulsaba la mejor versión para enfrentar la tremenda responsabilidad que se tenía con el planeta.

Tras un análisis profundo y un proceso colaborativo entre miles de trabajadores y trabajadoras, definimos los valores que representan, movilizan, y que conectan con el propósito y misión. En 2024 lanzamos la nueva Carta de Valores y se llevó hasta el último rincón de las faenas.



Fuente: Codelco memoria anual 2024

Figura 1-2. Carta de valores.

1.2. Producción de Cobre.

Tabla 1-1 Producción por divisiones

Divisiones Codelco 2024	Producción (millones de toneladas métricas de cobre fino)
Chuquicamata	289,0
Radomiro Tomic	270,5
Ministro Hales	122,2
Salvador	5,7
Andina	181,6
El Teniente	356,4
Gaby	103,1
Total Codelco	1.328,4

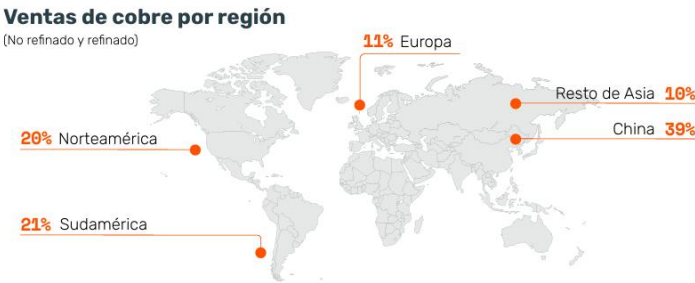
Fuente: Consejo minero

La producción total de Codelco alcanza 1.328,4 millones de toneladas métricas de cobre fino, reflejando la magnitud de la empresa como principal productor mundial de cobre.

Esto refleja una alta dependencia operativa de estas minas, destacando la necesidad de mantener su eficiencia y continuidad. Asimismo, el bajo aporte de Salvador pone en evidencia la importancia de proyectos de renovación y expansión para asegurar la sostenibilidad productiva a futuro.

1.2.1. Destino.

Las ventas de cobre de Codelco alcanzaron a 1,32 millones de toneladas, con destino distribuido en un 49% Asia, 11% Europa, 21% Sudamérica y 20% Norteamérica



Fuente: Codelco memoria anual 2024

Figura 1-3. Venta de cobre por región.

1.3. Planteamiento del problema.

En la División Chuquicamata de Codelco, el sistema de medición de niveles en los piques del chancador superior METSO cumple un rol crítico en el control operativo del proceso de chancado y transferencia de mineral. Sin embargo, actualmente se evidencia una deficiencia en la estabilidad, confiabilidad y robustez del sistema de medición existente, lo que repercute directamente en la continuidad operacional y en la seguridad de los equipos y estructuras asociadas.

El principal problema identificado corresponde al desprendimiento del blindaje de los piques ubicados aguas abajo del chancador, fenómeno que ocurre como consecuencia de fallas geotécnicas en el macizo rocoso que los rodea. Estas fallas generan desmoronamientos y pérdida de material de contención, afectando la integridad estructural de los blindajes. En este contexto, la operación debe mantener un nivel de mineral estable dentro de los piques para evitar esfuerzos bruscos sobre los blindajes restantes. Cuando los niveles descienden demasiado, se incrementa la probabilidad de desprendimientos, provocando atollos en los buzones de descarga y, en consecuencia, detenciones prolongadas del proceso productivo.

A su vez, la ausencia de un sistema de medición confiable, estable y redundante impide visualizar en tiempo real los niveles de los piques, dificultando la toma oportuna de decisiones operacionales. Esta falta de monitoreo continuo puede conducir tanto a niveles excesivamente bajos, que debilitan los blindajes, como a niveles altos o rebases, los cuales pueden dañar la instrumentación instalada y comprometer la seguridad del personal y los equipos.

Por lo tanto, el impacto de no contar con un sistema de medición adecuado se traduce en pérdidas de productividad, aumento de los tiempos de inactividad no programados y mayores costos operacionales. Frente a esta situación, se plantea la necesidad de desarrollar una propuesta de mejora mediante la metodología de análisis de causa raíz, orientada a identificar los factores técnicos y operativos que originan las fallas en el sistema de medición y proponer soluciones que permitan garantizar un control confiable, estable y redundante de los niveles en los piques del chancador superior METSO.

1.3.1. Marco teórico.

El Análisis Causa Raíz, no es un único método, sino un conjunto de herramientas, que se utilizan para identificar las causas fundamentales de un problema.

Es un proceso sistemático, que permite identificar las causas fundamentales que provocan una falla, o un evento indeseado en un sistema, equipo o proceso.

Su objetivo, es evitar que el problema vuelva a ocurrir, atacando la raíz del fallo y no solo sus síntomas. Busca entender que ocurrió, determinar el por qué y identificar como prevenirlo de forma definitiva. Esto, permite diseñar acciones correctivas y preventivas efectivas, evitando recurrencias y aumentando la confiabilidad del sistema

1.3.1.1. Análisis Causa Raíz (ACR)

Una investigación ACR, une la causa y el efecto final con el fin de determinar lo que sucedió, por qué sucedió y lo más importante averiguar qué hacer para reducir la probabilidad de que vuelva a suceder (Ben-Daya & Duffuaa, 2009).

Existen 3 etapas previas que se deben cumplir para empezar a trabajar en un ACR, estas son:

- Tener una estructura organizacional de ACR
- Confeccionar un sistema de gestión de ACR
- Realizar el análisis de criticidad de fallas

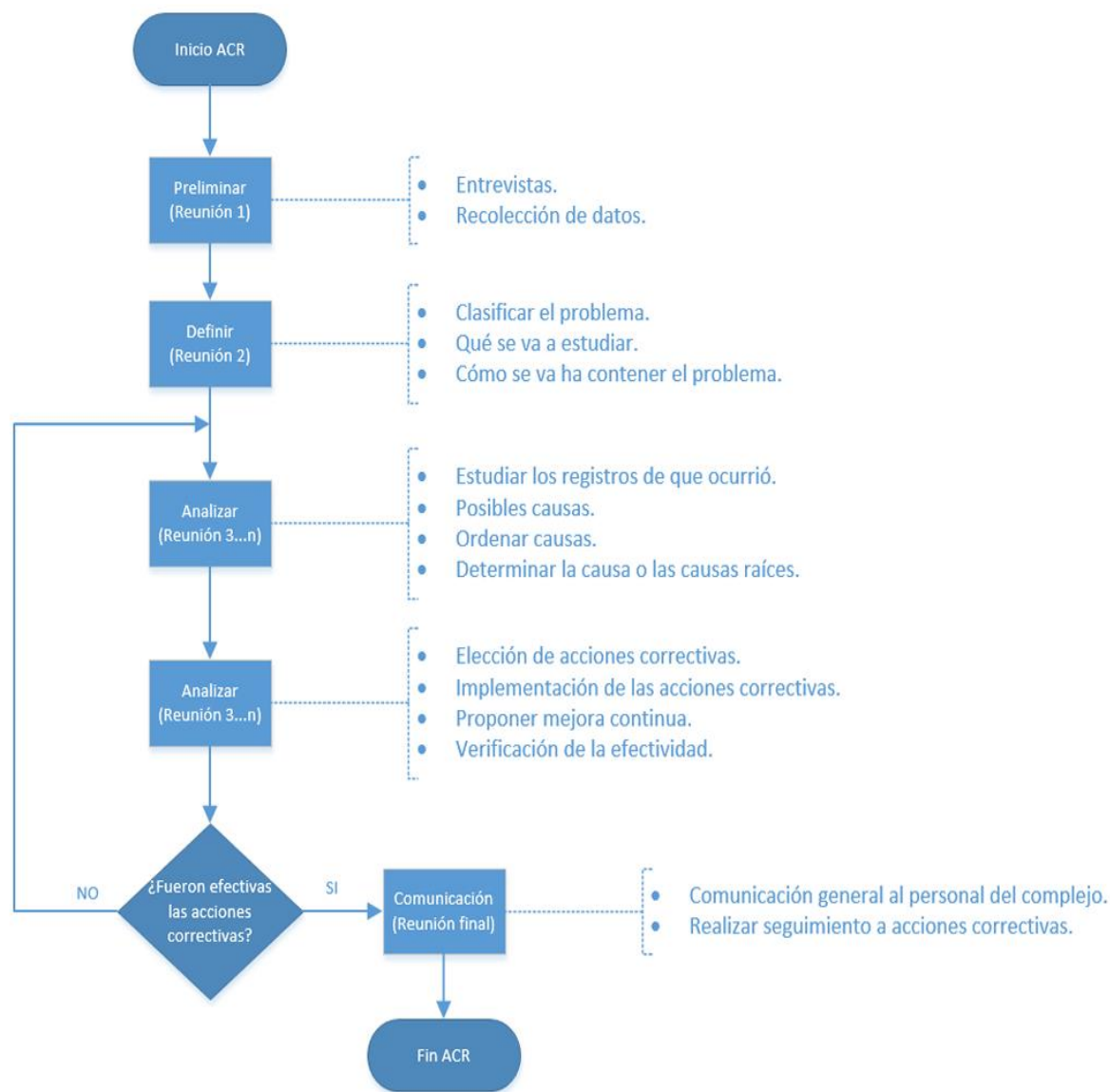
Una vez cumplidas las etapas anteriores, se da inicio a la investigación de ACR, Las 4 etapas que conforman un ACR son las siguientes:

- Actividades preliminares
- Recolección de datos e informaciones (hallazgos)
- Análisis de datos y determinación de Causa Raíz
- Elección de acciones correctivas
- Verificación de la efectividad
- Comunicación

1.3.2. Actividades preliminares

Al realizar el ranking de falla ordenadas por criticidad, elegida la falla que tiene mayor impacto y conformado el equipo que realizará el ACR, se puede dar inicio al ACR.

El coordinador de ACR, debe llevar la gestión del proceso. La figura 1-4 muestra un diagrama de flujo que sirve como ayuda para gestionar el ACR, saber cuáles son las etapas (reuniones) de la investigación y el proceso que se realizará en cada reunión.



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Root cause analysis for beginners . J. J. Rooney y L. N. Vanden Heuvel, 2004, Quality Resources.

Figura 1-4. Diagrama de flujo de ACR.

1.3.2.1. Recolección de datos e informaciones (hallazgos)

Esta etapa, está orientada a conseguir información detallada de las circunstancias contextuales, de cómo se presentó la falla, información de los equipos involucrados y todo otro dato que se considere relevante, con la finalidad de utilizar esta información para la etapa de análisis de ACR.

1.3.2.2. Análisis de datos y determinación de Causa Raíz

Los datos recopilados en la etapa anterior se deben analizar para empezar a inferir modos de fallos. Se debe clasificar el evento que ocurrió, con el fin de acercarse al problema y así comprender la naturaleza del mismo, por lo tanto, la primera medida, es enfocar el problema con todo detalle, definiendo los límites del mismo, además entender si el problema ha ocurrido en más de una oportunidad. Luego de enfocar el problema y definir cuál es la problemática para estudiar, el grupo debe analizar la evidencia y realizar inferencia en posibles modos de fallo.

1.3.2.3. Elección de acciones correctivas

Para elegir la acción correctiva, que asegurará que lo sucedido no volverá a ocurrir, se debe tener en claro dos cosas:

- Saber cuál es la causa o causas raíz que provocaron la falla (esto se deduce del diagrama causa y efecto).
- Reconocer cuál es el patrón de falla de la causa raíz (cada patrón de falla tiene asociada una acción correctiva en particular).

1.3.2.4. Verificación de la efectividad

Una vez ejecutada, la acción correctiva se debe verificar la efectividad de ésta, si el problema persiste podría deberse a 2 factores: • Que la acción correctiva elegida no fue la adecuada. • Es otra la causa raíz del problema. En cualquiera de los dos casos se debe volver al proceso de análisis, volver a analizar los nuevos datos y volver a inferir una nueva causa raíz con su nueva acción correctiva. Cabe destacar que muchas veces toma tiempo verificar si la acción correctiva fue la adecuada, es responsabilidad del líder decidir (a través de datos objetivos) cuando cerrar el ACR y pasar al proceso de comunicación.

1.3.2.5. Comunicación

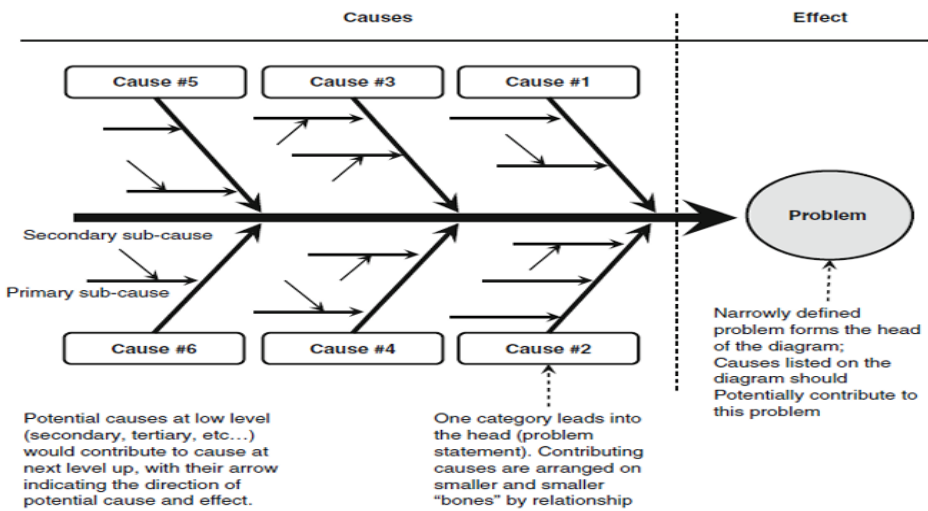
La etapa de comunicación, es muy importante, ya que aquí se plasman los resultados de la investigación del análisis causa raíz, lo ideal, es realizar una exposición con los resultados a todos los miembros de la organización, a continuación de presentan los puntos básicos que debe llevar dicha presentación:

- Descripción general, es un breve resumen de la presentación.
- Descripción del proceso.
- Línea de tiempo, cronograma de los sucesos antes y después de la falla.
- Hallazgos, gráficos y datos relevantes.
- Diagramas de metodologías seleccionadas (Ishikawa, 5 porques, bowtie, etc.)
- Elección de la causa raíz.
- Acciones correctivas con fecha de ejecutable y responsable.
- Acciones de mejora continua con fecha de ejecutable y responsable.

1.3.2.6 Tipos de ACR (análisis causa raíz) y sus funciones.

1.3.2.6.1 ISHIKAWA

El diagrama de causa-efecto de Ishikawa que se muestra en la figura 1-5, es un diagrama causal, que muestra las causas de un evento específico. Fue diseñado para solucionar, las posibles causas de un problema, organizando éstas en causas relacionadas. El profesor Kaoru Ishikawa, desarrolló esta herramienta en 1943 para explicar a un grupo de ingenieros de Kawasaki Steel ,como diferentes factores pueden ser ordenados e interrelacionados (Van Aartsengel & Kurtoglu, 2013) .



Fuente: Van Aartsengel & Kurtoglu, 2013

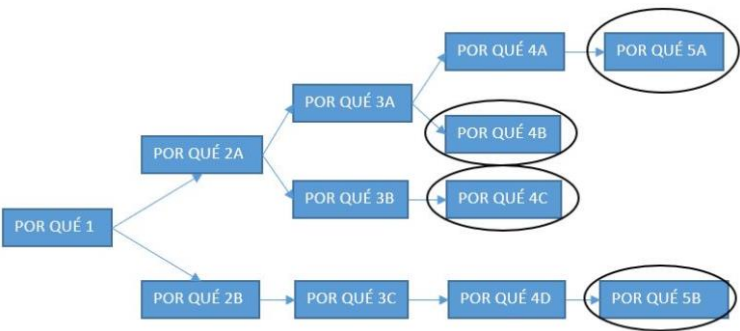
Figura 1-5. Diagrama Causa-Efecto.

1.3.2.6.2. Método de los 5 Porqués (5 Whys)

El Método de los 5 Porqués ,es una técnica de análisis causa raíz desarrollada por Toyota Production System (TPS) , que consiste en realizar una secuencia de preguntas del tipo “¿por qué?”, con el objetivo de profundizar en las causas que originan un problema hasta llegar a su origen fundamental.Generalmente se emplean cinco iteraciones de la pregunta, aunque el número puede variar según la complejidad del evento. Este método permite identificar rápidamente la causa raíz de un problema, evitando quedarse en síntomas superficiales.

Sus funciones clave son:

- Identificar de manera rápida y sencilla la causa raíz a través de preguntas consecutivas, el análisis va profundizando, desde la falla visible, hacia factores ocultos o sistémicos.
- Descubrir causas humanas, procedimentales y operacionales, este método es especialmente efectivo para revelar errores de operación, incumplimiento de procedimientos, falta de capacitación, fallas en protocolos, decisiones operacionales incorrectas.
- Simplificar el análisis de fallas recurrentes, o de baja complejidad, esté se utiliza cuando la falla ocurre repetidamente, cuando no requiere modelamiento matemático, tiene una secuencia clara de eventos o no involucra sistemas extremadamente complejos.



Fuente: Elaboración propia a partir de Rooney y Vanden Heuvel (2004).

Figura 1-6. Diagrama de los 5 Porqués.

1.3.2.6.3 FMEA / AMEF (Failure Mode and Effect Analysis)

El FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), conocido en español como AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Falla), es una metodología sistemática, utilizada para identificar, evaluar y priorizar los modos de falla potenciales en un sistema, equipo, proceso o componente antes de que estos ocurran.

Se trata de una herramienta preventiva, que permite analizar de forma estructurada cómo puede fallar un sistema y qué consecuencias, tendría cada tipo de falla sobre la operación.

El FMEA/AMEF, cumple una función esencial en la fiabilidad y la ingeniería de mantenimiento, ya que se enfoca en prevenir fallas, evaluar riesgos y determinar acciones prioritarias, enfocándose en analizar modos de falla ANTES de que ocurran, esto permite anticiparse a fallas potenciales, mediante la identificación de los modos de falla más probables, así como sus causas y efectos sobre el sistema.

El evaluar criticidad mediante el NPR ,(Número de Prioridad de Riesgo) en el cálculo se da el enfoque a la Severidad (magnitud del impacto del modo de falla), la Ocurrencia (probabilidad de que la falla ocurra), la detección (probabilidad de que el sistema detecte el fallo antes de afectar la operación.)

