

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA

MARÍA SEDE VIÑA DEL MAR

JOSÉ MIGUEL CARRERA

**ANÁLISIS MANTENIMIENTO PREVENTIVO A EQUIPOS KOMATSU,
ANDINA**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Técnico Universitario en
Mantenimiento Industrial

Alumno:

Sr. Benjamín Ignacio Valdenegro Gajardo

Profesor guía:

Mg. Ing. Ricardo Ciudad Cartagena



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: Analisis Mantenimiento Preventivo a Equipos Komatsu, Andina

Nombre del candidato(a): Benjamín Ignacio Valdenegro Gajardo

Carrera / Grado: Técnico Universitario en Mantenimiento Industrial

Campus: Viña del Mar ; **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Ricardo Ciudad Cartagena, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 01/06/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 01/06/2025.

; Firma:

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

2025

RESUMEN

La presente investigación aborda la implementación de un plan de mantenimiento preventivo centrado en los equipos CAEX 930E-4 de Komatsu, operando en la División Andina de Codelco, haciendo foco en la falla crítica del contactor RP2. A partir del análisis de datos en terreno, registros técnicos y la metodología AMFEC, se identificaron debilidades estructurales en el plan de mantenimiento actual, particularmente en los protocolos de torqueo y revisión de componentes eléctricos. La falla, originada por un mal torqueo, provocó una reacción en cadena que afectó a componentes vitales del sistema de propulsión eléctrica, generando 72 horas de indisponibilidad. A partir del análisis modal de fallas, se construyó un nuevo plan preventivo con tareas mensuales específicas, rediseño técnico del contactor y aplicación de mantenimiento predictivo mediante análisis termográfico y trazabilidad digital. El estudio refuerza la necesidad de una transición desde modelos tradicionales hacia una estrategia basada en riesgo, enfocada en la mejora continua, confiabilidad operacional y reducción de fallas humanas. Esta propuesta se alinea con los estándares de gestión de activos de clase mundial (ISO 55001) y responde al desafío de garantizar la productividad y seguridad en condiciones mineras extremas.

Palabras Clave

1. Mantenimiento preventivo
2. Komatsu CAEX 930E-4
3. Contactores RP
4. Metodología AMFEC
5. División Andina – Codelco

ÍNDICE

RESÚMEN

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN EMPRESA KOMATSU-CODELCO, MANTENIMIENTO GENERAL

1. Identificación de productividad y fallas en operaciones

1.1. Objetivos

1.1.2. Objetivos generales

1.1.3 Objetivos específicos

1.2. Historia Minería en Chile

1.3. Misión y Visión Komatsu, Andina

1.3.1. Cronología Komatsu

1.3.2. Cronología Codelco

1.3.3. Ubicación Geográfica

1.4. Contexto operacional

1.4.1. Caex 930E-4 Especificaciones

1.4.2. Capacidad y Producción Caex 930E-4

1.4.3. Operación segura Caex 930E-4

1.4.4. ¿Qué es el mantenimiento?

1.4.5. Importancia mantenimiento planificado y costes asociados

CAPÍTULO 2: IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICA MEDIANTE ANÁLISIS DE LA CAUSA PRINCIPAL.

- 2.1. Definición de problemática
- 2.1.2. Descripción general de la falla
- 2.1.3. Identificación de la falla ocurrida
- 2.1.4. Inspección secuencial de los componentes dañados
- 2.1.5. Proceso de cambio de componentes dañados
- 2.1.6. Diagrama asociado a la falla ocurrida
- 2.1.7. Plan de mantenimiento preventivo para contactares RP
- 2.1.8. Propuesta plan de mantenimiento

CAPÍTULO 3: PROCESO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EQUIPOS KOMATSU, MEDIANTE INDICADORES DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD.

- 3.1. Proceso mantenimiento
- 3.1.2. Mantenimiento mensual CAEX 930E-4
- 3.1.3. Mantenimiento específico
- 3.1.4. Inspección cada 12 horas de uso
- 3.1.5. Cuadro comparativo PALASPC/CAEX
- 3.1.6. Indicadores de disponibilidad
- 3.1.7. Identificación modo de falla, efectos y consecuencia
- 3.1.8. Identificación modo de falla (930E-4)
- 3.1.9. Efecto y consecuencias modos de fallo
- 3.2.1. Método detección modos de fallo.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

- Ilustración 1-1 Imagen ubicación Codelco
- Ilustración 1-2 Costes en el mantenimiento
- Ilustración 2-1 Mal torqueo perno sujeción bobina
- Ilustración 2-2 Barra vertical quemada
- Ilustración 2-3 Condensadores de Blower quemados
- Ilustración 2-4 Sensores análogos VAM/VAM2 quemados
- Ilustración 2-5 Arnés eléctrico quemado
- Ilustración 2-6 ICP backplane quemadas
- Ilustración 2-7 Gabinete ICP programado
- Ilustración 2-8 Condensadores
- Ilustración 2-9 Arnés eléctrico
- Ilustración 2-10 Busbar de chopper
- Ilustración 2-11 Sensores análogos nuevos
- Ilustración 2-12 Placa madre backplane nueva
- Ilustración 2-13 Partes internas contactor
- Ilustración 2-14 Partes internas (explicativa)
- Ilustración 3-1 Caex en naves de mantención

INDICE DE TABLAS

- Tabla a.1 cuadro comparativo PALASPC/CAEX
- Tabla a.2 Indicador de disponibilidad
- Tabla a.3 fallas ocurridas, indisponibilidad y numero de eventos
- Tabla a.4 Identificación modos de falla
- Tabla a.5 Severidad, ocurrencia, disponibilidad
- Tabla a.6 Subcomponentes
- Tabla a.7 Detección modos de fallo

INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido de la industria minera chilena ha impulsado el desarrollo e implementación de soluciones tecnológicas de alto nivel para la operación continua y eficiente de los equipos de producción. En este contexto, la confiabilidad de los equipos mineros pesados, como los camiones CAEX 930E-4 de Komatsu, adquiere un rol estratégico en la cadena de valor productiva. La División Andina de Codelco representa uno de los entornos operacionales más exigentes del país, donde la eficiencia en la gestión del mantenimiento es clave para alcanzar altos niveles de disponibilidad y continuidad operativa.

El presente trabajo se enmarca en la necesidad de mejorar los sistemas de mantenimiento aplicados en equipos de alta criticidad, particularmente ante la evidencia de fallas eléctricas graves como la ocurrida en el contactor RP2 del CAEX 930E-4. Esta falla, más allá de su causa técnica inmediata, evidenció una serie de falencias sistemáticas en la planificación, ejecución y control del mantenimiento, derivando en importantes pérdidas operacionales.

El análisis de esta problemática permitió identificar factores humanos, organizacionales y técnicos que convergen para explicar el fallo, generando una oportunidad única para rediseñar el plan de mantenimiento a partir de datos reales. En este sentido, la aplicación del Análisis Modal de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC) se vuelve central como metodología estructurada para evaluar riesgos, priorizar tareas y construir un sistema de mantenimiento más robusto y adaptado al contexto real de operación.

El mantenimiento preventivo, tradicionalmente concebido como una programación de tareas por ciclos horarios, ha demostrado ser insuficiente para abordar modos de falla complejos que involucran componentes electrónicos, condiciones de operación extremas y errores humanos. Por esta razón, esta investigación propone un modelo de mantenimiento basado en el análisis de causa raíz y en la criticidad de los componentes.

A partir del estudio de campo realizado en terreno, se recopiló información relevante sobre los síntomas de la falla, la secuencia de fallas asociadas y el tiempo promedio de reparación, lo que permitió calcular indicadores técnicos como MTBF, MTTR y

disponibilidad real. Estos indicadores evidencian que el modelo actual requiere una mejora integral, tanto a nivel técnico como procedimental.

La propuesta del plan de mantenimiento preventivo incluye medidas concretas como la implementación de sensores de temperatura en los contactores, rediseño del sistema de anclaje para eliminar pernos torqueables y el uso de plataformas digitales para registrar cada acción de mantenimiento. Estas medidas no solo buscan reducir la ocurrencia de fallas, sino también optimizar la trazabilidad, la seguridad y la formación técnica del personal.

El plan propuesto tiene como finalidad no solo aumentar la disponibilidad de los equipos, sino también reducir la exposición al riesgo de los trabajadores, minimizar costos no planificados y fortalecer la cultura preventiva dentro de la operación minera. La metodología AMFEC permite priorizar intervenciones y asignar recursos con mayor eficiencia, lo que se traduce en una mejor gestión de los activos.

Finalmente, esta tesis constituye un aporte práctico y técnico a la gestión del mantenimiento en faenas mineras de alta exigencia, alineado con los estándares internacionales de confiabilidad operacional y seguridad. Su aplicación permitirá avanzar hacia un modelo de mantenimiento proactivo, basado en datos, análisis crítico y mejora continua.

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN EMPRESA KOMATSU-CODELCO,
MANTENIMIENTO GENERAL

1. Descripción de las empresas Komatsu y Codelco, su historia, contexto operacional y sistema de mantenimiento aplicado en los camiones CAEX 930E-4

La industria minera chilena ha experimentado un crecimiento sostenido durante las últimas décadas, impulsada por el desarrollo tecnológico, la implementación de procesos de automatización y la adopción de estándares internacionales en la gestión de activos. En este contexto, dos actores claves convergen para asegurar la eficiencia, productividad y sostenibilidad de la minería a gran escala: Komatsu, empresa de origen japonés líder en maquinaria pesada y soluciones de mantenimiento, y Codelco, la mayor empresa estatal productora de cobre a nivel mundial.

Historia y perfil de Komatsu: innovación al servicio de la industria minera

Komatsu Ltd. fue fundada en 1921 en Japón como respuesta a la necesidad de transformar la industria minera a través de la mecanización y el desarrollo tecnológico. Su origen se remonta al empresario Meitaro Takeuchi, quien impulsó el crecimiento de la empresa con un enfoque humanista, vinculado al progreso industrial, la educación técnica y el bienestar de la comunidad. A lo largo de su historia, Komatsu ha mantenido un compromiso constante con la innovación, posicionándose como uno de los fabricantes de maquinaria más relevantes en el ámbito de la minería, construcción y forestal (Komatsu Latinoamérica, s.f.).

En el contexto chileno, Komatsu se ha consolidado como proveedor estratégico de maquinaria pesada para la gran minería. La compañía ofrece no sólo el suministro de equipos, sino también servicios integrales de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo, apoyándose en tecnologías como la analítica de datos, sistemas de monitoreo en tiempo real y soluciones autónomas. En faenas como la División Andina de Codelco, la presencia de Komatsu es esencial para mantener operativos equipos de gran escala como los camiones CAEX 930E-4, cuya productividad depende directamente de la gestión eficiente del mantenimiento.

Perfil de Codelco: empresa estatal líder en producción de cobre

Por su parte, la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es una empresa estatal creada oficialmente en 1976 mediante el Decreto Ley N.º 1.350, como resultado del proceso de nacionalización del cobre llevado a cabo en 1971 durante el gobierno del presidente Salvador Allende. Desde entonces, Codelco se ha convertido en el principal productor mundial de cobre, con más de 1,7 millones de toneladas métricas de cobre fino producidas en 2020, lo que representa aproximadamente el 8% de la producción mundial (Codelco, 2021).

Codelco opera ocho divisiones a lo largo del país: Chuquibambilla, Radomiro Tomic, Salvador, El Teniente, Gabriela Mistral, Ministro Hales, Ventanas y División Andina, siendo esta última una de las más estratégicas por su ubicación y volumen de producción. En esta faena, ubicada en la Región de Valparaíso a más de 3.000 metros de altitud, se combinan operaciones subterráneas (Río Blanco) con rajo abierto (Sur Sur), lo que exige una flota de maquinaria robusta, confiable y de alto rendimiento (Codelco, 2020).

Contexto operacional y alianza estratégica Komatsu–Codelco

El contexto operacional en División Andina se caracteriza por condiciones extremas de temperatura, altitud y carga de trabajo. En este entorno, Komatsu provee soluciones de maquinaria a través de modelos como el CAEX 930E-4, un camión de alto tonelaje diseñado para trabajar en jornadas extensas, acarrear hasta 290 toneladas métricas y operar de forma continua durante al menos 500 horas antes de su primera mantención. El mantenimiento de estos equipos no es un proceso aislado, sino que se enmarca dentro de un plan integral de gestión de activos, donde la empresa Komatsu aplica estándares basados en la normativa ISO 55001 y metodologías como el Análisis de Modo de Falla y Efecto Crítico (FMECA).

La relación entre ambas empresas no se limita a un vínculo cliente-proveedor, sino que responde a un modelo de asociación estratégica, donde Komatsu participa activamente en la planificación y ejecución de las tareas de mantenimiento dentro de las instalaciones de Codelco. Este trabajo colaborativo permite implementar mejoras continuas, compartir

información técnica y monitorear el estado de los componentes críticos mediante diagnósticos en línea.

Problemática técnica: Falla en el contactor RP2 del CAEX 930E-4

En el marco de este contexto, uno de los desafíos más relevantes ha sido la ocurrencia de fallas críticas en el sistema eléctrico de los camiones CAEX, en especial en componentes como el contactor RP2, cuya función es esencial para el control de la propulsión y el frenado del equipo. El caso abordado en esta investigación corresponde a un cortocircuito provocado por un torque inadecuado en los pernos de sujeción de la bobina del contactor RP2, lo cual desencadenó una serie de fallas en cadena: quemaduras en la barra vertical de chopper, condensadores de blower sobrecalentados, daño en sensores análogos VAM1 y VAM2, deterioro del arnés eléctrico y destrucción parcial de la placa madre (tarjeta ICP Backplane).

