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

PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA SISTEMA CRITICO DE CENTROS DE MECANIZADO URANE-20.

Trabajo de titulación para optar al título de INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Autor:

Sebastián Cristóbal Barnett Contreras

Profesor guía:

Mg. Ing. Carlos Andrés Baldi Gónzalez

2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Propuesta de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para sistema critico de centros de mecanizado Urane-20.

Nombre del candidato(a): Sebastián Cristóbal Barnett Contreras.

Carrera / Grado: Ingeniería en mantenimiento industrial.

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Andrés Baldi Gónzalez , 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)

X 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: 21-09-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20-09-2026 **Firma:** 

RESUMEN

KEYWORDS: RCM – FMECA - ANÁLISIS DE CRITICIDAD - ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD - ÁRBOL DE DECISIÓN DEL RCM

En este presente trabajo de título se presenta una propuesta de plan de mantenimiento en base a confiabilidad para un grupo de centros de mecanizado de la empresa automotriz HORSE. El despliegue de esta metodología tiene como objetivo central la estabilización de la disponibilidad operativa de los activos y la focalización estratégica de los recursos financieros. Se persigue la mitigación proactiva de modos de falla críticos mediante la selección de tareas fundamentadas en un análisis lógico, permitiendo así una reducción de la incertidumbre en los procesos productivos y garantizando la sostenibilidad económica de la gestión de activos industriales.

Capítulo 1 (Contexto Operacional): Este capítulo introduce el entorno de la empresa automotriz HORSE, detallando las operaciones de fabricación de cajas de cambio y la relevancia de los centros de mecanizado Urane-20. Se describe la problemática principal: fallas recurrentes en los equipos, lo que afecta su disponibilidad y fiabilidad. El capítulo también presenta una descripción detallada de los equipos involucrados, enfocándose en sus sistemas críticos, como el eje Z, el cual ha sido identificado como el más vulnerable a fallas. Finalmente, se propone una solución basada en la implementación del RCM, focalizándose en este eje para mejorar la disponibilidad, reducir costos y aumentar la confiabilidad operativa.

Capítulo 2 (Análisis de Fallas del Eje Z y Determinación de Políticas de Mantenimiento): En este capítulo, se aplica la metodología del RCM al sistema del eje Z. Se realiza un análisis de modos y efectos de fallas (FMECA) para identificar las causas, consecuencias y modos de falla de este eje, clasificando las fallas en evidentes y no evidentes, y evaluando su impacto en la operación, la seguridad y el medio ambiente. A partir de este análisis, se determinan las políticas de mantenimiento más adecuadas, que

incluyen tareas proactivas (como sustitución cíclica y mantenimiento basado en condición) y tareas a falta de (inspección de fallas ocultas o rediseño de componentes). También se utiliza un árbol de decisión del RCM para seleccionar las estrategias más eficientes para prevenir las fallas.

Capítulo 3 (evaluación económica): Este capítulo presenta la evaluación económica de las actividades de mantenimiento propuestas a partir del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) aplicado al eje Z de los centros de mecanizado Urane-20. El análisis compara el escenario actual, caracterizado por una alta incidencia de mantenimiento correctivo y elevados costos de indisponibilidad, con un escenario futuro que incorpora las tareas preventivas y a condición definidas en el análisis RCM.

Se consideran los costos asociados a fallas funcionales, tiempos fuera de servicio, intervenciones de mantenimiento e inversión requerida para la implementación del plan propuesto. Los resultados evidencian que la aplicación de las actividades de mantenimiento reduce significativamente los costos totales, principalmente debido a la disminución de la indisponibilidad del equipo. Aun considerando la inversión necesaria, el escenario propuesto presenta un beneficio económico neto, validando la viabilidad financiera del plan de mantenimiento y respaldando su implementación como una estrategia eficiente para la gestión del activo.

ÍNDICE

RESUMEN 3

GLOSARIO 7

INTRODUCCIÓN 11

OBJETIVOS 13

Objetivo general 13

Objetivos específicos 13

CAPÍTULO I: CONTEXTO OPERACIONAL 14

1.1. Antecedentes de la empresa 15

1.1.1. Misión y visión 16

1.2. Descripción del equipo 16

1.2.1. Análisis S.I.P.O.C 18

1.2.2. Sistemas del equipo 19

1.2.3. Subsistemas del equipo 22

1.2.4. Descripción del proceso de las Urane-20 24

1.3. Problemática 26

1.4. Propuesta de solución 29

CAPÍTULO II: APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM) 33

Introducción 34

2.1. Función 34

2.1.1. Estándares de ejecución 34

2.2. Fallas Funcionales del Eje Z 35

2.3. Causas de falla 35

2.4. Efectos de falla 36

2.5. Consecuencias de falla 40

2.6. Determinación de las políticas de mantenimiento 46

2.6.1. El Árbol de Decisión en el RCM 48

2.6.2. Aplicación del árbol de decisión 49

2.7. Planificación de las tareas propuestas 53

2.7.1. Procedimientos: 53

2.7.2. Programación: 80

2.7.3. Calendarización 88

CAPITULO III: EVALUACIÓN ECONÓMICA 90

Introducción 91

3.1. Evaluación económica de los costos por falla actual 91

3.2. Evaluación económica de las tareas de mantenimiento 94

3.3. Estimación del CIF futuro 97

3.4. Contraste económico 100

3.4.1. Falla Vs acción de mantenimiento 100

3.4.2. Resumen y análisis de resultados 105

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES 108

ANEXOS 110

REFERENCIAS 139

GLOSARIO

1. **Activo**: Cualquier equipo, maquinaria o sistema que es objeto de mantenimiento y cuya disponibilidad o funcionalidad es crítica para la operación.
2. **AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Falla):** Herramienta utilizada para identificar, analizar y priorizar los modos de falla de un sistema, así como sus efectos y las acciones de mitigación necesarias.
3. **Árbol de Decisión de Mantenimiento:** Herramienta que guía la selección de las tareas de mantenimiento más adecuadas (proactivas, correctivas, o de rediseño) en función del análisis de fallas y su impacto.
4. **Causa de Falla:** La raíz del modo de falla, es decir, el motivo fundamental por el que se produce una falla funcional. Puede estar relacionada con errores humanos, diseño deficiente, mantenimiento inadecuado, etc.
5. **CNC (Control Numérico Computarizado):** Sistema que controla el movimiento de máquinas herramientas mediante comandos programados en un lenguaje de control. Se utiliza en procesos de mecanizado de alta precisión, como en fresadoras, tornos y centros de mecanizado.
6. **Confiabilidad:** La capacidad de un activo para desempeñar su función durante un período determinado sin fallas. Se asocia a la probabilidad de funcionamiento adecuado en condiciones normales.
7. **Consecuencia de Falla:** El impacto de una falla funcional sobre la seguridad, el ambiente, la operación o los costos. El análisis de estas consecuencias es clave para priorizar las acciones de mantenimiento.
8. **Contexto Operacional:** Condiciones y factores bajo los cuales un activo opera, incluyendo el entorno, la carga de trabajo y los requerimientos de funcionamiento.
9. **Criticidad**: Medida que evalúa la importancia de un activo o componente dentro de un sistema.
10. **Delta t**: Representa el intervalo de tiempo entre dos eventos, comúnmente utilizado para calcular períodos de operación, fallas o mantenimiento.
11. **Disponibilidad (D):** Capacidad de un activo de estar operativo cuando se necesita. Depende tanto de la confiabilidad como de la efectividad del mantenimiento.

12. **Efecto de Falla:** Lo que pasa cuando ocurre un modo de falla.
13. **Falla Evidente:** Falla que se detecta inmediatamente debido a que interrumpe la operación del sistema o del equipo. Generalmente, tiene un impacto inmediato en la seguridad o la producción.
14. **Falla Funcional:** La incapacidad de un activo o sistema para cumplir con su función o alcanzar los estándares de desempeño requeridos. Puede ser una falla total o parcial.
15. **Falla No Evidente:** Falla que no es inmediatamente aparente y puede pasar desapercibida hasta que provoca consecuencias más graves. Este tipo de fallas es crítico en sistemas de seguridad o control.
16. **Falla Parcial**: Situación en la que un activo presenta una reducción en su capacidad de funcionamiento, pero aún puede realizar algunas funciones.
17. **Falla Total**: Situación en la que un activo no puede realizar su función, resultando en la parada completa de la operación.
18. **Frecuencia de Fallas:** Medida de cuántas veces ocurre una falla en un periodo de tiempo determinado. Se utiliza para establecer la criticidad de las fallas y programar intervenciones de mantenimiento.
19. **FRL (Filtro, Regulador y Lubricador):** Dispositivo utilizado en sistemas neumáticos para mantener el aire comprimido limpio, regular la presión y lubricar el sistema para garantizar un funcionamiento adecuado y prolongar la vida útil de los componentes neumáticos.
20. **Función:** La tarea o propósito específico que debe cumplir un activo o sistema en condiciones normales de operación. Se especifica en términos de desempeño y requerimientos.
21. **Jerarquización**: Proceso de organizar activos, sistemas o componentes en niveles de importancia o dependencia.
22. **Mantenimiento a Condición:** Actividades de mantenimiento basadas en el monitoreo del estado del activo para determinar cuándo intervenir, buscando prevenir fallas antes de que afecten el funcionamiento.
23. **Mantenimiento Correctivo**: Actividades de mantenimiento realizadas después de que ha ocurrido una falla, con el objetivo de restaurar la funcionalidad del equipo.

24. **Mantenimiento Proactivo:** Estrategia de mantenimiento enfocada en prevenir la falla antes de que ocurra. Incluye el mantenimiento preventivo y predictivo.
25. **Modos de Falla:** Las maneras o mecanismos en que un activo puede fallar y no cumplir con su función. Por ejemplo, desgaste, fatiga, corrosión, entre otros.
26. **Montaje:** Elemento a mecanizar (cárter de caja de cambio).
27. **Número de Prioridad de Riesgo (NPR):** Valor calculado durante el análisis AMEF que ayuda a priorizar los modos de falla en función de su severidad, ocurrencia y detectabilidad, orientando las acciones correctivas.
28. **Palet:** Elemento en el cual se fija y posiciona el montaje para su mecanizado.
29. **Pantógrafo:** Componente basado en dos placas móviles y una estática que permiten la estanqueidad entre las parte motriz del CNC y el área de mecanizado por medio de elementos filtrantes.
30. **PLC (Controlador Lógico Programable):** Dispositivo electrónico utilizado para automatizar procesos industriales. El PLC recibe señales de entrada, las procesa según un programa preestablecido y genera salidas para controlar equipos.
31. **Política de Mantenimiento:** Conjunto de decisiones sobre qué tipo de acciones tomar para prevenir o mitigar fallas funcionales. Puede incluir tareas a tiempo, a condición, o correctivas, entre otras.
32. **Probabilidad o Tasa de Falla**: Medida de la frecuencia con que se espera que ocurra una falla en un activo durante un periodo específico, utilizada para evaluar la confiabilidad.
33. **Rediseño:** Acción de modificar un sistema o activo para eliminar fallas recurrentes o problemas de confiabilidad. Generalmente utilizada cuando las tareas de mantenimiento preventivo o correctivo no son suficientes.
34. **SAE JA**: Conjunto de normas y directrices desarrolladas por la Society of Automotive Engineers (SAE) que abordan temas relacionados con la confiabilidad y el mantenimiento de sistemas y componentes, incluyendo el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).
35. **Seguridad Operacional:** Grado de reducción del riesgo de daños o accidentes como consecuencia de fallas en un sistema. El RCM se enfoca en reducir estos riesgos al mínimo mediante una planificación adecuada del mantenimiento.

36. **TO (Tiempo Operacional)**: Tiempo total durante el cual un activo está en funcionamiento efectivo y realizando su función.
37. **TFS (Tiempo Fuera de Servicio)**: Tiempo total durante el cual un activo no está operativo debido a fallas o mantenimiento.
38. **TPO (Tiempo Promedio Operativo)**: Promedio del tiempo que un activo opera correctamente entre fallas, reflejando su confiabilidad.
39. **TPFS (Tiempo Promedio Fuera de Servicio)**: Promedio del tiempo que un activo está fuera de servicio por fallas durante un periodo determinado.

INTRODUCCIÓN

En el competitivo entorno industrial actual, la labor de un ingeniero en mantenimiento es fundamental para asegurar la continuidad operativa, la eficiencia y la rentabilidad de las empresas. Su rol no solo implica supervisar y gestionar actividades de mantenimiento, sino también implementar estrategias avanzadas que optimicen el rendimiento y disponibilidad de los activos industriales. El mantenimiento ha evolucionado más allá de la simple corrección de fallas, hacia un enfoque integral que promueve prácticas preventivas, predictivas y proactivas. Este enfoque contribuye a reducir los tiempos de inactividad, minimizar costos operativos y maximizar la eficiencia de los procesos productivos.

En este contexto, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) se posiciona como una metodología clave para desarrollar planes de mantenimiento que prioricen la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. El RCM se enfoca en identificar funciones críticas, evaluar las posibles fallas y definir las acciones de mantenimiento más efectivas para prevenirlas. A través de un análisis riguroso, el RCM permite gestionar mejor los activos al tomar en cuenta no solo el impacto de las fallas, sino también el entorno operativo en el que ocurren.

Este trabajo presenta una propuesta de plan de mantenimiento basado en confiabilidad para los centros de mecanizado Urane-20, esenciales para la fabricación de cajas de cambio en la empresa automotriz HORSE. Estos equipos han presentado fallas recurrentes en los últimos años, afectando su disponibilidad y la productividad general. El análisis se centrará en el eje Z, identificado como el sistema más crítico debido a su alta frecuencia de fallas, lo que ha generado más de 1000 horas de inactividad en los últimos periodos. La implementación del RCM busca mejorar la confiabilidad y disponibilidad de estos centros de mecanizado, optimizando su operación y reduciendo tanto los costos de mantenimiento como el tiempo fuera de servicio.

La propuesta toma como referencia el Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) de los profesores Adolfo Crespo Márquez y Carlos A. Parra Márquez, que combinan la metodología RCM con las mejores prácticas de gestión de activos. El MGM

ofrece un enfoque integral que no solo permite identificar y priorizar las actividades de mantenimiento, sino que también promueve la alineación de estas actividades con los objetivos estratégicos de la organización, asegurando una mejora continua en la gestión de recursos y la toma de decisiones.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para los centros de mecanizado Urane-20 de la empresa HORSE, mediante el análisis de fallas y acciones de mejora, para la optimización de costos y disponibilidad operativa.

Objetivos específicos

- Describir el contexto operativo y las problemáticas de disponibilidad y confiabilidad de los centros de mecanizado Urane-20 en la empresa HORSE, para la justificación de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM).
- Determinar las actividades y políticas de mantenimiento para el eje Z de los centros de mecanizado Urane-20, mediante la aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) y el árbol de decisión RCM, para la reducción de fallas y la optimización de recursos.
- Evaluar la viabilidad económica de las actividades de mantenimiento propuestas para el eje Z de los centros de mecanizado Urane-20, mediante la comparación de costos de falla e inversión entre el escenario actual y el proyectado, para la justificación financiera del plan RCM.

CAPÍTULO I: CONTEXTO OPERACIONAL

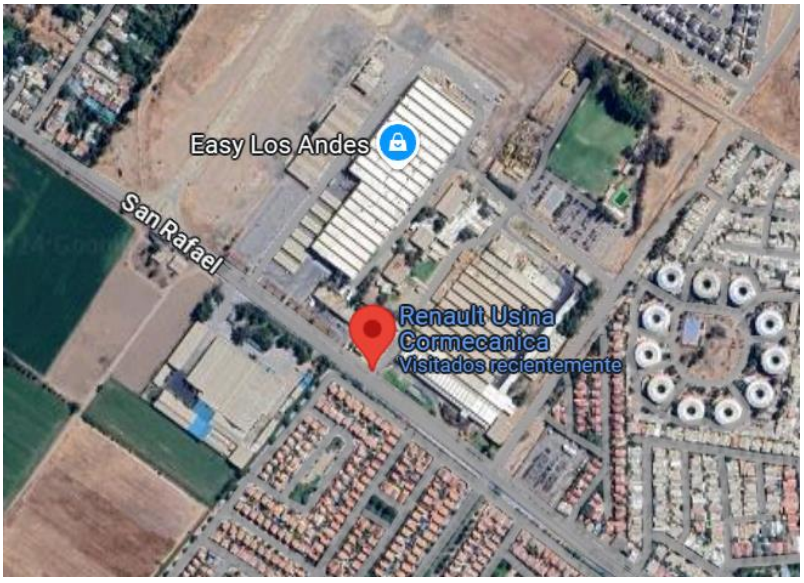
1.1. Antecedentes de la empresa

HORSE es una empresa global de manufactura automotriz, cuyo rubro es el desarrollo, fabricación y suministro de trenes motrices y transmisiones eficientes en consumo de energía, tanto de combustión interna como híbridos, a socios en todo el mundo. La empresa cuenta con centros de I+D y capacidades de fabricación en dos continentes, ofreciendo una amplia gama de soluciones para acelerar la descarbonización.

Además, HORSE aprovecha el conocimiento industrial y los activos del Grupo Renault, operando tres centros de I+D y ocho plantas de producción de trenes motrices en Argentina, Brasil, Chile, Portugal, Rumanía, España y Turquía.

La Planta de producción en Chile, está ubicada en San Rafael 1769, Los Andes, Valparaíso y posee una capacidad productiva de alrededor 800 cajas de cambio manuales de 100 Nm y 200 Nm de torque por día, las cuales son exportadas principalmente a Brasil, Argentina y Colombia, para distintos modelos de autos de las marcas Renault, Nissan y Geely principalmente.

Figura 1-1



Fuente: Google maps

La planta, antes conocida como Renault Usina Cormecánica cambio de nombre el reciente 1 de julio del 2023, donde por medio de un acuerdo entre las empresas Renault Group y Geely se crearía esta nueva empresa con la finalidad de combinar sus filiales en

sistemas de propulsión y así, liderar el mercado en motores híbridos y de combustión interna.

Esta empresa cuenta con un personal de 306 personas, quienes desempeñan diversas tareas y funciones dentro de las diferentes áreas operativas y administrativas. Estas labores incluyen desde la producción y el mantenimiento, hasta la gestión de calidad, logística y control de procesos, garantizando el óptimo funcionamiento de todas las actividades que permiten alcanzar los objetivos estratégicos de la organización.

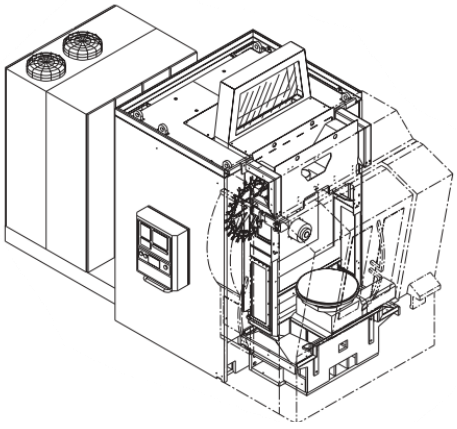
1.1.1. Misión y visión

La misión de HORSE es desarrollar y producir trenes motrices híbridos y de combustión interna eficientes, contribuyendo a una movilidad sostenible. Su visión es liderar la transición global hacia un transporte más ecológico, ofreciendo soluciones innovadoras y respetuosas con el medio ambiente, en colaboración con diversas industrias.

1.2. Descripción del equipo

Los equipos objeto de análisis son la flota de centros de mecanizado Urane-20, los cuales son utilizados para el maquinado de los cárteres de las cajas de cambio del tipo "J". En los últimos años estos equipos han ido presentando fallas constantes en los últimos años. Este incremento en la frecuencia de fallas ha generado preocupación, destacando la necesidad de revisar y actualizar las estrategias de mantenimiento implementadas hasta el momento.

Figura 1-2: Dibujo técnico de CNC similar a las Urane-20



Fuente: Renault Automation Comau

En particular, los centros de mecanizado modelo Urane-20, que forman parte de la flota de la empresa, se agrupan en dos versiones: la versión 1, que corresponde al primer modelo de las Urane-20, y la versión 2, que presenta una leve mejora en su sistema operativo, además de una disposición modificada de algunos de los sistemas. La versión 1 incluye los equipos CUC 01, 03 y 05, mientras que la mayoría de los

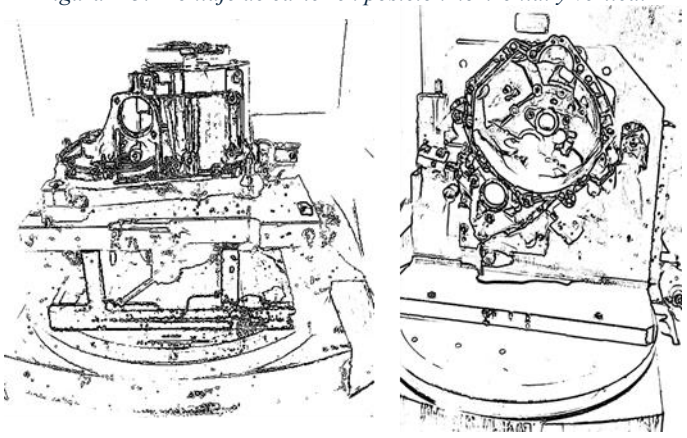
equipos pertenecen a la versión 2, que abarca las CUC 02, 04, 06, 07, 08, 09, 10, 11 y 12, aunque los dos últimos equipos se encuentran fuera de servicio.

Estos equipos se dividen en dos grupos principales: “C.E.D-JXX” y “C.MEC-JXX”, según el área del cárter que mecanizan. El grupo “C.E.D-JXX” se encarga del maquinado de los bloques del área de embrague, y está compuesto por los equipos 01-04, 09, 11 y 12. Por otro lado, el grupo “C.MEC-JXX” se dedica al área de mecanismo, agrupando los equipos 05-08 y 10.

Los centros de mecanizado modelo Urane-20 fueron adquiridos como parte del traspaso del Grupo Renault a HORSE. Estos equipos, con una antigüedad considerable, datan de entre los años 1990 y 2000, lo que subraya aún más la urgencia de una gestión de mantenimiento adecuada para prolongar su vida útil y asegurar un rendimiento óptimo

A pesar de su antigüedad, el Urane-20 sigue siendo un equipo robusto y eficiente, con una capacidad de carga de hasta 500 kilos. Además, su paletizador de doble montaje permite almacenar y trabajar dos piezas simultáneamente, una en posición vertical y otra en horizontal, lo que incrementa la productividad al reducir las acciones de carga y descarga. Como resultado, se logra una producción de 50 piezas por turno de apertura (404 min/turno). El equipo opera generalmente en tres turnos de 8 horas durante seis días a la semana, aunque estos turnos pueden variar según la disponibilidad de equipos y la demanda de producción.

Figura 1-3: Montaje de cárter en posición horizontal y vertical



Fuente: Elaboración propia

1.2.1. Análisis S.I.P.O.C

El análisis SIPOC permite delimitar de forma clara el alcance del proceso de mecanizado de cárteres, identificando a los proveedores, las entradas, el proceso, las salidas y los clientes involucrados. Desde la perspectiva de la gestión del mantenimiento y la confiabilidad, este análisis resulta clave para comprender las interdependencias entre recursos humanos, técnicos y operacionales que influyen directamente en el desempeño del equipo.

Figura 1-4

S	I	P	O	C
INTERNOS • Operadores de CNC. • Unidad GATM • POE **EXTERNOS** • Planta de fundición PFA.	**INTERNOS** • Componentes del equipo. • Herramientas "HSK 63 E" del equipo. • Programas CNC. • Tareas de mantenimiento. • Energía eléctrica. • Energía neumática. • Energía hidráulica. • Refrigerante. **EXTERNOS** • Carters sin mecanizar.	• Preparación del equipo. • Carga de carteres. • Mecanizado. • Inspección y acabado. • Despacho de piezas.	**PRINCIPALES** • 50 piezas mecanizadas por turno. **SECUNDARIAS** • Residuos de material (virutas de aluminio). • Refrigerante contaminado.	**INTERMEDIOS** (Carter) • Laboratorio de metrología. (Refrigerante y viruta) • Central de tratamiento de líquido refrigerante **FINALES** • Línea de montaje. • Clientes externos.

Fuente: Elaboración propia

En el apartado de **proveedores (S)**, se observa la participación tanto de proveedores internos operadores: CNC, unidad GATM y POE, como externos: planta de fundición PFA, lo que evidencia que la continuidad del proceso depende no solo del estado del equipo, sino también de la coordinación entre distintas áreas y del suministro oportuno de materia prima. Cualquier desviación en estos proveedores puede impactar directamente la carga del equipo y su disponibilidad.

Las **entradas (I)** incluyen componentes críticos del equipo, herramientas específicas, programas CNC, tareas de mantenimiento y distintos tipos de energía, además del refrigerante. Esto pone de manifiesto que el proceso es altamente dependiente de múltiples recursos técnicos, muchos de los cuales están directamente asociados a modos de falla relevantes (por ejemplo, fallas en sistemas eléctricos, hidráulicos o contaminación del refrigerante), reforzando la necesidad de planes de mantenimiento bien definidos.