El NPR ,permite cuantificar objetivamente la criticidad del modo de falla, facilitando la toma de decisiones. A través de preguntas consecutivas, el análisis va profundizando desde la falla visible hacia factores ocultos.

El priorizar qué fallas requieren atención inmediata, con FMEA permite ordenar los riesgos desde los más críticos hasta los menos relevantes.

Las fallas con mayor NPR, deben ser abordadas primero mediante acciones correctivas o preventivas como el cambio del diseño, mejoras en mantenimiento, redundancias, sensores adicionales, modificaciones operacionales, procedimientos y controles.



Fuente: elaboración propia adaptado de Arata y Furlanetto (2005).

Figura 1-7: Etapas metodología AMEF.

1.3.2.6.4 Bow-Tie

El Análisis Bow-Tie, es una metodología de evaluación de riesgos que combina dos herramientas clásicas: el Árbol de Fallas (FTA) y el Árbol de Eventos (ETA), integrándolos en un diagrama único con forma de “corbata de moño” (bow-tie).

Este método, permite visualizar de forma clara la relación entre causas que pueden originar un evento crítico, el evento central o punto de pérdida de control, consecuencias que se generan si el evento ocurre, barreras preventivas (antes del evento) y barreras mitigadoras (después del evento).

El Bow-Tie , permite analizar y gestionar riesgos críticos, mediante tres funciones fundamentales , el cual el identificar y organizar las causas que pueden provocar un evento crítico ,este incluye causas técnicas, humanas, ambientales u organizacionales, Es similar al lado izquierdo del Árbol de Fallas (FTA), donde se descompone el evento en sus causas primarias y secundarias.

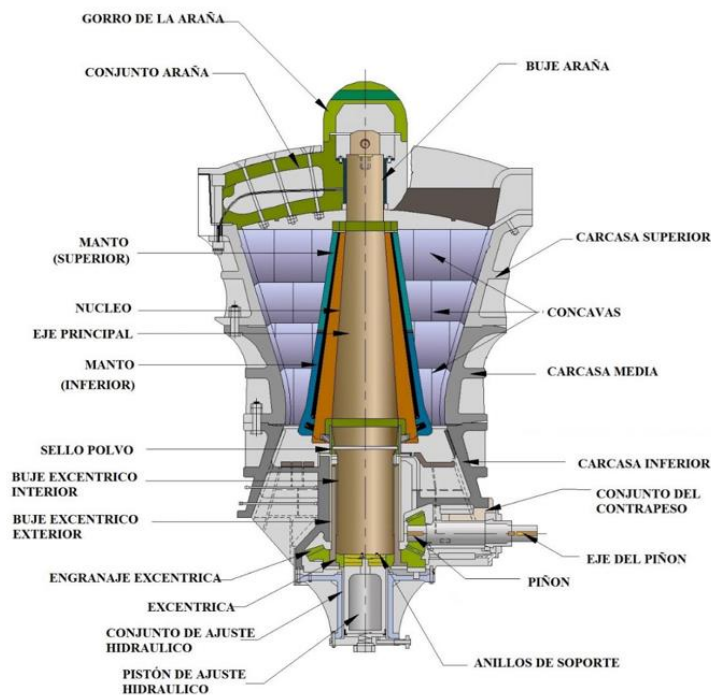


Fuente: Estrategia sso Codelco

Figura 1-8. Diagrama Bow-Tie Codelco.

1.3.3. Chancador superior METSO.

El Chancador Primario de la Planta, es un chancador giratorio, tamaño 42” x 66” especificado para una capacidad de 1380 [tmph]. Es accionado directamente por un conjunto motriz, compuesto de: motor eléctrico de 400 HP, eje de extensión, y una transmisión cónica piñón-corona con dientes en espiral. Está equipado con un sistema hidráulico, para ajustar la posición vertical de operación del eje principal, sistemas de lubricación con refrigeración mediante ventilador y la instrumentación requerida para su funcionamiento.



Fuente: Manual del chancador

Figura 1-9. Ilustración del equipo completo con la señalización de sus principales componentes.

1.3.4. Piques.

En minería, un pique es una excavación vertical o subvertical, que sirve como vía de comunicación y transporte entre la superficie y los niveles subterráneos de una mina. Se utilizan para el descenso y ascenso de personal, equipos, y el mineral extraído, y también cumplen funciones de ventilación y desfogue de gases.

Funciones principales de los piques:

Transporte: Permiten mover personal, maquinaria, herramientas y el mineral entre diferentes niveles de la mina y la superficie.

Ventilación: Facilitan la circulación del aire, siendo esenciales para la seguridad y la extracción de gases tóxicos o el polvo generado en la mina.

Comunicación: Sirven como puntos de acceso para el mantenimiento, la exploración y el desarrollo de la mina.

Características y construcción:

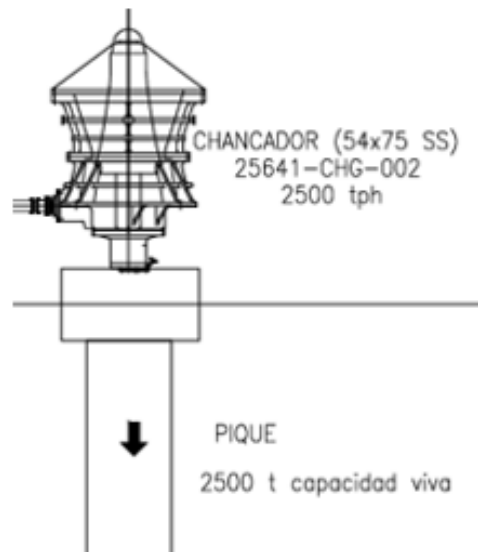
Profundidad: Pueden variar desde decenas de metros en minería a cielo abierto o pequeña minería hasta alcanzar los 1000 metros o más en la gran minería.

Método de construcción: Generalmente se excavan desde la superficie hacia abajo, reforzando las paredes con materiales como madera o acero a medida que se profundizan.

Sistemas de transporte: Se instalan sistemas de transporte, como jaulas (ascensores) para facilitar el movimiento vertical.

Importancia:

La construcción de piques, es fundamental para la operación y el desarrollo de minas subterráneas, ya que optimizan la extracción de mineral y garantizan condiciones de seguridad y ventilación adecuadas para los trabajadores.

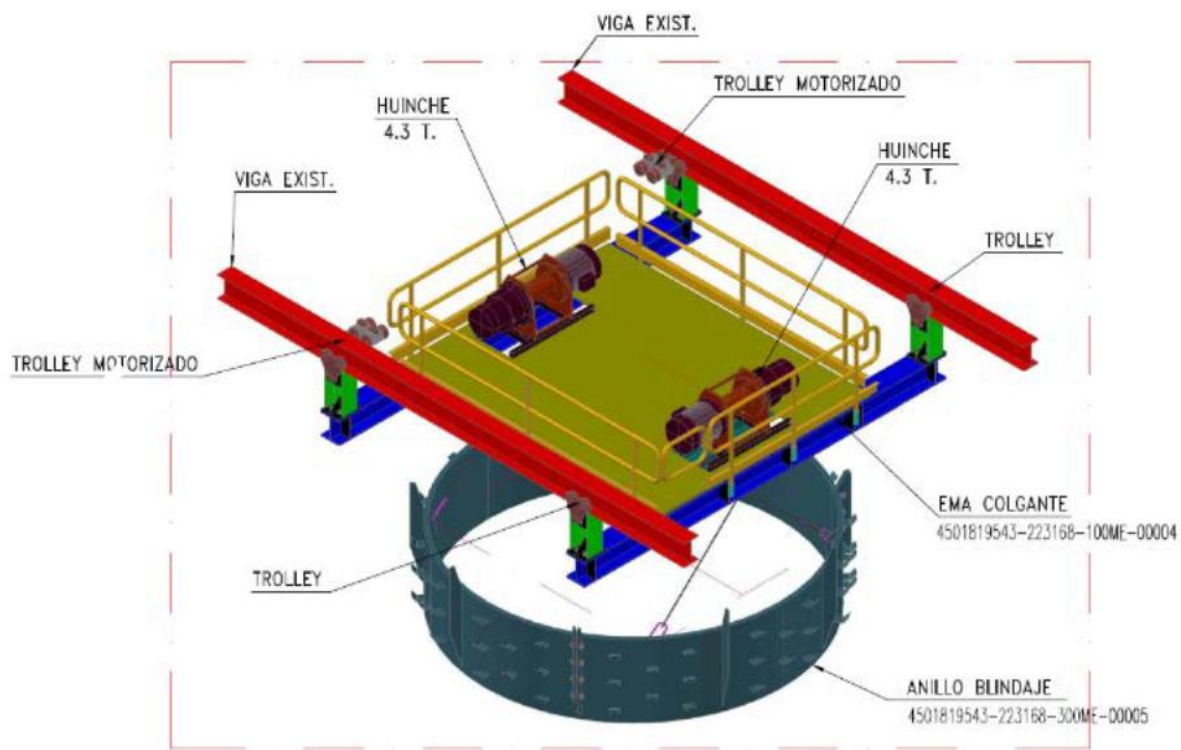


Fuente: Filosofía de control y operaciones PMCHS

Figura 1-10. Extracto de diagrama de flujo

1.3.4.1. Blindaje Piques.

Los blindajes en piques mineros son anillos de acero, que se instalan para revestir y proteger las paredes de las excavaciones verticales o subverticales (piques), proporcionando sostenibilidad, integridad y durabilidad a la mina. Este proceso, conocido como blindaje, se realiza después de la excavación inicial, para soportar el macizo rocoso y crear un espacio donde se vierte hormigón, para recubrir los muros, mejorando la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.



Fuente: Contrato N°: 4501819543 (ODS-C1141 / ODS-C1167)

Figura 1-11. Ilustración Sistemas blindaje piques.



Fuente: alercechile.cl

Figura 1-12. Montaje blindaje piques.

1.3.5. Sistema de medición

En minería, los piques se miden para controlar el nivel de material (mineral o estéril) acumulado dentro del buzón o tolva vertical. Esto es clave para evitar desprendimientos del blindaje, rebalses, o atollos que afecten la continuidad operacional del chancado y transporte.

1.3.5.1 Sensores de nivel.

En la actualidad en el chancador, se utilizan sensores de radar, como el Micropilot FMR67B ,que forma parte de la nueva generación de sensores de radar de 80 GHz. Es adecuado para una medición continua de nivel sin contacto de sólidos, en aplicaciones exigentes, incluso en temperaturas de proceso extremas. Unos asistentes de navegación guían a los usuarios en la puesta en marcha, los test de prueba y la verificación de los equipos, garantizando así una fácil operación del equipo. El estrecho ángulo de abertura del haz, es adecuado para mediciones en silos estrechos. Heartbeat Technology, identifica anomalías para aumentar la seguridad y la productividad.



Fuente: Endress+Hauser

Figura 1-13. Micropilot FMR67B: sensor de radar de 80 GHz.



Fuente: Registro de operaciones

Figura 1-14. Sistema de medición actual

1.3.5.2. Sensor de atollo – chute atascado.

Un sensor de atollo o chute atascado, funciona con un interruptor de inclinación, (tilt switch) que se activa cuando un material sólido, (como granos o polvos) se acumula y empuja el sensor más de 17° desde la vertical. Esta inclinación, provoca un contacto interno, enviando una señal de alarma al sistema de control, que puede detener un chancador para evitar rebalses.



Fuente: tecnocontrol.cl

Figura 1-15. Interruptores de Atollo tipo TILT Serie CT

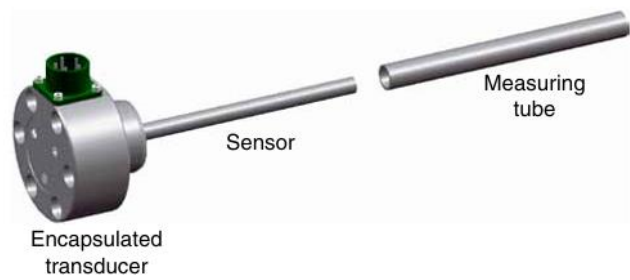
1.3.5.3. Transductor de desplazamiento.

Los transductores de desplazamiento Magtrol, permiten la medición sin contacto de la posición absoluta del pistón en cilindros hidráulicos, neumáticos y otras aplicaciones.

El principio de funcionamiento de los transductores de desplazamiento Magtrol, utilizan la medición por corrientes. Este consta de un tubo de aluminio, que se desplaza a lo largo de la bobina del transductor, modificando las pérdidas inducidas por corrientes parásitas, lo que cambia la impedancia de la bobina.

- Un circuito electrónico ubicado en la cabeza del transductor convierte esta información sobre la posición del tubo en una señal lineal.
- Este circuito emplea tecnología SMD (Surface-Mounted Device), lo que le otorga robustez y confiabilidad.
- El sensor está compensado activamente frente a variaciones de temperatura, asegurando precisión en condiciones cambiantes.

Este transductor es el encargado de medir la posición del poste del chancador cuyo objetivo es establecer el tamaño del mineral triturado.

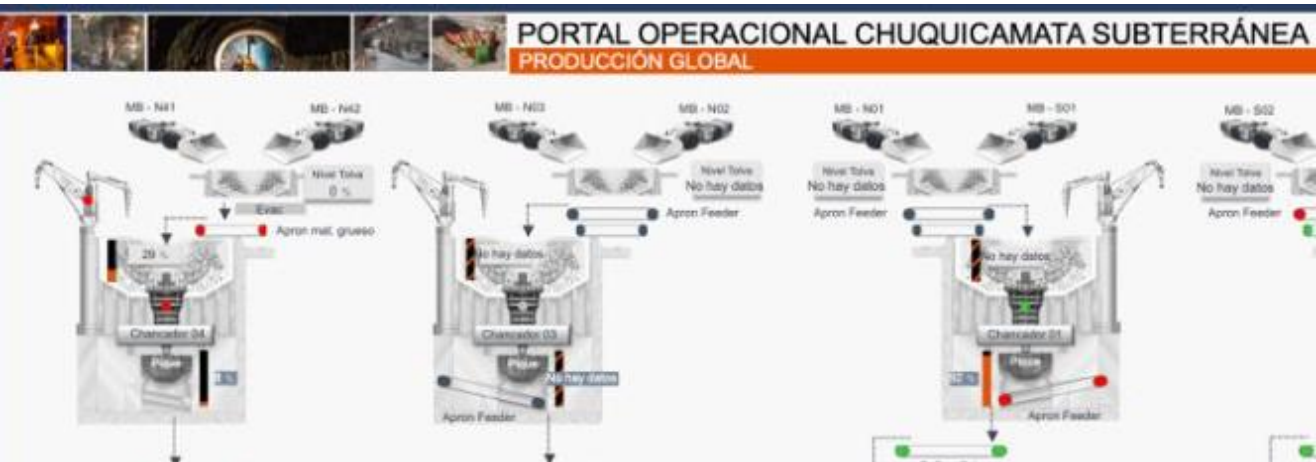


Fuente: <https://www.magtrol.com/welcome-to-new-site/>

Figura 1-16. Transductor de desplazamiento Magtrol DI 605–610 / 011

1.4. Visualización y monitoreo continuo.

El monitoreo continuo y la visualización de los niveles en los piques, asociados al sistema de chancado, constituyen elementos esenciales para asegurar la operación estable, segura y eficiente del proceso productivo. En el contexto de la División Chuquicamata, donde el sistema de chancado primario METSO, desempeña un rol crítico en la alimentación hacia las etapas posteriores del procesamiento mineral, mantener una supervisión constante del nivel de material en los piques, resulta determinante para la continuidad operacional y la integridad estructural del sistema.



Fuente: Overview MB PCHS

Figura 1-17. Portal operacional Chuquicamata subterránea

1.5. Síntesis del Capítulo 1.

En este capítulo, se presentaron los antecedentes generales de Codelco y de la División Chuquicamata, así como el rol del chancado primario METSO, dentro de la cadena productiva. Además, se describieron los piques asociados al sistema, sus blindajes y la instrumentación utilizada para la medición de nivel, destacando la importancia del monitoreo continuo, como condición base para una operación, estable y segura.

A partir del planteamiento del problema, se estableció que el sistema de medición actual presenta brechas de estabilidad, confiabilidad y robustez, lo que dificulta la visualización en tiempo real del nivel de material en los piques. Esta limitación, incrementa la probabilidad de condiciones operacionales no controladas (por ejemplo, niveles demasiado bajos o altos), elevando el riesgo de atollos, rebalses, daños en blindajes e intervenciones no planificadas, con impacto directo en la continuidad operacional.

En consecuencia, el problema técnico, queda definido como la necesidad de disponer de un sistema de medición confiable, robusto y con criterios de mantenibilidad y redundancia, capaz de operar en condiciones severas, propias del chancado y transferencia de mineral. Con esta base, el Capítulo 2 desarrolla el Análisis de Causa Raíz del evento seleccionado, identificando amenazas, brechas de barreras y acciones correctivas y de mejora continua, que sustentarán la propuesta final.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.

2 ACTIVIDADES PRELIMINARES

2.1 Descripción del problema

Evento: Falla del sensor radar del pique – Chuquicamata Subterránea.

El día 12 de septiembre de 2025, durante el turno B en el sector Chancado Primario de Chuquicamata Subterránea, el sensor radar de medición del nivel del pique del Chancador Superior METSO, presentó lecturas erráticas, fluctuando entre valores incoherentes (−1 m a +14 m), y finalmente perdió señal.

El operador quedó sin visibilidad interna del pique, generándose riesgo inmediato de:

- Atollo
- Rebalse
- Daño en blindaje
- Detención no programada

Se requirió intervención en terreno bajo condiciones de riesgo.

Como consecuencia:

- El operador de sala, queda sin visibilidad del comportamiento del pique.
- Se inició una sobrecarga del chute de alimentación.
- Se generó riesgo de atollo y rebalse, activándose tardíamente el sensor tilt.
- Se realizó una intervención urgente en zona peligrosa.
- Se pierden cables de alimentación y señales de instrumentación
- Se detuvo el sistema durante 2 horas.

2.2. Alcance del RCA

Este RCA, analiza únicamente las causas y consecuencias asociadas a la falla del sensor radar y su impacto en el control del pique.