Esta falla generó una indisponibilidad total de 72 horas, afectando gravemente la producción y evidenciando la necesidad de reforzar los procedimientos de mantenimiento preventivo. El análisis técnico realizado en terreno permitió determinar que el origen de la falla fue de carácter humano (mal torqueo) pero con consecuencias estructurales en múltiples sistemas eléctricos del equipo.

Plan de mantenimiento actual y mejora basada en datos de terreno

Actualmente, Komatsu implementa un plan de mantenimiento escalonado para los equipos CAEX 930E-4, dividido en ciclos de 500, 1000, 2000 y 2500 horas de operación. Cada mantenimiento contempla tareas como el cambio de filtros hidráulicos, verificación de componentes eléctricos, revisión de tolva, lubricación de motores eléctricos, limpieza con microfiltradora, inspección visual de neumáticos, entre otros. Sin embargo, esta estructura no contempla una revisión específica del torque de los pernos del contactor RP2, lo que permitió que una falla de origen mecánico no fuera detectada a tiempo.

La información levantada en terreno, así como el análisis del historial de fallas, permitió calcular un MTBF de 149 horas y un MTTR de 24 horas, con una disponibilidad esperada de 86,12%. Si bien esta cifra está dentro de un rango aceptable, se encuentra por debajo

del umbral óptimo (90–95%) que la empresa busca mantener para equipos críticos. Por ello, se propone implementar una revisión de torque en cada mantención mensual, así como encapsular el contactor con un sistema tapafuego que impida la propagación de arcos eléctricos, y rediseñar el sistema de anclaje para evitar el uso de pernos susceptibles al error humano.

Análisis

La gestión de mantenimiento en equipos de alta producción, como los CAEX 930E-4, es un componente esencial del éxito operativo en faenas mineras de gran escala. La alianza entre Komatsu y Codelco Andina permite integrar capacidades tecnológicas, experiencia en terreno y estándares de clase mundial para enfrentar los desafíos del entorno. No obstante, las fallas como la ocurrida en el contactor RP2 ponen en evidencia la necesidad de reforzar los mecanismos de control, monitoreo y mejora continua.

Este análisis operacional demuestra que la recopilación y análisis de datos en terreno no sólo permite diagnosticar fallas, sino también identificar oportunidades de mejora en los planes de mantenimiento, reduciendo la indisponibilidad, mejorando la seguridad y asegurando la continuidad operacional. La aplicación de metodologías como FMECA, el uso de indicadores como MTBF/MTTR, y la planificación detallada, son herramientas fundamentales para consolidar un modelo de mantenimiento robusto y adaptable a las exigencias de la minería del siglo XXI.

1.1. Objetivos

1.1.2. Objetivo general

Conocer el plan de mantenimiento preventivo en equipos Komatsu específicamente de la línea CAEX 930E-4, dado que son de alta productividad y equipo primordial dentro de la empresa, lo cual siempre busca mantener operativo el equipo bajo parámetros mantenimiento preventivo, conocer la falla ocurrida en contactor RP2 y solución de esta problemática.

1.1.3. Objetivos específicos

1. Identificar los modos de falla críticos en el contactor RP2 del camión CAEX 930E-4 a través de la metodología AMFEC, considerando su severidad, ocurrencia y capacidad de detección.
2. Evaluar el impacto técnico-operacional de la falla del contactor RP2 y su efecto sobre los sistemas interdependientes del equipo, a través del análisis de datos de terreno e indicadores de mantenimiento (MTBF, MTTR y disponibilidad).
3. Diseñar e implementar un nuevo plan de mantenimiento preventivo específico para el sistema eléctrico del camión CAEX 930E-4, integrando mejoras técnicas, rediseños estructurales y monitoreo predictivo.

1.2. Historia Minería en Chile

Chile es un país rico en reservas de minerales, es por esto, por lo que a lo largo del tiempo estas se han convertido en el ingreso más importante para el país. Si bien hoy en día los yacimientos de cobre son los más relevantes en el territorio nacional, estos pasaron por un proceso de chilenización en la cual se llevaron a cabo las conformaciones mixtas de empresas chilenas con empresas privadas extranjeras, esto provocando que la nacionalización que culminó en julio del año 1971 resolviera que estos yacimientos pasaran a ser propiedad del gobierno de Chile mediante la creación de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO CHILE), la cual es la encargada de la explotación y de la comercialización de estas.

El boom de la industria del cobre toma suma importancia debido a la aparición de la industria eléctrica que hizo rentable la explotación a gran escala de minerales de bajo contenido de cobre. Durante la década entre 1990 y 2000, el sector minero mostró un dinamismo sin precedentes, resultado de una abundante inversión extranjera.

Actualmente la minería en Chile es una de las principales actividades de la economía nacional ya que esta industria aporta con el 10,1% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y esta es el área con mayor inversión extranjera con el 33,3% del total de ella, y todo esto sumado a que en la actualidad Chile es el mayor productor de cobre, nitratos

naturales, yodo y litio a nivel. Hoy en día hay varias grandes empresas mineras en nuestro país como lo son las que están presente en la primera región de Chile: COLLAHUASI, TECK QUEBRADA BLANCA, CERRO COLORADO, COSAYACH, SQM, entre otras.

1.2.1. Misión/Visión Komatsu; Andina

Misión: Komatsu desde los inicios de la empresa, ha sido líder en minería, construcción y forestal, innovando siempre en cuanto a maquinaria industrial, y hoy en día en lo que es principalmente la autonomía en sus nuevos proyectos que brindan mayor rendimiento para las empresas que los contratan.

Misión: Codelco, Andina; Siendo una empresa estatal su primordial objetivo es realizar su trabajo con altos estándares de salud ocupacional y seguridad, siendo efectivos y eficientes en generando las mejores condiciones para sus trabajadores, tanto propios de la empresa, como contratistas.

Visión: Komatsu tiene como expectativa a futuro es seguir innovando en cuanto a autonomía, lo cual es un requerimiento que cada día se ha ido fortaleciendo y ocasionando una disminución el factor de deceso humano en las empresas al momento de realizar actividades de excesivo peligro. Codelco en 2015: “Récord de cinco años sin fatalidades, con una Tasa de frecuencia menor a 1 y procesos peligrosos automatizados”.

1.2.2. Cronología Komatsu

Las raíces de Komatsu se remontan hace más de 100 años, en un frondoso bosque de Japón que albergaba una mina de cobre, vital para una comunidad cercana. Fundador, *Meitaro Takeuchi*, era un empresario con una extraordinaria visión humanitaria, comprometido con mejorar la calidad de vida de la comunidad, desarrollar las generaciones futuras y crecer con las necesidades de la sociedad. Dedicado a los ideales de la educación para el pueblo y decidido a traer a Japón la última tecnología industrial del extranjero para ayudar a construir una nación competitiva e industrial.

En 1902, financió proyectos para mecanizar los procesos mineros y enseñar nuevas aptitudes a la gente de la comunidad. Creó escuelas, envió a su personal al extranjero para que aprendiera las últimas técnicas y compró máquinas para ayudar a mejorar la eficiencia de la mina. Al mismo tiempo, financió y apoyó un departamento de ciencia e ingeniería en la Universidad de Waseda, en Tokio, así como una escuela industrial local para mejorar significativamente las oportunidades y opciones educativas en las zonas rurales cercanas a la ciudad de Komatsu; Takeuchi también sabía que los depósitos de cobre de la mina se agotarían pronto y estaba decidido a proporcionar una nueva fuente de empleo a los residentes de la zona, así que en 1917 fundó Komatsu Iron Works, una empresa de maquinaria para el mantenimiento de equipos mineros. En mayo de 1921, reunió a un grupo de inversionistas y formó Komatsu Manufacturing Co., fue el comienzo de la empresa Komatsu que conocemos hoy.

La nueva empresa comenzó a fabricar productos de acero fundido, proporcionando empleo a muchos de los que habían dependido de la mina. El primer producto fabricado fue una prensa en 1924: una máquina formadora de láminas de un cilindro, probablemente utilizada para dar forma a artículos como botes o componentes para productos de uso cotidiano, como ollas y sartenes. En 1931, cuando el gobierno japonés quería mecanizar la industria agrícola y abandonar la producción de tracción animal, Komatsu estaba preparada para suministrar al país el primer tractor agrícola sobre orugas. En vísperas de la Segunda Guerra Mundial, cuando los presupuestos de defensa japoneses y la construcción naval aumentaron, los equipos de Komatsu ayudaron a satisfacer la demanda de una gran variedad de productos requeridos por los militares. Una vez terminada la guerra, el gobierno buscó la ayuda de Komatsu para aumentar la producción de tractores agrícolas, arados y otros equipos.

1.2.3. Cronología Codelco

La Corporación Nacional del Cobre de Chile es una empresa estatal chilena dedicada a la explotación minera **cuprífera**, rubro en el que es una de las mayores compañías del planeta. Codelco opera **8** centros de trabajo, ubicados entre la región de Antofagasta y la región del Libertador General Bernardo O'Higgins (de norte a sur) y también su casa matriz ubicada en Santiago.

Historia de Codelco se remonta al proceso de *nacionalización* de la Gran minería del cobre que durante gran parte del siglo XX fue realizada por capitales estadounidenses. En 1967, el Estado se convirtió en accionista mayoritario de las principales minas cupríferas del país, hasta que, en 1971, durante el gobierno de **Salvador Allende**, las compañías fueron totalmente expropiadas y estatizadas. Administradas cada una como una sociedad separada a cargo de la *Corporación del Cobre*, éstas finalmente se unificarían en una única empresa, Codelco Chile, encargada de la explotación de los yacimientos y la comercialización de sus productos, con la promulgación del Decreto Ley N° 1.350 del 1 de abril de 1976.

Codelco es el productor de cobre **más** grande del mundo y la empresa que **más contribuye** a la economía chilena. Durante el año **2020**, su producción totalizó **1.727.355 TMF** de cobre fino (incluidas sus participaciones en *El Abra* y *Anglo American Sur*), la cual corresponde al **8%** de la producción mundial y un **29%** de la producción nacional. Actualmente, esta empresa cuenta con un total de 15.267 empleados aproximadamente.

Codelco concentra el **7%** de las reservas globales de cobre, contenidas en yacimientos de clase mundial y, con una participación de **10%**, es el **segundo** mayor productor de molibdeno. La compañía cuenta divisiones mineras: *Radomiro Tomic*, *Chuquibambilla*, *Gabriel de la Cruz*, *Ministro Hales*, *Salvador*, *Andina* y *El Teniente*.

En Chile, desde la *nacionalización del cobre* en **1971**, hasta el año **2019**, los yacimientos y operaciones de Codelco han aportado **US\$ 115 mil millones** a las arcas fiscales. **US\$ 2.078 millones** de excedentes generó Codelco en **2020**, **55% más** que en **2019**. Parte sustantiva de la mejor cifra se explica por la gestión de la compañía. Poco más de 46% es sólo buena administración y el resto es precio y tipo de cambio cerca de **9%**.

1.2.4. Ubicación geográfica

División Andina se ubica a más de 3 mil metros de altura sobre el nivel del mar en la Región de Valparaíso. Las operaciones combinan rajo abierto y mina subterránea. En la actualidad esta división realiza la explotación de minerales en la mina subterránea de Río Blanco y en la mina a rajo abierto Sur Sur.

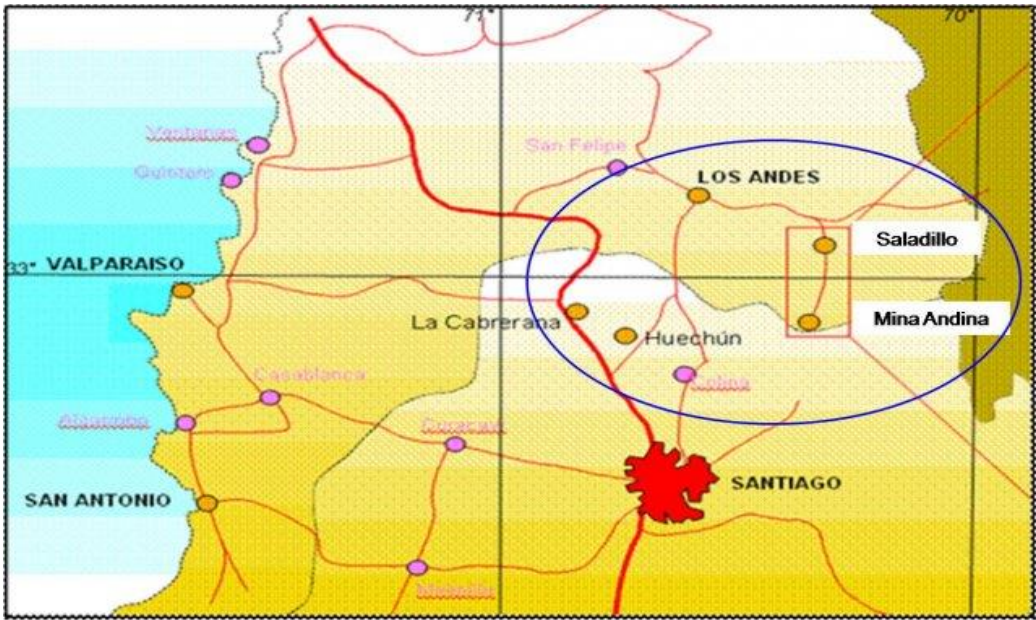


Ilustración 1-1
Imagen ubicación Codelco
Fuente: Google

1.2.4 Contexto operacional

Komatsu es una empresa que presta servicios a Codelco, y dentro de estos servicios se enfocará en los análisis de mantenimiento del orden preventivo de estos equipos, centrándose en la línea de camiones **Caex 930E-4** (camiones chuqui), la cuál es el más común y que genera mayor productividad dentro de este rubro minero.