El **proceso (P)** describe las etapas clave de preparación, carga, mecanizado, inspección y despacho, lo que permite identificar puntos críticos donde una falla del equipo puede generar detenciones no planificadas, reprocesos o pérdidas de calidad. Estas etapas son especialmente sensibles a la condición del eje Z y de los sistemas asociados, lo que justifica su selección como sistema crítico para el análisis RCM.

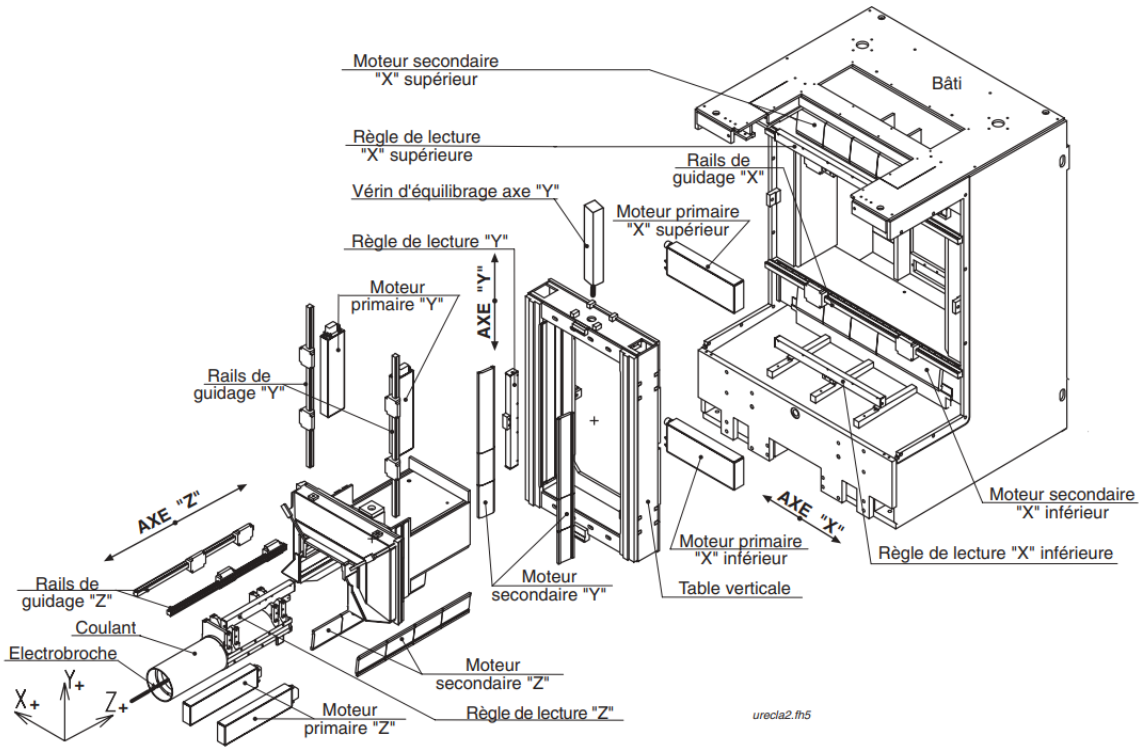
En cuanto a las **salidas (O)**, se distinguen salidas principales (piezas mecanizadas por turno) y secundarias (residuos y refrigerante contaminado). Esto evidencia que el proceso no solo debe gestionarse en términos productivos, sino también ambientales, lo cual introduce restricciones adicionales al mantenimiento, especialmente en lo relativo al control del refrigerante y la gestión de virutas.

Finalmente, los **clientes (C)** incluyen clientes intermedios y finales, tanto internos como externos. La diversidad de clientes resalta que las fallas del proceso no solo afectan la producción inmediata, sino también etapas posteriores como el montaje y la satisfacción del cliente final, aumentando el impacto operacional y económico de la indisponibilidad del equipo.

1.2.2. Sistemas del equipo

Además del análisis del ciclo productivo, es fundamental comprender cómo los sistemas internos de las Urane-20 permiten mantener su rendimiento. A pesar de las diferencias entre la versión 1 y la versión 2, ambos modelos comparten una arquitectura basada en sistemas esenciales que aseguran su funcionamiento óptimo. Estos sistemas se incluyen a continuación para facilitar su comprensión sobre la función que cumplen:

Figura 1-5



Fuente: Renault Automation Comau

- **SISTEMA DE MOVIMIENTO DE AVANCE (EJE Z):** Este sistema se encarga de realizar el movimiento de penetración de la electrobrocha, está compuesto por dos motores lineales primarios (parte eléctrica) y 8 motores secundarios cortos (parte imantada), dos rieles guía, una regla óptica y conductos para la refrigeración de los motores y presurización de la regla óptica.
- **SISTEMA DE MOVIMIENTO LATERAL (EJE X):** Este sistema, como su nombre lo indica, se encarga del movimiento lateral de la electrobrocha, está compuesto por dos motores lineales primarios, dos motores secundarios largos y 6 cortos, además al igual que el eje z, está compuesto por dos rieles guía y una regla óptica.
- **SISTEMA DE MOVIMIENTO VERTICAL (EJE Y):** Este sistema es responsable del movimiento ascendente y descendente de la electrobrocha, además de mantenerla en una posición neutral. Esto se logra mediante un vástago neumático que equilibra las cargas generadas por el peso de la electrobrocha. El

eje Y está compuesto por dos motores lineales primarios, dos motores secundarios largos y dos cortos, dos rieles guía, una regla óptica, y el mencionado vástago neumático.

- **SISTEMA DE ROTACIÓN (EJE C):** Este sistema es básicamente el responsable del movimiento rotacional de la electrobrocha, por lo que es una mera representación de esta como sistema individual.
- **SISTEMA DE ROTACIÓN DE MONTAJES (EJE B):** Este sistema es el encargado de bridar el palet y realizar la rotación del montaje (cárter) posicionándolo para las distintas perforaciones que se le realizan en su caras frontales y laterales. Este sistema está conformado por un husillo de bolas, el cual se encarga de realizar la sujeción del palet por medio de una estrella que genera el bloqueo de este. Además, cuenta con un servomotor, frenos hidráulicos y sensores de posición, los cuales aseguran la precisión en el movimiento del sistema.
- **SISTEMA DE ROTACIÓN DE PALETS (EJE W):** Este sistema se encarga de indexar y rotar los palets por medio de un paletizador hidráulico de doble cabina. Este sistema está compuesto de varios componentes, como: un paletizador en forma de H; un basculador, el cual inclina el paletizador para facilitar la rotación; un motor hidráulico OMR160; un interruptor de proximidad inductivo; un sistema de lubricación automático; cuñas de ajuste; dos limitadores de caudal y un limitador de presión de doble brida.
- **SISTEMA DE FIJACIÓN DE MONTAJES (COUPLER):** Este sistema, como su nombre lo indica, se encarga de fijar los montajes una vez son cargados en el palet, esto por medio de tres brazos que cierran al aplicarles una fuerza hidráulica que se transmite por medio de unas mangueras que se conectan debajo del palet.
- **SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE HERRAMIENTAS (EJE Q):** Este sistema cuenta con dos cabinas, las cuales almacenan las 38 herramientas HSK63 que utiliza el electrohusillo para las perforaciones del cárter. Está compuesto por dos ruedas dentadas, en las cuales van ubicadas las pinzas que sostienen las herramientas. Estas ruedas giran mediante un servomotor con un reductor, el cual

por medio de indicaciones electrónicas enviadas por el PLC transcribe e identifica la posición de cada herramienta en el almacén.

- **SISTEMAS DE APERTURA DE PUERTAS:** Este sistema engloba de forma general los componentes asociados a la apertura de puertas de mantenimiento y de carga

1.2.3. Subsistemas del equipo

- **SISTEMA NEUMÁTICO:** El sistema neumático incluye 4 tipos de aire: **aire de ciclo (C)**, **aire filtrado permanente (PF), aire micro filtrado permanente (PMF)** y **aire ultrafiltrado permanente.**
  - El **aire de ciclo** se utiliza para equilibrar la masa del eje Y, indexar los brazos del paletizador, accionar las puertas de carga, emulsificar el aceite de riego o lavado (arrosage) y limpiar los apoyos de sujeción del palet.
  - El **aire filtrado permanente** se encarga de pilotar una válvula para el flujo del aire de ciclo para el accionamiento del vástago neumático que nivela la carga del eje Y.
  - El **aire micro filtrado permanente** presuriza y realiza el soplado (limpieza) del cono de la electrobrocha para la toma de herramientas, además se usa para presurizar el eje B y las reglas ópticas de los ejes X, Y y Z.
- **SISTEMA HIDRÁULICO (GRUPO HIDRÁULICO):** El sistema hidráulico se encarga de rotar el paletizador en 180°, generar el bloqueo del montaje del palet, levantar y bajar el paletizador, y permitir el cambio y sujeción de herramientas en la electrobrocha.

  Para poder mejorar la estabilidad, eficiencia y seguridad del sistema, este cuenta con acumuladores, los cuales funcionan generalmente a tres presiones: P0=60 bar, P1=67 bar y P2=80 bar, donde:
  - P0: Precarga de gas.
  - P1: Presión de trabajo.
  - P2: Presión máxima de operación o de carga completa.

- **SISTEMA ELÉCTRICO:** El sistema eléctrico suministra energía a todos los componentes de la máquina, incluidos los motores de la electrobrocha, los ejes y los sistemas de control.
- **SISTEMA ELECTRÓNICO:** El sistema electrónico se encarga de controlar la operación del equipo y de avisar en caso de fallas.
- **SISTEMA DE REFRIGERACIÓN AUTÓNOMO (R.A):** El sistema de refrigeración se encarga de mantener la temperatura de los componentes de la máquina dentro de un rango seguro de funcionamiento. Este sistema es autónomo, y se encarga de mantener las temperaturas de los motores lineales de los ejes (primario y secundario), la electrobrocha y del armario eléctrico dentro un rango optimo.
- **SISTEMA DE ARROSAGE:** El sistema de arrosage limpia los componentes de la máquina eliminando los residuos de operación, como las virutas de aluminio. Este sistema es autónomo, y se encarga principalmente de limpiar de viruta la pieza que se está mecanizando y las herramientas que se utilicen, además se encarga de controlar la temperatura de estos elementos.
- **SISTEMA DE RETROALIMENTACIÓN:** Este sistema se encarga de medir el desplazamiento y la posición de los ejes del CNC durante el movimiento de la máquina, asegurando que las posiciones se mantengan dentro de las tolerancias especificadas.

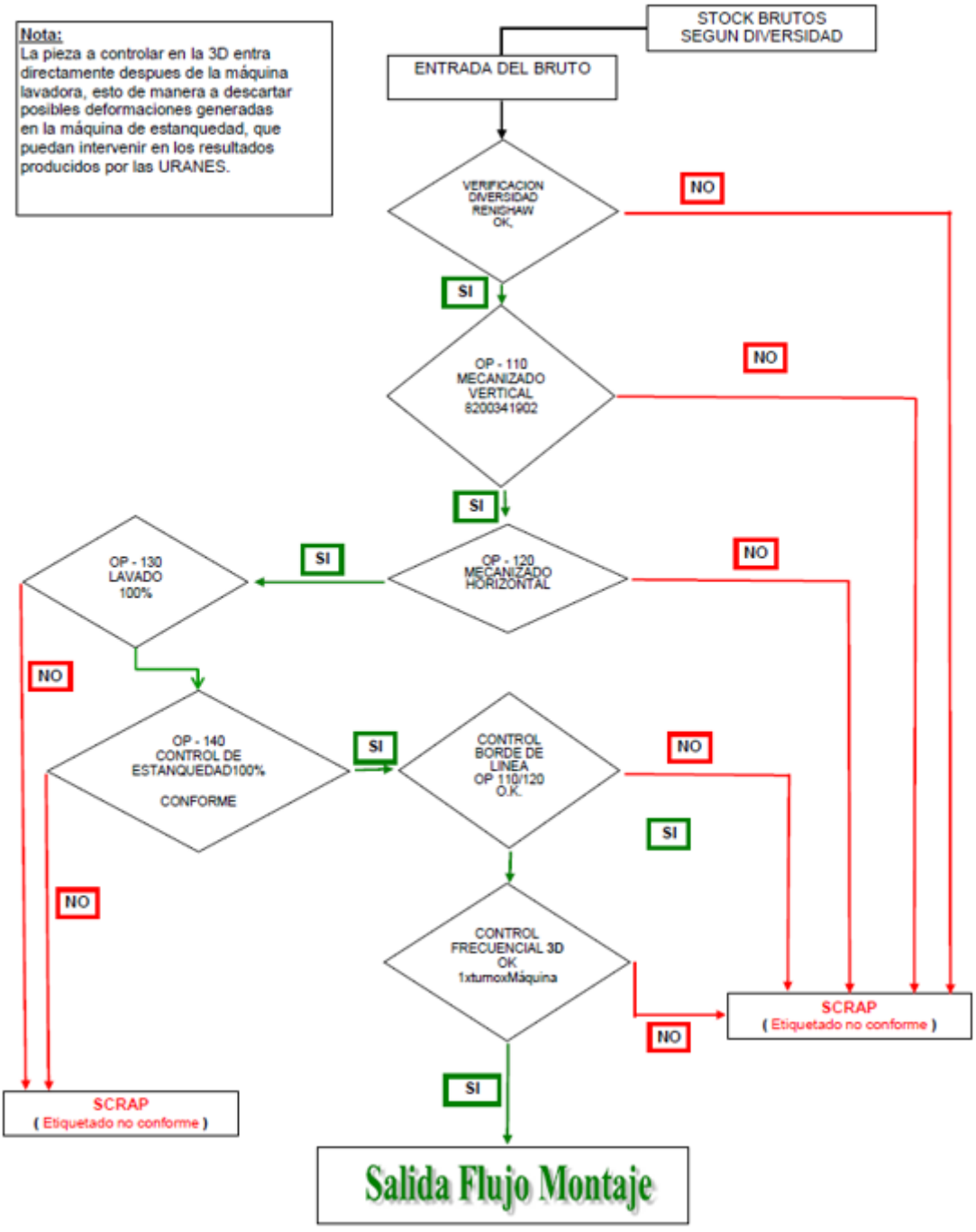
1.2.4. Descripción del proceso de las Urane-20

El proceso de producción en los centros de mecanizado Urane-20 se caracteriza por un flujo estructurado y controlado, diseñado para asegurar la calidad y precisión de las piezas mecanizadas. El flujo, como se puede apreciar en la ilustración 1, comienza con la entrada del bruto, que pasa por una serie de etapas de verificación y mecanizado, tanto en posiciones verticales como horizontales, utilizando tecnología de medición avanzada como el sistema Renishaw.

El objetivo principal es garantizar la conformidad de las piezas en todas las fases, desde el mecanizado inicial hasta la inspección final tridimensional (3D), incluyendo procesos intermedios como el lavado y el control de estanqueidad. Este enfoque permite detectar y corregir cualquier defecto en etapas tempranas del proceso, minimizando el riesgo de fallas durante el ensamblaje final y asegurando que solo las piezas conformes lleguen a la etapa de montaje.

El uso de múltiples puntos de inspección, junto con la tecnología de control tridimensional, asegura la precisión en las dimensiones críticas y el cumplimiento de las especificaciones del producto. Esta estrategia reduce el desperdicio y optimiza la calidad del producto final, al mismo tiempo que se garantiza la eliminación de piezas defectuosas mediante el etiquetado como Scrap en caso de no conformidad.

Figura 1-6

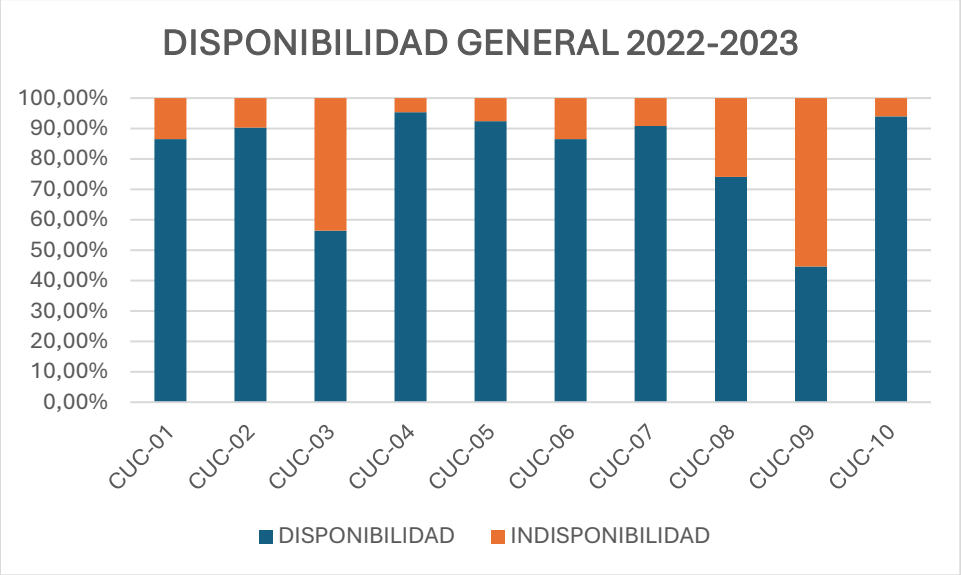


Fuente: Renault Automation Comau

1.3. Problemática

El área de "Gestión y Apoyo Técnico al Mantenimiento" (GATM) de la empresa HORSE ha solicitado una evaluación de la flota de centros de mecanizado mencionado, esto debido a que han experimentado diversas fallas en los equipos que han afectado significativamente la disponibilidad de alguno de estos, como se puede ver a continuación:

Gráfico 1-1

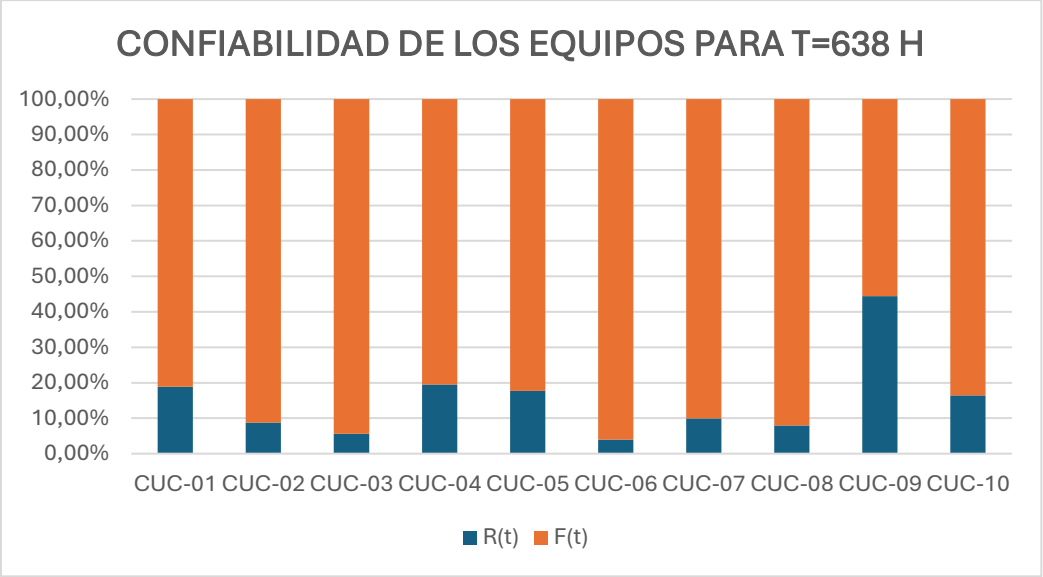


Fuente: elaboración propia en base al anexo 1

El área de GATM tiene como objetivo el mantener la disponibilidad de los equipos por sobre el **92%**, por lo que existen 7 de 10 equipos que no cumplen el estándar de desempeño esperado, siendo que incluso existen equipos cuya disponibilidad cae por debajo del 60%. Esta deficiencia ha provocado tiempos fuera de servicio prolongados, que se extienden por varios meses o incluso durante todo el año, afectando gravemente la productividad general.

Además, la confiabilidad de los equipos es bastante baja. En un periodo de un mes (aproximadamente **638 horas/mes**), los equipos muestran una alta probabilidad de falla, lo que significa que es muy probable que hayan experimentado fallas durante este tiempo, lo que a su vez incrementa los costos de mantenimiento y reparación.

Gráfico 1-2

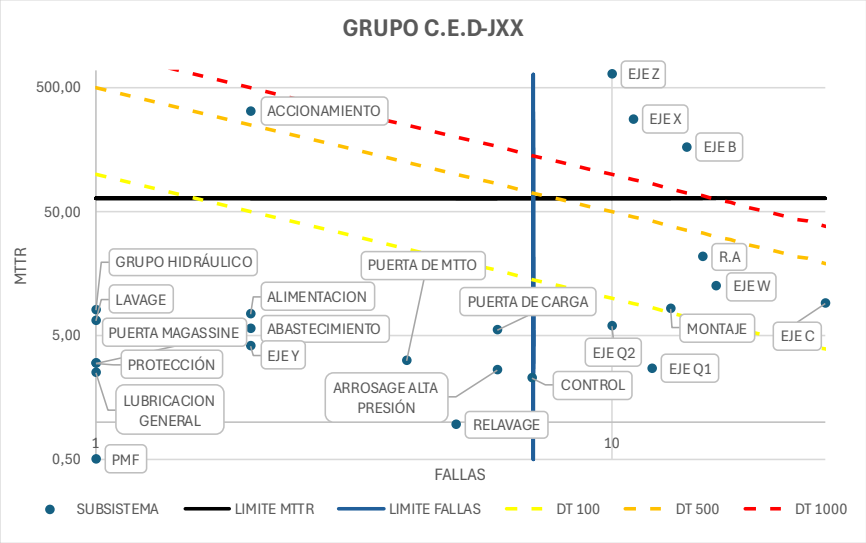


Fuente: elaboración propia en base al anexo 1

Si bien el área de GATM ha logrado cumplir con la demanda de producción a través de ajustes en los turnos de operación, esta es una práctica que no debería ser sostenible en el largo plazo. Estos ajustes no solo incrementan los costos operativos, sino que también aceleran el desgaste de los demás equipos, poniendo en riesgo la eficiencia futura del sistema de producción.

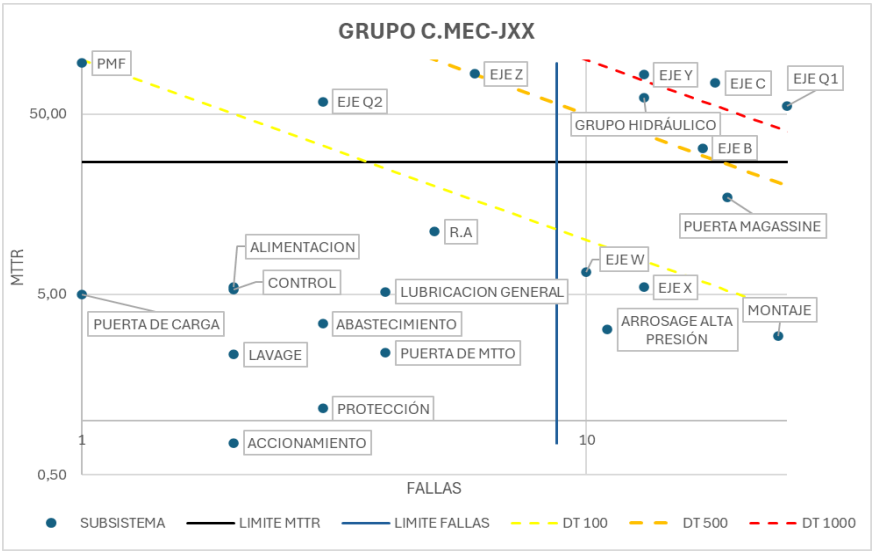
Debido a esta situación, se ha solicitado analizar en detalle el historial de fallas de los equipos, agrupándolos por grupo de producción (“C.E.D-JXX” y “C.MEC-JXX”) para identificar cuáles son las áreas y sistemas que más han afectado la disponibilidad de los equipos:

Gráfico 1-3: Sistemas críticos del grupo C.E.D-JXX



Fuente: elaboración propia en base al historial de fallas

Gráfico 1-4: Sistemas críticos del grupo C.MEC-JXX



Fuente: elaboración propia en base al historial de fallas

Como se puede apreciar en los gráficos de dispersión los elementos más críticos de la flota corresponden a los ejes: X, Z, Y, B, Q1 y C, puesto que superan las 1000 horas fuera de servicio en sus respectivos grupos.

En conclusión, el análisis realizado revela problemas críticos en varios ejes de los centros de mecanizado Urane-20, lo que ha reducido significativamente la disponibilidad y confiabilidad de los equipos. Aunque el área de GATM ha mitigado el impacto de estas fallas con ajustes en los turnos de operación, estas soluciones temporales incrementan los costos y aceleran el desgaste de los equipos restantes. Es crucial desarrollar estrategias de mantenimiento específicas y dirigidas a los sistemas más vulnerables, como los ejes mencionados, para mejorar la eficiencia operativa, reducir los tiempos fuera de servicio y asegurar el cumplimiento de la demanda a largo plazo.