Incluye:

- Fallas técnicas del radar
- Condiciones estructurales del pique
- Factores operacionales
- Factores humanos
- Evaluación de barreras

- Acciones correctivas y de mejora

No incluye, análisis del funcionamiento del chancador, del sistema de correas o de procesos aguas arriba.

2.3. Objetivo del RCA

Identificar la causa raíz y las causas contribuyentes de la falla del sensor radar del pique, definir acciones correctivas y de mejora continua, garantizando la confiabilidad del sistema de medición, la seguridad del personal y la continuidad operacional del chancado primario.

2.4 RECOLECCIÓN DE DATOS

2.4.1. Evidencias recopiladas

Tabla 2-1 – Evidencias obtenidas en terreno y registros

N°	Evidencia observada	Fuente	Descripción / Observación técnica
1	Pérdida total de señal del radar (“Loss of Signal”)	Historial SCADA	Lectura desaparece abruptamente. El patrón indica interrupción eléctrica, no falla de instrumento.
2	Lecturas erráticas previas a la falla	Tendencias SCADA	Salto en la lectura y valores incoherentes, típicos de conductor dañado o falso contacto.
3	Cable con abrasión por roce con mallas metálicas del pique	Inspección eléctrica	Aislación desgastada por contacto directo con malla. Se observan cortes superficiales y exposición parcial del conductor.
4	Aplastamiento del cable por atollos y rebote de mineral	Inspección mecánica – Fotografía	Canalización deformada por golpes. El cable presenta daño interno (microfracturas del cobre).
5	Conductores sin robustez adecuada para ambiente minero	Equipo eléctrico	Cable utilizado no cumple estándar reforzado minero: aislación delgada, sin blindaje y sin recubrimiento antiabrasión.
6	Ausencia de canalización adecuada	Inspección terreno	Cable instalado sin tubería protectora, quedando expuesto a polvo, rocas, humedad y roce con estructuras.
7	Humedad y sulfatación en caja de paso	SST / Fotografía	Humedad interna deteriora bornes y genera resistencia inestable, acelerando la falla de continuidad.
8	Prueba de continuidad falla en múltiples puntos	Multímetro – M.eléctrico	Al mover el cable, la continuidad varía, confirmando rotura interna intermitente del conductor.
9	Prensaestopas sin torque y sin sello	Inspección eléctrica	Permite entrada de polvo y agua, afectando conductor y conexiones; además, deja el cable suelto y más expuesto al movimiento.
10	Rebote de mineral contra el sector del cableado	Video operador terreno	Golpes frecuentes sobre la zona donde pasa el cable agravan la abrasión y los daños en la aislación.
11	Operador reporta “pérdida súbita de señal”	Bitácora turno C	Coincide con una fractura completa del conductor.
12	Falta de redundancia en medición y cableado	Análisis de ingeniería	Un solo cable alimenta y transmite la señal; falla simple = caída total del sistema.
13	Falta de mantenimiento preventivo al circuito eléctrico	SAP PM	No existían registros recientes de pruebas de continuidad, torqueo ni inspección de cajas de paso.

Fuente: Elaboración propia, Datos recopilados a partir de inspecciones en terreno, historial del sistema SCADA y registros de mantenimiento en SAP PM.

La evidencia recopilada en la Tabla 2-1, es consistente y converge en un mismo punto: la pérdida de señal no se origina en el radar/instrumento, sino en el circuito eléctrico de transmisión y alimentación, asociado al cableado y sus conexiones. En SCADA, se observa una desaparición abrupta de la lectura (“Loss of Signal”), cuyo patrón, es compatible con una interrupción eléctrica, y además se registran lecturas erráticas, previas que suelen asociarse a falsos contactos o daño progresivo del conductor. Esto se refuerza con la prueba de continuidad, donde la señal varía al mover el cable, confirmando una rotura interna intermitente (microfracturas), que finalmente deriva en la pérdida total, coherente con el reporte operacional de “pérdida súbita de señal”, por fractura completa del conductor. En términos de mecanismo de falla, la secuencia probable, inicia con un diseño vulnerable: cable sin canalización, ni protección, expuesto a golpes y rebote de mineral, sumado a una especificación insuficiente para ambiente minero. Luego, ocurre un daño mecánico progresivo por abrasión con estructuras/mallas y aplastamiento por atollos e impactos, generando deformación y daño interno. Paralelamente, se deterioran las conexiones por ingreso de polvo y humedad debido a prensaestopas sin torque/sello y por sulfatación en cajas de paso, aumentando la inestabilidad eléctrica. En consecuencia, la causa física dominante, corresponde al daño acumulativo del cable (abrasión y aplastamiento) y al deterioro de conexiones por contaminantes, culminando en la fractura del conductor y la pérdida completa de señal. la solución propuesta no se limita al reemplazo del sensor, sino que exige el rediseño de la ingeniería de canalización, la segregación de rutas y la implementación de redundancia, para asegurar la disponibilidad de la variable crítica.

2.4.2 Condiciones operacionales al momento del evento

- Operación del pique al 83% de capacidad.
- Granulometría gruesa por ciclo de tronadura.
- Descarga intermitente transportada desde zona de hundimiento.
- Polvo en suspensión elevado.
- Vibración anormal en chute por sobrealimentación previa.

2.5 Análisis de datos

2.5.1. Línea de tiempo del evento (Tabla 2)

Tabla 2-2 – Línea de tiempo evento

Hora	Evento
1:48	Operación normal del pique (sin anomalías en señal).
2:03	SCADA muestra oscilaciones fuera de tendencia en la lectura del nivel del pique.
2:07	Operador reporta lecturas “no confiables”, asociadas a pérdida intermitente de continuidad del conductor.
2:13	Evento “Loss of Echo” – Radar pierde señal completamente.
2:21	Activación tardía del sensor tilt, señal de riesgo por material acumulado.
2:25	Se detiene apron 2° velocidad baja polea cabeza debido a segmento de anillo caído en traspaso 2° a sacrificio.(atollo)
4:35	Equipos vuelven a operación,señales de instrumentación perdidas.
Se da continuidad operacional con señales forzadas,mediando de manera manual el pique cada Estas señales se podran recuperar en una detencion programada de la línea de producción	

Fuente: Elaboración propia, datos recopilados a partir del registro del sistema SCADA y los reportes de operación.

De acuerdo con la Tabla 2-2, la secuencia temporal del evento muestra una degradación progresiva de la medición, antes de la falla total. A las 1:48 el sistema opera con normalidad, sin anomalías en la señal; sin embargo, a las 2:03 SCADA, comienza a evidenciar oscilaciones fuera de tendencia en la lectura de nivel del pique, lo que constituye una señal temprana de inestabilidad. Minutos después, a las 2:07, el operador reporta lecturas “no confiables”, asociándolas a una pérdida intermitente de continuidad del conductor, lo que refuerza la hipótesis de una falla incipiente en el circuito eléctrico de transmisión/alimentación. Posteriormente, a las 2:13 ocurre el evento crítico “Loss of Echo”, donde el radar pierde completamente la señal, dejando al proceso sin una variable confiable para el control del nivel del pique. En consecuencia, a las 2:21 se registra una activación tardía del sensor tilt, lo que evidencia una condición de riesgo por material acumulado, actuando como barrera en una etapa avanzada del problema. Finalmente, a las 2:25 se detiene el apron (según la velocidad baja en polea cabeza) debido a un atollo asociado a un segmento/anillo caído en el traspaso, materializando la consecuencia operacional de operar sin medición confiable.

Aunque a las 4:35 los equipos retornan a operación, las señales de instrumentación permanecen perdidas, por lo que se mantiene la continuidad operacional mediante señales forzadas y medición manual periódica del pique, quedando la recuperación definitiva del sistema condicionada a una detención programada de la línea.

2.5.2. Clasificación de factores

Se clasificaron factores en:

- Técnicos

- Humanos
- Operacionales
- Ambientales
- Gestión

2.5.3. Factores identificados.

Tabla 2-3 – Factores identificados

Categoría	Factor observado	Impacto
Técnico	Conductores sin robustez adecuada (aislación delgada, sin blindaje)	Alto
Técnico	Ausencia de canalización protectora (cable expuesto a golpes, polvo y mineral)	Alto
Técnico	Abrasión del cable por roce con mallas metálicas del pique	Alto
Técnico	Aplastamiento o microfracturas en el conductor por atollos y rebote de mineral	Alto
Técnico	Bornes flojos / torque insuficiente (falsos contactos)	Medio-Alto
Técnico	Prensaestopas sin torque ni sello (entrada de material fino y polvo)	Medio-Alto
Operacional	Caída recurrente de segmentos de anillo (L2) que generan impactos en zona eléctrica	Alto
Operacional	Inestabilidad del flujo en traspaso 2° hacia sacrificio	Medio
Ambiental	Mallas metálicas que generan atollos en la taza y desprenden los cables de señal	Alto
Humano	Operador novato no reconoce síntomas eléctricos tempranos	Medio
Humano	Dependencia excesiva del SCADA sin verificación en terreno	Medio
De Gestión	Ausencia de redundancia en medición y en circuito eléctrico	Alto
De Gestión	Falta de mantenimiento preventivo del circuito eléctrico	Alto

Fuente: Elaboración propia, factores de falla identificados y categorizados a partir del análisis de causa raíz y las inspecciones en terreno.

La tabla evidencia que el riesgo asociado a la pérdida de señal y a sus consecuencias operacionales se concentran principalmente en factores de carácter técnico y de gestión, ya que la mayoría presenta un impacto alto.

En el ámbito técnico, destacan la baja robustez del cableado (aislación delgada y sin blindaje), la ausencia de canalización protectora y la exposición del cable a condiciones severas del proceso, lo que favorece la abrasión por roce con mallas metálicas y el aplastamiento o generación de microfracturas debido a atollos y rebote de mineral. A esto

se suman factores de instalación con impacto medio-alto, como bornes flojos por torque insuficiente y prensaestopas sin sello, los cuales facilitan el ingreso de polvo/material fino y aumentan la ocurrencia de falsos contactos, acelerando la degradación del circuito. En paralelo, la categoría de gestión refuerza la criticidad del problema, ya que la ausencia de redundancia en la medición y en el circuito eléctrico, junto con la falta de mantenimiento preventivo, transforman una falla técnica en un evento de alto impacto al no existir barreras efectivas de contención.

Finalmente, los factores operacionales y ambientales (caída recurrente de segmentos/anillos e interacción con mallas metálicas) actúan como agentes de daño físico directo sobre la zona eléctrica, mientras que los factores humanos, aunque de impacto medio, influyen en la detección temprana y en la respuesta ante síntomas eléctricos iniciales. En conjunto, el análisis confirma que la causa predominante se relaciona con la vulnerabilidad del sistema de señal frente a agresiones mecánicas/ambientales y con brechas en las barreras de gestión (redundancia y PM), lo que incrementa la probabilidad de pérdida total de medición y detenciones asociadas.

2.6 Determinación de la causa raíz

Para la determinación de la causa raíz del evento analizado, se utilizó la metodología Bow-Tie, herramienta actualmente empleada por la división en sus análisis de riesgo y de causa raíz debido a su capacidad de integrar, en una sola representación, las amenazas (causas), el evento central, las consecuencias y las barreras de control asociadas. A diferencia de otros métodos más lineales (por ejemplo, solo 5 Porqués o un FMEA aislado), el Bow-Tie permite visualizar el problema de forma sistémica, incorporando simultáneamente aspectos técnicos, operacionales, ambientales y humanos, lo que resulta especialmente adecuado para sistemas complejos como el pique de chancado y su instrumentación asociada. (Validado por el equipo multidisciplinario).

2.6.1 Caso de estudio ACR mediante metodología Bow-Tie

Pérdida total de la señal del sensor de nivel del pique, producto de daño o pérdida de continuidad en los conductores de alimentación y señal.

A la izquierda del Bow-Tie se desarrollaron las amenazas que pueden conducir a dicho evento. A partir de las evidencias levantadas en terreno, los registros SCADA y las inspecciones eléctricas, se identificaron como amenazas principales:

- Conductores sin robustez adecuada (aislación delgada, sin blindaje minero).
- Ausencia de canalización protectora, dejando el cable expuesto a golpes, polvo y mineral.
- Roce y abrasión del cable contra mallas metálicas del pique.
- Aplastamiento y daño interno de los conductores debido a atollos en la taza y rebote de rocas en la zona donde pasa el cable.
- Prensaestopas sin torque ni sello, que permiten movimiento del cable y entrada de material fino.
- Bornes flojos y falsos contactos en cajas de paso.
- Condiciones operacionales inestables (caída de segmentos de anillo en L2) que aumentan los impactos mecánicos sobre la canalización.

Estas amenazas se conectan en el Bow-Tie con el evento central, mostrando que la falla no se origina únicamente en el sensor, sino principalmente en la vulnerabilidad del circuito eléctrico que lo alimenta y comunica su señal.

A la derecha del Bow-Tie se representaron las consecuencias derivadas de la pérdida total de señal: operación “a ciegas” del pique, aumento del riesgo de atollo y rebalse, necesidad de intervenir en la zona de la taza bajo condiciones peligrosas, posibilidad de daño estructural en blindajes y chutes, detenciones no programadas del sistema y, en el peor escenario, exposición de personal a condiciones de alto riesgo.

El Bow-Tie permitió además evaluar las barreras preventivas y mitigadoras existentes y evidenciar sus brechas. Entre las barreras preventivas se consideraron el uso de cable minero reforzado, canalización adecuada (tuberías o bandejas cerradas), sujeción mecánica certificada, prensaestopas correctamente sellados, pruebas periódicas de continuidad y redundancia en el circuito (circuito A+B). En la práctica, varias de estas barreras estaban ausentes o implementadas de forma parcial, lo que explica que un único daño mecánico en el conductor haya sido capaz de dejar fuera de servicio todo el sistema de medición. Como barreras mitigadoras se identificaron el sensor tilt, las alarmas de pérdida de señal en SCADA, la parada automática y los procedimientos de intervención segura; sin embargo, su activación ocurre cuando el problema ya se ha materializado y el sistema ha perdido la capacidad de prevenir el riesgo.

A partir de la construcción y análisis del Bow-Tie, y en coherencia con las evidencias levantadas, se concluyó que la causa raíz del evento es:

La falta de robustez y protección del circuito eléctrico de los sensores de nivel (conductores de alimentación y señal), lo que permite que las mallas metálicas, los atollos en la taza y el rebote del mineral dañen mecánicamente los cables, provocando la pérdida de continuidad y, en consecuencia, la pérdida total de señal.

La elección de la metodología Bow-Tie se justifica no solo por su uso actual en la división para la gestión de riesgos críticos, sino porque en este caso permitió:

- Integrar en un mismo modelo las condiciones de diseño del cableado, las condiciones operacionales reales (mallas, anillos, atollos), los factores humanos y las prácticas de mantenimiento.
- Visualizar claramente que el problema no es un “fallo puntual del radar”, sino una vulnerabilidad estructural del sistema de medición, centrada en el diseño y la protección de los conductores.
- Priorizar acciones de mejora orientadas a robustecer y redundar el sistema (uso de cables mineros reforzados, canalización adecuada, circuitos redundantes, inspecciones periódicas específicas), más allá de una simple reposición de sensor.



Fuente: Plantilla DCH
Figura 2-1. BOWTIE

2.7. Acciones correctivas

Tabla 2-4 Acciones correctivas BOW TIE

Tipo	Elemento del BowTie	Acción	Resultado
Amenaza	Cable sin canalización protectora, expuesto a golpes y polvo	Encapsular y proteger el tendido expuesto (guardas, sujeciones, alivio de tensión en tramos críticos)	Reducir probabilidad de daño mecánico/contaminación del cable
Amenaza	Abrasión del cable por roce con mallas metálicas del pique	Eliminar puntos de roce con mallas (separadores/guías y protección antiabrasión)	Disminuir desgaste de aislación y fallas por falso contacto
Amenaza	Ausencia de redundancia en el circuito de medición (canal único)	Incorporar redundancia del circuito de medición (doble canal/ruta alternativa/backup de señal según factibilidad)	Evitar “falla simple = pérdida total de medición”
Mitigador	Parada automática del sistema por pérdida de señal	Configurar lógica de respuesta ante pérdida de señal (alarma + modo seguro/condición controlada)	Reducir la exposición a operación “a ciegas” y prevenir escalamiento a atollo
Mitigador	Procedimiento de intervención segura en pique	Estandarizar procedimiento de intervención segura (roles, permisos, verificación de condiciones, LOTO, checklist)	Disminuir riesgo a personas durante intervención en taza/pique
Preventivo	Canalización adecuada	Implementar canalización adecuada (conduit/tubería/bandeja cerrada según estándar del área)	Aumentar robustez del circuito y evitar exposición directa
Preventivo	Ruta de cable alejada de mallas y zonas de impacto	Rediseñar ruta del cable (reubicación/altura segura/alejamiento de impacto)	Quitar el cable de la zona de agresión del proceso

Fuente: Elaboración propia de acciones correctivas y barreras (preventivas y mitigadoras) definidas a partir del análisis Bow Tie aplicado al evento.

Las acciones se definieron a partir del BowTie mediante trazabilidad directa: cada acción se asocia explícitamente a una amenaza (T) o a un control preventivo/mitigador (P/M) existente o faltante en el diagrama. De esta forma, las medidas propuestas no son una lista independiente, sino que corresponden al cierre de brechas detectadas en amenazas sin control suficiente, controles preventivos debilitados y controles mitigadores requeridos para limitar consecuencias.”

Las Acciones Correctivas que muestra la Tabla 2-5 son medidas específicas que se ejecutan para eliminar la falla ocurrida y corregir las condiciones que permitieron que el evento sucediera, sin embargo, las anteriores acciones mencionadas en el BOW TIE son las que obtienen la prioridad al momento de la planificación.