Dentro de estos servicios, se realizan en faena 4 a 5 categorías, como lo son equipos de movimiento de tierra (palas pc), retroexcavadoras de menor tamaño, cargadores frontales,

camiones aljibes (transporte de agua) y los camiones Caex **930E-4**, considerando que esta línea es de alta producción, aunque cabe mencionar que hoy en día actualmente están en faena los modelos más actualizados que son 960-E Y 980E, lo cual presentan un aumento de producción mucho mayor, un impacto medio ambiental mucho menor, y sobre todo tienen un porcentaje mayor en cuanto a autonomía, lo cual aumenta producción y reduce falla humana

Caex 930E-4

Este equipo principalmente cuenta con un mantenimiento de 500 hr. de operación, 1000 horas de operación, 2000 y 2500 horas de operación. Este tipo de mantenciones son muy parecidas entre sí, normalmente cada mantención dura aproximadamente 24 horas, lo cual transcurrido estas horas el equipo sale de las naves de mantención (garaje de trabajo) siendo que ya estaría preparado para ser trasladado devuelta a faena y no producir fallas durante las horas de trabajo.

Mantenimiento Palas PC

Retroexcavadoras de mayor tamaño modelo 5500, con una capacidad de carga por palada equivalente a 40.000 a 47.000 kg aproximadamente; se les realizan **una** mantención al mes, de un tiempo de duración de la tarea entre 12 a 16 horas, su duración de mantención es menor dado que su producción es mayor, como consecuencia de esto entre más tiempo funcione es mejor para la producción, de lo contrario los camiones **Caex** (alrededor de 10 camiones) estarán parados sin producción, lo cual ocasionará grandes pérdidas económicas ya que siempre se busca tener una mayor eficacia y rapidez en cuanto a producción.

Mantenimiento programado

Son tareas o trabajos programados, por ejemplo, si un equipo se le necesita cambiar en un futuro próximo ciertos componentes, se realiza un cálculo aproximado para hacer este trabajo en el próximo mantenimiento, analizando previamente y confiando que este equipo no tendrá fallas antes de lo previsto; considerando las horas efectuadas en el mantenimiento a realizar como el cambio de componente sumando estas horas en el próximo mantenimiento

Caex 930E-4 especificaciones

- El 930E-4 es un camión tolva, para uso fuera de carretera, con Mando Eléctrico AC; El peso bruto del vehículo es de *1.100.000 lbs. (498.960 kg.)* El motor es un Komatsu SSDA16V160 de capacidad nominal **@ 2700 HP.**
- La cabina del operador ha sido diseñada para comodidad del operador y para permitir una operación segura y eficiente del camión. La cabina proporciona gran visibilidad, con una estructura integral ROPS/FOPS de 4 pilares, y un avanzado ambiente análogo para el operador

1.4.2 Capacidad y producción Caex 930E-4

Mediante el uso de diseños computacionales, análisis de elementos, pruebas dinámicas y estáticas a gran escala, el diseño del chasis ha sido estructuralmente mejorado, permitiendo acarrear **290 toneladas o 320 toneladas cortas**, entregando la más alta confiabilidad de la industria.

El **Caex 930E-4** realiza trabajos a diario alrededor de 10 horas continuas, realizando una buena productividad para la empresa, en conjunto con las palas PC5500, son equipos primordiales para la empresa; por ello su mantenibilidad es primordial y constante para evitar mantener los equipos en indisponibilidad.

1.4.3. Operación Segura Caex 930E-4

- Al inicio de cada turno, el operador debe realizar una cuidadosa inspección del camión antes de arrancar el motor.
- Prevenir es el mejor programa de seguridad evitando un posible accidente conociendo los requerimientos de seguridad del empleador, todas siendo regulaciones necesarias del lugar de trabajo, y el uso y cuidado del equipo manteniendo la seguridad del camión.

- Sólo operadores o técnicos calificados deben operar o mantener un camión Komatsu. Use la vestimenta apropiada. Ropa suelta, chaquetas y camisas desabotonadas, joyas etc., pueden engancharse en alguna protuberancia y provocar un accidente.
- Siempre use el equipo de seguridad personal que se entrega al operador, como casco, zapatos de seguridad, anteojos o antiparras de seguridad. En ciertas ocasiones el operador deberá usar dispositivos protectores de oídos para su propia seguridad.
- Cuando camine hacia o desde el camión, mantenga una distancia segura de todas las máquinas, aun cuando el operador esté visible.

1.4.4 ¿Qué es el mantenimiento?

Se define como un conjunto de actividades se lleven a cabo para que un componente de un equipo o de una producción pueda continuar funcionando con un rendimiento óptimo, con un propósito en común, el cual es, alargar la vida útil de un componente, o en muchos casos, reemplazarlo por uno nuevo para mantener en un nivel constante la operabilidad del equipo para no provocar pérdidas económicas durante todo proceso en una empresa.

1.4.5. Importancia del mantenimiento planificado y costes asociados

La teoría tradicional consideró el mantenimiento como un ‘mal necesario’, siendo la principal preocupación de las direcciones industriales radicaba en disminuir los costos que se generan en un mantenimiento, contribuyendo de esta manera a la deducción de costo general de la empresa. Pero, puede verse que un mantenimiento inadecuado afecta a la totalidad del funcionamiento en una industria, planta, fábrica, etc. En donde ocurren:

1. Limitaciones en los volúmenes de producción
2. Puede ocasionar accidentes
3. Se generan daños hacia el medioambiente (contaminación)

4. En varias ocasiones se pueden generar costes indirectos que pueden superar largamente el coste tradicional de un mantenimiento cotidiano, tales como alquiler de equipos, arriendo de vehículos, contratación de servicios de reparaciones, etc.

Costes de mantenimiento

- Cuando se registran **los costos de mantenimiento**, se consideran gastos tales como; mano de obra tanto propia, como contratación externa, los materiales que son principal herramienta para todo trabajo, y por último el servicio de terceros (empresas contratista por lo general).
- Los costes poco considerados tales como; costos indirectos como lo son la pérdida de producción, pérdidas por **no** cumplimiento por plazos de entrega (generalmente se extiende el plazo), multas, cese de contratos, costes de accidentes laborales, mayores primas en los seguros, entre otros.

Imagen representativa de los costes en cuanto al mantenimiento



Ilustración 1-2

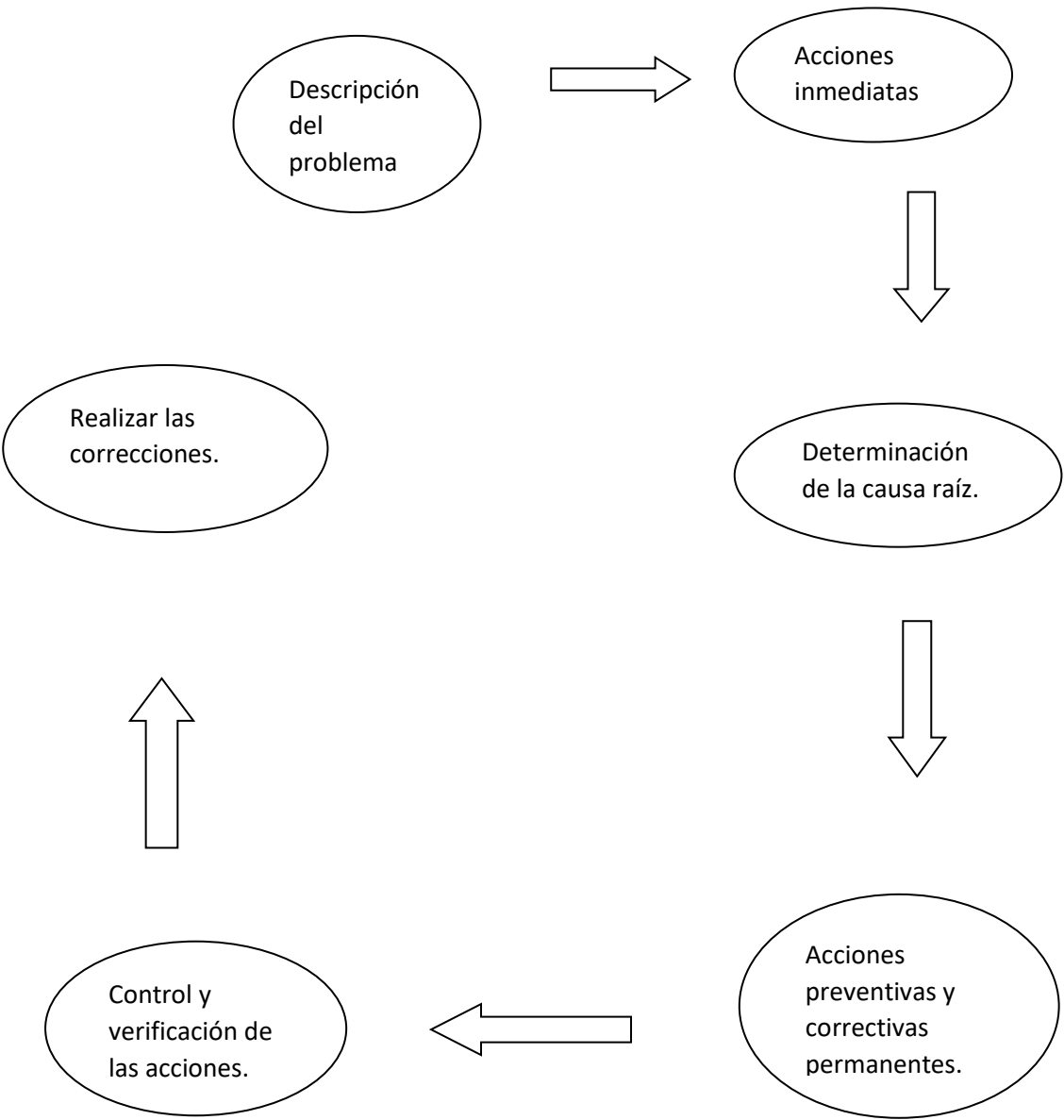
Costes en el mantenimiento

Fuente: Google

**CAPÍTULO 2: IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICA MEDIANTE
ANÁLISIS DE LA CAUSA PRINCIPAL.**

2.1. Definición problemática

Una problemática es un hecho, situación o cuestión que precisa de una solución. Es un conflicto que se presenta como inconveniente para alcanzar objetivos o estabilidad de distintos ámbitos.



2.1.2. Descripción general de la falla

- Posible causa o falla preliminar: Cortocircuito contactares RP2
- El equipo presenta falla en el sistema de propulsión por cortocircuito en gabinete por contactares RP.

Recopilación de datos:

Se recopilan antecedentes de falla inicial por cortocircuito de contactor RP2, se comienza con levantamiento de componentes para buscar las evidencias de daños, se analizan datos para cruzar información de parámetros anormales con las consecuencias provocadas (leves o graves), se realiza levantamiento de los 4 bancos de resistencias de retardo y se cambia banco RG1 completo, posteriormente se ejecuta cambio de componentes afectados y reparación de arnés eléctrico para normalizar gabinete de potencia.

Una vez concluidos estos trabajos se comienza con pruebas operacionales en la cual se presenta una desviación en un parámetro análogo que tiene relación con la carga de motor diésel que interpreta el control del equipo (HPADJ) arrojando un valor negativo, se realizan mediciones del circuito involucrado no encontrando desviaciones. Seguidamente se revisa panel de control de tarjetas que reciben la información del circuito descrito y se evidencian síntomas de temperatura en tarjeta backplane (conector electrónico en paralelo conectado con otros y con un pin de seguridad) que es la tarjeta madre dentro del circuito electrónico del equipo.

2.1.3. Identificación de la falla ocurrida

Inicialmente se procede a investigar la falla ocurrida en el equipo, dada la toma de datos obtenidas, se procede a la identificación del proceso a realizar. Se logra identificar que la falla ocurrida fue producida por un mal torqueo realizado en uno de los componentes del contactor RP2.

- La falla ocurrió con el equipo en movimiento mientras el conductor del camión iba aplicando freno de retardo mientras descendía de un camino en subida.
- Se procede a despejar el área de trabajo para retirar el componente que generó la falla.
- Se retira el contactor RP2 por completo, se comienza a desarmarlo para verificar la falla principal encontrando decoloración en la cabeza del perno.