1.4. Propuesta de solución

Debido a la alta tasa de fallas recurrentes y el déficit en la disponibilidad operativa de los centros de mecanizado Urane-20, se ha dispuesto el desarrollo de un plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) con enfoque prioritario en el Eje Z. La criticidad de este sistema se sustenta en el análisis del historial de eventos, el cual lo posiciona como el principal factor de indisponibilidad. Durante el bienio 2022-2023, las fallas en el Eje Z provocaron un tiempo de inactividad acumulado de 6443 horas en el área de mecanizado de embragues, lo que representa una pérdida de disponibilidad promedio de 19,18 días anuales por unidad o una pérdida del 8% en la disponibilidad del quipo, considerando 5640 horas hábiles por año.

La criticidad del Eje Z subyace en su rol determinante para la precisión cinemática y la integridad funcional del activo, dado que cualquier desviación o falla en este sistema impacta de forma directa en la calidad del mecanizado.

En virtud del alcance del presente estudio y la relevancia estratégica de este componente, se ha delimitado el análisis exclusivamente a dicho sistema. La metodología empleada se fundamenta en los criterios de la norma **SAE JA1012**, garantizando que las estrategias de mantenimiento propuestas se orienten rigurosamente a la mitigación de los modos de falla identificados y a la gestión de sus efectos dentro del contexto operacional de la planta.

El primer paso en el proceso RCM será la realización de un Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Fallas (FMECA), enfocado en el Eje Z. Este análisis permitirá

identificar y clasificar los modos de falla probables que afectan al sistema, proporcionando un desglose detallado de las causas subyacentes y sus efectos. La norma SAE JA 1012 subraya la importancia de que los modos de falla estén descritos con suficiente detalle, facilitando así la selección de políticas de mantenimiento adecuadas, sin caer en descripciones generales que dificulten la acción preventiva.

El FMECA aplicado al Eje Z analizará sus principales componentes, como los motores lineales, rieles guía, y sensores de posición. Cada modo de falla será documentado con claridad, siguiendo las recomendaciones de la norma, describiendo el evento específico que lo provoca y sus consecuencias en el desempeño del equipo.

El proceso RCM busca responder las siguientes siete preguntas clave, según lo estipulado por la SAE JA 1012:

1. **¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño asociados con el equipo en su contexto operacional actual?**

   Se analizarán las funciones primarias y secundarias del Eje Z, así como los estándares de precisión requeridos para asegurar su funcionamiento óptimo.
2. **¿De qué maneras puede fallar el equipo respecto a las funciones que cumple en dicho contexto?**

   Se identificarán las fallas funcionales, tanto parciales como totales, del Eje Z que impactan la productividad y calidad del mecanizado.
3. **¿Qué causa cada falla funcional?**

   Se documentarán los modos de falla específicos que contribuyen a la pérdida de función, prestando atención a los eventos causales identificables, como desgaste, malfunción de sensores, o problemas en la transmisión.
4. **¿Qué ocurre cuando sucede una falla?**

   Se detallarán los efectos inmediatos y a largo plazo que ocurren tras una falla funcional, considerando tanto la pérdida de precisión como las posibles interrupciones en la producción.
5. **¿Cómo impacta cada falla en la operación y la seguridad?**

Se evaluarán las consecuencias operativas y de seguridad de cada modo de falla, siguiendo las categorías de consecuencias definidas en la SAE JA 1012, como la afectación a la productividad, la seguridad del operador y el cumplimiento ambiental.

6. **¿Qué puede hacerse para prevenir cada falla funcional?**

   Se identificarán las políticas de mantenimiento proactivo, tales como tareas basadas en condición, restauración programada o rediseño, en función de cada modo de falla y sus características de criticidad.

7. **¿Qué puede hacerse si no se encuentra una tarea de prevención adecuada para una falla?**

   Se explorarán alternativas, incluyendo estrategias como operar hasta fallar o cambios en el diseño del componente, cuando no existan tareas preventivas viables.

La implementación del RCM y el análisis FMECA tiene como objetivo optimizar el rendimiento del Eje Z mediante la identificación de las estrategias de mantenimiento más adecuadas para este sistema crítico. Al realizar este análisis, se espera lograr lo siguiente:

- **Reducir la frecuencia de fallas del Eje Z:** Al identificar las causas más comunes de fallas, se podrán implementar medidas preventivas o correctivas que prolonguen la vida útil de los componentes y reduzcan los tiempos fuera de servicio.
- **Aumentar la disponibilidad del equipo:** El Eje Z es esencial para la operación de los centros de mecanizado. Mejorando su confiabilidad, se incrementará la disponibilidad general del equipo, permitiendo alcanzar niveles óptimos de producción sin interrupciones prolongadas.
- **Disminuir los costos de mantenimiento:** Al optimizar el mantenimiento del Eje Z, se espera reducir la necesidad de intervenciones no planificadas, lo que minimizará los costos asociados a reparaciones de emergencia y repuestos.

- **Mejorar la eficiencia operativa:** Con un Eje Z más confiable, se espera mejorar la precisión y velocidad del mecanizado, lo que contribuirá a una mayor eficiencia en el proceso productivo.

En conclusión, el RCM aplicado al Eje Z de los centros de mecanizado Urane-20 permitirá focalizar los esfuerzos de mantenimiento en el sistema más crítico del equipo, con el objetivo de maximizar su disponibilidad, reducir costos y mejorar la confiabilidad general. La propuesta busca establecer una base sólida para la futura implementación de estrategias de mantenimiento a otros sistemas del equipo, una vez completado el análisis del Eje Z.

CAPÍTULO II: APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)

Introducción

Este capítulo busca aplicar la propuesta antes mencionada, satisfaciendo las 7 preguntas que formula el RCM y que se pueden responder mediante la herramienta del análisis de modos y efectos de falla (FMECA).

2.1. Función

El Eje Z, como se mencionó anteriormente en la sección 1.2, es responsable de realizar el movimiento de avance del electrohusillo. Este desplazamiento se lleva a cabo mediante motores lineales, que generan la potencia necesaria para trasladar el electrohusillo a lo largo del riel guía. El control de estos motores se realiza a través de sistemas de control y retroalimentación.

El sistema de control gestiona las órdenes que deben ejecutar los motores lineales, compuesto por la tarjeta de control, el módulo SIMODRIVE y el PLC, cada uno con funciones específicas:

- **Tarjeta de control:** La tarjeta de control procesa el código G, determina el movimiento necesario y envía comandos al SIMODRIVE para gestionar los motores.
- **Módulo SIMODRIVE:** El módulo SIMODRIVE recibe las órdenes de la tarjeta de control y regula el accionamiento de los motores, ajustando la velocidad, el torque y la posición de los ejes.
- **PLC:** El PLC se encarga de las funciones auxiliares de la máquina, gestionando la secuencia de operaciones, la seguridad y el control de dispositivos periféricos.

Por otro lado, el sistema de retroalimentación garantiza la precisión y el control continuo del movimiento de los motores. Este sistema mide en tiempo real la posición, velocidad y otros parámetros a través de una regla óptica, comparando estos datos con los valores esperados para corregir cualquier desvío o error durante el desplazamiento.

2.1.1. Estándares de ejecución

- Aceleración de desplazamiento de $15 \pm 3 \left[{}^{m}/_{s^2}\right]$

- Precisión de posicionamiento de ±0,01 mm.
- Repetibilidad de ±0,005 mm.

2.2. Fallas Funcionales del Eje Z

Las fallas funcionales se refieren a la pérdida de la función de un activo, y pueden presentarse de manera total o parcial. En este contexto, se ha definido como falla total la incapacidad de la electrobrocha para moverse en la dirección del eje Z, mientras que se considera falla parcial cuando las perforaciones realizadas por la electrobrocha se encuentran fuera de tolerancia debido exclusivamente a una falla en los componentes del eje Z. Estas fallas se clasifican como A para fallas totales y B para fallas parciales, tal como se muestra en la tabla 1

2.3. Causas de falla

De acuerdo con la norma SAE JA 1011, sección 5.3, "se deben identificar los modos de falla probables que puedan causar una falla funcional". En base a este criterio, los modos de falla se seleccionaron utilizando los datos históricos de fallas, así como suposiciones fundamentadas en las tareas de mantenimiento preventivo actuales y las condiciones operativas del equipo. Estas suposiciones fueron validadas con el personal de mantenimiento para garantizar que los eventos seleccionados sean realistas y probables. A continuación, se detallan los modos de falla identificados para las fallas funcionales del activo:

Tabla 2-1

Activo: Eje Z					
#	Función	#	Falla funcional	#	Modos de falla
1	Realizar el movimiento de avance de la electrobrocha con una: Aceleración de desplazamiento	A	La electrobrocha se encuentra detenida en la dirección del eje.	1	Mangueras del sistema de refrigeración de los motores lineales, fugas.
				2	Motores lineales secundarios, corroídos.
				3	Cable de alimentación de los motores lineales primarios, picado.

	de $15 \pm 3 \left[{}^{m}/_{s^2}\right]$. Precisión de posicionamiento de ±0,01 mm. Repetibilidad de ±0,005 mm.			4	Conectores de los cables de alimentación de los motores lineales primarios, sulfatados.
				5	Modulo SIMODRIVE, cortocircuitado.
				6	Patines de las guías lineales, fracturados.
				7	Tarjeta de control, cortocircuitado.
				8	Cable de señal de la regla óptica, picado.
				9	Motores lineales, aislamiento degradado.
				10	Sensor de regla óptica, contaminado.
		B	Las perforaciones de la electrobrocha se encuentran fuera de tolerancia.	1	Guías lineales, corroídas.
				2	Regla óptica, desreglada.
				3	Catenaria, quebrada.

Fuente: Elaboración propia

2.4. Efectos de falla

Para responder a la pregunta número 4 del RCM, "¿Qué ocurre cuando sucede una falla?", es fundamental considerar otras seis preguntas clave que permiten evaluar de manera integral los efectos de la falla:

1. ¿Cuál es la evidencia de que la falla se ha producido?
2. ¿Qué síntoma caracteriza el modo de falla?
3. ¿Puede esta falla representar una amenaza para la seguridad de los trabajadores o las instalaciones?
4. ¿Existe el riesgo de que la falla genere un impacto negativo en el medio ambiente?
5. ¿Qué daños físicos puede causar la falla en el activo?
6. ¿Qué acciones son necesarias para restaurar la función principal del activo o sistema afectado?

A partir de estas preguntas, se pueden identificar y describir los efectos de cada modo de falla, los cuales se detallan a continuación:

Tabla 2-2: AMEF eje Z (2/2)

#	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA	MTTR	C. MATT. CORRECT.
1.A.1	Mangueras del sistema de refrigeración de los motores lineales, fugas.	Evidente: Si Afecta SHA: No Causas: Válvulas del sistema de refrigeración obstruidas, mangueras con fugas, bomba del sistema de refrigeración no entrega el caudal requerido. Efecto operacional: Detención operacional por alarma. Acción correctiva: Inspeccionar el sistema, cambiar mangueras y/o sellos.	1,5	$ 460.317
1.A.2	Motores lineales secundarios, corroídos.	Evidente: No Afecta SHA: No Causas: Neblina corrosiva. Efecto operacional: Interrupción prolongada de la operación. Acción correctiva: Reemplazar motores lineales secundarios.	13	$ 4.176.404
1.A.3	Cable de alimentación de los motores lineales primarios, picado.	Evidente: Si Afecta SHA: No Causas: Neblina corrosiva, roce constante en la catenaria. Efecto operacional: Interrupción de la operación por alarma. Acción correctiva: Reemplazar los cables de alimentación y revisar aislamiento de los motores.	2	$ 678.978
1.A.4	Conectores de los cables de alimentación de los motores lineales primarios, sulfatados.	Evidente: Si Afecta SHA: No Causas: Neblina corrosiva, mala fijación de los conectores. Efecto operacional: Interrupción de la operación por alarma. Acción correctiva: Reemplazar los cables de alimentación y revisar aislamiento de los motores.	2	$ 678.978

1.A.5	Modulo SIMODRIVE, cortocircuitado.	Evidente: Si Afecta SHA: No Causas: Contaminación del componente por polvo, humedad u otro; ventilación deficiente. Efecto operacional: Interrupción de la operación por alarma. Acción correctiva: Reemplazar modulo SIMODRIVE.	1	$	2.689.621
1.A.6	Patines de las guías lineales, fracturados.	Evidente: No Afecta SHA: No Causas: Ingreso de viruta al riel guía, neblina corrosiva, falta de lubricación o lubricación incorrecta, montaje incorrecto. Efecto operacional: Bloqueo del eje. Acción correctiva: Reemplazar conjunto guía-patines.	51	$	12.060.162
1.A.7	Tarjeta de control, cortocircuitado.	Evidente: Si Afecta SHA: No Causas: Contaminación del componente por polvo, humedad u otro; ventilación deficiente. Efecto operacional: Interrupción de la operación por alarma. Acción correctiva: Reemplazar tarjeta de control.	1,5	$	2.997.402
1.A.8	Cable de señal de la regla óptica, picado.	Evidente: Si. Afecta SHA: No Causas: Desgaste mecánico, desgaste abrasivo. Efecto operacional: Interrupción de operación por alarma. Acción correctiva: Reemplazar cable.	1,5	$	491.720
1.A.9	Motores lineales, aislamiento degradado.	Evidente: Si. Afecta SHA: No Causas: contaminación, sobrecalentamiento, sobretensión, cables mal conectados, roce entre el motor primario y secundario (entre hierro menor). Efecto operacional: Perdida de potencia; Activación de alarma; perdidas de producción. Acción correctiva: Reemplazar y enviar a reparar.	13	$	7.783.217

1.A.10	Sensor de regla óptica, contaminado.	Evidente: Si. Afecta SHA: No Causas: Ingreso de escoria y refrigerante al área de motriz equipo. Efecto operacional: Interrupción de operación por alarma. Acción correctiva: Limpiar la ventana de la cabeza lectora, inspeccionar filtros de la FRL y la lámina anti-salpicadura de la regla.	1,5	$	340.317
1.B.1	Guías lineales, corroídas.	Evidente: No Afecta SHA: No Causas: Ingreso de viruta al riel guía, neblina corrosiva, falta de lubricación o lubricación incorrecta, montaje incorrecto. Efecto operacional: Aumento de vibración y ruido; producción de piezas fuera de tolerancia. Acción correctiva: Reemplazar conjunto guías lineales-patines.	51	$	14.227.855
1.B.2	Regla óptica, desreglada.	Evidente: No. Afecta SHA: No Causas: Mal montaje. Efecto operacional: Errores de posicionamiento; baja precisión en el mecanizado; perdidas de producción; falla potencial en otros componentes, como la brocha y motores lineales. Acción correctiva: Corregir posicionamiento.	1	$	226.878
1.B.3	Catenaria, quebrada.	Evidente: No. Afecta SHA: No Causas: Acumulación de suciedad en las uniones de los eslabones, tensores mal acoplados o ausentes. Efecto operacional: Aumento de vibraciones y ruido; Sobretensión en las conexiones de electrobrocha; soltura mecanica; falla de la toma de herramientas en la electro brocha; quiebre en las mangueras. Acción correctiva: Reemplazar la catenaria.	6	$	1.361.267

Fuente: Elaboración propia

2.5. Consecuencias de falla

La pregunta 5 del RCM, "¿Cómo impacta cada falla?", tiene como objetivo identificar las consecuencias de cada falla, considerando su efecto sobre la operación del equipo, la seguridad, el medio ambiente y su visibilidad (evidente/no evidente). Estas consecuencias son esenciales para decidir qué acciones de mantenimiento deben implementarse, priorizando aquellas que mitiguen los riesgos más críticos.

Fallas evidentes y no evidentes

- **Fallas evidentes**: Son aquellas fallas que se manifiestan de manera clara y visible en la operación del equipo. Pueden provocar una parada inmediata o una reducción significativa en el rendimiento, y su detección es obvia para los operadores. Ejemplos incluyen la rotura de un componente clave o una fuga de fluidos que afecta directamente el funcionamiento.
- **Fallas no evidentes**: Estas fallas no se detectan fácilmente y pueden permanecer ocultas mientras siguen causando daños o reduciendo la eficiencia del equipo. Su impacto puede no ser perceptible de inmediato, pero pueden tener graves consecuencias si no se abordan a tiempo. La identificación de estas fallas suele requerir inspecciones o monitoreo especializado. Un ejemplo típico es el desgaste interno de un componente que no muestra signos visibles hasta que la falla es crítica.

Impacto en la operación

El impacto de una falla sobre la operación se refiere a cómo afecta el rendimiento del equipo o del sistema. Se pueden evaluar los siguientes aspectos:

- **Paradas de producción**: Algunas fallas pueden causar paradas completas del sistema, afectando la producción y generando altos costos debido a la interrupción.
- **Pérdida de rendimiento**: Otras fallas pueden no detener completamente el sistema, pero reducir su eficiencia o capacidad, generando una pérdida en la calidad del producto o en la tasa de producción.
- **Costos asociados**: Se puede estimar el impacto económico de cada falla en términos de costos de reparación, tiempo de inactividad y pérdida de productividad. Esto ayuda a priorizar las fallas más costosas.

Impacto en seguridad y medio ambiente

Las fallas también pueden tener consecuencias graves en términos de seguridad y medio ambiente:

- **Seguridad**: Algunas fallas pueden poner en riesgo la integridad física de los trabajadores o del público. Esto incluye la posibilidad de accidentes, lesiones o incluso situaciones fatales, como incendios o explosiones. Para evaluar este impacto, se deben considerar los posibles escenarios de accidente que podría desencadenar la falla.
- **Medio ambiente**: Otras fallas pueden generar consecuencias adversas para el entorno, como la liberación de sustancias tóxicas, contaminación del suelo o del agua, o emisiones nocivas al aire. El impacto ambiental se mide a través de los posibles daños y las implicaciones regulatorias o legales que puedan derivarse.

Estimación o cálculo del impacto

Para cuantificar el impacto de los modos de falla, se utilizan diversas herramientas de análisis que pueden ser tanto cualitativas como cuantitativas. Una de las herramientas cuantitativas más empleadas es el **Número de Prioridad de Riesgo (NPR)**, el cual permite evaluar y jerarquizar la criticidad de los modos de falla mediante la multiplicación de tres factores clave: **severidad (S)**, **ocurrencia (O)** y **detectabilidad (D)**. Este enfoque facilita la identificación de los eventos que requieren mayor atención dentro del plan de mantenimiento.

- **Severidad (S)**: Representa la gravedad de las consecuencias de la falla en el sistema o en el cliente. Este factor abarca los impactos de la falla tanto en la operación como en la seguridad de los trabajadores y el medio ambiente.
- **Ocurrencia (O)**: Indica la probabilidad de que la falla ocurra, reflejando la frecuencia con la que es esperable que se manifieste el modo de falla.
- **Detectabilidad (D)**: Evalúa la capacidad para detectar la falla antes de que cause un impacto significativo. Una baja puntuación (1) indica que la falla es fácilmente detectable, mientras que una alta puntuación (10) señala que la falla es difícil de identificar.

Para asignar los valores de **severidad**, **ocurrencia** y **detectabilidad**, se utilizan las tablas y directrices proporcionadas por la norma **SAE JA 1739**, la cual ofrece un enfoque sistemático para llevar a cabo el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF). Esta norma establece criterios detallados para evaluar cada factor en una escala del 1 al 10, donde 1 representa el menor riesgo posible y 10 el mayor riesgo.

- **Severidad (S):**

Tabla 2-3

Efecto	Criterio: Severidad del efecto	Ranking
Peligros sin advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario. Muy alto ranking de severidad, cuando el modo de falla afecta la seguridad operativa y/o envuelve el no cumplimiento de regulaciones gubernamentales. La falla no se advierte al ocurrir.	10
Peligros con advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario. Muy alto ranking de severidad, cuando el modo de falla afecta la seguridad operativa y/o envuelve el no cumplimiento de regulaciones gubernamentales. La falla se advierte al ocurrir.	9
Muy alto	Perturbación grave a la línea productiva. Las pérdidas pueden alcanzar el 100% del producto. Equipo inoperable, pérdida de la función primaria. Cliente muy insatisfecho.	8
Alto	Perturbación menor en la línea productiva. La producción puede tener que ser ordenada y una parte desechada (menor al 100%). Equipo operable, pero con un nivel de calidad reducido. Cliente insatisfecho.	7

Moderado	Perturbación menor en la línea productiva. Una porción (menor al 100%) puede tener que ser desechada (no ordenada). Equipo operable, pero algunos ítems de confort inoperables. El cliente experimenta insatisfacción.	6
Bajo	Perturbación menor en la línea productiva. 100% del producto tiene que ser adaptado. Equipo operable, pero con algunos ítems de confort con un nivel de calidad reducido. El cliente experimenta algo de insatisfacción.	5
Muy bajo	Perturbación menor en la línea productiva. El producto puede ser ordenado y una porción (menor al 100%) adaptado. Ajustes y terminaciones no están en conformidad. Defecto notado por la mayoría de los clientes.	4
Menor	Perturbación menor en la línea productiva. Una parte (menor al 100%) puede ser modificada en línea, pero fuera de la estación. Se presentan desajustes y chirridos que no están en conformidad. Defecto notado por el 10% de clientes.	3
Muy menor	Perturbación menor en la línea productiva. Una parte (menor al 100%) puede ser modificada en línea, pero fuera de la estación. Se presentan desajustes y pequeñas vibraciones en el ítem que no están en conformidad. Defecto notado por la minoría de los clientes.	2
Ninguno	Sin efectos	1

Fuente: Norma SAE JA 1739

- **Ocurrencia:**

Tabla 2-4

Probabilidad de falla	Posible tasa de falla	Ranking

Muy alta: La falla es casi inevitable	≥ 1 en 2	10
	1 en 3	9
Muy alta: La falla es casi inevitable	1 en 8	8
	1 en 20	7
Moderada: Generalmente asociadas a procesos similares o procesos previos que experimentan fallas ocasionales, pero no en mayores proporciones	1 en 80	6
	1 en 400	5
	1 en 2.000	4
Bajas: Fallas aisladas asociadas con procesos similares	1 en 15.000	3
Muy baja: Solo fallas aisladas asociadas con procesos casi idénticos	1 en 150.000	2
Remota: La falla es poco probable. No se repiten las fallas de procesos casi idénticos	≤ 1 en 1.500.000	1

Fuente: Norma SAE JA 1739

- **Detección:**

Tabla 2-5

Detección	Criterios: Probabilidad de detección de un modo de falla	Ranking
Casi imposible	No existen controles disponibles para detectar el modo de falla.	10
Muy remota	Existen controles pero es casi imposible que detecten el modo de falla.	9
Remota	Muy remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	8
Muy baja	Remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	7
Baja	Baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	6
Moderada baja	Moderadamente baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	5
Moderada alta	Moderadamente alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	4
Alta	Alta probabilidad del fallo pero es posible que no se detecte al momento o en cada caso particular.	3
Muy alta	Muy alta probabilidad del fallo y es probable su detección al momento o en cada caso particular.	2

Casi cierta	Los actuales controles son casi ciertos para detectar el modo de falla. Detección confiable.	1

Fuente: Norma SAE JA 1739

Una vez explicado esto, la criticidad de los modos de falla definidos resulta en lo siguiente:

Tabla 2-6

#	MODO DE FALLA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECCIÓN	NPR
1.B.1	Guías lineales, corroídas.	7	5	5	175
1.A.9	Motores lineales, aislamiento degradado.	7	4	6	168
1.A.2	Motores lineales secundarios, corroídos.	8	4	5	160
1.A.6	Patines de las guías lineales, fracturados.	8	4	5	160
1.A.3	Cable de alimentación de los motores lineales primarios, picado.	8	4	4	128
1.A.5	Modulo SIMODRIVE, cortocircuitado.	8	4	4	128
1.A.7	Tarjeta de control, cortocircuitado.	8	4	4	128
1.A.8	Cable de señal de la regla óptica, picado.	8	4	4	128
1.B.2	Regla óptica, desreglada.	7	4	4	112
1.A.4	Conectores de los cables de alimentación de los motores lineales primarios, sulfatados.	8	3	4	96
1.A.1	Mangueras del sistema de refrigeración de los motores lineales, fugas.	8	5	2	80
1.B.3	Catenaria, quebrada.	4	5	2	40
1.A.10	Sensor de regla óptica, contaminado.	4	2	3	24

Fuente: Elaboración propia

Siendo así, que la falla más crítica actualmente en los equipos corresponde a la **corrosión de las guías lineales**, la cual es causada principalmente por la baja alcalinidad de los fluidos usados en el mecanizado, la acumulación de neblina en el área motriz del equipo y el ingreso de viruta en los rieles de las guías.

2.6. Determinación de las políticas de mantenimiento

En el marco del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), la determinación de las tareas de mantenimiento se basa en la respuesta a las preguntas 6 y 7 de la metodología, las cuales están orientadas a definir las acciones más adecuadas para prevenir las fallas funcionales identificadas o, en su defecto, establecer alternativas cuando no existe una tarea preventiva eficaz. Entre estas alternativas se consideran las tareas de búsqueda de fallas, la operación hasta la falla o la implementación de rediseños. De este modo, se definen políticas de mantenimiento coherentes con la criticidad del equipo, con el objetivo de optimizar la confiabilidad, la disponibilidad y los costos asociados a su operación.