Tabla 2-5 Acciones correctivas totales

Nº	Acción Correctiva	Responsable	Plazo	Estado
1	Sustituir el cable existente por cable minero reforzado (blindado + aislación gruesa apta para impacto).	Eléctrico – Ingeniería	7 días	Pendiente
2	Instalar canalización protectora (tubería metálica o HDPE cerrado) en toda la ruta del cableado del sensor.	Mantenimiento mecánico + Eléctrico	10 días	Pendiente
3	Reubicar la ruta del cableado para evitar roce con mallas metálicas y zonas de impacto del mineral.	Ingeniería – Proyecto	14 días	Pendiente
4	Instalar circuito redundante A+B para asegurar lectura continua del sensor ante falla simple.	Ingeniería Eléctrica	30 días	Pendiente
5	Retirar y reemplazar mallas metálicas sueltas o deformadas que generan atollos en la taza.	Mantenimiento Mecánico	5 días	Pendiente
6	Ejecutar torqueo y sellado de todos los prensaestopas del sistema para eliminar ingreso de polvo/humedad.	Eléctrico Turno	48 horas	Pendiente
7	Reemplazar todos los bornes flojos o sulfatados en cajas de paso y asegurar torque adecuado.	Eléctrico Turno	72 horas	Pendiente
8	Implementar inspecciones de continuidad y mediciones	Eléctrico	POR OPORT.	Pendiente
9	Crear procedimiento estándar de “Inspección del circuito eléctrico de sensores críticos”.	Seguridad e Ingeniería de Confiabilidad	15 días	Pendiente
10	Capacitar a operadores en detección temprana de fallas de señal y lectura SCADA no confiable.	Operaciones	20 días	Pendiente
11	Integrar alarmas SCADA para advertir variaciones eléctricas anormales, antes de Loss of Signal.	Automatización	25 días	Pendiente
12	Asegurar inspección post-atollo para verificación de canalizaciones afectadas.	Turno Mec. + Eléctrico	Inmediatamente tras evento	Pendiente

Fuente: Elaboración propia de plan de acción consolidado y asignación de responsabilidades a partir de los hallazgos del análisis de causa raíz.

2.8. Acciones de mejora continua

Las Acciones de Mejora Continua consisten en un conjunto de iniciativas de acciones preventivas orientadas a incrementar la confiabilidad, seguridad y desempeño del sistema a lo largo del tiempo, no solo corrigiendo la falla puntual, sino atacando las condiciones sistémicas que permitieron que el evento ocurriera.

Tabla 2-5 Mejora continua

N°	Acción de Mejora Continua	Justificación Técnica	Responsable	Frecuencia / Plazo
1	Implementar circuito redundante A+B en sensores de nivel del pique	Evita pérdida total de señal ante falla simple del conductor	Ingeniería Eléctrica	Proyecto anual
2	Estandarizar uso de cable minero reforzado para todas las líneas críticas	Mayor resistencia a abrasión, impacto y humedad	Ingeniería – Confiabilidad	Permanente
3	Crear plan de inspección mensual de continuidad y aislación	Detecta daño interno antes de que ocurra pérdida de señal	Eléctrico	Mensual
4	Implementar canalización cerrada (HDPE/metal) para todos los sensores críticos	Protege cableado contra mallas metálicas, atollos y golpes de mineral	Mantenimiento Mecánico + Eléctrico	Proyecto trimestral
5	Revisión por turno de mallas metálicas en zonas de pique	Evita desprendimientos que puedan cortar cables	Operaciones	Al turno
6	Capacitación anual en diagnóstico de fallas de señal SCADA	Mejora detección temprana por parte de operadores	Operaciones	Anual
7	Integración de alarmas SCADA para variación eléctrica temprana	Permite reaccionar antes del evento “Loss of Signal”	Automatización	60 días
8	Inspección post-evento (post atollo o caída de anillo) a la canalización	Permite detectar daño inmediato tras impactos fuertes	Turno Eléctrico	Inmediato tras cada evento
9	Auditorías semestrales del cumplimiento de torque en bornes y prensaestopas	Minimiza falsos contactos y sulfatación	SSPA + Eléctrico	Semestral
10	Incorporar checklist eléctrico en los rondas operacionales del turno	Identificación temprana de anomalías	Operaciones	Diario

Fuente: Elaboración propia, plan de acciones de mejora continúa propuestas para garantizar la confiabilidad del sistema y prevenir la recurrencia de fallas a largo plazo.

2.9 Verificación de efectividad

La Verificación de Efectividad consiste en evaluar, mediante pruebas técnicas, análisis de tendencias y auditorías periódicas, si las acciones correctivas y de mejora continua implementadas lograron eliminar la causa raíz y evitar la recurrencia del evento. Esta verificación se basa en indicadores medibles del sistema (continuidad del conductor, ausencia de alarmas SCADA, inspecciones post-atollo), y busca asegurar que el riesgo asociado a la pérdida de señal del sensor de nivel del pique se encuentre controlado de manera sostenible.

Tabla 2-6 Verificación de efectividad

N°	Criterio de Verificación	Método de Evaluación	Indicador de Éxito	Responsable	Plazo / Seguimiento
1	Verificar continuidad estable en cableado reemplazado	Pruebas de continuidad	0 fallas / 0 intermitencias	Eléctrico	Semanal
2	Validar integridad física de la nueva canalización	Inspección visual en terreno + checklists	Sin abrasión / sin exposición del cable	Eléctrico + Mecánico	Mensual
3	Confirmar eliminación de daños por mallas o anillos	Revisión taza + rondas	0 contactos con mallas / 0 golpes visibles	Mecánico	Tras eventos y mensual
4	Validación de redundancia A+B	Prueba de desconexión controlada	SCADA mantiene señal sin interrupción	Ingeniería Eléctrica	1 vez / trimestre
5	Evaluar reducción de alarmas SCADA	Análisis de tendencias históricas	Reducción ≥ 90% de alarmas “Loss of Signal”	Automatización	Mensual
6	Verificar torque correcto en bornes/prensaestopas	insp torque/reaapriete	100% dentro de especificación	Eléctrico + SSPA	Trimestral
7	Evaluar respuesta del tilt como mitigador	Simulación de acumulación controlada	Activación dentro del tiempo estándar	Operaciones	Semestral
8	Confirmar disminución de intervenciones no programadas	Registro SAP PM	Reducción ≥ 80% en fallas asociadas a señal	Confiabilidad	Trimestral
9	Verificar competencias del personal	Evaluación post-capacitación	100% del personal calificado	Operaciones + SSPA	Anual
10	Auditoría total del plan de acciones	Revisión documental y en terreno	Cumplimiento ≥ 90% de acciones cerradas	Confiabilidad	Semestral

Fuente: Elaboración propia de criterios y métodos de evaluación definidos para medir el cumplimiento y la efectividad de las acciones correctivas y de mejora continua implementadas.

2.10. Comunicación

La comunicación dentro de un análisis RCA es el proceso mediante el cual se informa de manera clara, documentada y oportuna el evento analizado, la causa raíz identificada, las acciones correctivas, las mejoras continuas y los riesgos asociados a todas las áreas involucradas en la operación.

Clara: Se debe utilizar un lenguaje técnico, directo y comprensible para todas las áreas:

- Operadores
- Supervisores
- Electricistas
- Mecánicos
- Confiabilidad
- SSO

Documentada: Toda la información debe estar respaldada con evidencia.

- Fotografías de terreno
- Tendencias SCADA
- Línea de tiempo
- Pruebas de continuidad
- Registros SAP PM
- Diagrama Bow-Tie
- Factores contribuyentes
- Listado de acciones

Esto asegura trazabilidad y transparencia del análisis.

Oportuna: La comunicación debe realizarse en tiempo adecuado, preferentemente dentro de las primeras 24 horas del evento o del cierre del RCA.

Permite:

- Coordinar respuestas
- Implementar acciones urgentes
- Reducir riesgo residual
- Evitar que otros equipos repitan el error

Entrega de la comunicación: A quien fue comunicado el RCA

- Operadores (sala y terreno)
- Jefatura eléctrica
- Mantenimiento mecánico
- SSO (Seguridad y Salud Ocupacional)
- Ingeniería de Confiabilidad

Cada área recibe un nivel de detalle distinto, pero todos deben comprender la causa raíz y las acciones esperadas.

Lecciones Aprendidas: La comunicación incluye una sección clave. Lecciones Aprendidas, que permiten transformar el evento en conocimiento para la organización.

En este caso se generaron lecciones como: Importancia del torque del soporte y prensaestopas para evitar falsos contactos y desplazamientos.

Riesgos de humedad acumulada en cajas de paso ya que provoca sulfatación y pérdida de continuidad.

El valor de la redundancia en sistemas críticos para evitar caída total del sistema ante una falla simple.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA.

3. Propósito del capítulo

En el Capítulo 2 se identificaron las causas principales asociadas a la pérdida de continuidad en los conductores eléctricos del sistema de medición, así como los controles preventivos y mitigadores definidos mediante la metodología Bow-Tie. A partir de dichas brechas, se plantea una propuesta de mejora orientada principalmente a fortalecer la canalización del cableado y a incorporar criterios de redundancia en el circuito de medición, con el objetivo de aumentar la confiabilidad del monitoreo y disminuir la probabilidad de operación “a ciegas” del pique y detenciones no programadas.

Para materializar estas mejoras en un escenario realista, el presente capítulo considera un proceso de cotización/licitación técnica y económica con tres empresas contratistas: Holdas, Salfa Montajes y Ferrostaal. Cada empresa desarrolla una propuesta integral para la ejecución de la mejora, incluyendo el detalle de insumos y materiales, instrumentación requerida, dotación de personal, tiempos de ejecución, horas-hombre (HH), y todos los costos asociados a la intervención, tales como supervisión, prevención de riesgos y recursos complementarios necesarios para operar bajo estándares de seguridad y continuidad operacional.

Con la información entregada por las empresas, se realiza una comparativa técnica y económica de las alternativas propuestas, evaluando su cumplimiento con los requisitos definidos en el Capítulo 2 (robustez, protección, mantenibilidad y redundancia), junto con sus costos y plazos de implementación. Posteriormente, se selecciona la alternativa más conveniente mediante criterios de decisión previamente establecidos. Finalmente, la propuesta seleccionada se somete a una evaluación costo–beneficio, comparando el costo total de la mejora (CAPEX y costos asociados) con las pérdidas de producción atribuibles a la operación sin un sistema de medición confiable y redundante, cuantificadas a partir del historial anual de eventos y su impacto económico, con el fin de justificar la conveniencia y viabilidad de la implementación.

3.1. Alcance de la licitación

3.1.1. Qué incluye la intervención.

El alcance de la licitación comprende la ejecución integral de las mejoras definidas en el Capítulo 2 para asegurar un sistema de medición más robusto y confiable. En particular, incluye el suministro e instalación de la canalización del tendido eléctrico y/o de

señal, considerando el rediseño de la ruta para alejar el cableado de zonas de impacto, la provisión de elementos de protección mecánica (**conduit/tubería/bandejas cerradas según corresponda**), soporte y fijaciones, alivio de tensión, además de la incorporación y/o adecuación de cajas de paso, prensaestopas y sellos con estándar adecuado para condiciones severas (polvo, humedad y vibraciones). Asimismo, incluye la implementación de redundancia del circuito de medición, ya sea mediante una segunda ruta de cableado, un canal alternativo de señal o un esquema de respaldo (backup) que evite la pérdida total de medición ante una falla simple, incorporando la instrumentación y materiales necesarios para su correcta operación. Finalmente, el alcance considera las pruebas funcionales y verificaciones de continuidad e integridad del circuito, la validación de señal hacia el sistema de monitoreo/SCADA, y la puesta en servicio del sistema intervenido, dejando registros técnicos de instalación, pruebas y parámetros relevantes para operación y mantenimiento.

Quedan excluidas del alcance aquellas actividades que excedan la mejora del tendido y redundancia definida, tales como modificaciones mayores a la infraestructura civil o estructural del área, cambios de gran escala en el sistema de control (por ejemplo, rediseños de arquitectura de control o migraciones completas), ampliaciones que impliquen obras ajenas al punto intervenido, y adquisiciones o reemplazos de equipos principales del proceso que no estén directamente asociados a la solución propuesta. Asimismo, cualquier parada adicional no considerada, interferencias operacionales fuera de lo planificado o requerimientos extraordinarios no especificados en las bases técnicas deberán ser gestionados como trabajos adicionales según los procedimientos de la operación.

3.2. Requisitos técnicos mínimos (derivados del BowTie)

Los requisitos técnicos mínimos de la solución se definen directamente a partir del análisis Bow-Tie desarrollado, de modo que cada especificación responda a las amenazas identificadas y fortalezca los controles preventivos y mitigadores del evento superior (pérdida de señal).

En primer lugar, se establece como requisito el rediseño y ejecución de una ruta de cableado alejada de mallas metálicas, puntos de roce y zonas de impacto o rebote de mineral, asegurando separación física suficiente y evitando tramos expuestos que puedan sufrir abrasión o aplastamiento.

En segundo lugar, se define el requisito de incorporar una canalización adecuada y continua para todo el tendido de señal y/o alimentación, mediante soluciones de protección mecánica compatibles con el área (por ejemplo, conduit/tubería/bandeja

cerrada), incluyendo suportación, fijación y alivio de tensión, de manera que el cable no quede colgante, sometido a vibración o movimiento que genere microfracturas y falsos contactos. Adicionalmente, el Bow-Tie evidenció la criticidad de la amenaza sin sistema redundante, por lo que se exige la incorporación de redundancia en el circuito de medición, evitando la condición de falla simple; esto implica implementar un segundo canal/ruta alternativa o un esquema de respaldo que permita mantener la disponibilidad de la variable crítica ante la pérdida de una línea.

Finalmente, como control mitigador, se requiere implementar o ajustar la lógica de respuesta ante degradación o pérdida de señal, incorporando alarmas por calidad de medición (inestabilidad, oscilaciones fuera de tendencia, pérdida de eco) y un modo seguro que limite la exposición operacional cuando no exista medición confiable, según los estándares de operación y control.

Complementariamente, se consideran requisitos de calidad y montaje para asegurar desempeño en ambiente severo: uso de cable apto para minería (cubierta resistente a abrasión y condiciones ambientales, y blindaje/armadura si corresponde), empleo de cajas de paso y conectividad con grado de protección adecuado (IP), prensaestopas correctamente dimensionados y sellados, torqueo de bornes bajo procedimiento, continuidad y pruebas de aislamiento post-instalación, y entrega de registros técnicos (planos actualizados “checklist de instalación, protocolos de pruebas y parámetros de configuración). Con lo anterior, las propuestas de los contratistas deben demostrar cumplimiento explícito de estos requisitos, garantizando que las mejoras no solo resuelvan el evento observado, sino que incorporen barreras robustas y mantenibles alineadas a las amenazas y controles definidos en el Bow-Tie.

3.3. Descripción de propuestas recibidas

En este apartado se presentan y sistematizan las propuestas técnico–económicas recibidas en el proceso de cotización, correspondientes a las empresas Holdas, Salfa Montajes y Ferrostaal, quienes desarrollan soluciones para la mejora de la canalización del tendido y la incorporación de redundancia del sistema, conforme a los requisitos mínimos definidos en la sección 3.2. Para cada empresa, la propuesta se describe bajo una estructura homogénea que permite su comparación directa, considerando:

- Listado de materiales e instrumentación incluidos (canalizaciones, soportes, cajas, prensaestopas, cableado, componentes de respaldo y elementos de conexión),

- Dotación de personal y perfiles requeridos para la ejecución (por ejemplo, supervisor de terreno, personal eléctrico, instrumentistas y prevencionista).
- Total, de horas-hombre (HH) estimadas y su distribución por especialidad,
- Plazo de ejecución y secuencia de actividades.
- Desglose de costos asociados, separando mano de obra, supervisión, prevención de riesgos, materiales, equipos/herramientas, costos indirectos y cualquier ítem adicional relevante para la intervención en una instalación operativa.

3.3.1 Evaluación basado en criterios de evaluación de Likert

La evaluación de proveedores se estructuró mediante una matriz multicriterio compuesta por tres grupos de análisis: aspectos técnicos, aspectos comerciales y económicos y aspectos empresariales, con el fin de ponderar de manera equilibrada el desempeño esperado de cada oferente.

En primer lugar, los aspectos técnicos concentran el 50% de la ponderación total, debido a su relación directa con la calidad y confiabilidad del servicio/solución requerida. Este grupo considera los criterios: calidad del producto/servicio (22%), capacidad técnica del proveedor (7%), calidad certificada (ISO o similar) (6%), capacidad de adaptación (5%) y plazos de entrega (10%).

En segundo lugar, los aspectos comerciales y económicos representan el 30% del total, incorporando variables asociadas a costos y condiciones de contratación, a través de los criterios: precios (22%), formas y plazos de pago (3%), servicio postventa (3%) y garantías (2%).

Finalmente, los aspectos empresariales corresponden al 20% de la ponderación y buscan evaluar el respaldo y comportamiento organizacional del proveedor, considerando: estabilidad del proveedor (5%), proximidad (4%), facilidad de entendimiento (3%), reconocimiento/experiencia (3%) y referencias de terceros (5%). La suma total de las ponderaciones es 100%, permitiendo obtener un puntaje ponderado por proveedor y establecer un ranking comparativo.

Los criterios de evaluación se definen de acuerdo con el diagnóstico del Capítulo 2 y los controles del Bow-Tie, asignando ponderaciones que reflejan su importancia relativa: cumplimiento de requisitos Bow-Tie.

3.3.2 Pautas de valoración (criterios y escala)

La valorización de proveedores se realizó mediante una pauta de calificación en escala 1 a 5 basado en criterios de evaluación de Likert, donde 1 representa el desempeño más desfavorable y 5 el más favorable. La interpretación de la escala se definió por criterio, con el fin de estandarizar la evaluación y asegurar comparabilidad entre oferentes.

3.3.2.1 Aspectos Técnicos (50%)

Este grupo evalúa la capacidad del proveedor para entregar una solución técnicamente adecuada, robusta y acorde a los requerimientos del proyecto.

3.3.2.1.1 Calidad del producto/servicio

Criterio: nivel de calidad global, desempeño esperado, consistencia del servicio y adecuación técnica.

Pauta 1–5:

1 Muy baja – 2 Baja – 3 Media – 4 Alta – 5 Muy alta.

3.3.2.1.2 Capacidad técnica del proveedor

Criterio: competencia técnica del equipo, dominio del trabajo requerido, respaldo profesional y capacidad de ejecución.

Pauta 1–5:

1 Muy baja – 2 Baja – 3 Media – 4 Alta – 5 Muy alta.

3.3.2.1.3 Calidad certificada (ISO o similar)

Criterio: existencia de certificaciones o estándares formales de calidad/gestión aplicables (ISO u otros equivalentes).

Pauta 1–5:

1 Muy baja – 2 Baja – 3 Media – 4 Alta – 5 Muy alta.

(En caso de no presentar respaldo/certificación, puede asignarse calificación mínima según la metodología definida.)

3.3.2.1.4 Capacidad de adaptación

Criterio: flexibilidad para ajustarse a cambios operacionales, restricciones del área, coordinación con operación y contingencias.