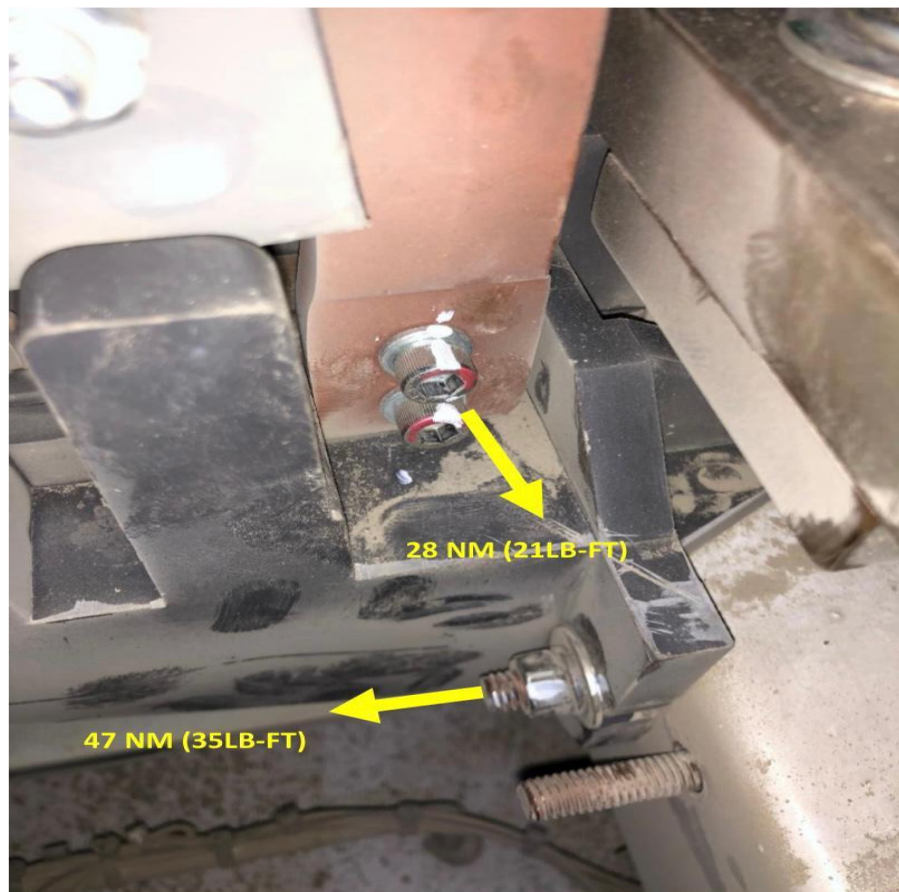


Ilustración 2-1

Mal torqueo perno sujeción de bobina

Fuente: fotografía presencial

2.1.4 Inspección secuencial de los componentes dañados

Bajo la inspección visual y en terreno del problema del cortocircuito, se procede a verificar los componentes eléctricos que conllevan al sistema e identificar componentes internos involucrados, dado el problema observado visualmente se procede al levantamiento de componentes para buscar otras fallas eléctricas asociadas a este problema, y así poder llevar a cabo un proceso correcto en cuanto a la toma de datos obtenidos y realizar un buen mantenimiento en el equipo

Cómo se siguió secuencialmente el circuito que conlleva a la placa madre del equipo, se puede observar otra falla de sobrecalentamiento de golpe en el componente, este se presentó inicialmente como una falla en la barra vertical de chooper, que a simple vista se pueden observar las quemaduras que en esta se produjeron.



Ilustración 2-2

Barra vertical quemada

Fuente: Fotografía presencial

Luego de verificar el segundo componente dañado, se procedió a seguir realizando el chequeo visual para continuar con la investigación, se logró encontrar otra quemadura en los condensadores de Blower quiénes cumplen la función de disipar el calor generado en las parrillas (resistencia eléctrica $\text{ohm}\Omega$), en este caso sufrieron un sobrecalentamiento por un golpe de sobrevoltaje que llegaron a quemarse.



Ilustración 2-3

Condensadores de blower quemados

Fuente: fotografía presencial

Continuando con la investigación, se logra visualizar otro componente principal que son el VAM1 Y VAM2 respectivamente, los cuales también sufrieron un sobrecalentamiento y por consiguiente se presentó una falla repentina.

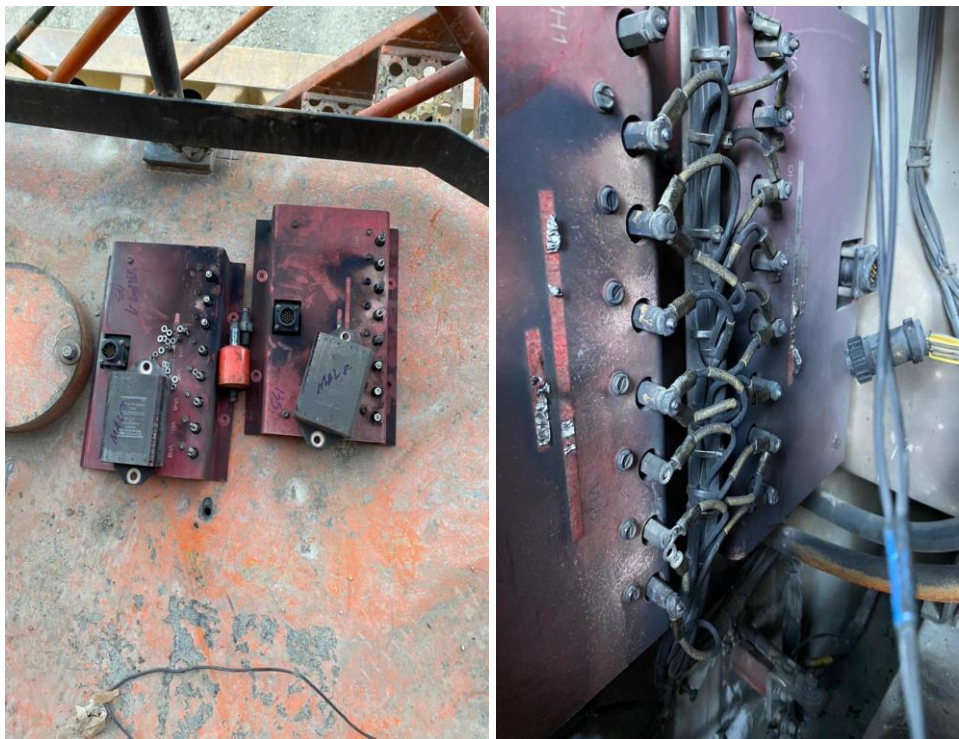


Ilustración 2-4
Sensores análogos VAM1 Y VAM2
Fuente: Fotografía presencial

Ya que la falla fue eléctrica, fue inevitable no darse cuenta de que el arnés eléctrico que conduce la electricidad hacia los componentes del equipo, no se hubiese quemado, dado que la carga eléctrica fue demasiada provocó un cortocircuito de grado mayor.

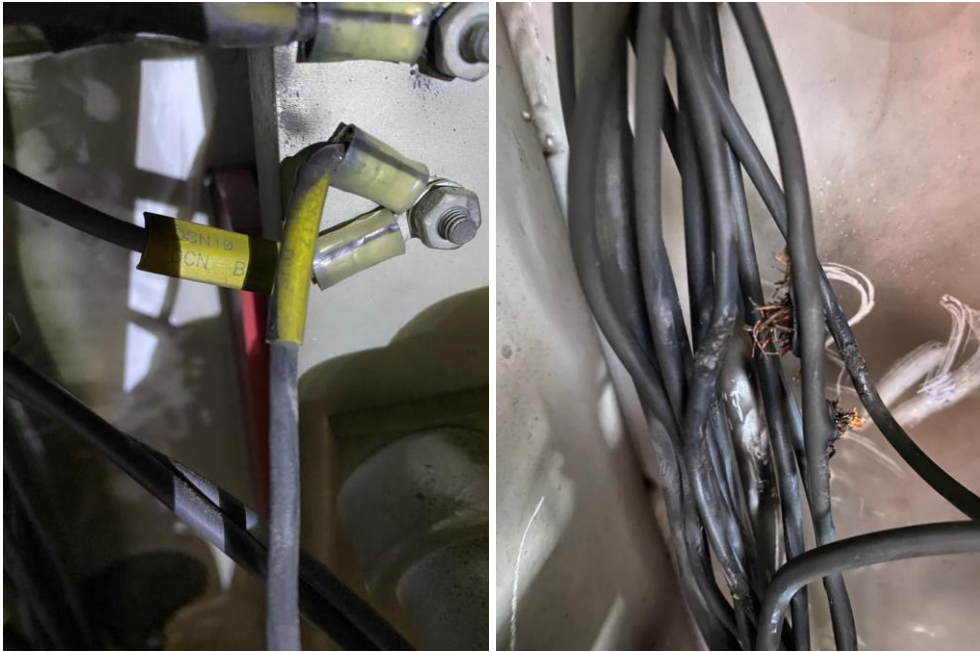


Ilustración 2-5
Arnés eléctrico quemado
Fuente: fotografía presencial

Al realizarse la observación y levantamiento de componentes del equipo Komatsu CAEX930E-4, se logra llegar hasta la placa madre del equipo, que inicialmente fue analizada mediante un aparato llamado pirómetro para saber la temperatura de este.

El componente principal, presentó índices de temperatura anormales, lo cual se procedió al levantamiento de esta unidad de componentes el cual se logró concluir que la tarjeta ICP BACKPLANE (placa madre) también sufrió quemaduras por medio del circuito eléctrico, que daño no sólo uno, sino que varios componentes eléctricos principales del equipo.

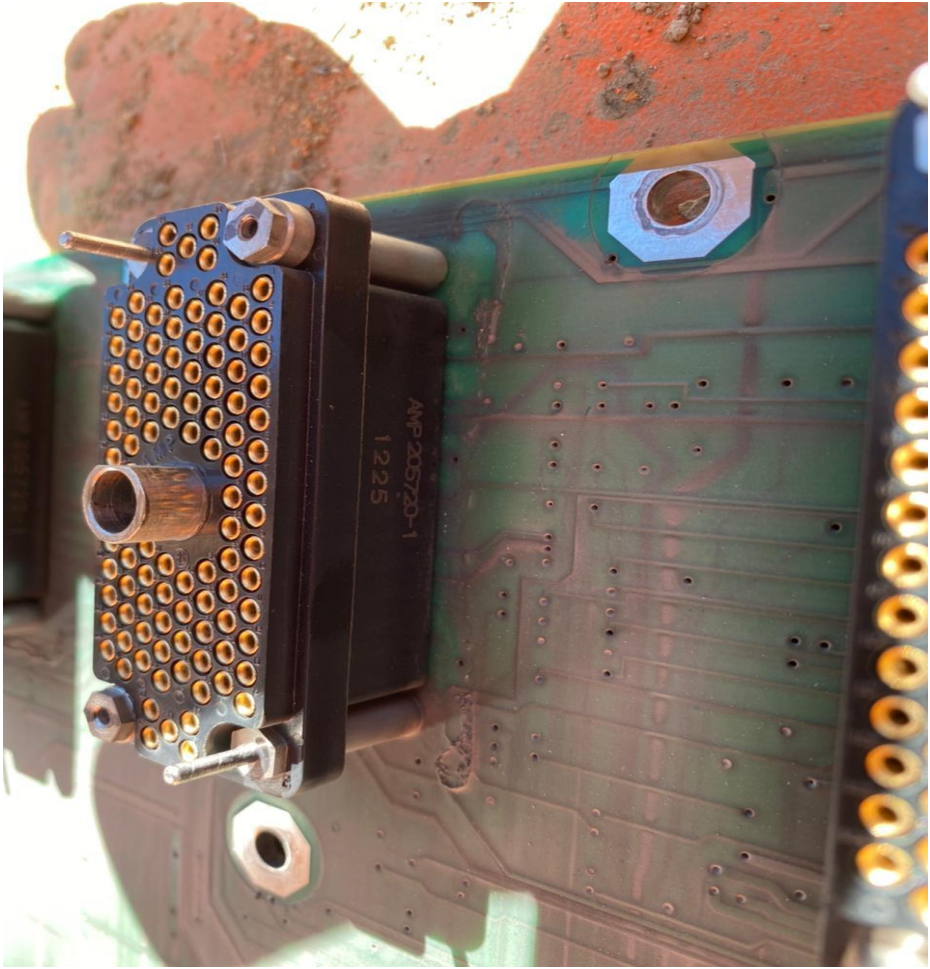


Ilustración 2-6

ICP Backplane quemada

Fuente: fotografía presencial.

En la imagen 2-6 de la tarjeta BACKPLANE, se presenta deterioro del componente, éste por regla de mantenimiento, no debe presentar ningún tipo de fisura, quemadura, ni mucho menos polvo. Por ser un componente crítico, se determinó un cambio de este ya que cumple la función de emitir señal hacia los contactores RP, lo cual trabajan en simultáneo, y son indispensables para el funcionamiento correcto dentro del equipo en el funcionamiento de la parte eléctrica.

La tarjeta BACKPLANE va situada dentro de una unidad llamada GABINETE ICP donde se sitúan varias tarjetas emiten señal hacia el equipo, pero en este caso, sólo sufrió quemaduras por sobrecalentamiento la placa madre del equipo CAEX930E-4.



Ilustración 2-7

Gabinete ICP (inspección control programado)

Fuente: fotografía presencial

2.1.5. Proceso cambio de componentes dañados

Al realizarse la inspección correspondiente a los componentes dañados, se procedió a retirar cada uno de estos y posteriormente se reemplazaron por componentes nuevos, para así evitar no reacondicionar y para también lamentar a corto plazo una posible falla repentina.



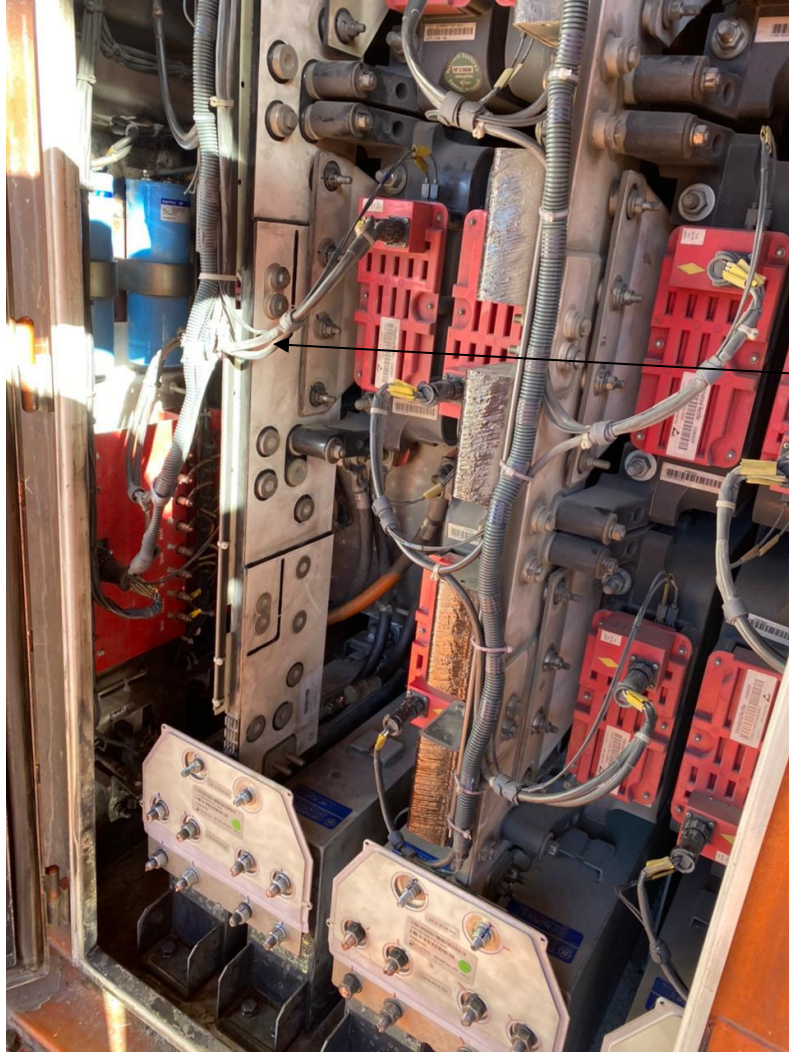


Ilustración 2-10

Busbar de chopper

Fuente: fotografía presencial

Finalmente, se procede con el cambio de los últimos componentes principales que se les presentó falla.