En resumen, las políticas de mantenimiento determinan las **tareas proactivas y alternativas** que deben implementarse para gestionar las fallas funcionales. Estas tareas pueden clasificarse en las siguientes categorías:

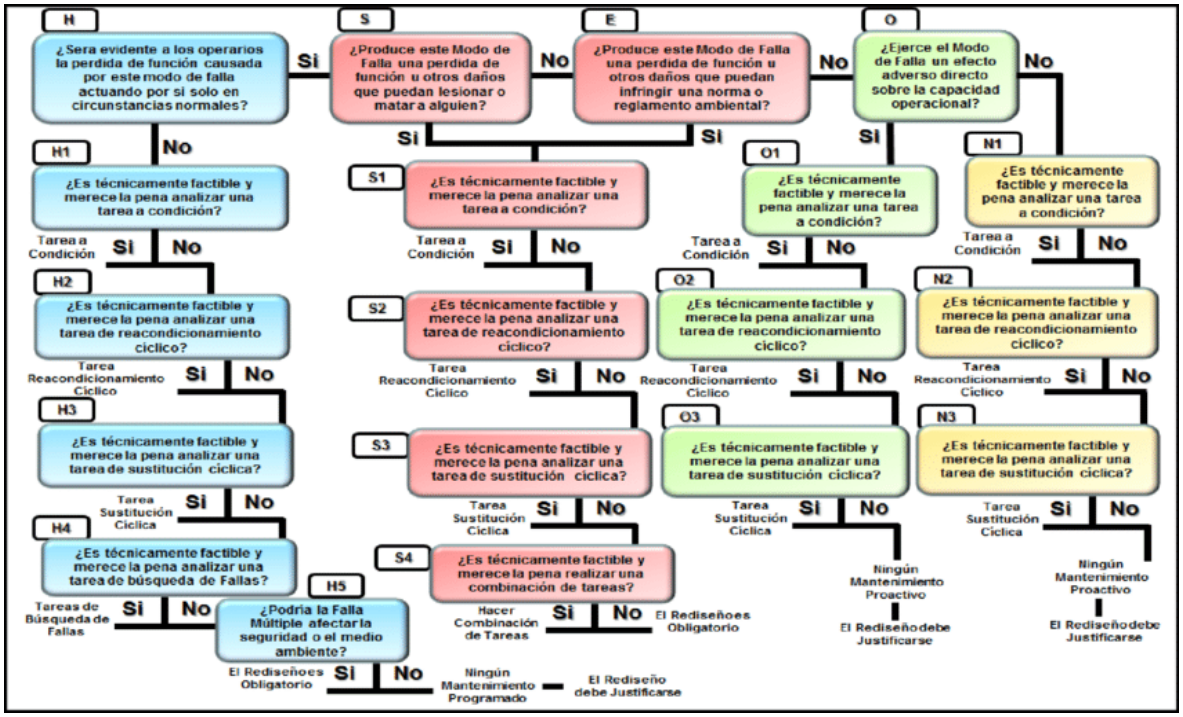
- **Tareas proactivas**:
  - **Sustitución cíclica**: Implica el reemplazo de un componente o equipo a intervalos regulares, independientemente de su estado actual, con el objetivo de prevenir una falla potencial. Esta estrategia es efectiva cuando el ciclo de vida de un componente es conocido y predecible.
  - **Reacondicionamiento cíclico**: Similar a la sustitución cíclica, esta tarea consiste en la restauración de un componente o equipo a su estado original, también a intervalos predefinidos. Se aplica cuando el reacondicionamiento es más rentable que el reemplazo y puede extender la vida útil del activo.
  - **Mantenimiento basado en condición**: Consiste en monitorear el estado del equipo para detectar indicios de deterioro o fallo inminente, como vibraciones anormales, temperaturas elevadas o fugas. Las tareas se ejecutan únicamente cuando los datos de condición indican la necesidad de intervención, lo que optimiza el uso de recursos y minimiza tiempos de inactividad.

- **Tareas alternativas:**
  - **Tareas de búsqueda de fallas**: Implican la inspección de los equipos para identificar fallas ocultas o incipientes antes de que se conviertan en fallas funcionales. Son útiles en fallas no evidentes que podrían pasar desapercibidas sin un seguimiento activo.
  - **No realizar mantenimiento programado**: En ciertos casos, el mantenimiento programado no es rentable ni necesario. Si la falla no tiene consecuencias graves o si las acciones preventivas no ofrecen beneficios claros, se puede optar por no realizar ninguna acción hasta que ocurra la falla, permitiendo una estrategia correctiva.
  - **Tareas de rediseño**: Si una falla recurrente no puede prevenirse con tareas proactivas ni con búsqueda de fallas, puede ser necesario rediseñar el sistema o el componente para eliminar la causa raíz del problema.

2.6.1. El Árbol de Decisión en el RCM

El **árbol de decisión del RCM** es una herramienta fundamental para determinar qué política de mantenimiento es más adecuada para cada modo de falla. Este proceso se basa en un conjunto de criterios que ayudan a clasificar la criticidad de las fallas y seleccionar las tareas de mantenimiento más efectivas.

Figura 2-1



Fuente: RCM II

El árbol de decisión considera factores según el tipo de falla, donde:

- **Tipo H:** Representa las fallas ocultas.
- **Tipo S:** Representa las fallas afectan la seguridad.
- **Tipo E:** Representa las fallas que inflen normas o reglamentos medioambientales.
- **Tipo O:** Representa las fallas que afectan la capacidad operacional.

Mediante el uso de esta herramienta, se responde a preguntas clave que determinan si una tarea proactiva es adecuada o si es preferible adoptar un enfoque reactivo. Si una falla tiene un impacto grave y es predecible, el árbol puede recomendar tareas de sustitución o reacondicionamiento cíclico. Si la falla es detectable mediante

monitoreo, puede sugerir un enfoque basado en condición. En caso de que ninguna de las opciones sea viable, se optará por una tarea "a falta de".

2.6.2. Aplicación del árbol de decisión

Siguiendo los criterios de la herramienta mencionada se llegó a la siguiente hoja de decisión, dando como resultado lo siguiente:

Tabla 2-7

Hoja de decisión RCM			**Sistema/activo: Urane 20_C.E.D-JXX**				**SISTEMA N°1**				**FACILITADOR:**			**FECHA:**	**HOJA N° 1**
			Subsistema: Eje Z				SUB-SISTEMA N°1				Auditor:			FECHA:	De 1
Referencia de información			sistema/activo: Urane 20				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"					
							S1	S2	S3						
							O1	O3	O3						
F	**FF**	**MF**	**H**	**S**	**E**	**O**	**N1**	**N2**	**N3**	**H4**	**H5**	**S4**	**Tareas Propuestas**	**Frecuencia inicial**	**A realizar por**
1	A	1	S	N	N	S	S	S					Tarea a condición: Inspección del nivel de refrigerante	DIARIO	OPERADOR
1	A	1	S	N	N	S	S	S					Tarea a condición: Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte del equipo e hidráulico.	MENSUAL	LABORATORIO
1	A	1	S	N	N	S	S	S					Reacondicionamiento cíclico: Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	TRIENAL	MECÁNICO
1	A	2	S	N	N	S	S	N	S				Sustitución cíclica: Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable, limpiar filtro metálico.	ANUAL	MECÁNICO
1	A	2	S	N	N	S	S	N	S				Tarea a condición: Revisar el espacio de entrehierro de los motores lineales.	CUATRIMESTRAL	MECÁNICO
1	A	2	S	N	N	S	S	N	S				Tarea a condición: Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte del equipo e hidráulico.	MENSUAL	LABORATORIO

1	A	3	S	N	N	S	S						Tarea a condición: Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte del equipo e hidráulico.	MENSUAL	LABORATORIO
1	A	3	S	N	N	S	S						Rediseño: implementar fundas o separadores resistentes al desgaste y corrosión para los cables y mangueras de la catenaria y separarlos por componente, terminal.	UNA VEZ	MECÁNICO
1	A	4	S	N	N	S	S						Tarea a condición: Inspeccionar los conectores de los motores lineales, asegurándose de que estén bien conectados.	Después de cada intervención	ELÉCTRICO
1	A	5	S	N	N	S	N	S					Reacondicionamiento cíclico: Reemplazar los sellos (burletes) del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas (estructura, bisagras y pestillos).	ANUAL	MECÁNICO
1	A	5	S	N	N	S	N	S					Reacondicionamiento cíclico: Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	ANUAL	FRIGORISTA
1	A	6	S	N	N	S	N	S	S				Reacondicionamiento cíclico: Limpiar y engrasar las guías lineales.	SEMESTRAL	MECÁNICO
1	A	6	S	N	N	S	N	S	S				Sustitución cíclica: Reemplazar los sellos del pantógrafo.	ANUAL	MECÁNICO
1	A	7	S	N	N	S	N	S					Reacondicionamiento cíclico: Reemplazar los sellos (burletes) del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas (estructura, bisagras y pestillos).	ANUAL	MECÁNICO
1	A	7	S	N	N	S	N	S					Reacondicionamiento cíclico: Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	ANUAL	FRIGORISTA
1	A	8	S	N	N	S	S	N	N				Tarea a condición: Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite	MENSUAL	LABORATORIO

													de corte del equipo e hidráulico.		
1	A	8	S	N	N	S	S	N	N				Rediseño: implementar fundas o separadores resistentes al desgaste y corrosión para los cables y mangueras de la catenaria y separarlos por componente, terminal.	UNA VEZ	MECÁNICO
1	A	9	S	N	N	S	S	S	S				Tarea a condición: Medir el nivel de aislación de los motores y revisar que no se encuentren rallados.	Anual	Eléctrico
1	A	9	S	N	N	S	S	S	S				Sustitución cíclica: Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable, limpiar filtro metálico.	Anual	Mecánico
1	A	9	S	N	N	S	S	S	S				Reacondicionamiento cíclico: Reemplazar sellos y limpiar válvulas del sistema.	BIANUAL	MECÁNICO
1	A	10	S	N	N	S	N	S	S				Sustitución cíclica: Reemplazar los sellos del pantógrafo.	ANUAL	MECÁNICO
1	A	10	S	N	N	S	N	S	S				Sustitución cíclica: Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable, limpiar filtro metálico.	ANUAL	MECÁNICO
1	A	10	S	N	N	S	N	S	S				Sustitución cíclica: reemplazar filtros de la FRL.	CUATRIMESTRAL	MECÁNICO
1	B	1	N				N	S	S				Reacondicionamiento cíclico: Limpiar y engrasar las guías lineales.	SEMESTRAL	MECÁNICO
1	B	1	N				N	S	S				Sustitución cíclica: Reemplazar los sellos del pantógrafo.	ANUAL	MECÁNICO
1	B	2	N				S						Tarea a condición: Realizar geometría	Tras cada intervención en el elemento	MECÁNICO
1	B	3	N				N	S					Reacondicionamiento cíclico: Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de	CUATRIMESTRAL	MECÁNICO

													pernos en el soporte y tensores de esta.		

Fuente: Elaboración propia

Este plan de mantenimiento es aplicable tanto para el Eje Z, como para los ejes X e Y debido a la similitud en los componentes, solamente deben de analizarse las frecuencias de acción, debido a las consecuencias económicas y a la disponibilidad del personal.

2.7. Planificación de las tareas propuestas

2.7.1. Procedimientos:

2.7.1.1. Tarea propuesta: Inspección del sistema de refrigeración.

Cuando realizar: Diario.

Duración estimada: 3 minutos.

Realizar por: Operador.

Herramientas y materiales: Linterna (opcional).

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad y anteojos de protección.

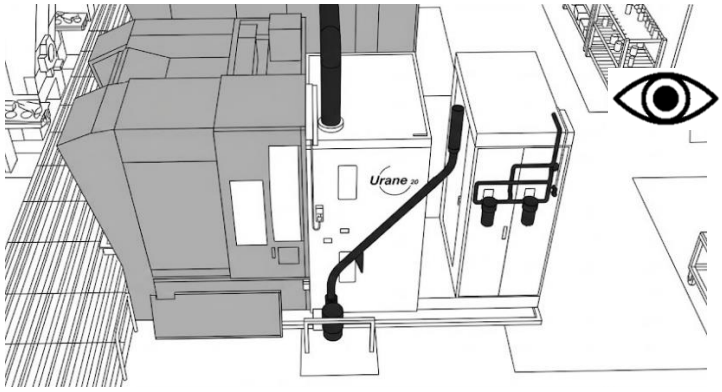
Permisos requeridos: Ninguno.

Procedimiento:

Fase 1: Preparación (30 segundos)

1. Posiciónese en el área marcada y abra el armario de las bombas.

Figura-2-2: Dibujo técnico de Urane-20



Fuente: Elaboración propia por medio de IA

Fase 2: Inspección visual (10 - 30 segundos).

2. Identifique el medidor del coolant y verifique la cantidad marcada en el medidor.

Figura 2-3: Referencia nivel de refrigerante de Urane.20



Fuente: Elaboración propia

Fase 3: Informe y registre anomalías (2 minuto)

3. Si el nivel del Coolant se encuentra menor a la línea marcada, avisar a su JU o senior para que se reponga el refrigerante.

2.7.1.2. Tarea propuesta: Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.

Cuando realizar: 1 vez cada 3 años (parada de planta).

Duración estimada: 2,5 horas.

Realizar por: 2 Mecánicos.

Herramientas y materiales: Llaves de torque (o llaves fijas/ajustables), juego de destornilladores, alicates de corte y de presión, bandeja de contención, trapos industriales absorbentes, linterna LED, Mangueras hidráulicas de repuesto (con certificación de presión), juntas tóricas (O-rings) de Vitón o Nitrilo (según el tipo de refrigerante), sellador de roscas adecuado (tipo anaeróbico para conexiones metálicas).

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes anticorte, anteojos de protección, casco de seguridad y arnés.

Permisos requeridos: bloqueo y etiquetado (LOTO), trabajo en espacio confinado.

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y Aislamiento del Sistema (20 minutos)

1. Desenergización: Aplique el protocolo LOTO en el tablero principal del Urane-20. Es crítico asegurar que las bombas de refrigerante no puedan activarse accidentalmente.

2. Despresurización: Cierre la válvula de paso principal y active el ciclo de purga o abra suavemente una conexión en el punto más alto del circuito para liberar la presión atrapada en las mangueras.
3. Contención: Coloque la bandeja debajo de las zonas de conexión que se van a intervenir. El refrigerante es altamente resbaladizo; evite que se derrame directamente sobre las guías lineales o el suelo del área de trabajo.

Fase 2: Desmontaje y Limpieza de Superficies (40 minutos)

4. Etiquetado: Antes de desconectar, marque las mangueras (entrada/salida) si no tienen código de colores claro, para evitar errores de conexión inversa que podrían dañar la electrobrocha.
5. Extracción de mangueras: Retire las mangueras gastadas. Si las conexiones están pegadas, utilice dos llaves para evitar girar el tubo rígido del equipo, lo cual podría provocar fisuras.
6. Limpieza de alojamientos: Retire los sellos (O-rings) viejos con un gancho de plástico para no rayar los asientos de metal. Limpie los asientos con alcohol isopropílico; cualquier partícula de viruta o residuo seco causará una fuga inmediata en el sello nuevo.

Fase 3: Instalación de Sellos y Mangueras (60 minutos)

7. Instalación de juntas: Lubrique ligeramente los nuevos O-rings con el mismo refrigerante o un lubricante compatible antes de colocarlos. Asegúrese de que no queden "torcidos" en la ranura.
8. Conexión de mangueras: Instale las nuevas mangueras evitando radios de curvatura demasiado cerrados que puedan causar fatiga en el material. Utilice las abrazaderas originales del Urane-20; no las sustituya por bridas plásticas (zip-ties), ya que no soportarán la vibración ni la presión.
9. Ajuste: Apriete las conexiones siguiendo el torque recomendado. Si se usa sellador de roscas, aplíquelo con moderación para evitar que el exceso bloquee el flujo interno.

Fase 4: Verificación y Puesta en Marcha (30 minutos)

10. Inspección visual: Antes de presurizar, verifique que no haya cables eléctricos o componentes móviles en contacto directo con las nuevas mangueras.
11. Presurización gradual: Abra la válvula de suministro lentamente. Observe los puntos de conexión mientras la presión sube. Si aparece un goteo, cierre inmediatamente y reajuste.
12. Prueba dinámica: Ponga en marcha el sistema de refrigeración sin activar el corte de piezas durante al menos 5 minutos. Verifique que la temperatura y el flujo de salida sean los esperados según los parámetros de control.
13. Registro: Documente en la bitácora de mantenimiento la fecha de reemplazo y el número de lote de las mangueras instaladas para trazabilidad.

2.7.1.3. Tarea propuesta: Mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable, limpiar filtro metálico).

Cuando realizar: 1 vez al año (parada de planta).

Duración estimada: 4 horas.

Realizar por: 2 Mecánicos.

Herramientas y materiales: Escalera, hidrolavadora, juego de destornilladores, Filtro multibolsa x5, Filtro desechable x5 y desengrasante industrial.

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes anticorte, anteojos de protección, casco de seguridad y arnés.

Permisos requeridos: Permiso de trabajo en altura, y bloqueo y etiquetado (LOTO).

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y Bloqueo (20 min)

1. Delimitar el área: Colocar conos o cinta de peligro debajo de la zona de trabajo para evitar que caigan objetos sobre peatones.
2. Bloqueo LOTO:
    - Apagar el extractor desde el panel de control.
    - Desenergizar el interruptor principal del extractor en el tablero eléctrico.

- Colocar candado y tarjeta de bloqueo.
- Prueba de energía cero: Intentar encender el extractor para confirmar que no arranca.

3. Ascenso: El técnico sube utilizando la plataforma o escalera, anclando su arnés a un punto fijo certificado inmediatamente al llegar a la altura de trabajo.

Fase 2: Desmontaje y Limpieza (40 - 50 min)

4. Apertura: Retirar los tornillos o cierres rápidos de la puerta de inspección de la unidad de filtrado.
5. Extracción de Filtros Sucios:
   - Retirar primero los 5 filtros desechables (pre-filtros). Colocarlos directamente en una bolsa de basura para no esparcir contaminantes.
   - Retirar los 5 filtros multibolsa. Verificar si las guías están sucias.
   - Retirar el filtro metálico (malla lavable).
6. Limpieza del Filtro Metálico:
   - Bajar el filtro metálico a nivel de suelo (o limpiarlo en una zona segura).
   - Aplicar desengrasante generosamente y dejar actuar unos minutos.
   - Lavar con agua a presión o aire comprimido (en sentido contrario al flujo normal) y secar completamente.
7. Limpieza de la Caja (Plenum):
   - Limpiar el interior del gabinete de los filtros con paños y desengrasante. Eliminar cualquier acumulación de aceite o viruta en el fondo de la carcasa.

Fase 3: Instalación y Montaje (30 - 40 min)

8. Instalación del Filtro Metálico: Colocar el filtro metálico limpio y seco en su posición original (generalmente es la primera etapa de choque o la última de seguridad, verificar manual).
9. Instalación de Filtros Multibolsa:
   - Insertar los 5 filtros multibolsa nuevos.
   - IMPORTANTE: Verificar la flecha de "Dirección de Flujo de Aire" (Airflow) impresa en el marco del filtro. Debe apuntar hacia el

motor/ventilador. Asegurar que sellen bien en sus marcos para evitar baipás de aire.

10. Instalación de Filtros Desechables:
    - Colocar los 5 filtros desechables nuevos (generalmente van antes de las bolsas para protegerlas).
11. Cierre: Volver a colocar la tapa de inspección, asegurando todos los tornillos/cierres. Verificar que los sellos de la puerta (gomas) estén en buen estado para evitar fugas de presión.

Fase 4: Pruebas y Cierre (20 min)

12. Retiro y Limpieza: Bajar de la altura, retirar Herramientas y materiales y limpiar el área de trabajo (disposición de filtros usados según normativa ambiental).
13. Desbloqueo: Retirar candado y tarjeta LOTO.
14. Prueba Funcional:
    - Encender el extractor.
    - Verificar visualmente (si hay manómetro diferencial) que la presión esté en rango "Limpio/Verde".
    - Confirmar que no existan ruidos anormales o vibraciones por puertas mal cerradas.

2.7.1.4. Tarea propuesta: Revisar el espacio de entrehierro de los motores lineales.

Cuando realizar: cada 4 meses.

Duración estimada: 30 minutos.

Realizar por: eléctrico.

Herramientas y materiales: galgas de espesor no magnéticas, paños de limpieza (que no suelte pelusa), linterna, limpiador dieléctrico o alcohol isopropílico

EPP: tapones para los oídos, zapatos de seguridad y anteojos de protección.

Permisos requeridos: Espacios confinados.

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y bloqueo (30 - 40 min)

1. Posicionamiento: Mover el eje a una posición que facilite el retiro de los fuelles o cubiertas de protección.
2. Bloqueo LOTO: Apagar el equipo, desenergizar el interruptor principal y aplicar bloqueo y etiquetado. Esperar 5-10 minutos para la descarga de condensadores del bus DC.
3. Acceso: Retirar las tapas, fuelles o cubiertas telescópicas necesarias para exponer visualmente la unión entre el motor primario (carro) y las pistas magnéticas.
4. Limpieza Previa: Antes de medir, limpiar cuidadosamente cualquier viruta o residuo de aceite sobre los imanes en la zona de medición. La viruta metálica atrapada altera la medición y daña el motor.

Fase 2: Inspección Visual y Medición (30 - 40 min)

5. Inspección Visual de Daños:
    - Revisar la superficie de los imanes (secundario) y la cara inferior del motor (primario).
    - Buscar marcas de roce, rayaduras o desgaste. Si hay roce, el motor debe detenerse inmediatamente para ajuste mecánico mayor.
6. Medición del Entrehierro (Air Gap):
    - Seleccionar una galga no magnética de 1 mm de espesor.
    - Introducir la galga no magnética entre el primario y el imán.
    - Puntos de Medición: Medir en al menos 3 puntos:
        1. Extremo izquierdo del primario.
        2. Centro del primario.
        3. Extremo derecho del primario.
    - Repetir la medición moviendo el carro (manualmente si es posible, o por secciones) a diferentes puntos de la bancada para asegurar que la altura sea constante en todo el recorrido.

7. Verificación de Desviación: Verificar que la diferencia entre las mediciones no exceda la tolerancia (±0.1 mm). Una diferencia grande indica que el carro o las guías lineales están desalineados.

Fase 3: Cierre y Restauración (30 - 40 min)

8. Limpieza Final: Asegurar que no queden herramientas, tornillos ni galgas adheridas magnéticamente a la pista.
9. Reinstalación: Montar nuevamente los fuelles y cubiertas. Asegurar un sellado hermético para evitar entrada de viruta futura.
10. Desbloqueo y Prueba: Retirar LOTO. Energizar el equipo. Realizar un movimiento lento (JOG) de referencia (Homing) escuchando cualquier ruido inusual.

Criterio de Aceptación/Rechazo

- PASA: La galga especificada entra con una ligera resistencia (ajuste deslizante) y no hay marcas de contacto físico en los componentes.
- FALLA: La galga no entra (gap muy cerrado), entra demasiado holgada (gap muy abierto) o hay rayaduras visibles en los imanes.
    - Acción correctiva: Se requiere intervención mecánica para ajustar los patines de las guías lineales o calzar el motor. No operar el equipo.

2.7.1.5. Tarea propuesta: Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.

Cuando realizar: cada 4 meses.

Duración estimada: 40 minutos.

Realizar por: laboratorio.

Herramientas y materiales: multímetro de pH, refractómetro manual, kit de manchas de aceite, recipientes para muestras, papel absorbente (sin pelusa), solución buffer (pH 7 y 10) y desengrasante.

EPP: tapones para los oídos, zapatos de seguridad y anteojos de protección.

Permisos requeridos: ninguno.

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y Verificación de los Instrumentos (5 minutos)

1. Calibración: Asegúrese de que el pH-metro esté calibrado con soluciones buffer antes de comenzar; una lectura incorrecta puede llevar a tomar decisiones erróneas sobre el fluido.
2. Limpieza de viales: Utilice recipientes perfectamente limpios y secos para cada fluido. No reutilice recipientes entre el aceite hidráulico y el refrigerante para evitar la contaminación cruzada.
3. Preparación del entorno: Identifique los puntos de muestreo en el Urane-20 (tanque de emulsión, tanque de aceite hidráulico) y asegúrese de que el equipo esté a temperatura de operación para una muestra representativa.

Fase 2: Muestreo Representativo (10 minutos)

4. Homogeneización: En el refrigerante (taladrina), asegúrese de que el sistema de recirculación haya estado funcionando al menos 15 minutos antes de tomar la muestra para que la concentración sea uniforme.
5. Extracción: Tome la muestra del flujo de retorno o del tanque principal. Evite extraerla de zonas muertas (esquinas del tanque) donde se acumulan sedimentos que no representan el estado general del fluido.
6. Rotulado: Marque cada vial con la fecha y el tipo de fluido para evitar confusiones durante el análisis.