Pauta 1–5:

1 Muy baja – 2 Baja – 3 Media – 4 Alta – 5 Muy alta.

3.3.2.1.5 Plazos de entrega

Criterio: cumplimiento y conveniencia del plazo propuesto para ejecución/entrega, considerando continuidad operacional.

Pauta 1–5:

1 Muy altos – 2 Altos – 3 Medios – 4 Bajos – 5 Muy bajos.

3.3.2.2 Aspectos Comerciales y Económicos (30%)

Este grupo evalúa condiciones económicas y comerciales que afectan la conveniencia contractual y el soporte posterior.

3.3.2.2.1 Precios

Criterio: competitividad del precio total ofertado respecto al mercado y a lo requerido.

Pauta 1–5:

1 Muy altos – 2 Altos – 3 Medios – 4 Bajos – 5 Muy bajos.

3.3.2.2.2 Formas y plazos de pago

Criterio: condiciones de pago ofrecidas (flexibilidad, plazos, facilidad administrativa).

Pauta 1–5:

1 Muy malas – 2 Malas – 3 Medias – 4 Buenas – 5 Muy buenas.

3.3.2.2.3 Servicio postventa

Criterio: soporte posterior a la ejecución (garantía operativa, asistencia, respuesta a fallas, acompañamiento).

Pauta 1–5:

1 Muy malo – 2 Malo – 3 Medio – 4 Bueno – 5 Muy bueno.

3.3.2.2.4 Garantías

Criterio: calidad y alcance de garantías ofrecidas para materiales, instalación y desempeño.

Pauta 1–5:

1 Muy mala – 2 Mala – 3 Media – 4 Buena – 5 Muy buena.

3.3.2.3 Aspectos Empresariales (20%)

Este grupo evalúa el respaldo organizacional del proveedor y su confiabilidad como empresa para ejecutar y sostener el servicio.

3.3.2.3.1 Estabilidad del proveedor

Criterio: solidez y estabilidad de la empresa (continuidad, respaldo, cumplimiento histórico).

Pauta 1–5:

1 Muy baja – 2 Baja – 3 Media – 4 Alta – 5 Muy alta.

3.3.2.3.2 Proximidad

Criterio: cercanía y capacidad de respuesta logística/operacional (presencia local, tiempos de movilización).

Pauta 1–5:

1 Muy baja – 2 Baja – 3 Media – 4 Alta – 5 Muy alta.

3.3.2.3.3 Facilidad de entendimiento

Criterio: claridad comunicacional, facilidad de coordinación, calidad de la propuesta y relación técnica-administrativa.

Pauta 1–5:

1 Muy baja – 2 Baja – 3 Media – 4 Alta – 5 Muy alta.

3.3.2.3.4 Reconocimiento/experiencia

Criterio: experiencia demostrable en trabajos similares, trayectoria y reconocimiento en el rubro.

Pauta 1–5:

1 Muy baja – 2 Baja – 3 Media – 4 Alta – 5 Muy alta.

3.3.2.3.5 Referencias de terceros

Criterio: calidad de referencias/respaldos externos (clientes, recomendaciones, evaluaciones previas).

Pauta 1–5:

1 Ninguna – 2 Malas – 3 Regulares – 4 Buenas – 5 Muy buenas.

3.4. Descripción de propuestas recibidas

En esta sección se presentan y describen las tres propuestas recibidas en el proceso de cotización para implementar las mejoras definidas en el Capítulo 2, orientadas a robustecer la canalización del tendido y a incorporar redundancia del sistema de medición con el fin de disminuir la pérdida de monitoreo y sus consecuencias operacionales. Las empresas participantes son Holdas, Salfa Montajes y Ferrostaal. Estas entregaron ofertas técnico–económicas que consideran distintos niveles de detalle. (ANEXOS)

3.3.1 Propuesta empresa Holdas

Propuesta integral para la implementación de la mejora del sistema de medición, incorporando la canalización protectora del tendido y el esquema de redundancia definido en los requisitos técnicos del proyecto en un plazo de ejecución de 13 días en planificación coordinada en una MGA.

3.3.2 Propuesta empresa Ferrostaal

De acuerdo con el requerimiento solicitado, se presenta cotización referencial para la ejecución integral del servicio, incluyendo suministro de materiales, montaje, conexión, pruebas y puesta en servicio. El plazo de ejecución considerado es de 13 días, coordinado con las ventanas operacionales definidas por la operación.

Principales actividades:

- Proveer equipos y materiales de acuerdo con las especificaciones técnicas del proyecto.
- Ejecutar canalización y protección mecánica del tendido, considerando ruta segregada para redundancia.
- Realizar montaje de instrumentación, comisionamiento, pruebas funcionales, capacitación y entrega documental.

3.3.3 Propuesta empresa Salfa Montajes

En respuesta al requerimiento, Salfa Montajes presenta una propuesta integral para ejecutar la mejora del sistema de medición del pique, con foco en la continuidad operacional, ordenamiento del tendido y reducción de fallas por daño mecánico. La propuesta incorpora canalización protectora, reubicación/ordenamiento de ruta en tramos críticos y un esquema de redundancia de señal básico, junto con pruebas y entrega documental.

3.4. Comparativa técnica (matriz multicriterio)

PROCESO A DESARROLLAR:

- 1- Pondera los criterios a tener en cuenta
- 2- Indica cuáles son los proveedores a comparar
- 3- Valora a tus proveedores
- 4- Resultados

3.5.1 Criterios y ponderaciones

Criterios de evaluación de Likert.

Tabla 3-1 Criterios y ponderaciones

Aspectos Técnicos	
Criterio	Ponderación
Calidad del producto/servicio	22,0%
Capacidad técnica del proveedor	7,0%
Calidad certificada (ISO o similar)	6,0%
Capacidad de adaptación	5,0%
Plazos de entrega	10,0%
Total aspectos técnicos	50,0%

Aspectos comerciales y económicos

Criterio	Ponderación
Precios	22,0%
Formas y plazos de pago	3,0%
Servicio postventa	3,0%
Garantías	2,0%
Total asp. comerc. y econ.	30,0%

Aspectos empresariales

Criterio	Ponderación
Estabilidad del proveedor	5,0%
Proximidad	4,0%
Facilidad de entendimiento	3,0%
Reconocimiento/experiencia	3,0%
Referencias de terceros	5,0%
Total aspectos empresariales	20,0%

Total Ponderaciones: 100,0% PONDERACION COMPLETA

Fuente: Elaboración propia basada en Jamieson (2004)

3.5.2 Valorización de los proveedores

Tabla 3-2 Valorización de los proveedores

Aspectos Técnicos			
Criterio	Holdas	Salfa Montajes	Ferrostaal
Calidad del producto/servicio	4	2	5
Capacidad técnica del proveedor	3	3	3
Calidad certificada (ISO o similar)	3	3	4
Capacidad de adaptación	2	1	2
Plazos de entrega	3	3	3

PAUTAS DE VALORACIÓN					
	1	2	3	4	5
Calidad del producto/servicio	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Capacidad técnica del proveedor	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Calidad certificada (ISO o similar)	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Capacidad de adaptación	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Plazos de entrega	Muy altos	Altos	Medios	Bajos	Muy bajos

Aspectos comerciales y económicos			
Criterio	Holdas	Salfa Montajes	Ferrostaal
Precios	2	2	3
Formas y plazos de pago	5	4	3
Servicio postventa	3	3	2
Garantías	3	3	2

PAUTAS DE VALORACIÓN					
	1	2	3	4	5
Precios	Muy altos	Altos	Medios	Bajos	Muy bajos
Formas y plazos de pago	Muy malas	Malas	Medias	Buenas	Muy buenas
Servicio postventa	Muy malo	Malo	Medio	Bueno	Muy bueno
Garantías	Muy mala	Mala	Media	Buena	Muy buena

Aspectos empresariales			
Criterio	Holdas	Salfa Montajes	Ferrostaal
Estabilidad del proveedor	3	5	3
Proximidad	2	3	3
Facilidad de entendimiento	2	5	2
Reconocimiento/experiencia	2	4	5
Referencias de terceros	4	3	2

PAUTAS DE VALORACIÓN					
	1	2	3	4	5
Estabilidad del proveedor	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Proximidad	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Facilidad de entendimiento	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Reconocimiento/experiencia	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Referencias de terceros	Ninguna	Malas	Regulares	Buenas	Muy buenas

Fuente: Elaboración propia basada en Jamieson (2004)

3.5.3 Resultados de la comparación

Tabla 3-3 Resultados de la comparación

Proveedor	Aspectos técnicos	Aspectos comerciales y econ.	Aspectos empresariales	TOTAL	POSICIÓN
Holdas	1,67	0,74	0,55	2,96	2
Salfa Montajes	1,18	0,71	0,79	2,68	3
Ferrostaal	1,95	0,85	0,58	3,38	1

Fuente: Elaboración propia basada en Jamieson (2004)

Los resultados globales indican que Ferrostaal obtiene el primer lugar con un puntaje total de 3,38, seguida por Holdas con 2,96 y, en tercer lugar, Salfa Montajes con 2,68. El orden final se explica principalmente por el desempeño en aspectos técnicos, dado

que este componente representa el mayor peso de la evaluación total. En esta dimensión, Ferrostaal presenta el mejor resultado (1,95), lo que evidencia mayor consistencia con los requerimientos técnicos mínimos definidos a partir del Bow-Tie, particularmente en criterios asociados a calidad de la solución y confiabilidad del desempeño esperado. Holdas se posiciona en segundo lugar técnico (1,67), mostrando un desempeño adecuado, aunque inferior en el criterio de mayor relevancia dentro del bloque. Por su parte, Salfa Montajes registra el menor puntaje técnico (1,18), asociado a calificaciones más bajas en variables clave como calidad del producto/servicio y capacidad de adaptación, lo que afecta significativamente su evaluación final debido a la ponderación dominante de este bloque.

En el componente comercial y económico, Ferrostaal también obtiene el mejor desempeño (0,85), principalmente influenciado por una mejor evaluación relativa en el criterio precios, el cual posee la ponderación más alta dentro de este bloque. Holdas alcanza 0,74, destacando en condiciones de pago; sin embargo, dicha ventaja no compensa la diferencia en el criterio de mayor peso. Salfa Montajes obtiene 0,71, manteniéndose cercana a Holdas en este apartado, pero sin una ventaja suficiente que revierta la brecha técnica.

Respecto de los aspectos empresariales, se observa que Salfa Montajes lidera con 0,79, reflejando fortalezas asociadas a estabilidad del proveedor, facilidad de coordinación y reconocimiento/experiencia. No obstante, dado que esta dimensión representa el 20% de la ponderación total, su mejor desempeño empresarial no logra compensar la brecha obtenida en la evaluación técnica. En cambio, Ferrostaal y Holdas presentan valores empresariales similares (0,58 y 0,55, respectivamente), manteniendo coherencia con su posicionamiento final.

En síntesis, la matriz multicriterio evidencia que la propuesta de Ferrostaal logra el mejor equilibrio global y, especialmente, el mayor cumplimiento en la dimensión técnica, lo que resulta determinante para la selección en una mejora orientada a robustecer la canalización y asegurar redundancia en el sistema. Por lo anterior, y conforme al criterio de decisión establecido, se recomienda adjudicar la alternativa correspondiente a Ferrostaal, complementando la adjudicación con exigencias contractuales de control de calidad, protocolos de pruebas y criterios de aceptación alineados a los controles del Bow-Tie, con el fin de asegurar trazabilidad técnica, cumplimiento de estándares y confiabilidad operativa del sistema intervenido.

3.6. Evaluación costo–beneficio de la alternativa seleccionada

Para estimar el impacto económico del problema se definió una línea base de 80 eventos anuales, los cuales alrededor de 45 según los libros de fallas de la división serian asociados las fallas de monitoreo. Estos eventos con una duración promedio de 2 horas, lo corresponde a 90 horas de detención al año.

Considerando un costo de \$143.335.794 CLP por hora, el impacto anual asociado alcanza \$12.900.221.460 CLP/año. En base a esta línea, se evaluaron alternativas de mejora derivadas del BowTie, estimando su efectividad como reducción porcentual de horas de detención.

PAYBACK: $\frac{(\text{CAPEX IVA incl.} = \$22.900.000 \text{ CLP})}{\text{Costo por hora de detención} = \$143.335.794} = 9.6\text{min}$

En este contexto, la inversión de Ferrostaal con un CAPEX de \$22.900.000 CLP IVA incluido se recupera con una reducción mínima equivalente a ~0,16 h/año siendo este un PAYBACK aprox. 9,6 minutos/año. Por lo anterior, se recomienda adjudicar la alternativa Ferrostaal y exigir entregables de pruebas, y criterios de aceptación alineados al Bow-Tie.”

3.6.1 Sensibilidad en función de eventos evitados

Tabla 3-4 Impacto por evento/año

Eventos evitados/año	Horas evitadas/año	Ahorro anual (CLP)
1	2 h	\$286.671.588
5	10 h	\$1.433.357.940
10	20 h	\$2.866.715.880

Fuente: Elaboración propia de estimación del ahorro económico calculada a partir del costo promedio por hora de detención del sistema y la proyección de fallas evitadas anualmente.

Considerando que cada evento representa en promedio 2 horas de afectación, la evitación de 1 evento/año equivale a 2 horas evitadas y un ahorro anual estimado de \$286.671.588 CLP. En un escenario de mayor efectividad, evitar 5 eventos/año representa 10 horas evitadas, con un ahorro anual de \$1.433.357.940 CLP, mientras que evitar 10 eventos/año corresponde a 20 horas evitadas y un ahorro anual de \$2.866.715.880 CLP.

Estos resultados confirman que incluso reducciones moderadas en la ocurrencia de eventos generan beneficios económicos relevantes, respaldando la conveniencia de implementar la propuesta seleccionada y reforzando la necesidad de asegurar su correcta ejecución mediante controles de calidad, pruebas y criterios de aceptación alineados al Bow-Tie.

Conclusión

Los resultados confirman que la falla no se explica por un “radar defectuoso”, sino por una condición estructural del sistema de señal, donde el elemento más vulnerable es el circuito eléctrico asociado al cableado y sus conexiones. La evidencia analizada es consistente con un mecanismo de degradación progresiva: exposición del tendido a golpes, vibraciones y rebote de mineral; abrasión por roce con estructuras/mallas; y puntos de conexión con sellado/torque insuficiente que facilitan el ingreso de polvo y humedad. Esta combinación incrementa la probabilidad de falsos contactos, microfracturas del conductor y, finalmente, pérdida total de continuidad, lo que se traduce operacionalmente en pérdida de monitoreo, decisiones tardías y mayor probabilidad de detenciones no programadas. A ello se suma una brecha relevante de diseño y gestión: la ausencia de redundancia (falla simples igual a caída total de la medición) y la insuficiencia de mantenimiento preventivo orientado a controlar el deterioro del circuito (inspección, torqueo, verificación de continuidad, control de cajas de paso).

En consecuencia, la solución propuesta debe enfocarse en controlar las amenazas identificadas en el Bow-Tie y cerrar las brechas de barreras. Esto implica, en primer lugar, robustecer la canalización mediante protección mecánica continua, soportación adecuada y alivio de tensión, eliminando tramos expuestos y minimizando puntos de roce e impacto. En segundo lugar, se requiere segregar la ruta del cableado para alejarla de zonas de agresión del proceso y asegurar accesibilidad para inspección y mantenimiento. En tercer lugar, resulta crítico incorporar redundancia del sistema de medición (segunda ruta/canal o respaldo) de manera que una falla puntual no implique la pérdida completa de la variable de nivel/condición del pique. Finalmente, para asegurar sostenibilidad operacional, se debe estandarizar el control de calidad de montaje y aceptación, incorporando protocolos formales de pruebas (continuidad, aislamiento, verificación funcional de señal), entregables y criterios claros de aceptación/rechazo que garanticen que el sistema intervenido queda operable, mantenible y alineado a los requisitos del diseño.

Con la comparación técnica–económica, se recomienda adjudicar la alternativa Ferrostaal, al presentar el mejor desempeño global (3,38) y mayor consistencia con los requisitos críticos del sistema. Esta selección se sustenta principalmente en el componente técnico (ponderación dominante), ya que la confiabilidad del monitoreo depende de la robustez real de la solución: calidad de canalización, protección del tendido, enfoque de redundancia y capacidad de asegurar pruebas y documentación final. No obstante, para reducir riesgos de implementación, la adjudicación debe complementarse con exigencias contractuales mínimas, tales como: protocolos de prueba y comisionamiento, evidencia de

cumplimiento de la segregación de rutas, especificación de IP y sellos de cajas, registros de torqueo y continuidad, documentación y un plan de soporte inicial post-puesta en marcha.

Finalmente, el análisis costo–beneficio evidencia que incluso reducciones moderadas de eventos asociados a pérdida de monitoreo generan ahorros significativos, debido al alto costo asociado a las detenciones y a la pérdida de control oportuno del proceso. Bajo la línea base utilizada (eventos anuales asociados a pérdida de monitoreo y horas promedio por evento), la implementación de la mejora se justifica con creces, ya que basta evitar una fracción del tiempo de detención anual para recuperar la inversión. Por ello, además de ejecutar la mejora física, se vuelve indispensable asegurar su permanencia mediante gestión de mantenimiento: incorporación de tareas PM específicas (inspección de canalización, control de fijaciones, torqueo programado, revisión de cajas, pruebas periódicas de continuidad/aislación), monitoreo de “calidad de señal” en SCADA como alerta temprana, y capacitación operativa para una respuesta estandarizada ante señales degradadas. En conjunto, estas medidas permiten transformar la solución en una barrera efectiva y sostenible, reduciendo la probabilidad de pérdida de señal, mejorando la continuidad operacional y fortaleciendo la toma de decisiones basada en información confiable del sistema de medición.