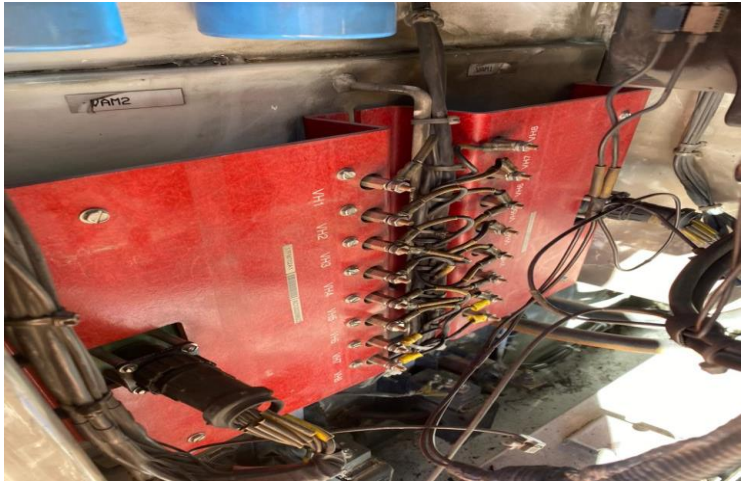


Ilustración 2-11

*Sensores análogos **VAM1/VAM2***

Fuente: fotografía presencial.

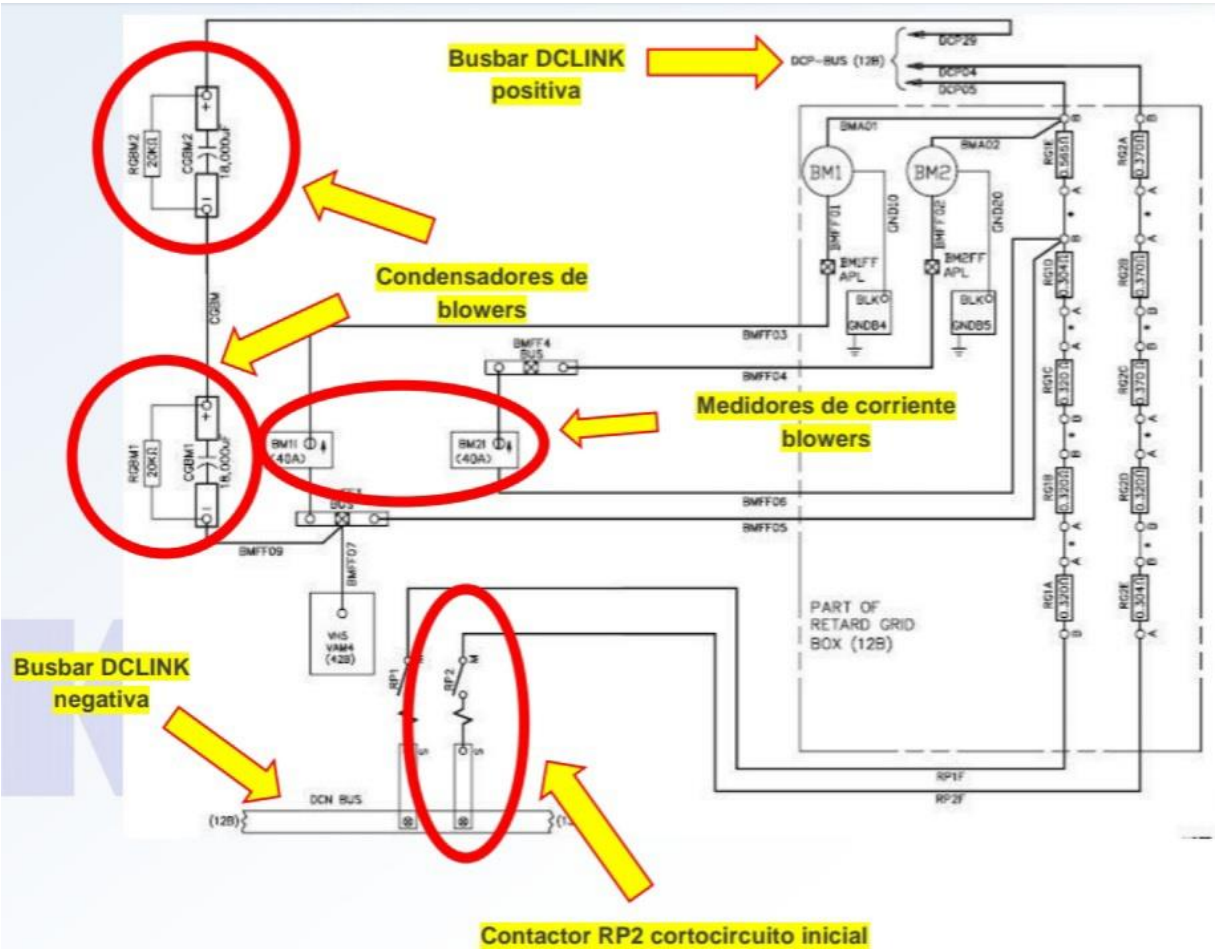


Ilustración 2-12

Placa madre backplane

Fuente: fotografía presencial.

2.1.6. Diagrama asociado a la falla ocurrida



En el diagrama se puede observar que el circuito se provocó por el mal torqueo en pernos sujeción bobina, las fallas no se presentaron a todo el sistema eléctrico que lo conlleva, sino que sólo a ciertos componentes del contactor RP2 y al anclaje de este, tanto en la busbar chopper negativa DCLINK (abajo), como la busbar chopper positiva DCLINK (arriba), mientras tanto las resistencias se mantuvieron intactas mientras que el contactor RP1 no presentó anomalías.

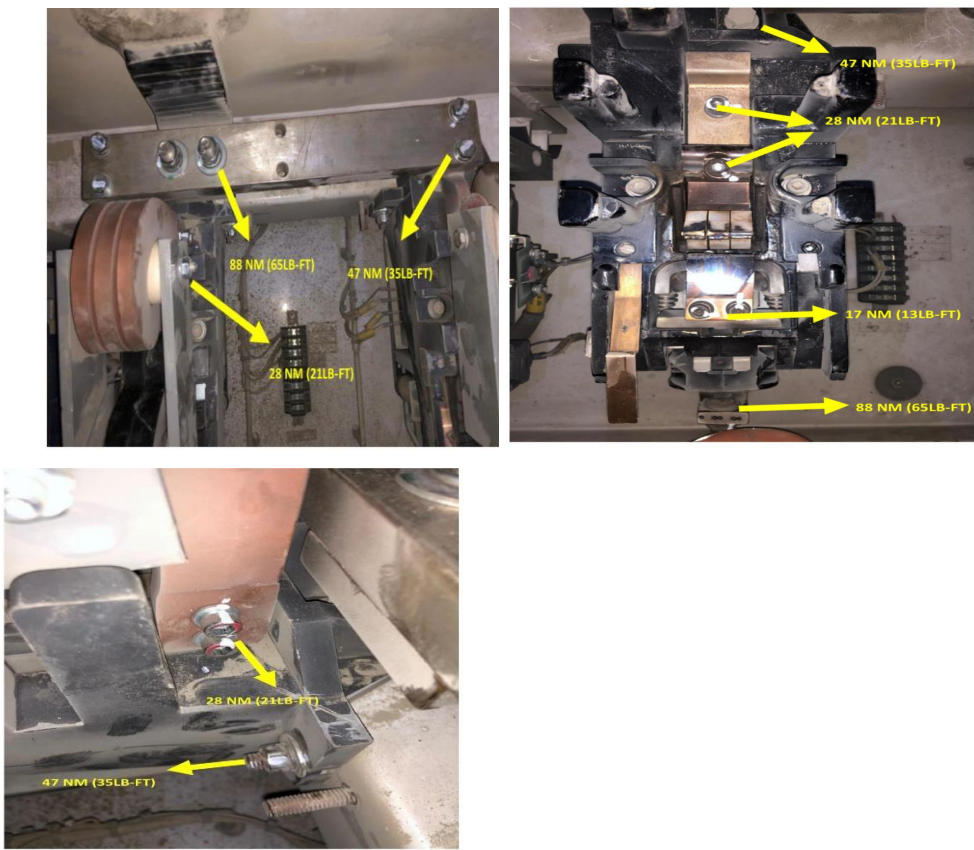
También tuvieron impacto negativo los condensadores de blower de igual manera sus medidores de corriente, y tanto así el arnés eléctrico fue dañado completamente.

2.1.7. Plan de mantenimiento preventivo falla contactor

La empresa **Komatsu Cummins**, cuenta con un plan de mantenimiento preventivo para los contactores RP, en este se debe realizar: cambio de tips móvil (2 unidades) y cambio de tips fijos (3 unidades).

Se procede a verificar la decoloración de sus pernos internos, lo cuales estos deben ser torqueados de acuerdo con la medida nominal normalizada, la cual se puede observar en la siguiente imagen:

Imágenes representativas de los torques que se deben realizar, por norma establecida por catálogo de Komatsu.



Ilustraciones 2-13
Partes internas de contactor
Fuente: fotografía presencial

Primero se debe retirar las piezas para poder llegar a los tips, tanto móviles, como tips fijos

Luego se deben retirar tips fijos y móviles, para realizar su cambio por unos nuevos.

Se debe extraer mediante una limpieza de aspirado, para retirar la escoria producida por el contacto entre tips móvil y tips fijos, ya que se puede producir mal contacto eléctrico si no se realiza una limpieza adecuada.

Para proceder al montaje de tips nuevos se debe realizar un correcto alineamiento de los tips fijo, en este caso 3 unidades por RP, para que no se produzca un arco eléctrico constante, ya que, al presentar una variación en la posición de algún tips, este no funcionaría en su correcta función.

Por último, luego del montaje de las piezas nuevas, se procede a realizar el torqueo de los pernos, los cuales son:

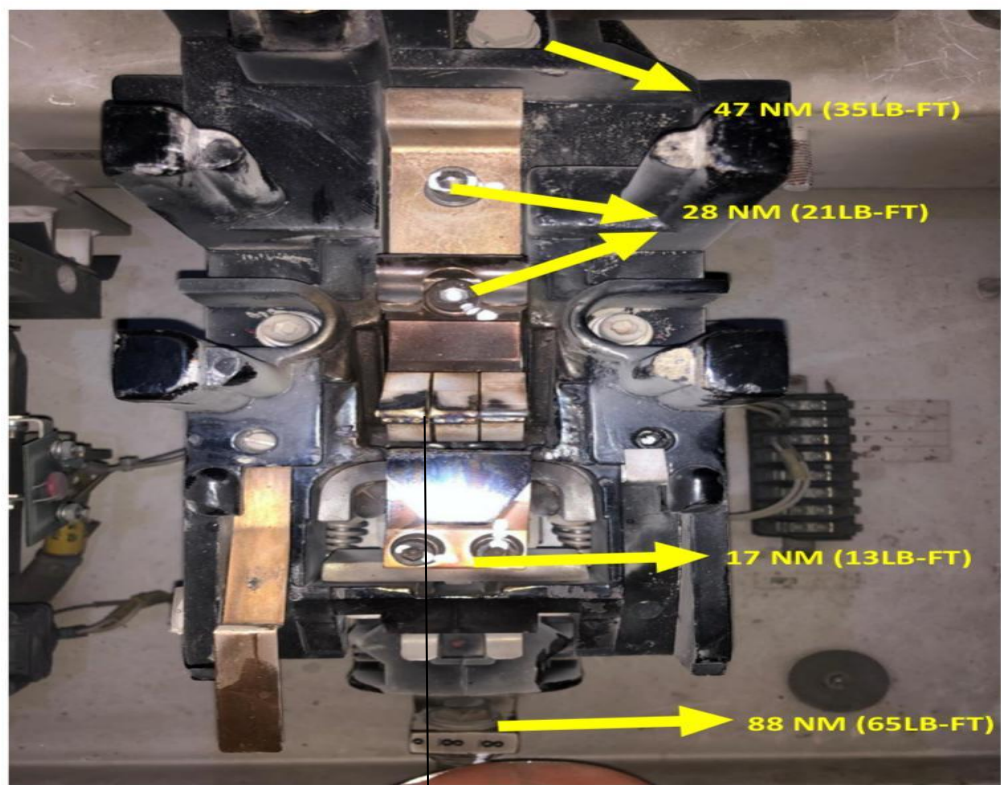
- Torque de RP interno: Tips fijo: **28 Nm ó 21 lb-ft**/Tips móvil: **17 Nm ó 13 lb-ft**
- Torque anclaje bobina de RP1/RP2: **28 Nm ó 21 lb-ft**
- Torque de barra (unión de RP's): **88 Nm ó 65lb-ft**
- Torque de anclaje de RP: **47 Nm ó 35 lb-ft.**

2.1.8. Propuesta mejora para contactores RP.

Basándose en el plan de mantenimiento preventivo, como mantenedor industrial se propone una propuesta de mejora para evitar que el equipo siga teniendo la misma falla a futuro, más allá que la falla haya sido factor humano, se propone lo siguiente:

El contactor en sí tiende a generar un arco eléctrico al interior donde se realiza el contacto (, y a través de este contacto eléctrico se genera una llama, para no se genere esta explosión en diversas direcciones, se propone encapsular el contactor mediante un tapafuego, para así evitar que se produzca daño a largo y corto plazo y reducir el nivel de escoria dentro del componente.