Fase 3: Medición de Alcalinidad y pH (10 minutos)

7. Refrigerante y Aceite de Corte: Sumerja el electrodo del pH-metro en la muestra. El rango ideal para el Urane-20 suele estar entre 8.5 y 9.5. Si el pH es < 8.0, el riesgo de proliferación bacteriana y corrosión es alto.
8. Aceite Hidráulico: Si bien el pH no es estándar para aceites puros, se puede medir la acidez. Si detecta un olor acre o cambio drástico de color, el fluido está oxidado y debe ser analizado por laboratorio externo.
9. Limpieza intermedia: Lave el electrodo con agua destilada y seque suavemente con papel sin pelusa entre cada medición para no alterar los resultados.

Fase 4: Evaluación de Contaminación (10 minutos)

10. Concentración (Refractómetro): Coloque una gota de refrigerante en el refractómetro para medir la concentración. Compare el valor obtenido (ej. 7-10% Brix) con la ficha técnica del proveedor. Un valor bajo indica contaminación con agua de limpieza; un valor alto indica evaporación excesiva.
11. Contaminación con Sólidos/Aceite (Blotter Test): Coloque una gota de aceite hidráulico en el papel de prueba. Observe la extensión de la mancha: una mancha clara es buena; una mancha oscura o con un centro sólido indica alta contaminación con partículas metálicas o degradación.
12. Inspección Visual: Observe la presencia de espumas excesivas o separación de fases (emulsión rota) en el refrigerante, lo cual es señal de contaminación por aceites extraños (aceite de guías o hidráulico).

Fase 5: Registro y Toma de Decisiones (5 minutos)

13. Bitácora: Registre los valores en el software de gestión de mantenimiento del Urane-20.
14. Acciones: Si el pH está fuera de rango, añada agentes alcalinizantes (previa consulta técnica). Si la contaminación con aceite extraño en el refrigerante supera el 2%, programe el uso de un skimmer (separador de aceites) o la limpieza del tanque.
15. Limpieza final: Deseche las muestras según la normativa ambiental de residuos peligrosos y deje los instrumentos limpios y almacenados correctamente en sus estuches.

2.7.1.6. Tarea propuesta: implementar fundas o separadores resistentes al desgaste y corrosión para los cables y mangueras de la catenaria y separarlos por componente, terminal.

Esta es una tarea de rediseño que aún debe de evaluarse, así que no existe procedimiento por ahora.

2.7.1.7. Inspeccionar los conectores de los motores lineales, asegurándose de que estén bien conectados.

Cuando realizar: después de cada intervención.

Duración estimada: 15 min.

Realizar por: eléctrico.

Herramientas y materiales: linterna, limpiador dieléctrico y paño de microfibra.

Epp: tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes aislantes y anteojos de protección.

Permisos requeridos: bloqueo y etiquetado (LOTO) [En teoría ya realizado en la intervención].

Procedimiento:

Fase 1: Inspección Visual Externa (4 min)

1. Verificación de acople: Revisar que las tuercas de unión o clips de seguridad estén en su posición de bloqueo.
2. Estado del cable: Buscar signos de fatiga, cortes o "estrangulamiento" en el punto de entrada del conector, especialmente en cables que se mueven con el motor (cadenas portacables).
3. Evidencia térmica: Detectar decoloración, deformación del plástico o rastro de quemaduras que indiquen sobrecalentamiento.

Fase 2: Verificación Mecánica y Limpieza (8 min)

4. Desconexión y Revisión de Pines: Desacoplar el conector y verificar que los pines no estén doblados, hundidos o con corrosión (pátina verde o negra).
5. Limpieza: Aplicar limpiador de contactos si se observa suciedad o residuos de aceite. Dejar secar completamente antes de reensamblar.
6. Prueba de Tensión (Pull-test): En los cables individuales que entran al conector, realizar una tracción leve para asegurar que no haya terminales sueltos dentro del cuerpo del conector.

Fase 3: Reconexión y Aseguramiento (5 min)

7. Alineación: Alinear las muescas de guía (keyways) para evitar daños en los pines.

8. Ajuste: Apretar firmemente, confirmar el "clic" de cierre.
9. Marcaje de Seguridad: Si no existe, aplicar una marca con plumón de pintura (torque seal) que atraviese el conector y la base para detectar visualmente si se afloja en el futuro.

2.7.1.8. Tarea propuesta: Reemplazar los sellos (burletes) del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas (estructura, bisagras y pestillos).

Cuando realizar: 1 vez al año (parada de planta).

Duración estimada: 1 **-** 1.5 horas

Realizar por: 2 mecánicos.

Herramientas y materiales: sello (burlete) de caucho EPDM, espátula de plástico o raspador (para no dañar la pintura), desengrasante (alcohol isopropílico o similar), grasa de litio blanca (para bisagras), destornilladores y llaves ajustables.

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad y anteojos de protección.

Permisos requeridos: ninguno.

Procedimiento:

Fase 1: Preparación (3 minutos)

1. Inspección del entorno: Verifique que no haya obstáculos que impidan la apertura total de las puertas.
2. Identificación del material: Asegúrese de tener el burlete de reemplazo con las dimensiones y el material correcto (EPDM).

Fase 2: Desmontaje y Limpieza (15 minutos)

3. Retiro del sello antiguo: Desprenda el burlete dañado con ayuda de una espátula de plástico para no rayar la pintura del tablero.
4. Eliminación de residuos: Use un solvente suave o desengrasante para eliminar restos de adhesivo viejo en el canal de sellado.
5. Secado: Asegúrese de que la superficie esté completamente seca y libre de grasa para garantizar la adherencia del nuevo sello.

Fase 3: Instalación del Nuevo Burlete (20 minutos)

6. Corte a medida: Mida los segmentos de la puerta, asegurando cortes precisos en las esquinas (preferiblemente cortes a 45° para un sellado hermético).
7. Aplicación: Pegue el sello de forma continua, evitando estirar el material, ya que esto podría causar que se contraiga y deje espacios libres con el tiempo.
8. Sellado de juntas: Presione firmemente en toda la longitud, prestando especial atención a las uniones para evitar puentes de entrada de contaminantes.

Fase 4: Inspección de Estructura, Bisagras y Pestillos (15 minutos)

9. Evaluación estructural: Revise que la puerta no presente deformaciones o signos de corrosión que afecten el cierre.
10. Ajuste de bisagras: Verifique que los pernos de las bisagras estén apretados y que la puerta esté alineada. Aplique una pequeña cantidad de lubricante seco si detecta fricción o ruidos.
11. Prueba de pestillos y cerraduras: Compruebe que el mecanismo de cierre (maneta o llave) ejerza la presión necesaria sobre el burlete nuevo para comprimirlo adecuadamente (generalmente una compresión del 25-30% es ideal).

Fase 5: Verificación Final y Cierre (5 minutos)

12. Prueba de estanqueidad visual: Cierre la puerta y verifique que no haya luz visible a través del sello o espacios de aire.
13. Limpieza del área: Retire los restos de material viejo y limpie cualquier exceso de lubricante o adhesivo.
14. Registro: Documente la fecha del cambio y el estado general de la estructura en la bitácora de mantenimiento.

2.7.1.9. Tarea propuesta: Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.

Cuando realizar: 1 vez al año (parada de planta).

Duración estimada: 1,5 horas.

Realizar por: Frigorista y mecánico.

Herramientas y materiales: juego de llaves Allen y destornilladores, aspiradora industrial con boquilla de cepillo, manómetro de refrigeración (si aplica), termómetro láser o de contacto, filtros de aire nuevos, líquido limpiador de serpentines (no corrosivo), agua destilada, paños de microfibra y aire comprimido seco.

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, mascarilla de polvo y anteojos de protección.

Permisos requeridos: bloqueo y etiquetado (LOTO**)**

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y bloqueo (5 minutos).

1. Verificación de funcionamiento: Antes de apagar, tome la temperatura de salida del aire y compare con la temperatura interna del tablero para evaluar el diferencial térmico.
2. Bloqueo eléctrico: Realizar el procedimiento LOTO en el interruptor principal del aire acondicionado o del tablero para evitar descargas o atrapamientos con los ventiladores.
3. Protección del Tablero: Cubrir los componentes eléctricos internos con plástico si se utiliza algún líquido limpiador para evitar goteos accidentales sobre la electrónica.

Fase 2: Diagnóstico inicial y desmontaje (15 minutos)

4. Retiro de cubiertas: Desmonte los paneles de acceso a la unidad de enfriamiento del Urane-20, guardando la tornillería en un recipiente seguro.
5. Extracción de filtros: Retire los filtros de aire saturados para su inspección; si presentan restos de aceite de corte, determine si requieren cambio inmediato.

Fase 3: Limpieza de Componentes Críticos (30 minutos)

6. Limpieza del Evaporador y Condensador: Utilice aire comprimido de baja presión o una aspiradora para retirar el polvo de las aletas del serpentín. Si hay suciedad incrustada, aplique el limpiador de serpentines y aclare con mínima humedad.
7. Limpieza de Ventiladores: Limpie las aspas de los ventiladores (interno y externo) con un paño húmedo.

8. Drenaje de Condensado: Verifique que la manguera o bandeja de drenaje no esté obstruida por lodos o algas. Sople la línea de drenaje para asegurar que el agua fluya fuera del tablero eléctrico.

Fase 3: Reemplazo de Filtros y Verificación de Sellos (15 minutos)

9. Instalación de filtros: Coloque los filtros nuevos o limpios asegurándose de que la flecha de dirección de flujo de aire apunte hacia el interior de la unidad.
10. Inspección de juntas: Verifique que el sello de unión entre el aire acondicionado y la puerta del tablero esté íntegro. Un sello defectuoso permitirá la entrada de aire húmedo del taller, causando condensación interna.
11. Revisión de cableado: Inspeccione visualmente que las conexiones eléctricas del compresor y capacitores no presenten signos de sobrecalentamiento o cables sueltos.

Fase 4: Pruebas de Rendimiento y Cierre (15 minutos)

12. Reensamblaje: Coloque nuevamente las cubiertas y asegure todos los tornillos.
13. Puesta en marcha: Retire el bloqueo de seguridad y encienda la unidad.
14. Medición final: Tras 10 minutos de operación, mida nuevamente la temperatura de inyección. Un equipo en buen estado debería mantener el interior del tablero entre 30°C y 35°C.
15. Documentación: Registre la actividad en la ficha de mantenimiento del Urane-20, anotando cualquier anomalía en el ciclo del compresor.

2.7.1.10. Tarea propuesta: Limpiar y engrasar las guías lineales.

Cuando realizar: cada 2 meses.

Duración estimada: 45 – 60 min.

Realizar por: 2 mecánicos.

Herramientas y materiales: Pistola de engrase manual, juego de llaves Allen, espátula de plástico o madera, linterna, grasa Mobilux EP 0, desengrasante industrial cítrico (no corrosivo), papel industrial o paños que no suelten pelusa

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes de nitrilo y anteojos de protección.

Permisos requeridos: Bloqueo y etiquetado (LOTO).

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y bloqueo (5 minutos)

1. Bloqueo y Etiquetado (LOTO): Antes de iniciar la limpieza física, el equipo debe estar completamente desenergizado para evitar movimientos inesperados de los ejes.
2. Retiro de protecciones: Desplace los ejes para tener acceso máximo a las guías y retire o retraiga las cubiertas telescópicas si es necesario.

Fase 2: Limpieza de guías (10 minutos)

3. Remoción de residuos: Utilice una espátula de plástico para retirar el exceso de grasa vieja mezclada con viruta o polvo metálico.
4. Limpieza profunda: Humedezca un paño con desengrasante y limpie las pistas de las guías lineales hasta que el metal quede brillante y seco. Es vital no usar aire comprimido directamente hacia los carros, ya que esto podría empujar la suciedad hacia el interior de los polines.

Fase 2: Engrase de Carros Lineales (10 minutos)

5. Localización de graseras: Identifique los puntos de engrase (nipples) en cada uno de los carros de los ejes X, Y y Z.
6. Aplicación de Mobilgear EP 0: Conecte la pistola de engrase y aplique 15.7 cm3 en los 4 puntos del eje X y 9,5 cm3 en el Y y Z . Observe si la grasa nueva comienza a purgar la grasa vieja por los sellos laterales.
7. Lubricación manual de la guía: Aplique una capa muy fina y uniforme de grasa directamente sobre la superficie de la guía lineal utilizando un paño limpio para evitar la oxidación en zonas donde el carro no transita frecuentemente.

Fase 3: Distribución y Verificación (15 minutos)

8. Retiro de bloqueos: Energice el Urane-20 siguiendo el protocolo de seguridad.

9. Ciclo de movimiento: Realice desplazamientos lentos (modo Jog) de los ejes en toda su longitud. Esto permite que patines internos del carro se recubran uniformemente con la grasa nueva.
10. Inspección de película: Verifique visualmente que quede una película delgada y brillante sobre la guía. Si hay acumulación excesiva en los extremos, retírela con un paño para evitar que se convierta en un imán de virutas.

Fase 4: Cierre y Reporte (10 minutos)

11. Reinstalación de cubiertas: Coloque nuevamente las protecciones telescópicas y asegúrese de que su movimiento sea suave y no interfiera con las guías recién lubricadas.
12. Limpieza del área: Recoja los residuos de grasa vieja y paños contaminados para su disposición según la normativa de residuos peligrosos.
13. Registro técnico: Anote la fecha, el tipo de grasa utilizado y cualquier observación sobre el estado de las superficies (rayaduras o picaduras) en la bitácora de mantenimiento del equipo.

2.7.1.11. Tarea propuesta: Reemplazar los sellos del pantógrafo.

Cuando realizar: 1 vez (parada de planta)

Duración estimada: 4 horas.

Realizar por: 2 mecánicos.

Herramientas y materiales: juego de llaves Allen métricas, destornilladores de precisión, espátula de plástico, alicates de punta fina, linterna, kit de "Rasqueta con soporte de labios intercambiable", "Junta rascadora NBR 210x225x13" (Nitrilo), alcohol isopropílico o desengrasante biodegradable, paños de limpieza técnicos y lubricante de silicona para juntas.

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes anticorte, guantes de nitrilo y anteojos de protección.

Permisos requeridos: bloqueo y etiquetado (LOTO)

Procedimiento:

Fase 1: Bloqueo (1 min)

1. Estado de la Máquina: Bloqueo de seguridad (LOTO) obligatorio del interruptor principal. El eje donde se ubica el pantógrafo debe estar asegurado mecánicamente si existe riesgo de caída por gravedad.
2. Advertencia: Manipule las placas con cuidado para evitar cortes con rebabas metálicas o daños en las superficies rectificadas de las placas móviles.

Fase 2: Desmontaje y Acceso al Sistema (30 minutos)

3. Posicionamiento: Coloque los ejes en una posición de mantenimiento que permita el acceso cómodo a la interfaz entre la cabina fija y las placas móviles.
4. Retiro de la "Lámina sobre muñeca": Desmonte los tornillos de fijación de la placa móvil más pequeña para acceder a la junta rascadora NBR.
5. Desacople de la Placa Intermedia: Libere los soportes que unen la placa intermedia con la placa fija, permitiendo la exposición de la rasqueta con soporte de labios intercambiable.
6. Inspección visual: Revise si hay acumulación de viruta incrustada en las placas metálicas que pueda haber rayado las superficies de contacto.

Fase 3: Limpieza y Remoción de Sellos Gastados (40 minutos)

7. Extracción de sellos: Retire la rasqueta de labios intercambiables de la placa fija y la junta NBR 210x225x13 de la interfaz intermedia.
8. Limpieza de alojamientos: Utilice alcohol isopropílico y una espátula de plástico para limpiar los canales y soportes donde se alojan los sellos. Es crítico eliminar cualquier resto de refrigerante cristalizado o micro-viruta.
9. Preparación de superficies: Limpie las caras de acero inoxidable de la placa fija, intermedia y móvil. Estas deben quedar libres de grasa vieja para que los nuevos sellos deslicen correctamente.

Fase 4: Instalación de Nuevos Componentes (50 minutos)

10. Montaje de la Rasqueta Intercambiable: Instale el nuevo soporte de labios en la placa fija. Asegúrese de que el labio esté orientado correctamente para "empujar" la viruta hacia afuera del área de los motores lineales.

11. Instalación de la Junta NBR 210x225x13: Coloque la nueva junta de nitrilo en la placa intermedia. Aplique una capa mínima de lubricante de silicona en el labio de la junta para facilitar su asentamiento y evitar que se "muerda" durante el primer movimiento.
12. Alineación de Placas: Presente la placa intermedia y la lámina sobre muñeca, verificando que los sellos hagan contacto uniforme en todo el perímetro sin dejar espacios de luz.

Fase 5: Reensamblaje y Pruebas de Movimiento (30 minutos)

13. Ajuste Mecánico: Apriete los tornillos de las placas siguiendo un patrón cruzado para evitar deformaciones en el pantógrafo.
14. Prueba de Deslizamiento Manual: Verifique que las placas se mueven suavemente una sobre otra y que los sellos barren efectivamente la superficie.
15. Prueba Dinámica: Retire el bloqueo de seguridad, energice el Urane-20 y realice movimientos lentos en los ejes. Observe desde una distancia segura que no haya ruidos de fricción metálica o desprendimiento de los labios de los sellos.
16. Validación Final: Compruebe que no haya luz visible a través de las juntas desde el interior hacia el área de los motores lineales.

2.7.1.12. Tarea propuesta: Medir el nivel de aislación de los motores y revisar que no se encuentren rallados.

Cuando realizar: 1 vez al año (parada de planta)

Duración estimada: 4 horas.

Realizar por: eléctrico.

Herramientas y materiales: megóhmetro, multímetro digital, espejo de inspección telescópico, linterna, alcohol isopropílico, paños de microfibra, solvente dieléctrico y marcador de torque.

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes aislantes y anteojos de protección.

Permisos requeridos: bloqueo y etiquetado (LOTO).

Procedimiento:

Fase 1: Bloqueo y preparación (5 minutos)

1. Bloqueo Eléctrico (LOTO): Es obligatorio desconectar y bloquear la alimentación principal del Urane-20. Espere al menos 5 minutos tras el apagado antes de manipular conectores.
2. Descarga de bobinados: Antes de medir, asegúrese de que los bobinados estén referenciados a tierra para eliminar voltajes residuales.

Fase 2: Inspección Visual de Superficies y Rayaduras (20 minutos)

3. Limpieza previa: Limpie las pistas de los motores lineales y la carcasa de la electrobrocha para eliminar residuos de refrigerante o viruta fina.
4. Búsqueda de surcos: Utilice la linterna para buscar rayas longitudinales en los imanes de los motores lineales o en el estator. Las rayas profundas indican que hay viruta atrapada entre la parte móvil y la fija.
5. Verificación de entrehierro: Inspeccione que no existan roces evidentes (puntos brillantes o pérdida de pintura) que indiquen una desalineación mecánica.
6. Revisión de la Electrobrocha: Inspeccione el cono de la electrobrocha y la parte posterior en busca de marcas de fricción o sobrecalentamiento térmico (decoloración azulada).

Fase 3: Preparación para la Medición de Aislación (15 minutos)

7. Desconexión de cables: Desconecte los cables de potencia (U, V, W) del driver o directamente en la caja de bornes del motor para evitar dañar la electrónica de control con el voltaje del megóhmetro.
8. Limpieza de terminales: Asegúrese de que los terminales estén secos y libres de contaminación, ya que la humedad en los bornes puede falsear la lectura de aislamiento.
9. Verificación de continuidad: Use el multímetro para confirmar que existe continuidad entre fases antes de proceder con la prueba de aislamiento.

Fase 3: Medición de Resistencia de Aislamiento (20 minutos)

10. Configuración del megóhmetro: Seleccione el voltaje en 500V.

11. Pruebas Fase-Tierra: Conecte una punta al terminal de tierra del motor y la otra a cada fase (L1-Tierra, L2-Tierra, L3-Tierra) sucesivamente.
12. Toma de lecturas: Aplique el voltaje durante 60 segundos por cada fase. La lectura debe de ser mayor a 100MΩ.
13. Prueba entre Fases: Mida el aislamiento entre bobinados (U-V, V-W, W-U) para descartar fallas de aislamiento entre espiras.

Fase 4: Reconexión y Verificación Final (15 minutos)

14. Descarga de seguridad: Tras la prueba, cortocircuite brevemente las fases a tierra para descargar el voltaje remanente aplicado por el megóhmetro.
15. Reconexión: Conecte los cables de potencia asegurando el torque correcto y verifique que el blindaje del cable esté correctamente aterrado.
16. Prueba de funcionamiento: Retire el LOTO, energice el equipo y verifique que no existan alarmas de "Ground Fault" o "Leakage Current" en el control numérico del equipo.

2.7.1.13. Tarea propuesta: Reemplazar filtros de la FRL.

Cuando realizar: cada 6 meses.

Duración estimada: 20 - 30 minutos.

Realizar por: mecánico.

Herramientas y materiales: llave de cinta o llave para filtros, juego de llaves Allen, destornillador plano, recipiente pequeño para recibir condensados, kit de cartuchos filtrantes de 25µ y 0,01µ, juntas tóricas (O-rings) de repuesto, alcohol isopropílico y grasa de silicona para sellos.

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes de nitrilo y anteojos de protección.

Permisos requeridos: ninguno.

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y Despresurización (3 minutos)

1. Cierre de suministro: Gire la válvula de entrada de aire del Urane-20 a la posición "OFF".
2. Purga de aire: Accione la válvula de drenaje manual en la parte inferior de los vasos o active un actuador manual para liberar el aire atrapado. Verifique que el manómetro de la unidad marque 0 bar.
3. Limpieza exterior: Limpie la parte externa de la unidad FRL para evitar que entre polvo o viruta al interior del sistema durante la apertura.

Fase 2: Desmontaje de Vasos y Filtros (10 minutos)

4. Apertura de vasos: Utilice la llave de cinta para desenroscar los vasos (bowls) de protección. En el Urane-20, algunos modelos cuentan con un seguro de pestaña que debe presionarse antes de girar.
5. Retiro del elemento filtrante: Desenrosque el soporte del filtro y retire el cartucho saturado. Observe el estado del filtro; si presenta aceite excesivo, podría indicar una falla en el compresor principal de la planta.
6. Limpieza de vasos: Lave el interior de los vasos con alcohol isopropílico para eliminar lodos, óxido o agua condensada acumulada.

Fase 3: Instalación de Nuevos Elementos (3 minutos)

7. Reemplazo de juntas: Retire los O-rings viejos, limpie el alojamiento y coloque los nuevos previamente lubricados con una fina capa de grasa de silicona.
8. Montaje del filtro: Inserte el nuevo cartucho filtrante en su soporte. Evite tocar el material filtrante directamente con las manos sucias para no obstruir los poros del elemento de 0.01 micras.
9. Cierre de vasos: Rosque los vasos manualmente hasta el tope. No sobreapriete con herramientas, ya que esto puede deformar las juntas y causar fugas posteriores.

Fase 4: Pruebas y Puesta en Servicio (9 minutos)

10. Presurización gradual: Abra la válvula de entrada de aire muy lentamente para permitir que el sistema se presurice de forma controlada y los sellos se asienten.
11. Detección de fugas: Utilice agua jabonosa para verificar que no existan fugas en las uniones de los vasos.

12. Regulación de presión: Verifique que el manómetro indique la presión de trabajo nominal (6 bar). Ajuste si es necesario.
13. Registro: Documente el cambio en la bitácora de mantenimiento preventivo para controlar la frecuencia de saturación de los filtros.

2.7.1.14. Tarea propuesta: Realizar geometría en la regla óptica.

Cuando realizar: después de cada intervención

Duración estimada: 2 horas.

Realizar por: 2 mecánico**s**

Herramientas y materiales: reloj comparador de precisión de 0.001 mm, base magnética articulada, juego de llaves Allen micrométricas, galgas de espesores (especialmente la de 0.1 mm para el entrehierro), alcohol isopropílico, paños ópticos que no suelten fibras, marcador de pintura para torque y líquido bloqueador de roscas suave (Loctite 222).

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes anticorte y anteojos de protección.

Permisos requeridos: ninguno.

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y bloqueo (5 minutos)

1. Modo de Operación: La verificación se realiza con el equipo energizado en modo JOG o Volante, por lo que se requiere extrema precaución con los movimientos del eje Z.
2. Bloqueo de seguridad: Durante el ajuste físico de los tornillos, asegure el eje Z mecánicamente (calzo de madera o soporte) si el freno del motor no es suficiente para garantizar la inmovilidad total.

Fase 2: Limpieza e Inspección Preliminar (20 minutos)

3. Acceso a la regla: Retire las protecciones o fuelles que cubren la regla óptica del eje Z.

4. Limpieza de la escala: Utilice un paño óptico humedecido en alcohol isopropílico para limpiar suavemente la superficie de cristal o acero de la regla. Cualquier partícula de polvo puede falsear la lectura del comparador.
5. Inspección del cabezal: Verifique que el cable del cabezal lector no tenga tensiones y que los soportes de montaje no presenten grietas o vibraciones evidentes.