Bibliografía

La bibliografía debe ser en APA 7

- Allen, F., Myers, S., & Brealey, R. (2007). *Principio de finanzas corporativas*. McGraw-Hill.
- Arata, A., & Furlanetto, L. (2005). *Manual de gestión de activos y mantenimiento*. RIL.
- Ben-Daya, M., & Duffuaa, S. (2009). *Handbook of maintenance management and engineering*. Springer.
- Ben-Daya, M., Duffuaa, S., Raouf, A., Knezevic, J., & Ait-Kadi, D. (Eds.). (2009). *Handbook of maintenance management and engineering*. Springer.
- Bolton, W. (2015). *Instrumentation and control systems* (2.^a ed.). Elsevier/Newnes.
- Boone, H. N., Jr., & Boone, D. A. (2012). Analyzing Likert data. *Journal of Extension*, 50(2), 1–5.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2018). *Bow ties in risk management: A concept book for process safety*. AIChE.
- Creus Solé, A. (2010). *Instrumentación industrial* (8.^a ed.). Marcombo.
- Emerson. (2002). *Comprendiendo las estrategias de mantenimiento*. PlantWeb University.
- Endress+Hauser. (2024). *Micropilot FMR67B – 80 GHz radar sensor* [Technical Information TI01687F].
- Fedele, L. (2011). *Methodologies and techniques for advanced maintenance*. Springer.
- FieldComm Group. (2015). *HART communication protocol specification (HART 7)*.
- Gano, D. (2007). *Apollo root cause analysis: A new way of thinking*. Apollo Associated Services.

- ISO. (2016). *ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2018). *ISO 31000: Risk management — Guidelines*. International Organization for Standardization.
- ISO/IEC. (2013). *IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. International Electrotechnical Commission.
- ISA. (2009). *ANSI/ISA-5.1: Instrumentation symbols and identification*. International Society of Automation.
- Jamieson, S. (2004). Likert scales: How to (ab)use them. *Medical Education*, 38(12), 1217–1218.
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 22(140), 1–55.
- Magtrol. (s. f.). *DI Series displacement transducers* [Manual/Ficha técnica].
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2.^a ed.). Butterworth-Heinemann.
- Moubray, J. M. (1991). *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. Aladon.
- Palomo Vadillo, M. T. (2013). *Liderazgo y motivación de equipos de trabajo*. ESIC.
- Rooney, J. J., & Vanden Heuvel, L. N. (2004). *Root cause analysis for beginners*. Quality Resources.
- Tecno-Control. (s. f.). *Interruptores de atollo tipo TILT Serie CT* [Ficha técnica].
- Van Aartsengel, A., & Kurtoglu, S. (2013). *Handbook on continuous improvement transformation*. Springer.

ANEXO-A Ficha técnica sensor Ender Hauser Micropilot FMR67B

TI01687F/00/EN/01.22-00
71575910
2022-06-01

Products

Solutions

Services

Technical Information

Micropilot FMR67B

HART

Free space radar



Level measurement in bulk solids

Application

- Continuous, non-contact level measurement of powdered to granular bulk solids
- Process connections: Flanges with purge air and alignment unit
- Maximum measuring range: 125 m (410 ft)
- Temperature: -40 to +450 °C (-40 to +842 °F)
- Pressure: -1 to +160 bar (-14.5 to +2 321 psi)
- Accuracy: ±3 mm (±0.12 in)

Your benefits

- PTFE lens antenna or ceramic sealed high-temperature horn antenna
- Reliable measurement thanks to strong signal focusing, even with multiple internal fixtures
- Easy, guided commissioning with intuitive user interface
- *Bluetooth®* wireless technology for commissioning, operation and maintenance
- SIL2 as per IEC 61508, SIL3 for homogeneous redundancy

ANEXO-B. Ficha técnica Interruptores de Atollo tipo TILT Serie CT



CONVEYOR COMPONENTS COMPANY

Division of Material Control, Inc.
130 Seltzer Road, PO Box 167 • Croswell, MI 48422 EUA
TELÉFONO: (810) 679-4211 • LÍNEA GRATIS (800) 233-3233 • FAX: (810) 679-4510
Correo electrónico: info@conveyorcomponents.com • <http://www.conveyorcomponents.com>

MODELOS: CT-105, CT-106 Y CT-107 con la serie CT-200G / CT-201G

Salida intrínsecamente segura para ubicaciones Clase I, Grupos A, B, C y D; Clase II, Grupos E, F y G al usarse con sondas serie CT-G.



ADVERTENCIA:
Pueden ocurrir LESIONES FATALES o MUERTE.
Antes de instalar o ajustar, cierre y bloquee físicamente el sistema del transportador. Solo los controles y sondas descritos en estas instrucciones, cuando se conectan correctamente, cumplen los requisitos de seguridad intrínseca. Para evitar la ignición de atmósferas inflamables o combustibles, desconecte el suministro antes de dar servicio. El remplazo de los componentes puede menoscabar la seguridad intrínseca.

Especificaciones de la unidad de control:

Voltaje del suministro de entrada:	120 V CA a 50/60 Hz; 240 V CA (sufijo B)
Consumo de energía:	10 vatios
Salida de sonda:	<50 mA a 12 V CC
Relé de salida:	DP/DT 5 amperios, 120 V CA resistivos 5 amperios, 240 V CA resistivos
Tiempo de retardo VR1:	0.1 a 35 segundos. Este ajuste retrasará la acción del relé de salida.
Gabinete:	CT-105/CT-105B: Tipo 4X CT-106/CT-106B: Tipo 4X, Clase II, Grupos E, F y G (tipo 9) CT-107/CT-107B: Clase I, Grupos C y D, Clase II, Grupos E, F y G (tipos 7 y 9)
Luces indicadoras:	Normal (verde): Luz encendida al activarse el relé. Alarma (roja): Luz encendida al desactivarse el relé.
Selector lógico S1:	Este interruptor determina el momento en que el relé de salida se activa y desactiva. Posición 1: El relé se activa cuando la sonda está en la posición vertical. El relé se desactiva cuando la sonda está en la posición inclinada. Intermedia: Nula; sin contacto NO USE esta posición. Posición 2: El relé se activa cuando la sonda está en la posición inclinada. El relé se desactiva cuando la sonda está en la posición vertical.

Especificaciones de la sonda:

Cada sonda contiene un interruptor de mercurio o sin mercurio SP/ST, normalmente cerrado. Entre las opciones de sondas disponibles se incluyen de acero inoxidable, de paleta para uso en aplicaciones en que los materiales se mueven y de acoplamiento roscado.

Las sondas serie 'G' se clasifican como intrínsecamente seguras para la Clase I, Grupos A, B, C y D; Clase II, Grupos E, F y G solo cuando se usan con los controles modelos CT-105, CT-106 o CT-107 (incluye el sufijo B y/o modelos E).

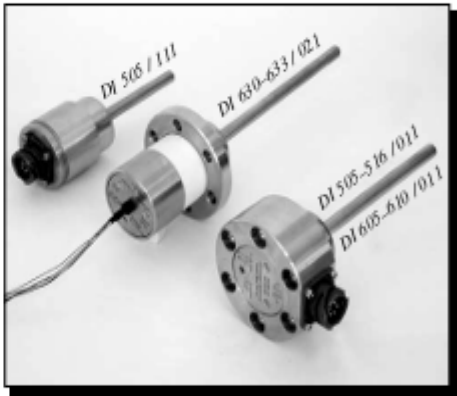
CT-201G:	Modelo de sonda estándar para servicio pesado; 9" [23 cm] de largo
CT-200G:	Modelo de sonda compacta; 6" [15 cm] de largo.
Señal de entrada:	<50 mA a 12 V CC; suministrado por un controlador intrínsecamente seguro de la serie CT
Ángulo de activación:	Nominal 15° (10°- 30°) desde la vertical
CT-201GN:	Modelo de sonda sin mercurio para servicio pesado; 9" [23 cm] de largo
CT-200GN:	Modelo de sonda compacta sin mercurio; 6" [15 cm] de largo
Señal de entrada:	<50 mA a 12 V CC; suministrado por un controlador intrínsecamente seguro de la serie CT
Ángulo de activación:	Nominal 25° (10°- 30°) desde la vertical; reactivación 8° min.

1.2 DATA SHEET

DI Series Displacement Transducers

FEATURES

- Large measuring range: Piston displacements from 50 to 1000 mm; 80 to 250 mm for DI 63X models
- Current-based output signal (4 to 20 mA) for displacement
- Built-in temperature measurement
- Very long life: No moving parts and therefore no wear of components (Eddy-current principle)
- Slim measuring system allowing large measuring range
- Insensitive to metallic impurities in the working fluid
- High shock and vibration resistance
- Capable of withstanding pressures up to 450 bar
- Robust construction, designed for permanent operation in hydraulic systems
- Standard temperature version, up to 80 °C (DI 5XX)
- High temperature versions, up to 125 °C (DI 60X and DI 61X) or up to 200 °C (DI 63X)
- EMC susceptibility conforms to European standards



DESCRIPTION

Magtrol’s line of Displacement Transducers provide contactless measurement of absolute piston position in hydraulic and pneumatic cylinders and other applications. Their robust construction, large insensitivity to shocks and very long life (due to no moving parts and therefore no wear of components) make them both cost effective and very reliable. Magtrol transducers offer a wide range of operational temperatures and admissible pressure resistance for even the most demanding applications.

The transducer provides a direct 4–20 mA output signal corresponding to the measuring range, as well as VDC temperature output. As an option Magtrol offers the CST 113 Signal Converter, which allows the complete chain to be calibrated according to the specific needs, either in current or voltage output.

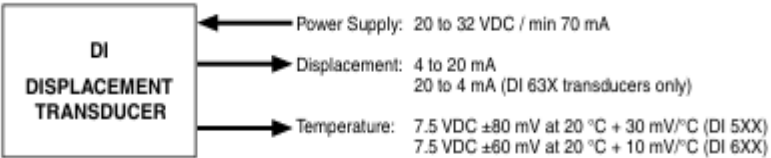
APPLICATIONS

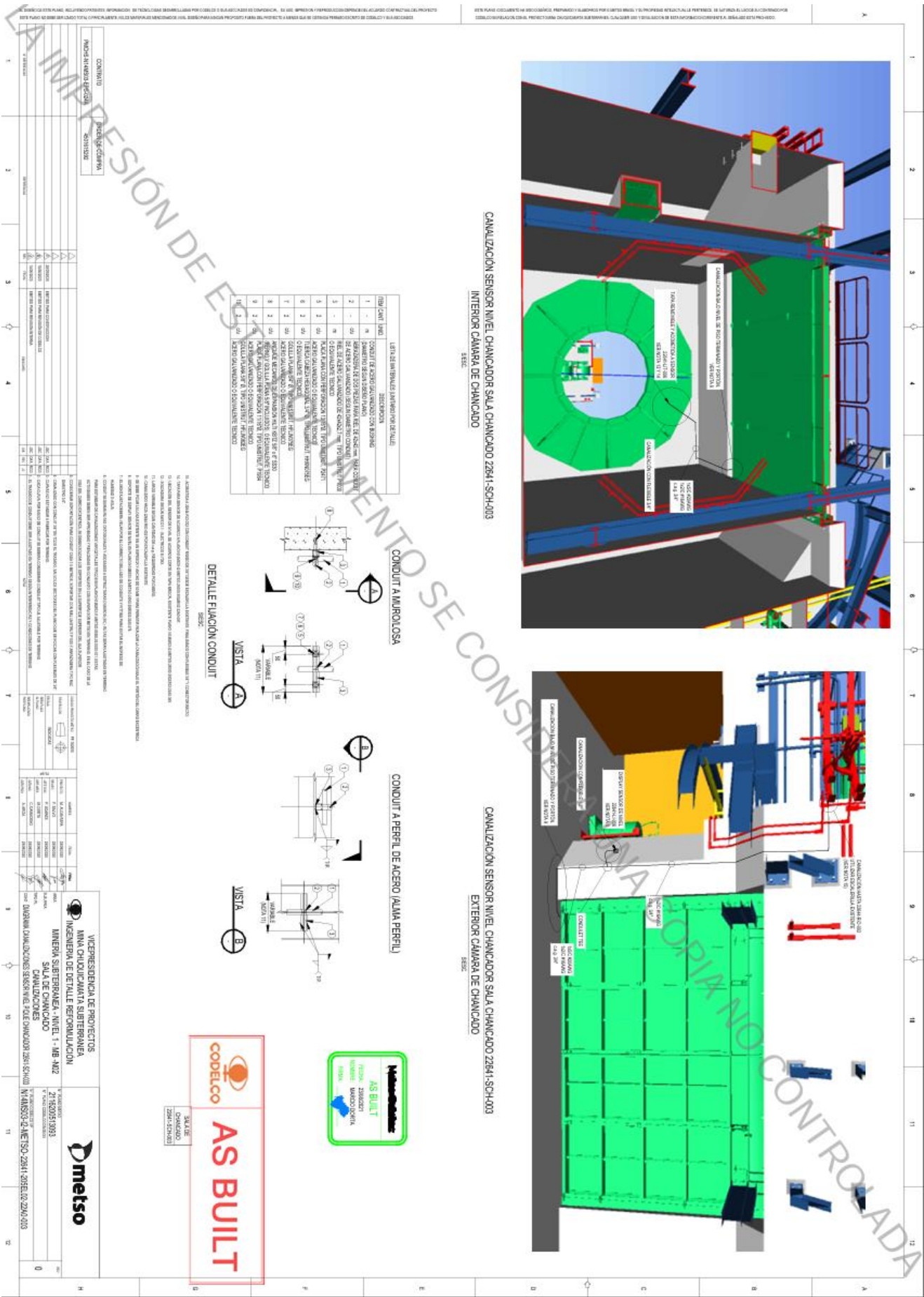
The DI series of displacement transducers were developed principally for OEM applications in the hydraulic industry. They enable the direct and reliable measurement of the position of:

- Hydraulic Cylinders
- Control Valves
- Servo Controls
- Steam Inlet Valves
- Propellers
- Stone Crushers

Their design is such that the installation cost is kept to a minimum. This cost-effectiveness results from the limitation to one fixed standard signal of 4 to 20 mA with very precise determination of the measurement interval (from 0 to full scale) on the sensing element.

BASIC CONFIGURATION





ANEXO F. Registro de forces en plataforma oficial

Empres Fleuto	Responsab SME	Equipo	TAG	Tipo de Interlock	Descripción de TAG	Actividad	Duraci hrs	Criticid	Componentes	Compromiso
Ferrostraal		I02 Chancador	25641-PMH-011	Seguridad Equipo	FILTRO SUCIO ACEITE MPS	PM CAMBIAR SENSOR FILTRO ACEITE MPS CH02		Baja	10F11-M201-M512 - UNITED ELECTRIC	Levantamiento del estado del sensor
Ferrostraal		I02 Chancador	25641-LI-007	Condiciones de Proceso	Nivel Descarga	PM NORMALIZAR FORCE SENSOR NIVEL CH02		Alta	Vega Puls 69, antena parabolica	Espera Repuesto
Ferrostraal		I02 Chancador	25641-CHG-002-04-M	Seguridad Equipo	BBA ARANJA CHANCADOR	PM NORMALIZAR FORCE BBA CHG-002-04M CH02		Baja		Revisar señal terreno
Ferrostraal		I02 Chancador	25641-LI-008B	Condiciones de Proceso	Nivel Alim. Chancador Picarroca	PM NORMALIZAR FORCE SENSOR LI-008B CH02		Alta		Levantamiento + gesion del cambio de estructura de soporte
Ferrostraal		I02 CHANCADOR	25641-LI-006	Condiciones de Proceso	Nivel Pique	PM NORMALIZAR FORCE NIV PQ CH L2		Alta	VegaPuls 68 Antena Parabolica Dos Hilos	Espera Repuesto

ANEXO G. Estándar de operación de piques.

Gerencia: GMCHS
SI: CH&TM
Área: Operaciones

Estándar – OPERACIÓN PIQUES L1,L2 Y L3

Objetivo

Asegurar que Pique no se atolle por material fino y/o húmedo.Cero atollo en pique por bolones. Asegurar nivel superior de pique.

Responsable Estándar

Jefe de Unidad – Michael Rojas SCH&TM

Responsable Ejecución

Operadores SCH&TM

KPI Asociado

Disponibilidad STI

Riesgos críticos

RC16
Caída a piques

RC20
Concentración ambiental peligrosa de polvo y sílice

RC22
Deformación, inestabilidad y colapso de componentes en pasillos, pisos y barandas

RC23
Colapso estructural en mina subterránea

1

1. Chequeo ingreso de turno

Al inicio de turno el operador de sala de chancado debe verificar que el pique no se encuentre con carga hasta el nivel superior, midiendo el nivel del pique a través de medición mecánica, y se informará inmediatamente a personal CIO.

5min

2

2. Chequeo durante descarga de apron primario

Si operador de sala de chancado observa material fino y/o húmedo proveniente de la alimentación mina, debe avisar inmediatamente la condición al Operador del transporte intermedio como también a la SOM para control de la alimentación.

5min

3

3. Operación Pique sobre el 60%

- El operador del transporte intermedio y operador CIO debe mantener el pique siempre en niveles adecuados de carga (~60% de altura por CIO) y para evitar tiempos de residencia del material, la operación de Apron secundario debe ser continua.
- En los cambios de turno, se debe continuar descargando pique a una velocidad mínima (30%), monitoreado por operador CIO, hasta llegada de operador terreno.
- En caso de detención que impida la continuidad operacional del equipo, se debe proceder de la siguiente manera:
- La descarga del pique debe ser mediante un ramp up (ascenso) moderado y paulatino de la velocidad del Apron Secundario. Es decir, se debe operar Apron Secundario al 30% de su velocidad por 4 minutos, posteriormente se podrá ir aumentado 10% cada dos minutos para llegar al valor nominal requerido.
- En caso de mantenciones programadas por más de 24 horas se **deben dejar vacíos** los piques para evitar atollos
- NO se debe dejar cama de un 30% con pique detenido.**

4

4. Chequeo durante turno

El operador del chancado y operador debe verificar que el pique opere siempre en niveles adecuados de carga (~60% de altura por CIO) para evitar atollo, para lo que se revisará cada 1 hora (durante su turno). Esto debe repetirse previo al fin de turno.