También se propone realizar un cambio en sistema de placas de anclaje de la bobina, fomentando un cambio completo de estas, para así evitar la explosión que se genera un arco eléctrico en estos casos siendo una acción peligrosa, y así también se regeneraría un sistema sin pernos de torque, para evitar nuevamente este tipo de fallas.



En simples palabras, se propone eliminar el sistema de contacto interno, y reemplazarlo por sistema de placas que interactúen todas entre sí y eliminar los pernos de torque.

Ilustraciones 2-14
Partes internas (explicativa)
Fuente: fotografía presencial.

CAPÍTULO 3: PROCESO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EQUIPOS
KOMATSU (930E-4) IDENTIFICANDO MÉTODO AMFEC.

3.1. Proceso mantenimiento

En la operación de equipos de alta producción, como el camión Komatsu CAEX 930E-4, la gestión del mantenimiento se vuelve una función crítica para asegurar la disponibilidad, eficiencia y seguridad del sistema productivo. En este sentido, resulta fundamental no solo ejecutar correctamente las tareas de mantenimiento, sino también comprender cuáles son las causas raíz que generan las fallas, a fin de aplicar acciones correctivas y preventivas con mayor efectividad.

En el contexto del presente estudio, el análisis de una falla crítica registrada en el contactor RP2 del equipo, así como la recopilación de datos en terreno y la revisión de registros técnicos, permitieron identificar un conjunto de factores que contribuyen significativamente a la ocurrencia de fallas. Entre ellos, destacan la coordinación deficiente entre los equipos de trabajo, la inadecuada ejecución de procedimientos operacionales estandarizados, y el factor humano vinculado a la fatiga física y mental del personal técnico.

Estas conclusiones no surgen de una especulación subjetiva, sino que se derivan de la aplicación práctica de herramientas como el Análisis de Causa Raíz (Root Cause Analysis, RCA) y el Análisis Modal de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC), aplicadas específicamente al caso del CAEX 930E-4. En particular, la investigación detallada sobre la falla en el contactor RP2 mostró que el torque incorrecto aplicado a los pernos de la bobina fue el desencadenante inmediato, pero no la causa raíz del problema. Al profundizar en el análisis, se evidenció que:

- El torque incorrecto se debió a una ejecución manual sin verificación cruzada, lo cual vulnera el protocolo de mantenimiento de Komatsu.
- No existía registro electrónico ni documental del torque aplicado, dificultando la trazabilidad de la operación.
- El técnico encargado no contaba con un protocolo de doble revisión ni con una pauta actualizada que indicara los torques normalizados según catálogo.
- El mantenimiento se realizó en un turno nocturno prolongado, donde la fatiga laboral era evidente según bitácoras de faena y entrevistas con el personal.

Estos elementos, al ser triangulados con los registros de mantenimiento previos y el historial de fallas en componentes similares, permitieron establecer que las causas raíz asociadas a este y otros eventos no están limitadas a una falla puntual de un componente, sino que están directamente relacionadas con:

1. Déficit en la coordinación interárea entre supervisores, técnicos y operadores.
2. Desviación en la aplicación de procedimientos técnicos normalizados.
3. Ausencia de mecanismos de control de calidad en las tareas críticas (como el torqueo).
4. Condiciones de trabajo que favorecen la fatiga humana, tales como exceso de turnos, falta de descansos adecuados y exigencias de producción en tiempos acotados.

La conjunción de estos factores configura un entorno donde las fallas dejan de ser eventos aislados y pasan a ser consecuencias naturales de un sistema vulnerable, el cual, si no se interviene preventivamente, seguirá repitiendo patrones de falla similares.

De ahí que el proceso de mantenimiento preventivo no puede centrarse exclusivamente en los aspectos técnicos o mecánicos, sino que debe incorporar también variables organizacionales, humanas y procedimentales. En este sentido, la prevención de fallas debe incluir la mejora continua de los protocolos de mantenimiento, la implementación de sistemas de trazabilidad digital, capacitaciones periódicas en tareas críticas, y programas de ergonomía laboral que reduzcan los riesgos derivados de la fatiga física y mental.

A través de este enfoque integral, se busca avanzar desde una lógica correctiva o rutinaria hacia un modelo de mantenimiento proactivo basado en la gestión de riesgos, donde el análisis de causas raíz sea el insumo central para la toma de decisiones.

3.1.2. Mantenimiento Mensual Caex 930E-4

Camión Caex 930E-4 se le realiza un mantenimiento preventivo principal en las llamadas ‘naves de mantención’, es el lugar específico en dónde se sitúa el camión tolva Caex 930E-4, que pasa a ser inspeccionado mediante una programación planificada para un correcto mantenimiento preventivo; estas mantenciones son realizadas cada 500hrs, 1000, 2000 y 2500 horas de operación, y cada mantención es regularizada para lo que requiera el cliente.

Como es común su mantenimiento una vez al mes, estas siguen ciertos parámetros de acuerdo con las horas de trabajo que se realice en el equipo. Cada componente (repuesto) que es cambiado, reacondicionado, o simplemente bajo inspección visual, tiene sus horas límites de uso, teniendo que ser netamente las exactas para no provocar efectos graves en cuanto al mantenimiento evitando un efecto post-falla.

3.1.3 Mantenimiento específico se basa en:

- a) Cambio de 3 filtros de alta presión: 2 filtros de la bomba de levante, y 1 filtro de la bomba de dirección y freno, este cambio de filtros se debe realizar cada vez que se realice una mantención (1 vez al mes), sea programada.
- b) Filtros de aire (4 que posee el motor): Estos cambios de filtro deben realizarse de forma correcta en cada mantención (1 vez al mes aproximadamente) y en una reparación de emergencia dada por una falla de motor, también debe reemplazarse nuevamente los filtros.
- c) Relleno del aceite hidráulico debe realizarse en todas las mantenciones, y el cambio completo de este tipo de aceite se realizará bajo indicaciones que ordene el especialista o técnico cuando se diagnostique algún tipo de falla o bien cuando el aceite ya cumpla con sus horas de uso.
- d) D.- Realización de inspección visual del tacho de engrase aparte que está en el sistema, inspección de cada punto de llegada de cada manguera observando cuidadosamente si presenta algún tipo de filtración, y verificar que las rotulas no estén secas (sin grasa), se rellena si es necesario.
- e) E.- Camión Caex 930E-4, posee 2 motores eléctricos, de los cuales ambos son lubricados mediante aceite, siendo precisamente inspeccionados de vez en cuando,

y al momento de realizar esta tarea visual, se procede a rellenar el nivel de aceite o bien se procede a cambiar completamente el aceite del o los motores eléctricos.

- f) F.- El aceite de los motores, en todas sus mantenciones se les realiza una limpieza con una máquina conocida en la industria como **Micro filtradora**, la cual succiona el aceite del motor eléctrico y lo hace pasar por un filtro, luego de este proceso, vuelve a estar en su posición. La tarea tiene una duración aproximada de 3 a 5 horas con las máquinas conectadas.
- g) G.- Mantenimiento eléctrico: Se le realiza una medición de las baterías, chequeo de luces, inspección de los carbones del contacto eléctrico que poseen los **blower** (ventiladores de las parrillas), las parrillas mantienen la composición de la resistencia de la carga eléctrica las cuales van dirigidas hacia el motor de tracción (motor eléctrico) que es donde se acciona el freno; y por último se procede a realizar la medición de los carbones de alternador principal, el cual es el principal otorgador de energía para que funcione correctamente el camión.
- h) H.- Mantención Tolva: Esta debe ser inspeccionada visualmente en varias ocasiones, ya que a medida que va produciendo, también comienza a sufrir daños en su estructura, y es en ese momento cuando comienza a extenderse su vida útil, ya sea parchándola con soldadura, planchas, etc.; dependiendo el tipo de daño que presente. Si la tolva ya cumplió con su vida útil (horas de uso ya completadas o excesivas), se procede al cambio completo para evitar malas consecuencias, siempre y cuando esté bajo programación dictada por un especialista o técnico calificado.
- i) Inspección de Neumáticos, debe realizar bajo tarea visual, y manteniendo un estricto rigor de acuerdo con las horas de uso, si éstos fallan antes de lo previsto, una empresa contratista externa a Komatsu, procede a realizar el cambio de estos componentes.
- j) Inspección de rótulas: Rótula cilindro de dirección (4 unidades), Rótula barra de dirección (2 unidades), Rótula cilindro de levante (2 unidades lado izquierdo y 2 unidades lado derecho), Rótula del pasador central que une al camión (1 unidad), Rótula de pasador de tolva (2 unidades). Todas las rótulas se verifican con el motor en funcionamiento y se realizan pruebas de movimiento, en dirección hacia delante, hacia atrás, hacia ambos lados, y al levantar y bajar la tolva.

- k) Inspección de ducto de escape y admisión: Los ductos de escape poseen las llamadas mantas térmicas, las cuales concentran el calor que se genera en los ductos de escape, tales como como el ducto de escape y las mantas térmicas no pueden presentar ninguna fisura ni daños en su estructura
- l) Fugas: Inspección de fuga en el tren de bomba (bomba levante y bomba dirección freno), fuga en sistema de refrigerante, fuga en motores de tracción, fuga en tanque de combustible e hidráulico.
- m) Toma de presiones: En sistemas de dirección (tanto izquierda como derecha), sistema de freno de traba, freno de parqueo, freno de servicio, freno de autoaplicación (automático), toma de presión operacional del sistema, toma de presión de la bomba de levante de la tolva.



Ilustraciones 3-1

Caex en naves de mantención

Fuente: fotografía presencial.

3.1.4. Inspección cada 12 horas de uso (diario)

- ✓ Filtros de combustible (Separadores de Combustible): Es cuando se drena el agua
- ✓ desde la válvula de drenaje inferior en cada separador de combustible.
- ✓ Se revisa el depósito de grasa, se debe reponer según cantidad restante.
- ✓ Al llenar el depósito, se debe revisar el indicador del filtro de grasa. Éste deber limpiarse o cambia el filtro de grasa si el indicador detecta un problema.
- ✓ Se debe inspeccionar el sistema y revisar que la operación sea la adecuada, y se debe asegurar que las siguientes áreas importantes reciban la cantidad adecuada de grasa.

Extraordinariamente, a diario se debe realizar una inspección visual de:

- ✓ Varillaje de la Dirección
- ✓ Pasador de Pivote del Mando Final
- ✓ Juntas del Pasador de Suspensión trasera superiores e inferiores
- ✓ Pasadores de Bisagra de la Tolva
- ✓ Pasadores de los Cilindros de Elevación
- ✓ Superiores e Inferiores Barra Estabilizadora
- ✓ Inspección visual de luces
- ✓ Inspección de neumáticos.

3.1.5. Cuadro comparativo palas PC/CAEX

En tiempos productivos	Mantenciones mensuales	Falla eléctrica/mecánica
A.- CAMIÓN CAEX: - Realiza actividades de alta productividad para la minería, siendo estas reflejadas en extensas horas, regido por tareas concretas programadas - Aproximadamente, luego de un mes de uso, el equipo debe pasar a las “naves de mantención” para ser chequeado de manera mas profunda de lo normal. - El equipo al estar en indisponibilidad, genera grandes pérdidas mayoritariamente económicas a la empresa, por lo general se llevan a cabo por programaciones sus debidas mantenciones preventivas para evitar este tipo de acontecimientos.	<u>1.- Cambio filtros de alta presión.</u> - 2 filtros de la bomba de levante. - 1 filtro de la bomba de dirección y freno. <u>2.- Cambio filtros de aire.</u> - Generalmente se realiza el cambio una vez al mes de 4 filtros de aire que tiene el motor. Estos también deben cambiarse si se presenta una falla en el motor. <u>3.- Relleno/ cambio de aceite hidráulico.</u> - Se deben realizar estas tareas dependiendo de las horas de uso del aceite, el cual disminuye su nivel, o si ya cumple con sus horas estimativas de uso deben cambiarse siempre y cuando lo indique un especialista y también bajo programación. <u>4.- Inspección visual de:</u> - Medición de baterías, chequeo de luces, e inspección de los carbones del contacto eléctrico que poseen los Blower. - Medición de los carbones del alternador principal.	-Falla contactor RP2. -Falla en la tolva. -Falla en neumáticos. -Falla en freno de retardo.

<u>B.- PALA PC 5500:</u> Realiza diariamente actividades en conjunto con los camiones caex, cumpliendo la función específica la cual es cargar con cientos de toneladas a los camiones, y al ser un equipo importante, éste no debe estar en indisponibilidad ya que ocasionaría grandes pérdidas económicas.	1.- Cambio de filtros de motor: El motor posee 8 filtros en total, 4 unidades son para el motor diésel 1 y 4 unidades para el motor diésel 2. El cambio de este tipo de filtros se debe realizar en cada mantención, lo que es regularmente una vez al mes cuando se hace ingreso a las naves de mantención. 2.- Chequeo de luces: Es una tarea de inspección visual, que se realiza diariamente.	- Falla en propulsión de balde. - Falla en acople flexible. - Cadena derecha. - Rueda guía derecha.
--	--	---

Tabla a.1: Elaboración propia

3.1.6. Indicadores de disponibilidad

La disponibilidad es la proporción de tiempo durante la cual un sistema o equipo estuvo en condiciones de ser usado

- Disponibilidad Real= $\frac{\text{Tiempo que estuvo disponible}}{\text{Tiempo total que debe estar disponible}}$
- Disponibilidad esperada= $\frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$

MTBF (TMEF): TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS

MTTR (TMPR): TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN

- Basado en falla contactor RP2 el equipo tuvo la siguiente **Disponibilidad Real**

Falla contactor RP2	Indisponibilidad (hrs)	Horas que debe trabajar (mensualmente)
1	72	360

Tabla a.2: Indicador de disponibilidad

Fuente: elaboración propia.