Fase 3: Verificación del Paralelismo (30 minutos)

6. Montaje del comparador: Fije la base magnética en una parte sólida de la columna y apoye la punta del reloj comparador sobre la cara de referencia de la regla óptica (o el soporte de esta).
7. Recorrido de comprobación: Desplace el eje Z lentamente en toda su carrera. La desviación de paralelismo entre el movimiento del eje y la regla no debe superar las tolerancias del fabricante (< 0.01 mm en toda la longitud).
8. Detección de puntos críticos: Identifique si la desviación es lineal (inclinación) o si presenta "panceo" (curvatura), lo cual indicaría problemas en los soportes intermedios.

Fase 4: Ajuste de Alineación y Entrehierro (40 minutos)

9. Corrección de posición: Afloje ligeramente los tornillos de fijación de la regla y, mediante golpes suaves con un mazo de goma o usando los tornillos de ajuste fino, alinee la regla hasta que el reloj comparador marque la tolerancia mínima.
10. Ajuste del cabezal lector (Gap): Verifique con una galga de espesores el espacio entre el cabezal lector y la regla (entrehierro). Este valor es crítico para la señal; generalmente debe estar entre 0.1 mm y 0.2 mm según el modelo.
11. Verificación de escuadra: Asegúrese de que el cabezal esté perfectamente perpendicular a la regla para evitar errores de fase en la señal sinusoidal.

Fase 5: Pruebas Dinámicas y Cierre (30 minutos)

12. Apriete final: Una vez alineada, apriete los tornillos de fijación en secuencia y aplique marcador de torque. Vuelva a pasar el reloj comparador para confirmar que el apriete no movió la geometría.

13. Verificación por software: Observe en el control numérico (CNC) la pantalla de diagnóstico de ejes. Verifique que no haya variaciones bruscas en la carga del motor al desplazarse, lo que indicaría un roce mecánico.
14. Prueba de repetibilidad: Realice un ciclo de "Home" (referencia) varias veces y verifique que el valor de posición Z sea consistente.
15. Reensamblaje: Coloque nuevamente las cubiertas y fuelles, asegurando que el sellado sea hermético para evitar que la viruta dañe la alineación recién realizada.

2.7.1.15. Tarea propuesta: Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores.

Cuando realizar: cada 6 meses.

Duración estimada: 50 – 75 minutos.

Realizar por: mecánico

Herramientas y materiales: juego de llaves Allen métricas, llave dinamométrica pequeña (rango 5-25 Nm), destornilladores planos de pala ancha (para clips de apertura), aspiradora industrial, linterna LED, desengrasante dieléctrico o alcohol isopropílico, paños de microfibra, aire comprimido seco y marcador de torque (laca de seguridad)

EPP: Tapones para los oídos, zapatos de seguridad, guantes anticorte y anteojos de protección.

Permisos requeridos: bloqueo y etiquetado (LOTO).

Procedimiento:

Fase 1: Preparación y bloqueo (5 minutos)

1. Bloqueo y Etiquetado (LOTO): Apagar y bloquear el interruptor principal. Nunca intervenir la catenaria con el equipo en movimiento, ya que presenta puntos de cizallamiento.
2. Energía Residual: Esperar 5 minutos para la descarga de capacitores de los motores lineales antes de manipular cables dentro de la cadena.

Fase 2: Limpieza Externa e Interna (15 minutos)

3. Remoción de viruta: Utilice una aspiradora industrial para retirar la viruta acumulada en el canal guía y sobre los eslabones de la catenaria. Evite usar aire comprimido de alta presión directamente, ya que puede introducir partículas metálicas dentro de los eslabones o conectores.
4. Limpieza de eslabones: Limpie la superficie de la cadena con un paño humedecido en desengrasante para eliminar restos de aceite de corte que puedan degradar el plástico o atraer más suciedad.
5. Inspección de cables: Abra algunos clips de registro si se detecta acumulación interna y verifique que los cables no tengan depósitos de lodo o viruta incrustada que actúe como abrasivo durante el movimiento.

Fase 3: Inspección y Ajuste de Soportes y Tensores (15 minutos)

6. Revisión de soportes fijos: Verifique los pernos de anclaje de los soportes inicial y final (puntos de tracción). Estos puntos sufren mayor fatiga por las aceleraciones del equipo.
7. Ajuste de pernos: Utilice la llave dinamométrica para reapretar los pernos de fijación al chasis. Si el perno está flojo, retírelo, aplique fijador de roscas y apriete según la especificación del manual (entre 8 y 12 Nm para pernos M6/M8 en estas estructuras).
8. Inspección de tensores y guías: Revise que los pernos que sujetan los canales guía laterales no presenten juego mecánico. Un canal guía flojo puede causar que la catenaria se "salga" de su trayectoria y se rompa.

Fase 4: Verificación de Integridad Mecánica (5 minutos)

9. Estado de eslabones: Busque grietas, roturas o pasadores de unión desgastados. Un eslabón roto puede perder su radio de curvatura mínimo y dañar los cables internos.
10. Radio de curvatura: Asegúrese de que no haya obstrucciones en el recorrido de la catenaria que fuercen un radio de curvatura menor al diseñado.

Fase 5: Pruebas de Movimiento y Cierre (15 minutos)

11. Retiro de bloqueo: Retire los candados de seguridad y energice el equipo.

12. Prueba dinámica (Jog): Desplace el eje correspondiente a baja velocidad en toda su carrera. Escuche atentamente en busca de ruidos de roce, "clics" metálicos o vibraciones anormales.
13. Marcado de seguridad: Aplique marcador de torque en los pernos ajustados para facilitar futuras inspecciones visuales.
14. Documentación: Registre el estado de la cadena y si se detectó algún cable con la chaqueta dañada para su posterior programación de cambio.

2.7.2. Programación:

Una vez definida la planificación de las tareas de mantenimiento en el apartado anterior, se procede a su programación mediante la aplicación de la técnica **PERT**, con el objetivo de establecer la secuencia lógica, la duración estimada y la interdependencia entre las actividades propuestas. Esta programación se desarrolla en conjunto con el análisis de la **ruta crítica**, lo que permite identificar aquellas tareas que condicionan directamente la duración total del plan y, por tanto, requieren una gestión prioritaria para evitar retrasos en la ejecución.

Para facilitar la organización y ejecución de las actividades, las tareas han sido agrupadas en paquetes de trabajo según su naturaleza y alcance, tales como mantenimiento autónomo, mantenimiento proactivo y mantenimiento mayor. Esta estructuración permite optimizar la asignación de recursos, mejorar la coordinación entre las áreas involucradas y asegurar una implementación eficiente del plan de mantenimiento definido.

2.7.2.1. Mantenimiento autónomo:

Dentro de este grupo se mantienen las tareas que puede realizar el operador, las cuales para el caso en concreto corresponden a una:

- **Tarea: "Inspección del nivel de refrigerante"**

Tabla 2-8

#	CÓDIGO	ACTIVIDAD	PREDECESORA	OPTIMISTA	PROBABLE	PESIMISTA	DURACIÓN ESTIMADA	σ	σ^2
1	A	Charla de inicio de turno	-	5,00	8,00	15,00	8,67	1,67	2,78
2	B	Posicionamiento operador	A	0,75	1,00	5,00	1,63	0,71	0,50
3	C	Inspección de nivel de refrigerante	B	0,50	1,00	3,00	1,25	0,42	0,17
Total				**6,25**	**10,00**	**23,00**	**11,54**		**3,45**

Fuente: Elaboración propia

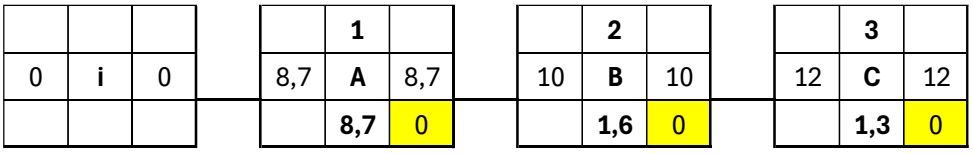
Las actividades mostradas corresponden a los factores que determina cuanto demorará el operador en iniciar y terminar la tarea propuesta. Estas se incluyen a razón de

que permiten visualizar el tiempo utilizado antes de iniciar la tarea propuesta y permiten tener un análisis de las demoras que puedan ocurrir antes de comenzar la producción en un escenario normal (sin fallas).

En este caso la tarea presenta una duración estimada de **11,54** minutos y una varianza de **3,45**, lo que significa que el proyecto es probable de cumplirse en el tiempo estimado sin mayores problemas.

Esta planificación es lineal, ya que las acciones son dependientes y no dan lugar a holguras, como se puede observar en el siguiente diagrama de red:

Figura 2-4



Fuente: Elaboración propia

2.7.2.2. Mantenimiento proactivo

En este apartado se encuentran las tareas programadas que se encuentran fuera del mantenimiento mayor, como el engrase de las guías lineales, medir el espacio entrehierro, los niveles de contaminación y pH del refrigerante, etc.

- **Tarea: "Revisar el espacio de entrehierro de los motores lineales"**

Tabla 2-9

#	CÓDIGO	ACTIVIDAD	PREDECESORA	OPTIMISTA	PROBABLE	PESIMISTA	DURACIÓN ESTIMADA	σ	σ^2
1	A	Obtención de permisos de trabajo		15	20	45	**23**	5,00	25,00
2	B	Preparar herramientas/ Insumos/ Repuestos	A	15	20	30	**21**	2,50	6,25
3	C	Posicionamiento de equipo	B	3	5	10	**6**	1,17	1,36
4	D	Realizar LOTO	C	10	15	20	**15**	1,67	2,78
5	E	Revisar el espacio de entrehierro de	D	20	45	110	**52**	15,00	225,00

		los motores lineales.							
6	F	Inspección Visual de Limpieza	E	10	20	45	**23**	5,83	34,03
7	G	Retiro de LOTO y pruebas estáticas	F	20	30	40	**30**	3,33	11,11
Total				**93**	**155**	**300**	**169**		**305,53**

Fuente: elaboración propia

Dentro de esta planificación se puede apreciar que una de las actividades posee un tiempo pesimista mucho mayor a su tiempo optimista, esta corresponde al revisar el espacio entrehierro de los motores lineales y es evidenciado por su alta desviación estándar (**225**). Esto se debe principalmente a problemas que puedan ocurrir como el hecho de que se encuentren contaminados con suciedad o escoria del mecanizado, lo cual requiere intervención.

Al igual que con la planificación anterior, esta tarea es secuencial, o sea, que cada actividad es dependiente de anterior y no existen holguras, quedando así el diagrama de red:

Figura 2-5

				1			**2**			**3**			**4**			**5**			**6**			**7**		
0	**i**	0	23,3	**A**	23,3	44,2	**B**	44,2	49,7	**C**	49,7	64,7	**D**	64,7	116	**E**	116	139	**F**	139	169	**G**	169
				23,3	0		**20,8**	0		**5,5**	0		**15**	0		**51,7**	0		**22,5**	0		**30**	0

Fuente: elaboración propia

- **Tarea: "Limpiar y engrasar las guías lineales"**

Tabla 2-10

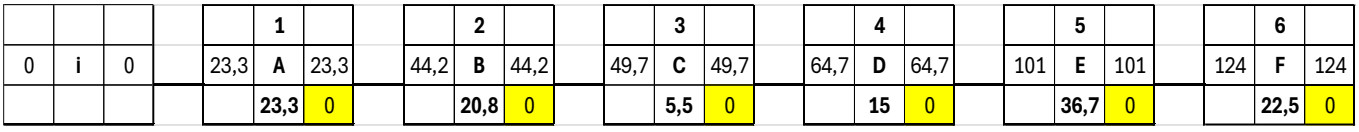
#	CÓDIGO	ACTIVIDAD	PREDECESORA	OPTIMISTA	PROBABLE	PESIMISTA	DURACIÓN ESTIMADA	σ	σ^2
1	A	Obtención de permisos de trabajo		15	20	45	**23**	5,00	25,00
2	B	Preparar herramientas/ Insumos/ Repuestos	A	15	20	30	**21**	2,50	6,25
3	C	Posicionamiento de equipo	B	3	5	10	**6**	1,17	1,36
4	D	Realizar LOTO	C	10	15	20	**15**	1,67	2,78
5	E	Limpiar y engrasar las guías lineales.	D	30	35	50	**37**	3,33	11,11
6	F	Retirar LOTO y verificar engrase de guías	E	15	20	40	**23**	4,17	17,36
Total				**88**	**115**	**195**	**124**		**63,86**

Fuente: elaboración propia

Esta tarea presenta una duración estimada de **124 minutos** y una varianza de **63,86,** lo cual representa que el proyecto podría alejarse de la duración media estimada debido principalmente a posibles demoras en la obtención de permisos de trabajo.

Su diagrama de red es lineal y sin holguras.

Figura 2-6



Fuente: elaboración propia.

- **Tarea: "Reemplazar filtros de FRL"**

Tabla 2-11

#	CÓDIGO	ACTIVIDAD	PREDECESORA	OPTIMISTA	PROBABLE	PESIMISTA	DURACIÓN ESTIMADA	σ	σ^2
1	A	Obtención de permisos de trabajo		15	20	45	**23**	5,00	25,00
2	B	Preparar herramientas/ Insumos/ Repuestos	A	15	20	30	**21**	2,50	6,25

3	C	Posicionamiento de equipo	B	3	5	10	**6**	1,17	1,36
4	D	Reemplazar filtros de la FRL.	D	10	15	20	**15**	1,67	2,78
Total				**43**	**60**	**105**	**65**		**35,39**

Fuente: elaboración propia

Esta tarea presenta una duración esperada de **65 minutos** y una varianza ligeramente elevada de **35,39**, esto al igual que con la tarea anteriormente vista a causa de posibles demoras en la obtención de permisos de trabajo.

El diagrama de red es lineal y sin holguras:

Fuente: elaboración propia

Figura 2-7

					1				**2**				**3**				**4**	
0	**i**	0		23,3	**A**	23,3		44,2	**B**	44,2		49,7	**C**	49,7		64,7	**D**	64,7
					23,3	0			**20,8**	0			**5,5**	0			**15**	0

- **Tarea: "Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo."**

Tabla 2-12

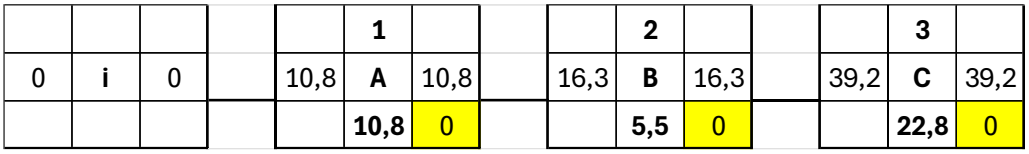
#	CÓDIGO	ACTIVIDAD	PREDECESORA	OPTIMISTA	PROBABLE	PESIMISTA	DURACIÓN ESTIMADA	σ	σ^2
1	A	Preparar herramientas/ Insumos/ Repuestos		5	10	20	11	2,50	6,25
2	B	Posicionamiento de equipo	A	3	5	10	6	1,17	1,36
3	C	Medir niveles de alcalinidad del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	B	12	20	45	23	5,50	30,25
Total				**20**	**35**	**75**	**39**		**37,86**

Fuente: elaboración propia

Esta tarea es la última en este apartado y tiene una duración estimada de **39 minutos**, como además de una varianza ligeramente alta de **37,36** debido principalmente a dificultades y demoras que puedan ocurrir al momento de tomar o analizar las muestras.

El diagrama de red de esta tarea es lineal y sin holguras, tal y como se ha visto en las demás tareas propuestas hasta ahora.

Figura 2-8



Fuente: elaboración propia

2.7.2.3. Mantenimiento mayor

Este paquete de trabajo abarca el mayor número de tareas y corresponde a aquellas que están designadas a ser realizadas en el periodo no productivo de la planta. Debido a lo anterior se han establecido como un solo proyecto con la finalidad de evaluar la incertidumbre en la duración total estimada del plan propuesto.

Tabla 2-13

#	CÓDIGO	ACTIVIDAD	PREDECESORA	OPTIMISTA	PROBABLE	PESIMISTA	DURACIÓN ESTIMADA	σ	σ^2
1	A	Charla personal		5	10	30	13	4,17	17,36
2	B	Obtención de permisos de trabajo	A	15	20	45	23	5,00	25,00
3	C	Preparar herramientas/ Insumos/ Repuestos	B	15	20	30	21	2,50	6,25
4	D	Posicionamiento de equipo	C	3	5	10	6	1,17	1,36
5	E	Realizar LOTO	D	10	15	20	15	1,67	2,78
6	F	Reemplazar los burletes del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas.	E	30	45	60	45	5,00	25,00
7	G	Reemplazar filtros y limpiar sistema de extracción de neblina.	F	90	120	180	125	15,00	225,00
8	H	Realizar mantenimiento al aire acondicionado	E	60	75	120	80	10,00	100,00

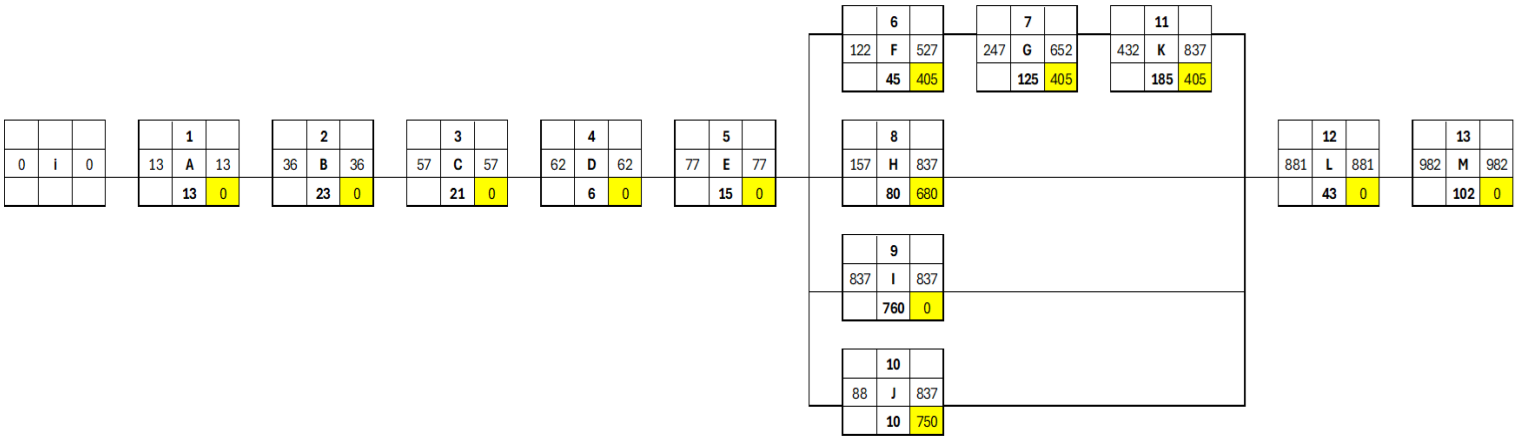
		del tablero eléctrico.							
9	I	Reemplazar los sellos del pantógrafo.	E	240	720	1440	760	200,00	40000,00
10	J	Medir el nivel de aislación de los motores y revisar que no se encuentren rallados.	E	7	10	15	10	1,33	1,78
11	K	Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores de esta.	G	150	180	240	185	15,00	225,00
12	L	Retirada de materiales y limpieza final	K, H, I, J	20	45	60	43	6,67	44,44
13	M	Retirada de LOTO y pruebas dinámicas	L	90	100	120	102	5,00	25,00
Total				**735**	**1365**	**2370**	**1428**		**40698,97**

Fuente: elaboración propia

En esta programación se consideran **13 actividades**, con una duración total estimada de **1428 minutos (23,8 horas)** y una varianza **de 40 698,97**. Este elevado valor de varianza indica que resulta poco probable ejecutar el plan completo dentro del tiempo estimado de aproximadamente 24 horas. Esta situación se debe principalmente a la actividad denominada «Reemplazar los sellos del pantógrafo», la cual presenta una diferencia de **1200 horas** entre los tiempos optimista y pesimista. En consecuencia, es necesario identificar e implementar medidas que permitan reducir la brecha entre ambos escenarios. Una vez mitigada esta incertidumbre, sería posible completar el plan en poco más de un día, considerando las menores variaciones asociadas al resto de las actividades.

El diagrama de red del proyecto presenta una configuración predominantemente lineal. No obstante, en la etapa “E” se ramifica en función de las especialidades del personal encargado de las intervenciones, para posteriormente converger en las actividades finales correspondientes a la limpieza del área de trabajo, el retiro de los bloqueos y la puesta en marcha del equipo.

Figura 2-9



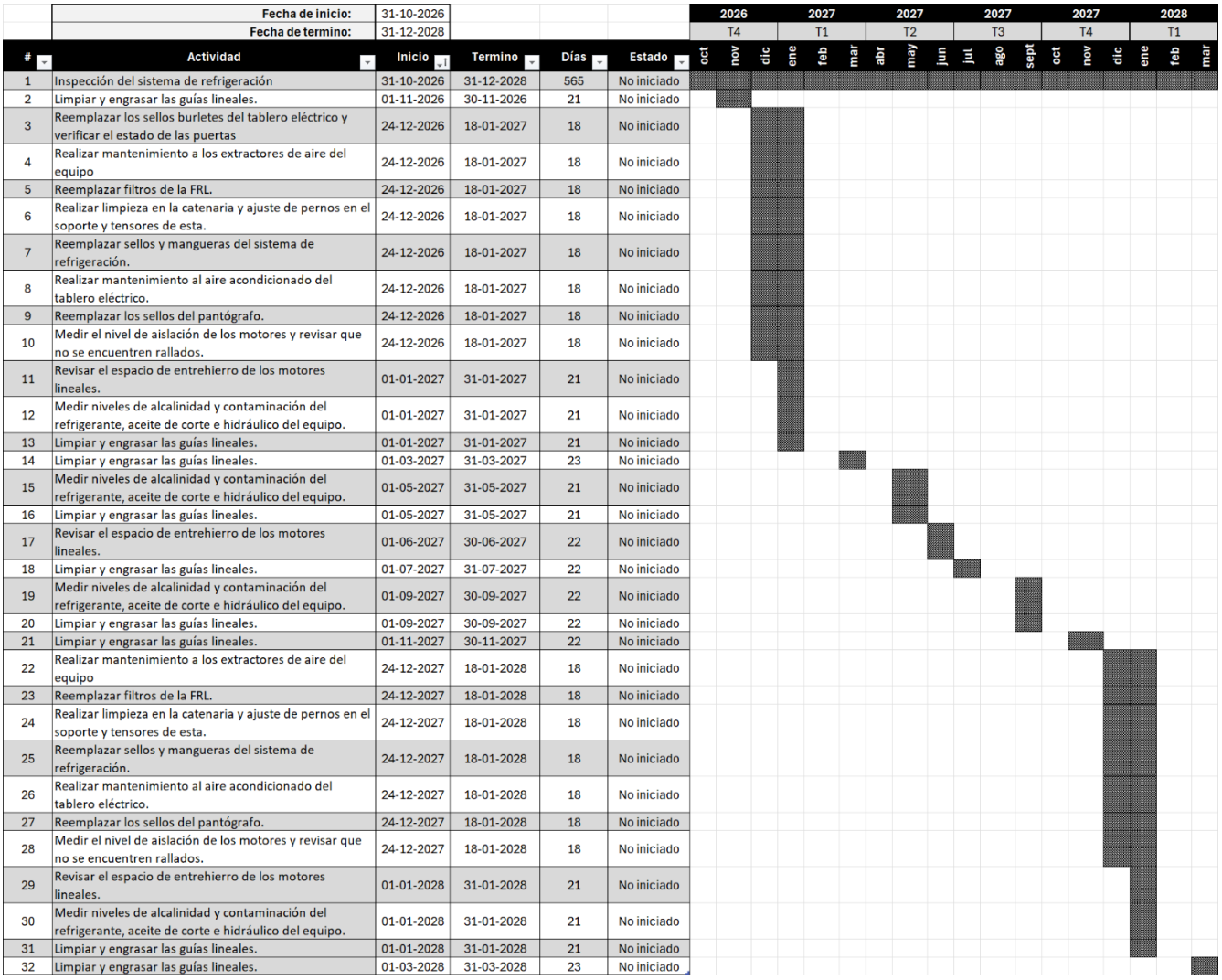
Fuente: elaboración propia en base a la tabla 2-13

La ruta crítica de este proyecto correspondería a la secuencia “A”, “B”, “C”, “D”, “E”, “I”, “L”, “M”. Si bien la actividad “I” corresponde a una tarea mecanica que podría ir en la ruta “F”, “G”, “K” se ha separado para realizar en paralelo y así reducir su impacto y poder acercarse a la duración estimada de 24 horas.