5min

Creado: Clark Cunanan/ Alonso Cortés
Aprobado: Michael Rojas

Fecha Elaboración: 21.01.2024
Fecha Vencimiento: 21.07.2024
Versión: 2.0



Ingeniería Fase 1

Proyecto Chuquicamata Subterránea

Blindaje de piques y Silos

10 febrero 2025



CODELCO
Vicepresidencia
de Proyectos

BLINDAJE PIQUES DE GRUESOS L4 Y PVAC S04

Pique de gruesos MB Norte y Sur

Material Acero Antiabrasivo.		Longitud Norte	Longitud Sur
Diámetro		59m	20m
Excavado	Libre	Peso x anillo 13,7t	
6m	5,1m		
Espesor Anillos 100mm		Dureza acero HBN 500	

Pique traspaso MB Sur PVAC

Material Acero Antiabrasivo.		Longitud Este	Longitud Oeste
Diámetro		44m	27m
Excavado	Libre	Peso x anillo 4,2t	
4m	3,5		
Espesor Anillos 38mm		Dureza acero HBN 400/500	

Descripción

Pique de Gruesos

El nuevo diseño para los anillos de blindaje tanto para el MB N41/42 y S04 (piques de gruesos), considera las siguientes optimizaciones:

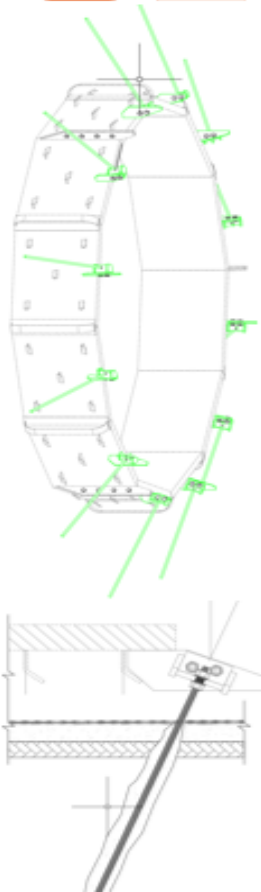
- Se determina espesor de anillos de acuerdo a análisis DEM y se define dureza del acero antiabrasivo superior a HBN 450. Análisis considera plan producción y factor de seguridad.
- Se aumenta el seccionamiento de los anillos para facilidades de montaje.
- Se incorpora 12 pernos de anclaje en roca para sujeción de anillos (diseño anterior solo 4)
- Requiere operar a 75% de carga útil del pique para asegurar su vida útil

Pique traspaso S04 PVAC

El nuevo diseño para los anillos de blindaje tanto para el S04 (piques PVAC), considera las siguientes optimizaciones:

- Se determina espesor de anillos de acuerdo a análisis DEM y se define dureza del acero antiabrasivo superior a HBN 400. Análisis considera plan producción y factor de seguridad.
- Los anillos van embebidos en hormigón, apernados entre ellos y sin anclaje a roca (mismo diseño DET).

Anillos Blindajes Pique de Gruesos Ø6m



Módulos

3

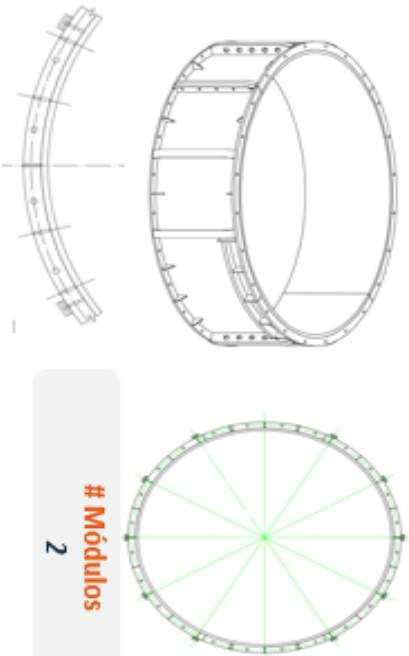
Caras

12 (dodecágono)

Barra Anclaje

12 Pernos Ø1" x 1750mm

Anillos Blindajes Pique PVAC Ø4m



Módulos

2

BLINDAJE SILOS Y PIQUES DE FINO

Silos Norte y Sur

Material Acero Antiabrasivo	Longitud Silo 54m
Díametro Excavado 6m	Peso x anillo libre 5,3m 6,8t
Espesor Anillos 50mm	Dureza acero Silo Sur HBN 500 Silo Norte HBN 400/450/500

Piques N02/03 y S02/03

Material Acero Antiabrasivo	Longitud Pique 63m
Díametro Excavado 6m	Peso x anillo libre 5,3m 3,5t
Espesor Anillos 25mm	Dureza acero HBN 400/450/500

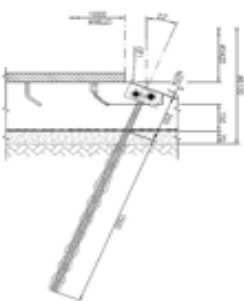
Descripción

El diseño original (IDe) año 2017, no consideraba anillos de blindaje para los piques asociados a las Salas de Chancado centrales (L1-L2-L3) ni para los Silos Norte y Sur del Nivel 1.

En junio 2018 se solicita a Alerce, diseñar acorde al stock de planchas de acero antiabrasivo disponible en maestranzas en Chile. Resultado del cual se emite un diseño de sistema de anillos y anclajes considerando un acero antiabrasivo de 25mm espesor para Piques de Fino centrales y 50mm en Silos Norte y Sur, con rangos de dureza de HBN 400 a 500.

No se desarrolló memoria DEM para determinar vida útil de acuerdo con el mineral pasante, ni cálculos para verificar el sistema de anclaje y solicitudes mecánicas.

Anillos Blindaje



Módulos
3

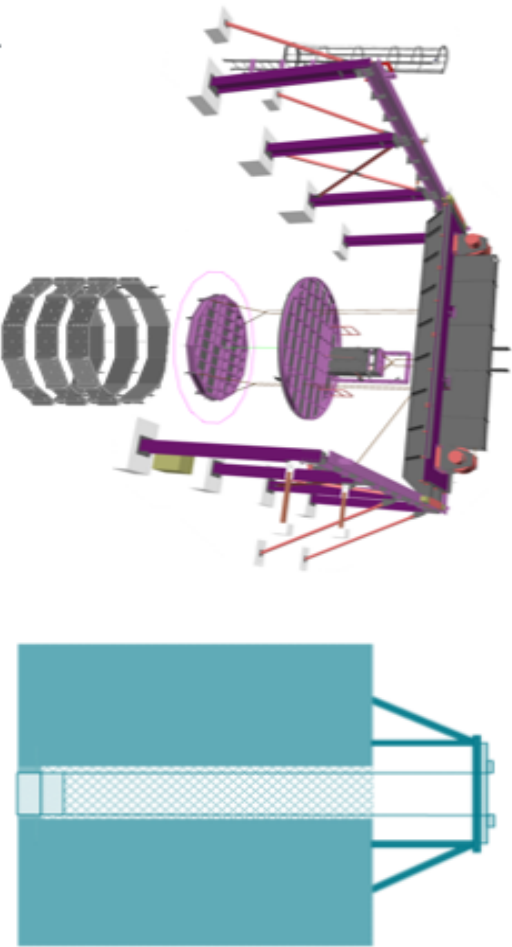
Barra Anclaje
4 Pernos Φ1" x 1750mm



BLINDAJE DE PIQUES Y SILOS

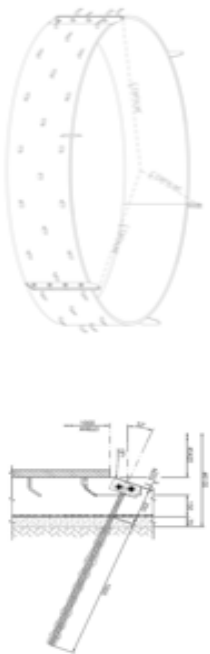
Mejoras de diseño			
Consideraciones	Silos y Piques L2-L3	Piques de Gruesos L4	Piques PVAC L4
Estudio DEM para determinar vida útil acorde a mineral pasante.	✗ No Realizado	✓ Realizado	✓ Realizado
Incorporación de Pernos de anclaje al diseño.	✗ 4 x anillo	✓ 12 por anillo	✓ Embebido en hormigón
Espesor Anillos	✗ 50mm y 25mm	✓ 100mm	✓ 38mm
Metodología constructiva	EMA	EMA	Bastidor hidráulico
Dureza Acero Antiabrasivo Anillo	HBN 400/450/500	HBN 500	HBN 400/500
Peso Anillo	6,8t y 3,5t	13,7t	4,2t
Diámetro Excavado	6m	6m	4m
Diámetro Libre	5,3m	5,1m	3,5m
Longitud Pique	54m y 63m	59m Norte 20m Sur	44m Este 27m Oeste

EMA para blindaje piques Ø6m

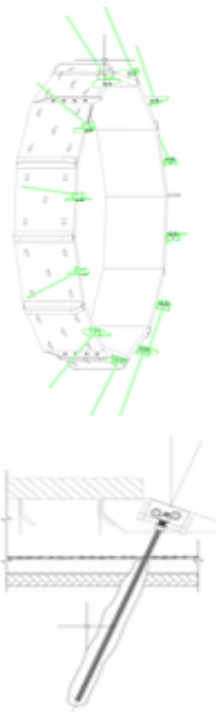


✓ Metodología diseñada para piques MChS

Diseño Blindajes Silos y Piques L2-L3



Diseño Blindajes Piques de Gruesos L4



Bastidor hidráulico para blindaje piques Ø4m



✓ Metodología de blindaje similar a DET (Standar Jack)

✓ Ambos métodos usan anillos embebidos en hormigón sin anclaje

Sensor de Nivel – Pique

Sala de Chancado MB N02/N03 y MB S02/S03.

22641-LIT-006 / 25641-LIT-006

Actividad: “Sensores de nivel definitivo”.



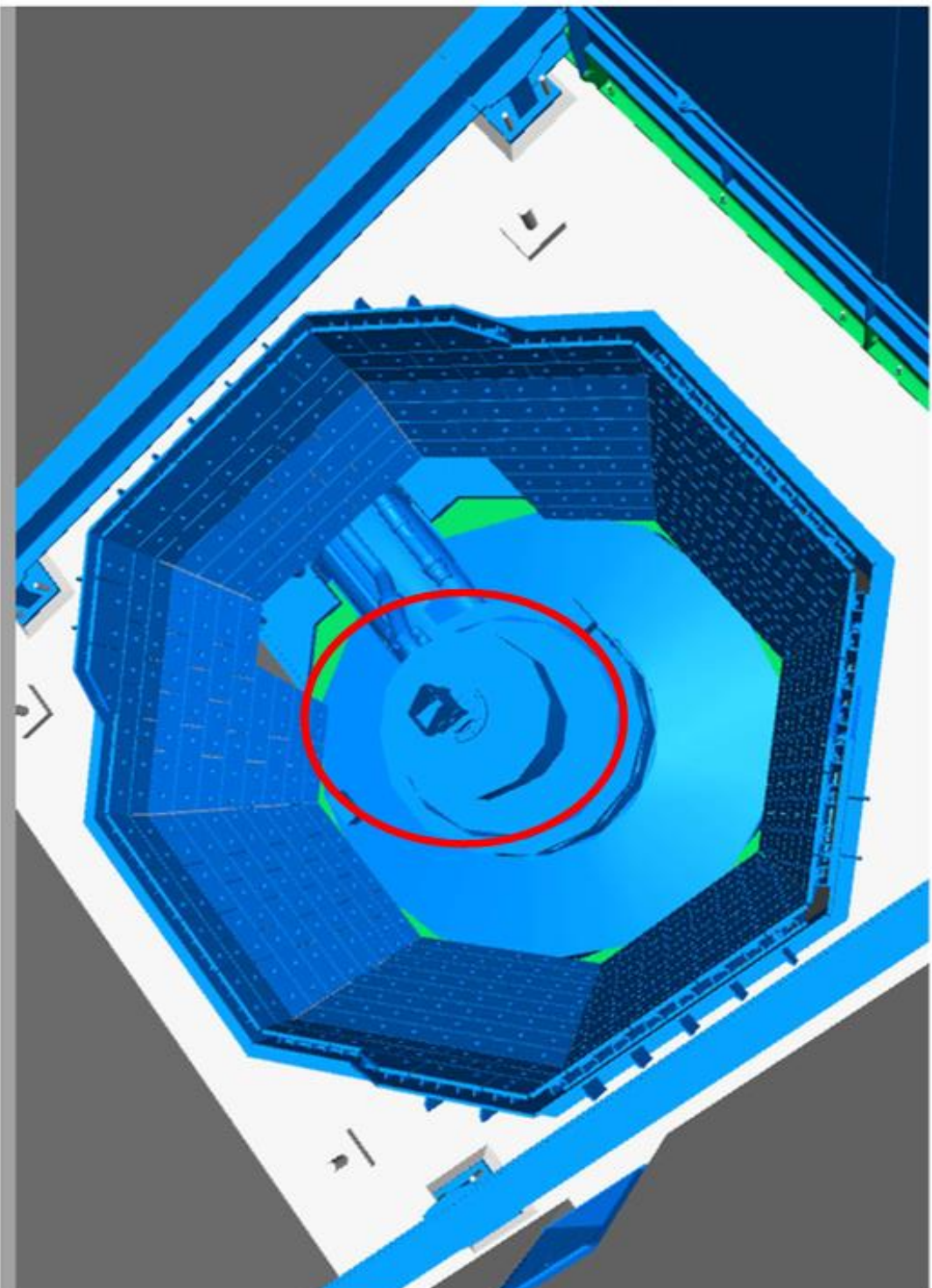
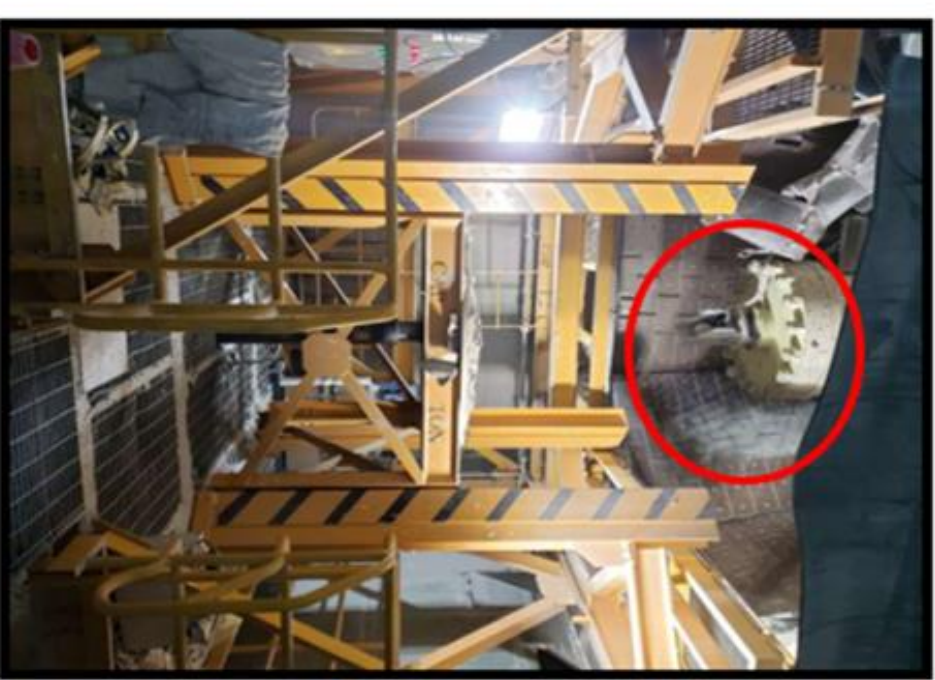
Vulnerabilidades corto-mediano plazo

Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea

19 de junio de 2023

Sensor de Nivel VEGA PS69

Pique – Sala de Chancado.



Sensor de Nivel VEGA PS69

Pique – Sala de Chancado.

 Sigsig!!! Sistema de Gestión de Señales	NET ISO		CODIGO SISA		ID	
	INSPECCIÓN SENSORES VEGA		REVISIÓN V	TECNOLOGIA	Septiembre 2018	
			REVISIÓN	TECNOLOGIA	FECHA	
			REVISIÓN	TECNOLOGIA	FECHA	

Una alternativa que se propone es realizar un soporte que nos permita bajar la altura que se encuentra en estos momentos, alrededor de 600 mm, esto en una prueba ejecutada en terreno donde mejoró la condición de medición, esto es una alternativa que no asegura completamente la medición pero si la mejora.
Si esta alternativa logra mejorar circunstancialmente la medida sin interferencia, esto se debe replicar en el sito Sur.

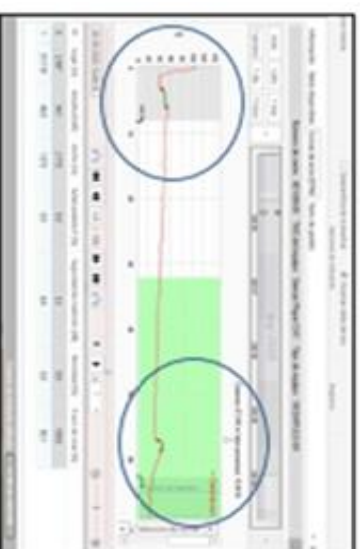
1.2.-Sito Sur

Para Sito Sur se replica parte de la configuración generada en Sito Norte.
Esta se debe mantener en observación una vez realicen carga en este sito nuevamente.

2.- Inspección L1

2.1.- Sensor de Nivel Chancador 1, MPS, Pique

Se realiza seguimiento a configuración ejecutada, Sensor se encuentra muy cerca de la descarga del material, provocando interferencias en la medición del equipo.
Se recomienda cambiar de ubicación sensor, con esto mejorar confiabilidad y estabilidad de la medición.
La ubicación del sensor debe estar donde interfiera lo menos posible la descarga del material.



La distorsión generada en la descarga de producto, sensor muy cerca de la caída de material. Señales se sobre-posicionan a la medición real, dejando sin lectura a equipo.



Se realiza seguimiento a configuración ejecutada, Sensor se encuentra muy cerca de la descarga del material, provocando interferencias en la medición del equipo.

Se recomienda cambiar de ubicación sensor, con esto mejorar confiabilidad y estabilidad de la medición.

La ubicación del sensor debe estar donde interfiera lo menos posible la descarga del material.

La distorsión generada en la descarga de producto, sensor muy cerca de la caída de material. Señales se sobre-posicionan a la medición real, dejando sin lectura a equipo.