Disponibilidad Real: $288 \div 360 = 80\%$ de disponibilidad real.

Basado en historial de fallas anuales específicamente del camión **CAEX 930E-4**, se realiza el siguiente cálculo.

- Falla en tolva; camión inicialmente llevaba **90 horas** trabajando, se produce una falla y su reparación dura **8 horas**.
- Falla en contactor; camión llevaba trabajando **120 horas**, se produce falla en contactor RP2, su reparación dura **72 horas**.
- Falla en neumático; camión llevaba trabajando **86 horas**, se produce falla repentina de neumático, su reparación dura **6 horas**.
- Freno retardo; camión llevaba **190 horas** trabajando, se produce falla en freno de retardo al ir descendiendo de una pendiente de 5°, su reparación dura **10 horas**.
- Y continuó trabajando **110 horas** sin problemas hasta ahora.

Fallas ocurridas (año)	Indisponibilidad (hrs)	Número de eventos
1 tolva	8	1
1 contactor	72	1
1 neumático	6	1
1 freno retardo	10	1

Tabla a.3: fallas ocurridas, indisponibilidad y numero de eventos

Fuente: Elaboración propia.

$\Sigma = TBF \div \text{número de eventos.}$
Resolviendo: $\frac{90+120+86+190+110}{4} = 149 \text{ MTBF}$

Por lo tanto, como promedio el equipo falla cada 149 horas.

Si bien es sólo un cálculo promedio, ya que pueden variar las condiciones a lo largo del año, ya sea por estación de verano, invierno, primavera, etc. Y también de acuerdo con la situación físico-emocional que se encuentren los trabajadores que trabajan en la empresa.

$$\Sigma = \text{TTR} \div \text{número de eventos.}$$
$$\text{Resolviendo: } \frac{8+72+6+10}{4} = 24 \text{ MTTR}$$

Por lo tanto, como promedio el grupo de técnicos de Komatsu, demoran 24 horas en reparar una falla, si bien la reparación del contactor RP2 fue extensa, por ello se alargó el MTTR.

Disponibilidad esperada: $149 \div (149+24) = 86.12\%$

Por lo tanto, el equipo del equipo se espera tener una disponibilidad de **86.12%**.

Para mejorar la disponibilidad del equipo (rango 90-95%), se requiere analizar los mantenimientos y las fallas más en específico para así poder lograr una mejor eficacia en cuánto al mantenimiento preventivo y, por consiguiente, mejorar la disponibilidad del equipo.

3.1.7. IDENTIFICACIÓN MODO DE FALLA, EFECTOS Y CONSECUENCIAS

Dentro del análisis técnico de los equipos de alta producción como el CAEX 930E-4, la identificación de modos de falla representa una herramienta metodológica de gran valor estratégico. En términos simples, un modo de falla se refiere a la manera específica en la que un componente, subsistema o sistema completo deja de cumplir su función operativa, ya sea de forma total o parcial. Sin embargo, más allá de la definición teórica, el valor real de esta identificación radica en su aplicación práctica dentro de la gestión del mantenimiento.

En este trabajo, el análisis de modos de falla no se incluye como un simple ejercicio técnico o académico, sino con una intención clara: servir de base para la generación de nuevas tareas dentro del plan de mantenimiento preventivo, fortaleciendo así la estrategia de confiabilidad de los equipos críticos. Este proceso responde directamente a los

hallazgos empíricos obtenidos a través de la observación en terreno, el levantamiento de datos históricos y el estudio detallado de una falla crítica específica ocurrida en el contactor RP2 del CAEX 930E-4.

La existencia de un plan de mantenimiento actual, estructurado en ciclos de 500, 1000, 2000 y 2500 horas de operación, si bien proporciona una base operativa adecuada, no contempla a profundidad todos los modos de falla identificados en los sistemas eléctricos y electrónicos del equipo, ni anticipa ciertos factores humanos como errores en el torqueado de pernos, fallas por sobrevoltaje o desgaste acumulado de componentes electrónicos que no presentan síntomas visuales hasta que ya han fallado.

Por esta razón, se propone complementar el plan existente con un análisis detallado de los modos de falla reales observados, sus efectos operacionales inmediatos y las consecuencias sistémicas. Esta triada —modo de falla, efecto y consecuencia— constituye el núcleo del enfoque AMFEC (Análisis Modal de Fallos, Efectos y Criticidad), el cual será aplicado como base técnica para la elaboración de nuevas tareas preventivas específicas y rediseños estructurales.

Cada modo de falla identificado será evaluado bajo los siguientes criterios:

- Severidad (S): Grado de impacto que tiene la falla sobre la operación del equipo.
- Ocurrencia (O): Probabilidad de que esa falla ocurra en un ciclo determinado.
- Detectabilidad (D): Posibilidad de detectar esa falla antes de que afecte al sistema.

A través de la multiplicación de estos factores se obtiene el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), el cual será utilizado como criterio para jerarquizar intervenciones preventivas. Aquellos modos de falla con mayor NPR deberán ser abordados con urgencia mediante acciones correctivas o rediseños operacionales que garanticen la disponibilidad y confiabilidad del equipo.

Este análisis detallado no sólo permite explicar con mayor profundidad lo ocurrido con la falla del contactor RP2, sino que ofrece una visión amplia y proactiva de las debilidades del sistema eléctrico del equipo. Por ejemplo, la falla inicial, provocada por un mal torqueo, generó una serie de fallas consecutivas que afectaron directamente a la barra

vertical de chopper, los condensadores de blower, los sensores análogos VAM1 y VAM2, el arnés eléctrico, y la tarjeta madre ICP Backplane. Cada uno de estos componentes no sólo representa una unidad aislada, sino que cumple funciones interdependientes que, al fallar, comprometen el funcionamiento completo del equipo.

Por lo tanto, el análisis de modos de falla, efectos y consecuencias aquí presentado no es un ejercicio paralelo al plan de mantenimiento, sino el insumo fundamental para su rediseño y fortalecimiento. Así, las fallas ya identificadas no se tratan como eventos pasados, sino como alertas técnicas que permiten prevenir futuras pérdidas económicas, reducir los tiempos de indisponibilidad (MTTR), aumentar el tiempo medio entre fallas (MTBF) y, sobre todo, garantizar la seguridad operativa y la integridad del equipo.

En resumen, esta sección cumple una doble función:

1. Analítica, al sistematizar los modos de falla y sus consecuencias desde una perspectiva técnica.
2. Propositiva, al usar esta información como base técnica y estratégica para construir nuevas tareas dentro del plan de mantenimiento preventivo, acorde a las necesidades reales de la operación minera.

Esta lógica se alinea con los principios de la gestión moderna de activos (ISO 55001), que establece la importancia de tomar decisiones basadas en datos y evidencia empírica, y refuerza la visión de un mantenimiento orientado al riesgo, donde la prevención se basa no sólo en el tiempo o en el uso del equipo, sino en el conocimiento profundo de sus vulnerabilidades.

3.1.8. Identificación modo de falla (930E-4)

El modo de falla es una situación que puede ocasionar la falla en algún activo físico (equipo crítico) que éste se encuentre relacionado con más de un sistema y/o subsistemas que lo compongan, en este caso específicamente el camión CAEX 930E-4 y sus componentes.

Identificar los modos de falla es una tarea muy importante, ya que se logran obtener evidencias para así escoger de manera correcta las acciones preventivas para así evitar fallas repentinas.

Equipo	Detención	Descripción	Tarea	Componente	Causa
930E-4	12 hrs	Descarga mensual de datos	Mantenimiento	General	Actividad estratégica.
930E-4	6 hrs	Reparación programada	Reparación motor diésel	Motor diésel	Mantenimiento
930E-4	6 hrs	Reparación programada	Bobina de compresor A/C, quemada	Aire acondicionado	Desgaste
930E-4	2 hrs	Reparación programada	Revisar tapones de mazas	Maza	Inspección visual
930E-4	2 hr	Reparación estructura	Deformación escalera izquierda	Escalera de seguridad	Impacto
930E-4	4 hrs	Reparación estructura	Desgaste en flejes piso tolva	Tolva	Desgaste
930E-4	72 hrs	Reparación eléctrica	Falla en contactor RP	Propulsión	Suelto
930E-4	6 hrs	Cambio Blower	Gird blower motor	Soplador del banco de retardo	Tarea estratégica
930E-4	18 hrs	a.- Lavado + 2000 hrs MP b.- Revisión calefactores	a- Inspección periódica b.- Inspección Motor diésel c.- Tolva	a.- Mantenimiento 200hrs	a.- Tarea estratégica b.- Mantenimiento

		c.- Mantenición estructural d.- Cambio filtros de aire y cabina.	d.- Cambio filtro de aire (cabina)	b.- Mantenimiento c.- Mantenimiento d.- Mantenimiento	c.- Mantenimiento d.- Mantenimiento.
Pala PC5500	12 hrs	Descarga mensual de datos	Mantenimiento	Mantenimiento	Tarea estratégica
Pala PC5500	1 hrs	Medición de get + engrase	Medir y registrar desgaste de cuchillas	Mantenimiento	Desgaste
Pala PC5500	6 hrs	Cambio de aceite motor diésel	Mantenimiento	Aceite del motor	Mantenimiento
Pala PC5500	4 hrs	Lavado más inspección visual	MP	Mantenimiento	Tarea estratégica

Tabla a.4: identificación modos de falla
Fuente: elaboración propia

3.1.9. Efecto y consecuencia de modos de fallo

Se desglosarán los modos de fallo principales y la evaluación de consecuencias a través de un análisis de criticidad para jerarquizar las fallas, lo cual es una acción de suma importancia porque genera una toma de decisiones más acertadas a cuanto mantenimiento se compete, y para esto se utilizará el número de prioridad de riesgo (NPR), basándose en severidad, ocurrencia y detectabilidad.

$$\bullet \quad NPR = SEVERIDAD (S) \times OCURRENCIA (O) \times DETECTABILIDAD (D)$$

Dónde:

- S= severidad
- O= ocurrencia
- D= detectabilidad

S: Es la estimación de la gravedad del efecto de falla que pueda ocurrir en el camión

O: Es la probabilidad de que una causa específica en los componentes del camión se concluya en un modo de falla.

D: Es el valor para clasificar la probabilidad de encontrar la falla antes de que esta se produzca en el camión.

Intervalo	Severidad (S)	Ocurrencia (O)	Detectabilidad (D)
9-10	Severidad muy alta	Muy alta probabilidad	Casi imposible de detectar
6-8	Problema mayor	Alta probabilidad	Baja capacidad de detección
3-5	Problema menor	Moderada probabilidad	Alta capacidad de detección
1-2	Mínimo efecto	Baja probabilidad	Muy alta capacidad de detección

Tabla a.5: Severidad, ocurrencia, disponibilidad

Tabla a.6: Subcomponentes

Fuente: Elaboración propia

Para mejorar la disponibilidad del equipo se aplicará metodología de modo de falla para saber el grado de criticidad de cada componente principal (falla contactores), en este caso basándose en planes de mantenimiento preventivo, para evitar fallas repentinas que produzcan pérdidas.

SUBCOMPONENTES FALLA CRÍTICA CAEX 930E-4

Subcomponente: Sistema eléctrico	Modo de falla	Efectos de falla	Consecuencia de la falla			
			S	O	D	Criticidad
<u>Falla funcional</u> Cortocircuito contactor RP2	1. Contactor quemado 2. Barra vertical quemada 3. Condensadores de blower quemados 4. Placa madre quemada.	-Mal torqueo pernos sujeción -Aumento de temperatura -Exceso de voltaje -Daño en componentes principales -Daño en arnés eléctrico	9	3	5	135

3.2.1 Método detección de modos de fallo.

Tras la disponibilidad bajo el rango 90-95% que está presentando el equipo (específicamente 86.12%), se requiere realizar ciertos tipos de planes de mantenimiento ya sea correctivo, preventivo, predictivo; para así evitar fallas a futuro y mantener el equipo con una disponibilidad en el rango adecuado.

Estrategia de mantenimiento y Modo de detección		
Modo de falla	Estrategia de mantenimiento	Modo de detección
Contactor RP2	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo (realización cambio de su sistema propuesta en capítulo 2)
Barra vertical	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo (componente nuevo)
Condensadores de blower	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo (componentes nuevos)
	Mantenimiento preventivo	Luego de su reemplazo, realizar inspección visual en cada mantención mensual.
Sensores análogos VAM1/VAM2	Mantenimiento correctivo	Reemplazo (nuevo)
	Mantenimiento preventivo	Inspección visual en cada mantención y realizar reemplazo de componentes internos cuando se cumpla horas de uso.
Arnés eléctrico	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo de línea de arnés dañada
	Mantenimiento Preventivo	Inspección visual
Tarjeta ICP Backplane (Placa madre)	Mantenimiento correctivo	Reemplazo
	Mantenimiento predictivo	Análisis espectral

Tabla a-7: detección modos de fallo
Fuente: Elaboración propia.