Para ver más a detalle cómo se obtuvieron los datos véase el anexo 2

2.7.3. Calendarización

Figura 2-10



	Fecha de inicio:	31-10-2026
	Fecha de termino:	31-12-2028

#	Actividad	Inicio	Termino	Días	Estado
1	Inspección del sistema de refrigeración	31-10-2026	31-12-2028	565	No iniciado
2	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-11-2026	30-11-2026	21	No iniciado
3	Reemplazar los sellos burletes del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas	24-12-2026	18-01-2027	18	No iniciado
4	Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo	24-12-2026	18-01-2027	18	No iniciado
5	Reemplazar filtros de la FRL.	24-12-2026	18-01-2027	18	No iniciado
6	Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores de esta.	24-12-2026	18-01-2027	18	No iniciado
7	Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	24-12-2026	18-01-2027	18	No iniciado
8	Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	24-12-2026	18-01-2027	18	No iniciado
9	Reemplazar los sellos del pantógrafo.	24-12-2026	18-01-2027	18	No iniciado
10	Medir el nivel de aislación de los motores y revisar que no se encuentren rallados.	24-12-2026	18-01-2027	18	No iniciado
11	Revisar el espacio de entrehierro de los motores lineales.	01-01-2027	31-01-2027	21	No iniciado
12	Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	01-01-2027	31-01-2027	21	No iniciado
13	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-01-2027	31-01-2027	21	No iniciado
14	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-03-2027	31-03-2027	23	No iniciado
15	Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	01-05-2027	31-05-2027	21	No iniciado
16	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-05-2027	31-05-2027	21	No iniciado
17	Revisar el espacio de entrehierro de los motores lineales.	01-06-2027	30-06-2027	22	No iniciado
18	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-07-2027	31-07-2027	22	No iniciado
19	Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	01-09-2027	30-09-2027	22	No iniciado
20	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-09-2027	30-09-2027	22	No iniciado
21	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-11-2027	30-11-2027	22	No iniciado
22	Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo	24-12-2027	18-01-2028	18	No iniciado
23	Reemplazar filtros de la FRL.	24-12-2027	18-01-2028	18	No iniciado
24	Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores de esta.	24-12-2027	18-01-2028	18	No iniciado
25	Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	24-12-2027	18-01-2028	18	No iniciado
26	Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	24-12-2027	18-01-2028	18	No iniciado
27	Reemplazar los sellos del pantógrafo.	24-12-2027	18-01-2028	18	No iniciado
28	Medir el nivel de aislación de los motores y revisar que no se encuentren rallados.	24-12-2027	18-01-2028	18	No iniciado
29	Revisar el espacio de entrehierro de los motores lineales.	01-01-2028	31-01-2028	21	No iniciado
30	Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	01-01-2028	31-01-2028	21	No iniciado
31	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-01-2028	31-01-2028	21	No iniciado
32	Limpiar y engrasar las guías lineales.	01-03-2028	31-03-2028	23	No iniciado

Fuente: elaboración propia

Se ha elaborado una carta Gantt con las actividades propuestas con el objetivo de establecer un control sobre su programación y sobre los tiempos disponibles para su ejecución. En este caso, debido a la falta de información histórica sobre intervenciones previas que permitan determinar fechas de referencia para el comienzo de las tareas consideradas, se han asignado fechas de ejecución de manera referencial, respetando las frecuencias definidas para cada actividad. Asimismo, se ha considerado un periodo de un mes para las intervenciones, con el propósito de disponer de margen para la ejecución de otras tareas asociadas a sistemas distintos que pudiesen requerir dicho espacio temporal,

excepto en el caso de las actividades establecidas para la parada de planta puesto que se cuenta exclusivamente de ese tiempo por el periodo estival de los operadores.

Por otra parte, para efectos de demostración se ha definido un horizonte de planificación comprendido entre el cuarto trimestre de 2026 y el primer trimestre de 2028. Este intervalo permite visualizar tanto las actividades cuya ejecución se extiende entre dos años calendario, como es el caso de las paradas de planta, así como aquellas con una periodicidad trianual, considerando una posible implementación hacia finales del 2026 y comienzos del 2027.

CAPITULO III: EVALUACIÓN ECONÓMICA

Introducción

Este capítulo tiene como objetivo desarrollar la evaluación de económica de las actividades de mantenimiento propuestas en el análisis RCM, comparándolas con el escenario actual de costos de indisponibilidad por fallas (CIF actual). La evaluación económica es una herramienta fundamental para determinar la viabilidad y sostenibilidad de las actividades de mantenimiento, ya que permite optimizar el uso de recursos, maximizando la confiabilidad y disponibilidad de los equipos mientras se minimizan los costos.

3.1. Evaluación económica de los costos por falla actual

Para poder evaluar los costos de los modos de fallos propuestos en el capítulo 2 se ha implementado el indicador de Costos por Indisponibilidad de Fallas (CIF). Este indicador permite anualizar las pérdidas financieras probables que pueden generar los modos de falla, permitiendo así:

- Evaluar el impacto económico de las fallas en las operaciones.
- Decidir entre estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo, evaluando si la inversión en mantenimiento proactivo podría reducir los costos de falla.
- Optimizar recursos y presupuestos en función de los equipos con mayor impacto en la disponibilidad.

La fórmula de este indicador es:

$$CIF = FF \times TPFS \times (CSHA + CP + CC) = \$/año$$

Donde:

FF= Frecuencia de falla= fallos/año

TPFS= Tiempo promedio fuera de servicio= horas/fallo

CSHA= Costes de penalización por seguridad, higiene y ambiente= $/hora

CP= Costes de penalización por producción por hora= $/hora

CC= Costes de mantenimiento correctivo por hora= $/hora

Entonces, una vez explicado esto, los costes de los modos de falla del eje Z son los siguientes:

Tabla 3-1: CIF actual

Modo de falla	Descripción	FF	TPFS	CP [clp/h]	CC [clp/h]	CIF [clp/año]
1.A.1	Mangueras del sistema de refrigeración de los motores lineales, fugas.	2,00	1,50	$222.772	$84.619	$922.173
1.A.2	Motores lineales secundarios, corroídos.	0,33	13,00	$222.772	$432.113	$2.798.960
1.A.3	Cable de alimentación de los motores lineales primarios, picado.	0,49	2,00	$222.772	$121.849	$339.900
1.A.4	Conectores de los cables de alimentación de los motores lineales primarios, sulfatados.	0,16	2,00	$222.772	$121.849	$113.300
1.A.5	Modulo SIMODRIVE, cortocircuitado.	0,33	1,00	$222.772	$2.467.362	$884.428
1.A.6	Patines de las guías lineales, fracturados.	0,49	51,00	$222.772	$18.833	$6.076.550
1.A.7	Tarjeta de control, cortocircuitado.	0,25	1,50	$222.772	$1.780.628	$740.983
1.A.8	Cable de señal de la regla óptica, picado.	0,49	1,50	$222.772	$110.173	$246.288
1.A.9	Motores lineales, aislamiento degradado.	0,25	13,00	$222.772	$744.689	$3.101.176

1.A.10	Sensor de regla óptica, contaminado.	3,95	1,50	$222.772	$9.238	$1.372.990
1.B.1	Guías lineales, corroídas.	0,99	51,00	$222.772	$18.833	$12.153.099
1.B.2	Regla óptica, desreglada.	0,20	1,00	$222.772	$9.238	$45.766
1.B.3	Catenaria, quebrada.	1,97	6,00	$222.772	$189.055	$4.874.227
Total		**11,9**	**11,23**			**$33.669.841**

Fuente: Elaboración propia

En conclusión, los modos de falla del eje Z tienen un costo anual potencial de **$33.669.841,** en donde el modo de falla más crítico (guías lineales corroídas) representa el **36%** de los gastos con un costo de **$12.153.099**.

(Costes de penalización por seguridad, higiene y ambiente no se han considerado puesto que ningún modo de falla afecta a SHA de forma considerable, según información entregada por GATM).

3.2. Evaluación económica de las tareas de mantenimiento

Para evaluar la viabilidad económica de las actividades de mantenimiento propuestas, es esencial analizar en detalle los costos asociados a cada acción de mantenimiento. Este análisis permite cuantificar la inversión requerida para implementar las estrategias definidas en el RCM, identificando tanto los recursos necesarios como los gastos asociados a materiales, mano de obra, tiempo de inactividad, y otros factores relevantes.

Tabla 3-2

TAREA DE PROPUESTA	Frecuencia [actividad/año]	HH	N° de personal	Costo personal [clp/hr]	Costo de materiales/ herramientas [clp/hr]	Costo de indisponibilidad [clp/hr]	Costo total de la actividad [clp/año]
Inspección del sistema de refrigeración.	252	0,02	1	$3.579	$0	$222.772	$950.677
Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	0,33	2,50	2	$4.702	$108.003	$0	$97.839
Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo	1	2,50	2	$4.702	$84.288	$0	$234.230
Revisar el espacio de entrehierro de los motores lineales.	2	2,00	1	$4.702	$0	$222.772	$909.899
Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	3	0,67	1	$4.702	$166	$0	$9.737
Implementar fundas o separadores resistentes al desgaste y corrosión para los cables y							

mangueras de la catenaria y separarlos por componente, terminal.							
Inspeccionar los conectores de los motores lineales, asegurándose de que estén bien conectados.							
Reemplazar los sellos burletes del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas	1	1,00	1	$4.702	$15.994	$0	$20.696
Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	1	1,50	1	$4.702	$4.011	$0	$13.069
Limpiar y engrasar las guías lineales.	6	1,23	1	$4.702	$236	$222.772	$1.685.055
Reemplazar los sellos del pantógrafo.	1	12,92	2	$4.702	$20.000	$0	$379.810
Medir el nivel de aislación de los motores y revisar que no se encuentren rallados.	1	0,42	2	$4.702	$8	$0	$3.922
Reemplazar filtros de la FRL.	2	0,35	1	$4.702	$85.714	$222.772	$219.232
Realizar geometría							
Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores de esta.	2	3,58	1	$4.702	$674	$222.772	$1.635.064
Total							**$6.159.231**

nota: Los costos de los materiales que presentan valor "0", es debido a que el valor es practicante despreciable y no afecta en el costo total de la actividad. Por otra lado, los costos por indisponibilidad que presentan valor "0" es debido a que la actividad no detiene la producción. Además las tareas de "inspeccionar los conectores…" y "realizar geometría" no se consideran como tareas preventivas/proactivas, por lo que no presentan costos en este aparto, junto con la tarea de rediseño, la cual no se ha evaluado lo suficiente para presentar los costos asociados.

El valor de "Costo de materiales/herramientas [CLP/h]" pueden apreciarse más a detalle en el anexo 3.

A partir del análisis de costos de mantenimiento, se evidencia que la mayor concentración de la inversión se focaliza en cuatro intervenciones principales: **"engrase y limpieza de guías lineales"**, **"limpieza de la catenaria y el ajuste de pernos", "inspección del sistema de refrigeración"** y **"revisar el espacio entrehierro de los motores lineales"**. Estas tareas representan de manera conjunta el **84,11%** del presupuesto operativo asignado (desglosado en un **27,36%, 26,55%, 15,44% y 14,77%** respectivamente).

Estas acciones se catalogan como críticas para la integridad y el desempeño del activo, fundamentándose en los siguientes puntos:

- **Preservación de la Vida Útil:** La inspección del sistema térmico y el monitoreo del entrehierro son determinantes para evitar el estrés térmico y la degradación prematura del aislamiento en las máquinas eléctricas.
- **Garantía de Precisión Cinemática:** El engrase de las guías lineales asegura una lubricación limítrofe adecuada, reduciendo el coeficiente de fricción y garantizando la precisión en los desplazamientos, factor clave para la calidad del producto final.
- **Mitigación del Riesgo Operativo:** Al priorizar estas tareas, el plan de mantenimiento actúa directamente sobre la causa raíz de las paradas no programadas, transformando una inversión de alta concentración en una reducción drástica de la probabilidad de falla catastrófica.

3.3. Estimación del CIF futuro

El **Costo de Indisponibilidad por Falla (CIF) Futuro** representa la estimación económica de las pérdidas proyectadas que sufriría la organización si un activo fallara tras la implementación de las tareas de mantenimiento propuestas. A diferencia del costo de falla histórico, el CIF futuro actúa como un indicador de **riesgo residual**, permitiendo evaluar si la estrategia de mantenimiento seleccionada en el RCM es económicamente viable y suficiente para mitigar el impacto operativo.

Tabla 3-3

Modo de falla	Descripción	FF	TPFS	CP [clp/h]	CC [clp/h]	CIF [clp/año]
1.A.1	Mangueras del sistema de refrigeración de los motores lineales, fugas.	0,67	1,50	$222.772	$84.619	$307.391
1.A.2	Motores lineales secundarios, corroídos.	0,20	13,00	$222.772	$432.113	$1.702.701
1.A.3	Cable de alimentación de los motores lineales primarios, picado.	0,20	2,00	$222.772	$121.849	$137.848
1.A.4	Conectores de los cables de alimentación de los motores lineales primarios, sulfatados.	0,16	2,00	$222.772	$121.849	$113.300
1.A.5	Modulo SIMODRIVE, cortocircuitado.	0,14	1,00	$222.772	$2.467.362	$384.305

1.A.6	Patines de las guías lineales, fracturados.	0,20	51,00	$222.772	$18.833	$2.464.379
1.A.7	Tarjeta de control, cortocircuitado.	0,14	1,50	$222.772	$1.780.628	$429.300
1.A.8	Cable de señal de la regla óptica, picado.	0,20	1,50	$222.772	$110.173	$99.884
1.A.9	Motores lineales, aislamiento degradado.	0,11	13,00	$222.772	$744.689	$1.397.444
1.A.10	Sensor de regla óptica, contaminado.	1,50	1,50	$222.772	$9.238	$522.022
1.B.1	Guías lineales, corroídas.	0,17	51,00	$222.772	$18.833	$2.053.649
1.B.2	Regla óptica, desreglada.	0,20	1,00	$222.772	$9.238	$45.766
1.B.3	Catenaria, quebrada.	0,17	6,00	$222.772	$189.055	$411.827
Total						**$10.069.815**

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, una vez aplicadas las acciones de mantenimiento de forma correcta, se espera poder bajar la tasa de falla en promedio un **52%**, esto debido a que las acciones buscan atacar las causas raíz de los modos de falla.

A continuación se puede apreciar a detalle el porcentaje que se busca reducir al aplicar las acciones de mantenimiento, como el total de fallas actuales como las esperadas.

Tabla 3-4

#	Modo de falla	FF actual	FF residual	%
1.A.1	Mangueras del sistema de refrigeración de los motores lineales, fugas.	2,00	0,67	66,67%
1.A.2	Motores lineales secundarios, corroídos.	0,33	0,20	39,17%
1.A.3	Cable de alimentación de los motores lineales primarios, picado.	0,49	0,20	59,44%

1.A.4	Conectores de los cables de alimentación de los motores lineales primarios, sulfatados.	0,16	0,16	0,00%
1.A.5	Modulo SIMODRIVE, cortocircuitado.	0,33	0,14	56,55%
1.A.6	Patines de las guías lineales, fracturados.	0,49	0,20	59,44%
1.A.7	Tarjeta de control, cortocircuitado.	0,25	0,14	42,06%
1.A.8	Cable de señal de la regla óptica, picado.	0,49	0,20	59,44%
1.A.9	Motores lineales, aislamiento degradado.	0,25	0,11	54,94%
1.A.10	Sensor de regla óptica, contaminado.	3,95	1,50	61,98%
1.B.1	Guías lineales, corroídas.	0,99	0,17	83,10%
1.B.2	Regla óptica, desreglada.	0,20	0,20	0,00%
1.B.3	Catenaria, quebrada.	1,97	0,17	91,55%
Total				**51,87%**

Fuente: Elaboración propia

En el escenario operativo actual, los activos registran una tasa de **12 fallas** potenciales anuales, lo que se traduce en un MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) de **578,6 horas** y un TFS (Tiempo Fuera de Servicio) acumulado de **106,6 horas**. En contraste, tras la implementación de las estrategias de mantenimiento derivadas del RCM, el CIF futuro proyecta una reducción significativa alrededor de las **4 fallas** anuales. Esta mejora optimiza el MTBF a **1695,9 horas** y contrae el TFS a solo **28,6 horas**, validando la eficacia de las tareas propuestas en la mitigación de la indisponibilidad

3.4. Contraste económico

La viabilidad de un plan de mantenimiento basado en **RCM** no solo reside en su eficacia técnica, sino también en su rentabilidad financiera. Este apartado presenta un **análisis comparativo** entre los costos derivados de la ejecución de las tareas propuestas y el impacto económico que presentan las fallas en su estado actual. Mediante este contraste, se busca demostrar el retorno de inversión y la eficiencia del plan, evidenciando cómo la asignación estratégica de recursos en tareas preventivas y predictivas minimiza el **Costo de Indisponibilidad por Falla (CIF) Futuro**, garantizando así la sostenibilidad operativa y financiera de los activos críticos.

3.4.1. Falla Vs acción de mantenimiento

Tabla 3-5

Modo de falla	Descripción	Tareas de mantenimiento propuestas	Costo de tareas de mtto [clp/año]	CIF Futuro [clp/año]	Costo total futuro [clp/año]	CIF Actual [clp/año]	Beneficio
1.A.1	Mangueras del sistema de refrigeración de los motores lineales, fugas.	Inspección del sistema de refrigeración	$950.675	$307.391	$1.355.905	$922.173	-$433.732
		Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	$97.839				
		Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	$0				
1.A.2	Motores lineales secundarios, corroídos.	Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo.	$0	$1.702.701	$1.712.438	$2.798.960	$1.086.522
		Revisar el espacio de entrehierro de	$9.737				

		los motores lineales.					
		Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	$0				
1.A.3	Cable de alimentación de los motores lineales primarios, picado.	Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	$9.737	$137.848	$147.585	$339.900	$192.315
		Implementar fundas o separadores resistentes al desgaste y corrosión para los cables y mangueras de la catenaria y separarlos por componente, terminal.					
1.A.4	Conectores de los cables de alimentación de los motores lineales primarios, sulfatados.	Inspeccionar los conectores de los motores lineales.		$113.300	$113.300	$113.300	$0
1.A.5	Modulo SIMODRIVE, cortocircuitado.	Reemplazar los sellos (burletes) del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas (estructura, bisagras y pestillos).	$20.696	$384.305	$418.070	$884.428	$466.357

		Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	$13.069				
1.A.6	Patines de las guías lineales, fracturados.	Limpiar y engrasar las guías lineales	$1.685.055	$2.464.379	$4.529.243	$6.076.550	$1.547.307
		Reemplazar los sellos del pantógrafo.	$379.810				
1.A.7	Tarjeta de control, cortocircuitado.	Reemplazar los sellos (burletes) del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas (estructura, bisagras y pestillos).	$0	$429.300	$429.300	$740.983	$311.684
		Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	$0				
1.A.8	Cable de señal de la regla óptica, picado.	Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	$0	$99.884	$99.884	$246.288	$146.405
		Implementar fundas o separadores resistentes al desgaste y corrosión para los cables y mangueras de la catenaria y separarlos por componente, terminal.					

1.A.9	Motores lineales, aislamiento degradado.	Medir el nivel de aislación de los motores y revisar que no se encuentren rallados.	$3.922	$1.397.444	$1.635.596	$3.101.176	$1.465.581
		Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo.	$234.230				
1.A.10	Sensor de regla óptica, contaminado.	Reemplazar los sellos del pantógrafo.	$0	$522.022	$522.022	$1.372.990	$850.968
		Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo.	$0				
		Reemplazar filtros de la FRL	$219.232				
1.B.1	Guías lineales, corroídas.	Limpiar y engrasar las guías lineales.	$0	$2.053.649	$2.053.649	$12.153.099	$10.099.451
		Reemplazar los sellos del pantógrafo.	$0				
1.B.2	Regla óptica, desreglada.	Realizar geometría		$45.766	$45.766	$45.766	$0
1.B.3	Catenaria, quebrada.	Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores de esta.	$1.635.064	$411.827	$2.046.892	$4.874.227	$2.827.336
Total			**$5.259.066**	**$10.069.815**	**$15.109.649**	**$33.669.841**	**$18.560.192**

Fuente: Elaboración propia

nota: los valores "0" o "-" se deben a que la acción de mantenimiento propuesta ha sido abarcada por otro modo de falla (se han agrupado los costos de tal forma que puedan justificar otras acciones).

Por otro lado, los valores que no marcan ningún valor es debido a que no corresponden a ninguna estrategia de mantenimiento contemplada por el árbol de

decisiones del RCM (dejar fallar) o se trata de una tarea de rediseño, la cual es necesario de analizar a detalle para su justificación.

El indicador de **'Costo Total Futuro'** se define como la agregación sistemática de la inversión requerida para ejecutar las tareas de mantenimiento propuestas y el **Costo de Indisponibilidad por Falla (CIF) Futuro**, el cual representa el riesgo residual inherente tras la intervención estratégica.

$$Costo\ total\ futuro = Costo\ plan\ de\ mantenimiento + CIF\ futuro$$

Esta métrica es fundamental para determinar la **viabilidad técnica-económica** de la propuesta, permitiendo establecer un contraste objetivo frente al escenario base o CIF actual.

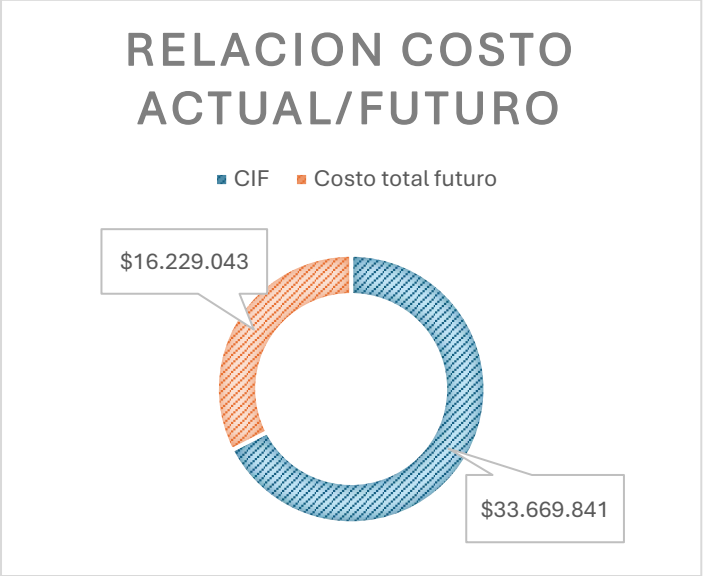
Bajo esta premisa, el análisis no se limita a la simple estimación de gastos, sino que profundiza en la optimización del desempeño financiero del activo mediante los siguientes criterios:

- **Evaluación del Beneficio Neto:** Al confrontar el costo actual de la falla frente al costo total futuro, se identifica el margen de ahorro operativo y la capacidad de las tareas seleccionadas para absorber el impacto económico de las paradas no programadas.
- **Justificación de la Estrategia RCM:** Este contraste permite validar si la reducción en la frecuencia de fallas y la disminución del tiempo fuera de servicio justifican la asignación de recursos humanos, materiales y de seguridad detallados en el plan.
- **Determinación del Punto de Equilibrio:** Facilita la identificación de tareas donde el costo de prevención es óptimo en relación con la mitigación del riesgo, asegurando que ninguna acción de mantenimiento sea económicamente superior al daño que pretende evitar.
- **Gestión del Riesgo Residual:** Reconoce explícitamente que, si bien las tareas de mantenimiento minimizan la probabilidad de ocurrencia, existe una fracción de

costo remanente que la organización debe aceptar o mitigar mediante rediseños o seguros operativos."

3.4.2. Resumen y análisis de resultados

Gráfico 3-1



Fuente: Elaboración propia en base a la tabla 3-4

Tabla 3-6

Beneficio de la aplicación correcta de las acciones de mtto	
CIF	$33.669.841
CIF Futuro	$10.069.815
Costo mtto	$6.159.228
Costo total futuro	$16.229.043
Reducción de costo:	52%
Beneficio	**$ 17.440.798**

Fuente: Elaboración propia en base a la tabla 3-4

El análisis consolidado de los datos revela una transformación significativa en la estructura de costos operativos tras la propuesta de mantenimiento RCM. Al contrastar el escenario actual (correctivo) frente al escenario proyectado (preventivo/predictivo), se obtienen los siguientes hallazgos financieros:

1. **Mitigación Drástica del Riesgo** El **Costo de Indisponibilidad por Falla (CIF):** inicial, valorado en **$33.669.841**, representaba una carga financiera insostenible derivada de paradas no programadas y reparaciones de emergencia. Tras la aplicación de las tareas propuestas, el riesgo residual o **CIF Futuro** desciende a **$10.069.815**. Esta disminución valida la efectividad técnica de las estrategias seleccionadas para contener los modos de falla críticos.
2. **Eficiencia de la Inversión:** El costo de implementación del nuevo plan de mantenimiento (**Costo mtto**) para el sistema seleccionado asciende a **$6.159.228**. Al sumar esta inversión operativa con el riesgo residual, obtenemos un **Costo Total Futuro** de **$16.229.043**. Es crucial destacar que este "Costo Total Futuro" sigue siendo sustancialmente inferior al costo de no hacer nada (CIF original), demostrando que la inversión en prevención es significativamente más económica que la corrección de fallas.