RdP Atollos por sobre nivel de pique

División Chuquicamata

Junio 2022



Problema: Atollos por sobre nivel de pique

Líder: Claudio Fredes Fecha/Turno: 04 y 05 de junio de 2022



1 Lluvia de Ideas (¿Qué causa el problema? / Traer la mayor cantidad de información desde terreno)

Causas
1.- Desajuste en el cálculo de nivel del pique
2.- Operador no efectúa la medición del nivel del pique en frecuencia adecuada
3.- Operador CIO no calibra el nivel de pique
4.- Sensor de nivel de descarga de chancado se encuentra fuera de servicio
5.-
6.-
7.-
8.-
9.-
10.-

Buscar las causas raíces



2 Busque las causas raíces (Llevar los problemas de lo más general a lo más particular)

Problema	Problema	Por qué?	Por qué?	Por qué?	Por qué?
	Desajuste en cálculo de nivel del pique	Falla en <u>encoder</u> de correa intermedia	Inundación en correa intermedia	Rotura de línea de agua industrial	<i>Sobrepresión de línea</i>
			Acumulación de carga en polea de cola de intermedia	Daños (condición de reparaciones) en correa intermedia que fugan carga fina	
	Operador no efectúa la medición del nivel de pique en frecuencia adecuada	No se encuentra debidamente estandarizada la frecuencia de medición			
		Sobre confianza del operador	Confía en el valor calculado		
	Operador CIO no realiza calibración de nivel de pique	Falta instrucción a operadores	Gran cantidad de operadores nuevos		
	Sensor de nivel de descarga de chancado se encuentra F/S	<i>Corte en cable en sector excéntrica</i>	<i>Caída de RIS desde chancador</i>		
		No es posible ejecutar mantenimiento con equipo operando			

Definir acciones para levantar las causas raíces



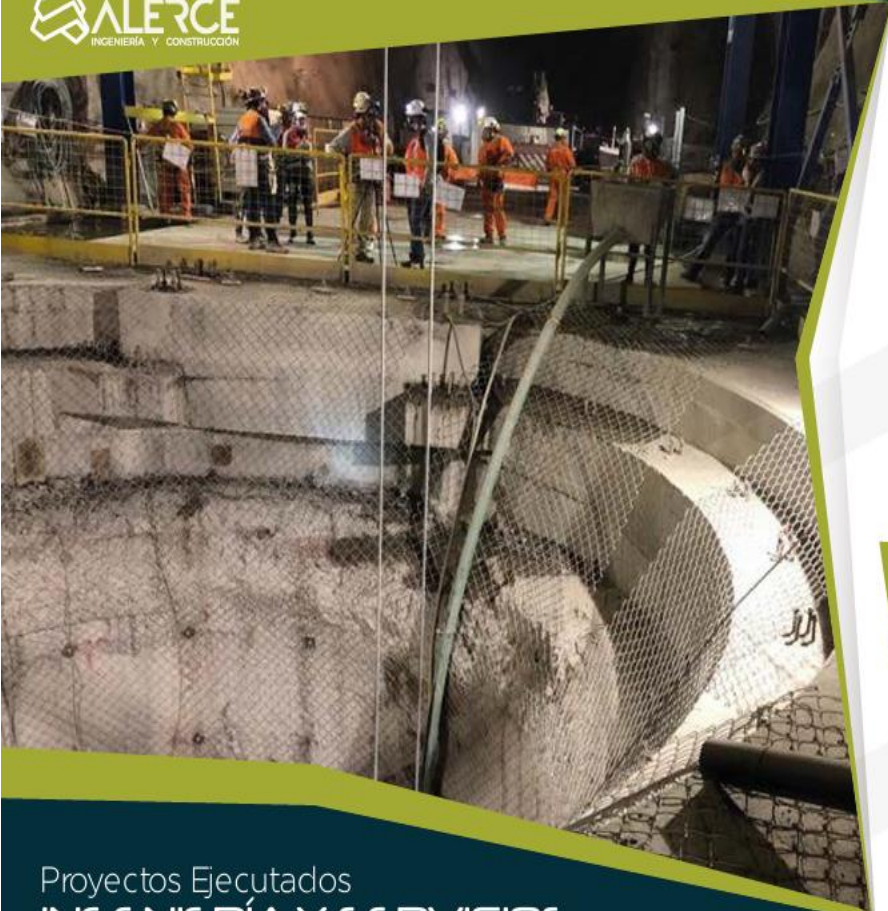
3 Proponer soluciones, responsables y fechas

Plan de acción - Compromisos	Responsable	Fecha Entrega
Actualizar estándar de operación pique y difundir con operadores de terreno	C. Fredes / J. Daroch	16-06-22
Inducción de Ingeniero de sistemas de control a operadores CIO entrantes	R. Rivera	16-06-22
Programar reparación de sensor de nivel de descarga del chancador en próxima detención L1	R. Rivera	30-06-22
Reparar <u>encoder</u> de cola correa intermedia L1	R. Rivera	16-06-22
Evaluar opción de instalación de sensor de nivel de descarga del chancador L1	R. Rivera	16-06-22

4 Fotografías



ANEXO L. Cotización de nuevo blindaje



Proyecto Ejecutado:

INGENIERÍA DE DETALLES
BLINDAJE DE SILOS Y PIQUES
SISTEMA TRANSPORTE MINERAL
SSM PCHMS

▲ Desarrollo ingeniería básica y estudios de factibilidad.

Cliente
VP-PMCHS

▲ Contrato N° : 4501827117 (C1020)
▲ Monto : USD 336.899
▲ Plazo : 8 meses

Proyectos Ejecutados
INGENIERÍA Y SERVICIOS



Santiago, 06 de enero de 2025

Cotización N° 179-2025



Atención:
Ricardo Neira S.

Asunto:

De acuerdo con requerimiento solicitado, se presenta a usted la cotización del servicio del asunto por un periodo de dos meses.

Principales Actividades:

- Proveer equipos y materiales de acuerdo con las especificaciones técnicas.

Descripción	Cantidad
Micropilot FMR67B	1
Conduit flexible metálico (LFMC) o flexible industrial con chaqueta, IP66/67	35 mt
Acero galvanizado o	10mt
Guardas anti-impacto	12
Perfil tipo Unistrut 41x41 (galv/inox),	20
Cable instrumentación (lazo 4-20 mA/HART)	40mt
Anclajes	30
Abrazaderas	80
Sellos / tapones / drenaje	10
Gabinete	1
Canalización y Alambrado	1





- Realizar el montaje, programación y Comisionamiento de acuerdo con carta Gantt.

Etapa	Horas	Técnico	Programador	Supervisor	APR
Carpeta de Arranque	40			1	1
Retiro de instrumentación obsoleta	24	2		0,5	0,5
Montaje de Gabinete control local y supervisión	24	2		0,5	0,5
Montaje Guardas anti-impacto	8	2		1	1
Montaje de nueva instrumentación	16	2		1	1
Canalización y cableado	40	2		1	1
Carga de programa	8	1	1		
Comisionamiento	16	4	1	1	1
Prueba de funcionamiento	8	4	1	1	1
Entrega de proyecto	4		1	1	
Capacitación y Entrenamiento	56		1		
Puesta en marcha	8	4	1	1	1

Consideraciones:

- Horario de trabajo de lunes a domingo de 8:00 a 20:00 turno día (A) y 20:00 a 8:00 turno noche (B), con 60 minutos destinados a la alimentación. Al inicio de la jornada se consideran 15 minutos para el cambio de vestuario y de 25 minutos antes de terminada la jornada para el aseo personal y cambio de vestuario.
- Elementos de protección personal de acuerdo con el estándar de la planta.
- Alimentación en planta.

No considera:

- Horas Extras.
- Equipos y materiales fuera de las especificaciones técnicas.





Detalle de la Cotización:

Descripción	Valor Unitario + IVA
Propuesta integral para la implementación de la mejora del sistema de medición, incorporando la canalización protectora del tendido y el esquema de redundancia definido en los requisitos técnicos del proyecto en un plazo de ejecución de 13 días en planificación coordinada en una MGA.	\$ 24.148.859

Atento a cualquier consulta:

Cristián Aguirre Alarcón
Gerente de Operaciones
HOLDAS Servicios Industriales Chile
Alcántara 44, piso 11
Las Condes, Santiago, Chile
Cel: +56 9 8479 5558



ANEXO N. Cotización empresa Salfa SA



Fecha	06-09-2025
Cotización	SM-024-2025
Atención	Ricardo Neira S.
Proyecto	Mejora del sistema de medición del pique: canalización protectora y redundancia de señal
Ubicación	Codelco - Chuquicamata (referencial)

1. Resumen ejecutivo

En respuesta al requerimiento, Salfa Montajes presenta una propuesta integral para ejecutar la mejora del sistema de medición del pique, con foco en la continuidad operacional, ordenamiento del tendido y reducción de fallas por daño mecánico. La propuesta incorpora canalización protectora, reubicación/ordenamiento de ruta en tramos críticos y un esquema de redundancia de señal básico, junto con pruebas y entrega documental.

Plazo	Turnos	Garantía	Validez oferta
13 días corridos	A: 08:00-20:00 / B: 20:00-08:00	6 meses instalación	30 días
Forma de pago	Postventa	Normas y SST	Observaciones
30% OC / 60% avance / 10% recepción	Soporte 30 días	APR en terreno + permisos	No incluye cambios de alcance

2. Alcance del servicio

El alcance considera el suministro, montaje y puesta en servicio de los siguientes elementos:

- Retiro de instrumentación obsoleta y adecuaciones menores en el punto de medición.
- instalación de gabinete de control local y cajas de paso (IP66/67) para ordenamiento de conexiones.
- canalización protectora del tendido (Conduit / bandeja cerrada según tramo) y soportes asociados.
- Tendido y conexionado de cable de instrumentación (4-20 mA/HART) para línea principal.
- implementación de redundancia de señal básica mediante segundo conductor y conmutación en gabinete (ruta segregada en tramos críticos).
- Pruebas de continuidad y funcionamiento, comisionamiento y puesta en marcha.
- Capacitación operacional y entrega documental (planos y registros de prueba).

No considera: horas extras, modificaciones mayores al sistema de control fuera del gabinete local, ni materiales fuera de especificación aprobada.



3. Enfoque técnico y cumplimiento de requisitos

Se prioriza la protección mecánica del tendido y la separación de ruta respecto de zonas de impacto/roce en los tramos más expuestos. Para la redundancia se implementa en esquema básico, con conmutación local en gabinete. La aplicación considera alcance cerrado; cambios de ruta o interferencias no levantadas en visita se cotizan como adicional (capacidad de adaptación limitada).

Requisito	descripción	Estrategia Salfa Montajes
P1	Ruta alejada de mallas / zonas de impacto	segregación en tramos críticos; cruces se protegen con guardas y separadores.
P2	Canalización adecuada (protección mecánica)	Conduit flexible IP66/67 y tramos rígidos galvanizados; soporte Unistrut.
T3	Redundancia (eliminar falla simple)	Segundo conductor y conmutación en gabinete; comparte cajas de paso para simplificar montaje.
M1	Pruebas y verificación funcional	Pruebas de continuidad/aislamiento y verificación de lectura estable en SCADA.

4. Materiales e instrumentación principales

Listado referencial de materiales principales (cantidades sujetas a levantamiento final en terreno):

descripción	Cantidad	Detalle técnico
Micropilot FMR67B	1 un	Radar de nivel; señal 4-20 mA/HART; montaje según especificación del fabricante.
Conduit flexible metálico (LFMC) IP66/67	35 m	Conduit flexible industrial con chaqueta; para tramos con vibración o interferencias.
Conduit rígido galvanizado + accesorios	10 m	Tramos rectos, curvas y coplas; continuidad mecánica y fijación a soportes.

SALFAMONTAJES®

Guardas anti-impacto	10 un	protección en puntos con riesgo de rebote/atollo (cantidad menor a otras propuestas).
Perfil Unistrut 41x41 + accesorios	20 m	Soportes, abrazaderas, pernos y anclajes.
Cable instrumentación apantallado	40 m	Cable para lazo 4-20 mA/HART; incluye terminaciones.
Anclajes mecánicos	30 un	Anclajes para soportes y canalización.
Abrazaderas y fijaciones	80 un	sujeción y alivio de tensión del tendido.
Sellos / tapones / drenaje	10 un	Estanqueidad y drenaje en cajas según condiciones de polvo/humedad.
Gabinete control local	1 un	Gabinete IP66/67 con riel DIN y borneras.

5. Plan de trabajo y recursos

El servicio se ejecuta en modalidad 24/7 con dos turnos (A y B). El plan de trabajo se resume en macro-etapas:

Macro-etapa	Duración	Recursos clave
Permisos, carpeta de arranque y charla seguridad	1 día	Supervisor + APR
Retiro de instrumentación y preparación de montaje	2 días	técnicos + Supervisor
Montaje gabinete local / cajas de paso	1 día	técnicos + Supervisor
Canalización y soporte (ruta principal)	4 días	técnicos + APR
Tendido y conexionado (principal + redundante básico)	3 días	técnicos + Programador
Comisionamiento, pruebas y	2 días	técnicos + Programador +

SALFAMONTAJES®

puesta en marcha		Supervisor
Capacitación y entrega documental	1 día	Programador + Supervisor

Dotación referencial por turno: 1 supervisor (parcial), 1 APR (parcial), 2 técnicos (instrumentación/electricidad) y 1 programador en etapas de integración.

5.1 Horas-hombre (HH) referenciales

Se presenta una estimación referencial de HH por rol, calculada a partir de la distribución de recursos por etapas y la modalidad de turnos.

Rol	HH (estimadas)	Comentario
técnicos (instrumentación/electricidad)	360	distribución por etapas y turnos A/B (referencial).
Programador / integración SCADA	100	distribución por etapas y turnos A/B (referencial).
Supervisor de terreno	164	distribución por etapas y turnos A/B (referencial).
APR / prevención de riesgos	160	distribución por etapas y turnos A/B (referencial).
TOTAL, HH	784	

6. Oferta económica

Valores referenciales para evaluación comparativa en tesis. Moneda: pesos chilenos (CLP).

Mano de obra (montaje y conexionado)	\$12.500.000
Materiales e instrumentación	\$6.800.000
supervisión y prevención de riesgos	\$900.000
Equipos, herramientas e indirectos	\$724.369
Subtotal neto	\$20.924.369
IVA 19%	\$3.975.630
TOTAL (IVA incluido)	\$24.899.999



7. Condiciones comerciales y postventa

- Validez de oferta: 30 días.
- Forma de pago: 30% contra orden de compra (OC), 60% contra avance (montaje/canalizacion), 10% contra recepción conforme.
- Garantía: 6 meses por defectos de instalación (no incluye desgaste por condiciones operacionales fuera de diseño).
- Postventa: soporte remoto y visita en sitio (según coordinación) durante 30 días posteriores a la puesta en marcha.
- Seguridad: cumplimiento de estándar SST de la planta, permisos de trabajo, APR en terreno y coordinación con operación.

8. Antecedentes del proveedor

Salfa Montajes presenta experiencia en montajes industriales y soporte a operaciones mineras. Se prioriza la coordinación con la supervisión del mandante, asegurando comunicación fluida, control de permisos y trazabilidad documental. Referencias y antecedentes pueden ser presentados a solicitud.

9. Contacto comercial

Departamento de Propuestas y Operaciones - SALFA MONTAJES S.A.

Santiago, Chile

ANEXO O. Cotización empresa Ferrostaal.



Santiago, 02 de enero de 2026

Cotización N° 21-2026

Atención:
Ricardo Neira S.

Asunto: Implementación de mejora del sistema de medición del pique (canalización protectora y redundancia de señal).

De acuerdo con el requerimiento solicitado, se presenta cotización referencial para la ejecución integral del servicio, incluyendo suministro de materiales, montaje, conexonado, pruebas y puesta en servicio. El plazo de ejecución considerado es de 13 días, coordinado con las ventanas operacionales definidas por la operación.

Principales actividades:

- Proveer equipos y materiales de acuerdo con las especificaciones técnicas del proyecto.
- Ejecutar canalización y protección mecánica del tendido, considerando ruta segregada para redundancia.
- Realizar montaje de instrumentación, comisionamiento, pruebas funcionales, capacitación y entrega documental.

Equipos y materiales principales:

Descripción	Cantidad
Micropilot FMR67B	1
Conduit flexible metálico (LFMC) o flexible industrial con chaqueta, IP66/67	35 m
Acero galvanizado (tramos y accesorios según ruta)	10 m
Guardas anti-impacto	12 un
Perfil tipo Unistrut 41x41 (galv/inox) + accesorios de fijación	20 m
Cable instrumentación (lazo 4-20 mA/HART) + terminaciones	40 m
Anclajes	30 un
Abrazaderas	80 un
Sellos / tapones / drenaje	10 un
Gabinete control local (IP66/67, con borneras y riel DIN)	1 un
Canalización y alambrado (incluye misceláneos: prensaestopas, etiquetado y consumibles)	1 ítem



Plan de trabajo (carta Gantt) - recursos por etapa:

Etapa	Horas	Técnico	Programador	Supervisor	APR
Carpeta de Arranque	40			1	1
Retiro de instrumentación obsoleta	24	2		0,5	0,5
Montaje de Gabinete control local y supervisión	24	2		0,5	0,5
Montaje Guardas anti-impacto	8	2		1	1
Montaje de nueva instrumentación	16	2		1	1
Canalización y cableado (incluye ruta redundante)	40	2		1	1
Carga de programa	8	1	1		
Comisionamiento	16	4	1	1	1
Prueba de funcionamiento	8	4	1	1	1
Entrega de proyecto	4		1	1	
Capacitación y Entrenamiento	56		1		
Puesta en marcha	8	4	1	1	1

Consideraciones:

- Horario de trabajo lunes a domingo: 08:00-20:00 (turno día A) y 20:00-08:00 (turno noche B).
- Incluye 60 min de alimentación; 15 min para cambio de vestuario al inicio y 25 min para aseo/cambio al término de jornada.
- EPP de acuerdo con el estándar de la planta.
- Alimentación en planta.

No considera:

- Horas extras.
- Equipos y materiales fuera de las especificaciones técnicas.

Condiciones comerciales (referenciales):

- Validez de oferta: 30 días.
- Forma de pago: 50% contra orden de compra (OC) y 50% contra recepción conforme del servicio.
- Garantía: 6 meses por defectos de instalación (no incluye desgaste por condiciones operacionales fuera de diseño).

**Detalle de la cotización:**

Descripción	Valor Unitario + IVA
Propuesta integral para la implementación de la mejora del sistema de medición, incorporando canalización protectora del tendido y esquema de redundancia de señal, con pruebas y puesta en servicio. Plazo de ejecución: 13 días (planificación coordinada en una MGA).	\$ 22.900.000

Atento a cualquier consulta,

Departamento Comercial y Operaciones

FERROSTAAL CHILE S.A.

Santiago, Chile