Basado en la metodología FMECA, se logra identificar mediante tablas comparativas, los modos de falla y efectos que ocurrieron específicamente en la falla de contactor RP2, que es donde más horas de indisponibilidad tuvo el equipo, lo cuál se busca igualar o superar el rango de disponibilidad mediante esta metodología de mantenimiento general (correctivo, preventivo, predictivo) todo basado en lo expuesto anteriormente en el capítulo 2 y también en la propuesta de mejora de contactor RP2.

CAPÍTULO 4. PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

1.Propuesta de plan de mantenimiento preventivo a través de la falla del contactor RP2, aplicando metodología AMFEC

La confiabilidad operativa de los camiones CAEX 930E-4 constituye un eje esencial dentro de la estrategia de producción minera de alta escala. Estos equipos, debido a su alta capacidad de carga y trabajo continuo en condiciones extremas, deben contar con un sistema de mantenimiento eficiente, planificado y adaptado a los riesgos reales identificados en terreno. La ocurrencia de una falla crítica como la presentada en el contactor RP2, con una consecuencia directa sobre múltiples sistemas eléctricos y electrónicos del equipo, permite generar un punto de inflexión en el enfoque de mantenimiento aplicado, particularmente al considerar el uso de herramientas analíticas como el Análisis Modal de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC).

1. Contexto de la falla: base para el rediseño del plan de mantenimiento

La falla específica analizada corresponde a un cortocircuito originado por mal torqueo en los pernos de sujeción de la bobina del contactor RP2. Este hecho generó un arco eléctrico que impactó negativamente en una cadena de componentes: barra vertical de chopper, condensadores de blower, sensores análogos VAM1 y VAM2, arnés eléctrico, tarjeta madre ICP Backplane, y finalmente la operatividad completa del camión, generando una indisponibilidad de 72 horas.

El contacto eléctrico deficiente, unido a una débil inspección visual y a la ausencia de procedimientos específicos para verificar torque nominal en componentes críticos, demostró que el mantenimiento actual no contempla todas las condiciones de riesgo real. De esta forma, la falla se convierte en un síntoma sistémico de una planificación de mantenimiento que necesita evolucionar desde una estructura tradicional basada en ciclos horarios (500/1000/2000/2500 hrs), hacia un modelo preventivo basado en modos de falla específicos.

2. Fundamento metodológico: aplicación del AMFEC como herramienta de mejora

El Análisis Modal de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC) es una metodología de evaluación proactiva que permite identificar los posibles modos de falla de un componente, determinar sus efectos en el sistema global, evaluar su criticidad y priorizar acciones preventivas. Su implementación en contextos industriales permite construir planes de mantenimiento más adaptados a la realidad operacional de los equipos, especialmente en ambientes donde la confiabilidad es crítica.

El AMFEC se construye a partir de tres variables fundamentales:

- Severidad (S): Gravedad del efecto de la falla en el sistema.
- Ocurrencia (O): Probabilidad de que la falla ocurra.
- Detectabilidad (D): Capacidad de identificar la falla antes de que ocurra.

La fórmula general del número de prioridad de riesgo (NPR) es:

$$NPR=S\times O\times D$$

A mayor valor del NPR, mayor es la necesidad de implementar acciones preventivas o rediseñar los procedimientos actuales.

3. Identificación del modo de falla: análisis del contactor RP2

Componente	Modo de Falla	Efectos observados	S	O	D	NPR
Contactor RP2	Torque incorrecto en bobina	Arco eléctrico, sobrecalentamiento, daño en barra de chopper	9	3	5	135
Barra vertical	Deformación térmica	Quemaduras en estructura de conexión eléctrica	8	2	6	96

Condensadores	Sobrecarga eléctrica	Explosión interna, pérdida de capacidad de disipación térmica	8	2	5	80
Sensores VAM1/VAM2	Sobrecalentamiento	Falla en lectura análoga, error en control de potencia	7	3	5	105
Arnés eléctrico	Cortocircuito	Daño total del aislamiento, falla completa del sistema eléctrico	9	2	4	72
Tarjeta ICP	Daño estructural por sobrevoltaje	Falla en comunicación y control general del equipo	10	2	5	100

Fuente: Elaboración propia basada en datos de terreno.

Como se observa, el contactor RP2 posee el mayor NPR (135), por lo tanto, debe ser el principal foco de intervención preventiva.

4. Propuesta de plan de mantenimiento preventivo aplicado

La propuesta de mejora consiste en reformar el plan de mantenimiento actual, incorporando tareas específicas basadas en los hallazgos del AMFEC. El plan debe abarcar tres niveles: tareas mensuales específicas, rediseño del componente y control predictivo complementario.

4.1. Tareas mensuales específicas (mantenimiento preventivo intensivo)

Tarea	Frecuencia	Responsable	Observaciones
Verificación de torque en pernos de sujeción del contactor RP2	Cada 500 hrs	Técnico eléctrico	Uso de torquímetro certificado
Limpieza interna del contactor RP2 (remoción de escoria con aspirado)	Cada mantención	Especialista Komatsu	Revisión de alineamiento de tips
Sustitución de tips fijos y móviles (si presentan desgaste visual)	Cada 1000 hrs	Técnico Komatsu	Conforme a normativa Komatsu
Inspección con termografía de la placa ICP Backplane	Cada 2000 hrs	Ingeniero de confiabilidad	Detectar zonas con alta temperatura
Prueba de continuidad y resistencia eléctrica en el arnés	Cada 2500 hrs	Técnico eléctrico	Registro obligatorio en bitácora

4.2. Rediseño del componente (propuesta de mejora técnica)

- Encapsulamiento ignífugo del contactor RP2: Para evitar propagación de arcos eléctricos, se propone instalar un sistema tapafuego interno con capacidad de disipación térmica. Este encapsulado permitiría contener explosiones internas y reducir el deterioro de componentes adyacentes.
- Sistema de anclaje sin pernos torqueables: Se recomienda rediseñar el sistema de fijación de la bobina mediante bloques de presión calibrados o sujetadores por encaje, eliminando el uso de pernos que pueden fallar por fatiga humana. Esta innovación tecnológica debe desarrollarse en conjunto con ingeniería Komatsu.

4.3. Control predictivo complementario (monitoreo de condición)

- Instalación de sensores de temperatura en la base del contactor RP2: Estos sensores permitirán detectar aumentos anómalos de temperatura y activar alarmas preventivas.
- Sistema de análisis espectral de tarjetas ICP: Mediante equipos portátiles, se pueden leer las vibraciones y el espectro eléctrico de las tarjetas para detectar posibles fallas antes de que sean visibles.
- Registro histórico de torque aplicado: Incorporar una base de datos digital donde cada torque realizado se registre con fecha, técnico responsable y valor aplicado. Esto aumenta la trazabilidad y la responsabilidad del personal técnico.

5. Indicadores de evaluación y mejora continua

Para asegurar el éxito del plan preventivo propuesto, se deben establecer indicadores técnicos y operativos que permitan evaluar su efectividad. Entre ellos:

- % de disponibilidad del CAEX 930E-4 post implementación del plan.
- Reducción de fallas en sistema eléctrico (objetivo: 80% menos en 12 meses).
- NPR anual promedio del contactor RP2 (objetivo: reducirlo bajo 100).
- Cumplimiento del plan de mantenimiento mensual (% de tareas ejecutadas).
- Satisfacción del personal técnico sobre mejoras en el procedimiento (medido vía encuesta interna).

La implementación de este plan de mantenimiento preventivo, centrado en el contactor RP2, representa una estrategia de intervención técnica basada en datos reales, con un enfoque de análisis crítico mediante AMFEC. Esta propuesta, al integrar acciones técnicas específicas, rediseño de componentes y monitoreo predictivo, permite reducir la probabilidad de fallas críticas, mejorar la disponibilidad del equipo y aumentar la seguridad operacional en la faena.

Además, permite pasar de una lógica de mantenimiento reactivo o genérico, a un modelo de mantenimiento inteligente, orientado a riesgos reales, alineado con los principios de gestión de activos según ISO 55001 y con las mejores prácticas internacionales en minería.

CONCLUSIONES

En primera instancia, la presente investigación ha demostrado que la gestión tradicional del mantenimiento en equipos mineros de alta producción como el CAEX 930E-4 presenta debilidades importantes, especialmente cuando se enfrenta a fallas de carácter eléctrico con consecuencias sistémicas. El caso del contactor RP2 ha sido un ejemplo paradigmático de cómo una falla aparentemente menor puede desencadenar un efecto dominó que afecta a múltiples componentes del sistema.

La aplicación del análisis AMFEC ha permitido identificar de forma precisa los modos de falla, efectos y consecuencias, otorgando un marco técnico-metodológico sólido para la reformulación del plan de mantenimiento. Este enfoque ha sido clave para jerarquizar intervenciones, priorizar recursos y establecer mecanismos de detección temprana, alineando así la estrategia de mantenimiento con los principios de confiabilidad operativa.

Se concluye que el mantenimiento no debe ser considerado como un conjunto de tareas rutinarias por horas de operación, sino como un proceso dinámico de toma de decisiones basado en la evaluación del riesgo, la criticidad de los sistemas y el comportamiento histórico de los equipos. Este nuevo enfoque resulta vital para mejorar la disponibilidad de los equipos, reducir los costos asociados a fallas no planificadas y proteger la seguridad del personal.

Asimismo, la integración de nuevas tecnologías, como sensores de temperatura, plataformas de trazabilidad y análisis espectral, resulta fundamental para migrar desde un modelo correctivo o simplemente preventivo, hacia una estrategia de mantenimiento predictivo y proactivo. Estas herramientas permiten tomar decisiones informadas antes de que la falla se manifieste de forma crítica.

Se destaca también la importancia del factor humano dentro del proceso de mantenimiento. La fatiga, la falta de verificación cruzada, y la omisión de protocolos establecidos, fueron factores decisivos en la ocurrencia de la falla analizada. Por tanto, se propone como parte integral del nuevo plan, la capacitación continua del personal, la implementación de protocolos de doble revisión y el rediseño de componentes que minimicen la intervención humana en tareas críticas.

La propuesta de encapsulamiento del contactor RP2 y la eliminación de pernos torqueables representa no solo una mejora técnica, sino también una acción orientada a la seguridad y a la sostenibilidad del equipo en condiciones operativas extremas. Estos rediseños deben ser evaluados en conjunto con los departamentos de ingeniería, producción y mantenimiento.

En términos económicos, la aplicación del nuevo plan preventivo permitirá reducir los tiempos de indisponibilidad, mejorar la planificación de las tareas de mantenimiento y disminuir el número de reparaciones no planificadas, con un impacto directo en la productividad y en los costos operacionales de la faena.

Desde el punto de vista de la gestión de activos, este trabajo se alinea con los principios de la norma ISO 55001, que promueve la toma de decisiones basadas en el riesgo y el uso eficiente de los recursos para maximizar el valor de los activos en el tiempo. Esta visión estratégica es esencial para operaciones mineras de gran escala, como las que desarrolla Codelco en su División Andina.

En conclusión, la implementación de un plan de mantenimiento basado en AMFEC, con tareas técnicas específicas, rediseños estructurales y monitoreo predictivo, representa una respuesta efectiva, técnica y sustentable frente a la problemática evidenciada en la falla del contactor RP2. Este modelo puede ser replicado en otros equipos y sistemas críticos dentro de la operación minera.

ANEXOS

ANEXO 1

Norma ISO 5001

El cumplimiento de la Norma ISO 55001 apoya a una organización con cultura proactiva de mejora continua que otorga eficacia y eficiencia para obtener aumento del valor de los activos. Refleja las últimas ideas y las mejores prácticas en la gestión de activos.

Desarrollar, implementar e integrar un marco de gestión de activos basado en la Norma ISO 55001 le demuestran a las partes interesadas (por ejemplo, reguladores, clientes y aseguradoras) que la organización gestiona su desempeño, riesgos y costos de manera muy eficaz y eficiente.

Reconocida a nivel mundial, la Norma de gestión ISO 55001 les ofrece a las organizaciones un lenguaje común y un marco para la toma de decisiones confiables permitiendo coherencia en las prácticas de gestión de activos. Está alineada con las otras normas de gestión ISO tales como las **ISO 9001** y **14001**, y permite que una organización desarrolle un conjunto coherente de prácticas de gestión a través de todas las facetas de su operación.

Esta norma rige de manera consecuente en lo que es mantención de los activos de la empresa Komatsu, representativa de su modelo de mantención, la cual se basa es una buena organización y planificación.

Referencias bibliográficas

Codelco. (2020). Memoria Anual 2020. <https://www.codelco.com/memoria-2020n>

Codelco. (2021). Producción de cobre y desempeño económico. <https://www.codelco.com>

Komatsu Latinoamérica. (s.f.). Catálogo de productos y soluciones industriales. <https://www.komatsulatinamerica.com/chile>

Komatsu Ltd. (2021). Historia y visión corporativa. <https://home.komatsu/en/>

Manual técnico Komatsu. (s.f.). 930E-4 camión tolva: Componentes y especificaciones técnicas. <http://www.geolay.cl/minas4/OP-MANT/Manual930E/>

Norma ISO 55001. (2014). Asset management – Management systems – Requirements. International Organization for Standardization.

Komatsu Latinoamérica. (s.f.). Manual técnico CAEX 930E-4: Componentes y mantenimiento. <https://www.komatsulatinamerica.com/chile>

Norma ISO 55001. (2014). Asset management – Management systems – Requirements. International Organization for Standardization.

Torres, P., & Contreras, J. (2020). Gestión de activos y confiabilidad operacional en minería de gran escala. Revista de Ingeniería Aplicada, 12(3), 45-60. <https://doi.org/10.32792/ria2020.12.3>

Valencia, H. (2019). Implementación de FMECA en equipos mineros CAEX: estudio de caso en minería chilena. Universidad Técnica Federico Santa María. <http://repositorio.usm.cl/handle/11673/49521>