   Cabe mencionar un caso particular en el análisis: aunque la acción propuesta para el **modo de falla 1.A.1** presenta un costo de ejecución superior al costo de su propia falla aislada, su implementación se justifica plenamente por su alcance sistémico. Esta tarea no solo mitiga el modo de falla primario, sino que actúa como una medida preventiva crítica para otros componentes vitales, tales como los **ejes X e Y** y la **electrobrocha**. Dado que estos elementos dependen estrictamente del suministro de refrigerante para operar sin anomalías, la inversión se traduce en una salvaguarda integral para la disponibilidad de toda la maquinaria.
3. **Rentabilidad y Beneficio Neto:** El indicador más contundente de la viabilidad del proyecto es la **reducción global de costos del 52%**. En términos monetarios,

la transición hacia este modelo de mantenimiento genera un **beneficio neto proyectado de $17.440.798.**

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) sobre el sistema crítico **"Eje Z"** de los centros de mecanizado **Urane-20** demostró ser técnicamente viable y alineada con los objetivos operacionales de **HORSE**: mejorar la disponibilidad, reducir tiempos fuera de servicio y aumentar la confiabilidad del equipo. El estudio aplicó un AMEF (FMECA) y la hoja de decisión del RCM para identificar modos de falla, evaluarlos según severidad/ocurrencia/detección y asignar políticas de mantenimiento apropiadas.

Del análisis de criticidad surge que la "**corrosión de las guías lineales"** es el modo de falla más crítico (mayor NPR) y concentra una parte significativa del costo anual por fallas, por lo que las acciones dirigidas a mitigar este modo (control de alcalinidad, limpieza/engrase programado y protección contra neblina) son prioritarias. Asimismo, se identificaron otros modos relevantes, como: **"baja aislación de motores"**, **"patines fracturados"**, y **"daños en cables/conectores"** que justifican tareas a condición y sustituciones cíclicas en casos puntuales, además de plasmar la idea de considerar aplicar un rediseño a la forma en la que se organizan los cables y mangueras en la catenaria del eje.

En términos económicos, el estudio presenta un análisis consolidado que compara el costo de **indisponibilidad actual** con el **escenario futuro** que incorpora la inversión en mantenimiento, donde se obtiene una reducción global de costos del **52%** y un beneficio neto proyectado de **$17.440.798 CLP** al considerar la mitigación del CIF y la inversión necesaria. Estas cifras indican que la inversión preventiva/predictiva propuesta es económicamente justificable y aporta un margen relevante frente al escenario correctivo. Adicionalmente, la implementación del plan de mantenimiento permite **incrementar la disponibilidad** del equipo en aproximadamente un **7 %** (véase anexo 4), lo que se traduce en una ganancia estimada de **403,06 h** de tiempo operativo anual, equivalentes a cerca de **17 días** adicionales de operación efectiva (16 días app, descontado las acciones de mantenimiento). Este aumento de disponibilidad refuerza el impacto

positivo del plan propuesto, al mejorar la capacidad productiva del sistema y contribuir directamente a la reducción de pérdidas asociadas a detenciones no programadas.

Además, la propuesta entrega un conjunto de tareas prácticas (inspecciones periódicas, mediciones de aislación, control de alcalinidad, mantenimiento de extractores de aire, limpieza/engrase de guías, y gestión de repuestos) que, implementadas con disciplina y registro adecuado, permitirán consolidar los beneficios proyectados y facilitar la replicabilidad del enfoque a otros subsistemas de la flota Urane-20.

En cuanto a **recomendaciones**, se sugiere priorizar la implementación de las tareas orientadas a mitigar la corrosión de las guías lineales, tales como el control sistemático de la alcalinidad del refrigerante, la mejora en las rutinas de limpieza y lubricación, y el mantenimiento adecuado de los sistemas de extracción de aire. Asimismo, es recomendable establecer programas periódicos de medición de aislación de motores y de inspección del estado de cables, conectores y patines, con el fin de detectar tempranamente condiciones degradadas antes de que evolucionen a fallas funcionales.

Como **oportunidades de mejora**, se identifica la necesidad de fortalecer los sistemas de registro histórico de fallas y actividades de mantenimiento, de modo que permitan una retroalimentación continua del análisis RCM y una mejora progresiva de los planes de mantenimiento. También se recomienda optimizar la gestión de repuestos críticos, asegurando su disponibilidad oportuna para reducir tiempos de detención, y evaluar la extensión de la metodología RCM a otros subsistemas de los centros de mecanizado Urane-20 o a equipos similares de la planta.

ANEXOS

1. Cálculos de Indicadores de confiabilidad y mantenibilidad

Los indicadores de confiabilidad son métricas utilizadas para evaluar el rendimiento y la disponibilidad de un sistema, equipo o componente.

Para representar los cálculos hechos se tomará como ejemplo el equipo CUC-03, tomando el siguiente histórico de fallas:

Tabla anexo A-1

OT	FECHA	TFS [Hrs]	TO [Hrs]	TIPO DE ACCIÓN
31823723	19-02-2022	6,00	72	CORRECTIVO
31823867	02-03-2022	48,00	168	CORRECTIVO
31964107	08-03-2022	24,00	48	CORRECTIVO
31965512	09-03-2022	3,67	24	CORRECTIVO
32458780	09-05-2022	0,08	1032	CORRECTIVO
32433568	09-05-2022	1,17	1032	CORRECTIVO
32458760	11-05-2022	0,08	48	CORRECTIVO
32701336	16-06-2022	168,00	624	CORRECTIVO
32920631	14-07-2022	4,83	360	CORRECTIVO
33005700	18-07-2022	2,50	48,00	PREVENTIVO
33006059	26-07-2022	3,00	144,00	CORRECTIVO
33008414	27-07-2022	0,50	24	CORRECTIVO
33116188	04-08-2022	4,53	144	CORRECTIVO
33142874	12-08-2022	3,00	144	CORRECTIVO
33144122	16-08-2022	168,00	48	CORRECTIVO
33213468	26-08-2022	1,42	72	CORRECTIVO
33213468	26-08-2022	1,42	72	CORRECTIVO
33190392	26-08-2022	16,00	72	CORRECTIVO
33190392	26-08-2022	16,00	72	CORRECTIVO
33243095	30-08-2022	192,00	48	CORRECTIVO
33296746	07-09-2022	6,00	120	CORRECTIVO
33299083	12-09-2022	0,67	72	CORRECTIVO
33452022	24-09-2022	936,00	216	CORRECTIVO
33813007	14-11-2022	1,50	192	CORRECTIVO
33840183	14-11-2022	10,00	192	CORRECTIVO
33818076	16-11-2022	24,00	24	CORRECTIVO

33827846	17-11-2022	3,00	24	CORRECTIVO
33839249	18-11-2022	2,30	24	CORRECTIVO
34332591	01-02-2023	2,33	1272	CORRECTIVO
34580469	07-03-2023	1,00	576	CORRECTIVO
34778292	03-04-2023	1,83	456	CORRECTIVO
34780227	12-04-2023	26,50	168	CORRECTIVO
34926555	24-04-2023	1,25	144	CORRECTIVO
34974080	02-05-2023	0,50	144	CORRECTIVO
35043028	12-05-2023	3,00	192,00	PREVENTIVO
35071413	16-05-2023	83,00	48,00	CORRECTIVO
35126519	25-05-2023	4,50	72	CORRECTIVO
35175556	31-05-2023	9,00	96	CORRECTIVO
35175848	01-06-2023	4,33	24	CORRECTIVO
35255252	15-06-2023	1,50	120	CORRECTIVO
35434429	05-07-2023	4368,00	336	CORRECTIVO
35653080	21-08-2023	9,00	624,00	PREVENTIVO

Fuente: GATM, HORSE

1.1. Tiempo Promedio Operativo (TPO):

$$\frac{\sum TO}{N\ fallas}$$

$$\frac{8568{,}00\ [Hrs]}{39\ [Fallas]}$$

$$219{,}69\ [Hrs]$$

1.2. Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS) :

$$\frac{\sum TFS}{N\ fallas}$$

$$\frac{6148{,}91\ [Hrs]}{39\ [Fallas]}$$

$$157{,}66\ [Hrs]$$

1.3. Disponibilidad (D):

$$\frac{TPO}{TPO + TPFS}$$

$$\frac{219{,}69\ [Hrs]}{219{,}69\ [Hrs] + 157{,}66\ [Hrs]}$$

$$58{,}22\%$$

1.4. Confiabilidad (R(t)):

Puesto que existen tareas de mantenimiento preventivo es necesario realizar un ranking ajustado (rj) para los eventos con la finalidad de obtener un resultado lo más acertado posible.

Para esto se realizó un ranking global de los históricos de fallas en relación a su TO del 1 al 42, tomando en cuenta los valores preventivos.

Luego se prosiguió con el ranking ajustado, el cual se adapta a las acciones preventivas. Este se calcula de la siguiente forma:

$$r_j = r_{j-1} + \frac{N + 1 - r_{j-1}}{N + 1 - (K_j - 1)}$$

Siendo N el número total de eventos (máximo Kj)

Los cálculos de la frecuencia acumulada de fallas F(t) y la confiabilidad se calcularon de la siguiente forma:

$$F_i(t) = \frac{r_i - 0{,}3}{N + 0{,}4}$$

$$R_i(t) = 1 - F_i(t)$$

Finalmente, para poder calcular los factores de forma, escala y localización para la tasa de falla, fue necesario calcular los valores X e Y para la pendiente y la intersección.

$$X = LN(TO)$$

$$Y = LN(LN(R(t)))$$

Obteniendo así lo siguiente:

Tabla anexo A-2

TO [Hrs]	TIPO DE ACCIÓN	kj	rj	F(t)	R(t)	LN(t. fun)	LN(-LN(R(t))
24	CORRECTIVO	1	1	0,0165094	0,9834906	3,1780538	-4,0955112
24	CORRECTIVO	2	2	0,0400943	0,9599057	3,1780538	-3,1961297
24	CORRECTIVO	3	3	0,0636792	0,9363208	3,1780538	-2,7211784
24	CORRECTIVO	4	4	0,0872642	0,9127358	3,1780538	-2,3935085
24	CORRECTIVO	5	5	0,1108491	0,8891509	3,1780538	-2,1414168
24	CORRECTIVO	6	6	0,1344340	0,8655660	3,1780538	-1,9353647
48	CORRECTIVO	7	7	0,1580189	0,8419811	3,8712010	-1,7602743
48	CORRECTIVO	8	8	0,1816038	0,8183962	3,8712010	-1,6073966
48	CORRECTIVO	10	9,029411765	0,2058824	0,7941176	3,8712010	-1,4674018
48	CORRECTIVO	11	10,05882353	0,2301609	0,7698391	3,8712010	-1,3410389
72	CORRECTIVO	12	11,08823529	0,2544395	0,7455605	4,2766661	-1,2254722
72	CORRECTIVO	13	12,11764706	0,2787181	0,7212819	4,2766661	-1,1186358
72	CORRECTIVO	14	13,14705882	0,3029967	0,6970033	4,2766661	-1,0189740
72	CORRECTIVO	15	14,17647059	0,3272752	0,6727248	4,2766661	-0,9252835
72	CORRECTIVO	16	15,20588235	0,3515538	0,6484462	4,2766661	-0,8366105
72	CORRECTIVO	17	16,23529412	0,3758324	0,6241676	4,2766661	-0,7521833
72	CORRECTIVO	18	17,26470588	0,4001110	0,5998890	4,2766661	-0,6713649
72	CORRECTIVO	19	18,29411765	0,4243896	0,5756104	4,2766661	-0,5936201
96	CORRECTIVO	20	19,32352941	0,4486681	0,5513319	4,5643482	-0,5184910
120	CORRECTIVO	21	20,35294118	0,4729467	0,5270533	4,7874917	-0,4455785
120	CORRECTIVO	22	21,38235294	0,4972253	0,5027747	4,7874917	-0,3745289
144	CORRECTIVO	23	22,41176471	0,5215039	0,4784961	4,9698133	-0,3050220
144	CORRECTIVO	24	23,44117647	0,5457825	0,4542175	4,9698133	-0,2367621
144	CORRECTIVO	25	24,47058824	0,5700610	0,4299390	4,9698133	-0,1694700
144	CORRECTIVO	26	25,5	0,5943396	0,4056604	4,9698133	-0,1028759
168	CORRECTIVO	27	26,52941176	0,6186182	0,3813818	5,1239640	-0,0367114
168	CORRECTIVO	28	27,55882353	0,6428968	0,3571032	5,1239640	0,0292970
168	CORRECTIVO	29	28,58823529	0,6671754	0,3328246	5,1239640	0,0954370
192	CORRECTIVO	30	29,61764706	0,6914539	0,3085461	5,2574954	0,1620203
192	CORRECTIVO	31	30,64705882	0,7157325	0,2842675	5,2574954	0,2293957
216	CORRECTIVO	33	31,77005348	0,7422182	0,2577818	5,3752784	0,3042751
336	CORRECTIVO	34	32,89304813	0,7687040	0,2312960	5,8171112	0,3812112
360	CORRECTIVO	35	34,01604278	0,7951897	0,2048103	5,8861040	0,4610077
456	CORRECTIVO	36	35,13903743	0,8216754	0,1783246	6,1224928	0,5447341
576	CORRECTIVO	37	36,26203209	0,8481611	0,1518389	6,3561077	0,6338936

624	CORRECTIVO	38	37,38502674	0,8746469	0,1253531	6,4361504	0,7307418
1032	CORRECTIVO	40	38,78877005	0,9077540	0,0922460	6,9392539	0,8684846
1032	CORRECTIVO	41	40,19251337	0,9408612	0,0591388	6,9392539	1,0395229
1272	CORRECTIVO	42	41,59625668	0,9739683	0,0260317	7,1483457	1,2942999

Fuente: Elaboración propia

Ya con los valores X e Y se calcularon los factores antes mencionados de la siguiente forma:

$$a = -\beta \times LN(\alpha) = interseccion\ (X, Y)$$

$$a = -5{,}43$$

$$\beta = pendiente\ (X, Y)$$

$$\beta = 1{,}004$$

$$\alpha = e^{-a/\beta}$$

$$\alpha = 222{,}575$$

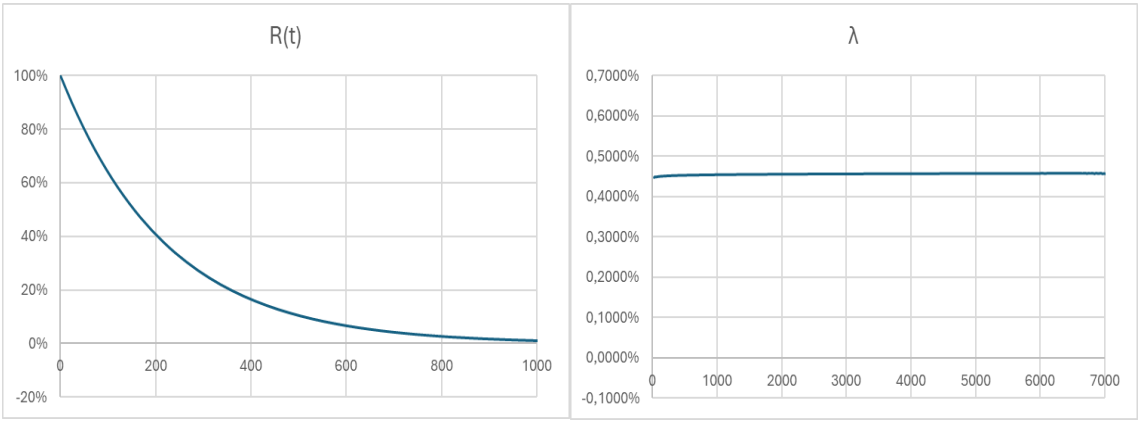
Con estos factores se calculó la tasa de falla y la curva de confiabilidad del equipo, cuyas formulas son las siguientes:

$$\lambda = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

Considerando gamma(γ)=0 y un delta t=24 horas, se generaron los siguientes gráficos

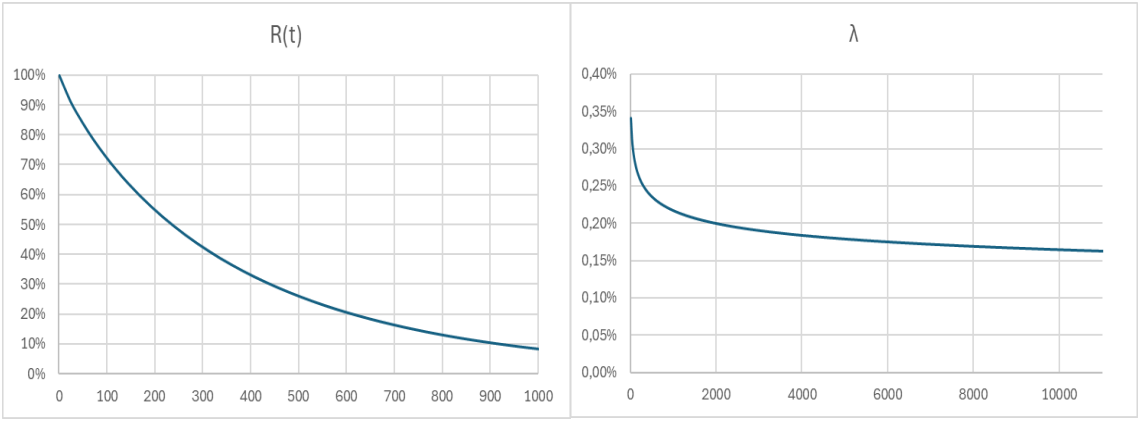
Gráfico anexo A-1: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-03



Fuente: Elaboración propia

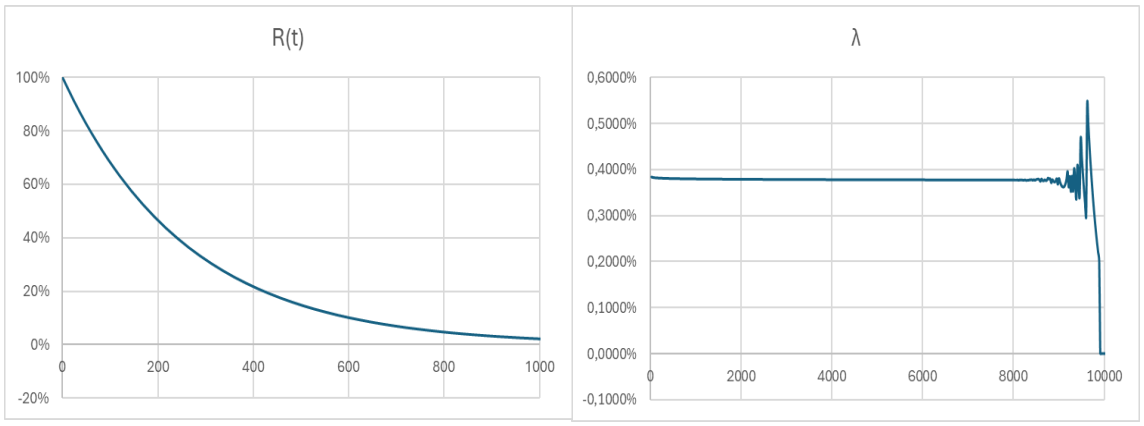
De esta forma se realizaron los gráficos para los siguientes equipos, resultando en los siguientes:

Gráfico anexo A-2: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-01



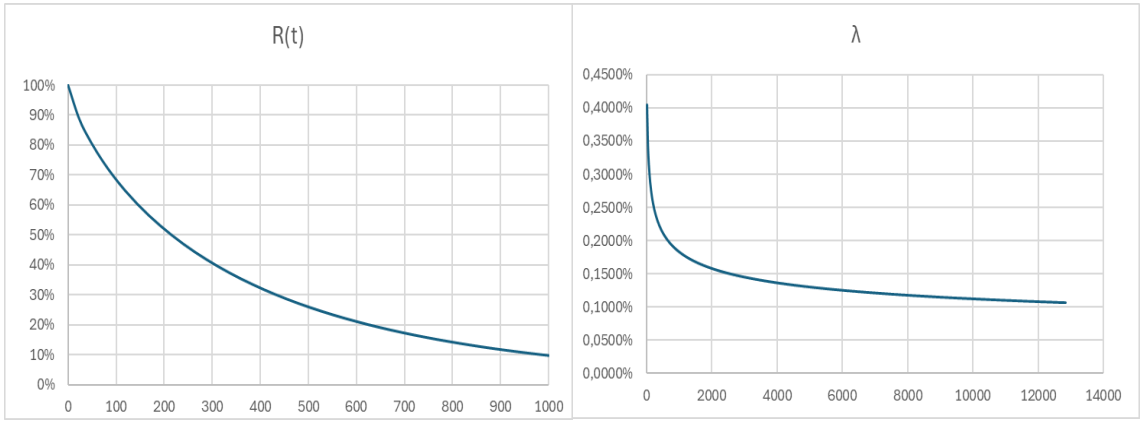
Fuente: Elaboración propia

Gráfico anexo A-3: : Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-02



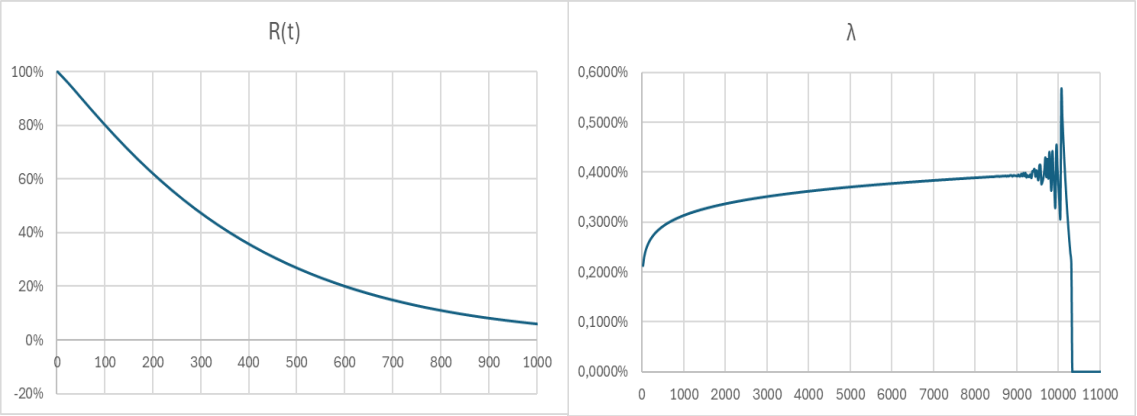
Fuente: Elaboración propia

Gráfico anexo A-4: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-04



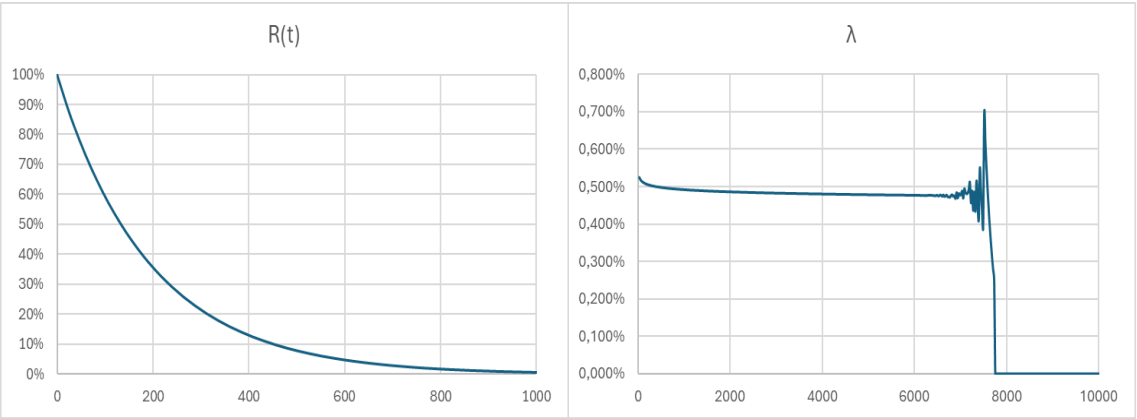
Fuente: Elaboración propia

Gráfico anexo A-5: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-05



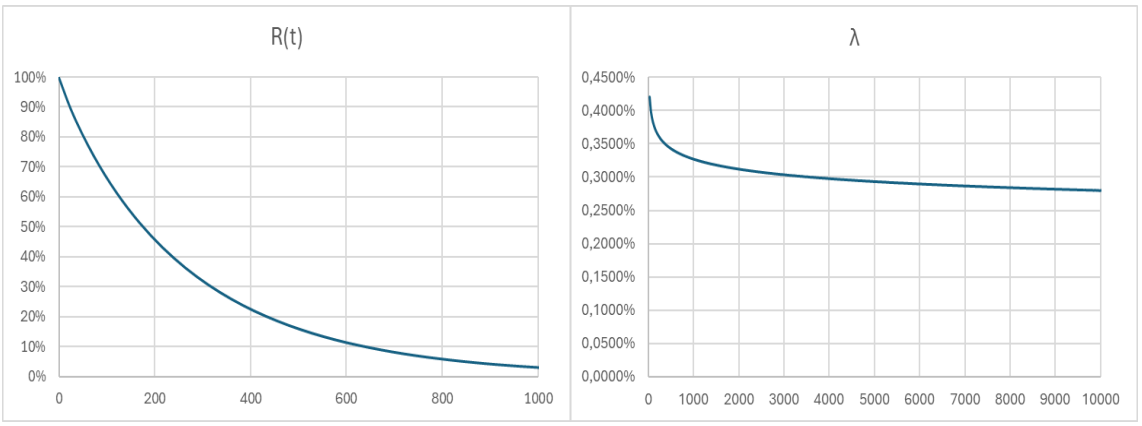
Fuente: Elaboración propia

Gráfico anexo A-6: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-06



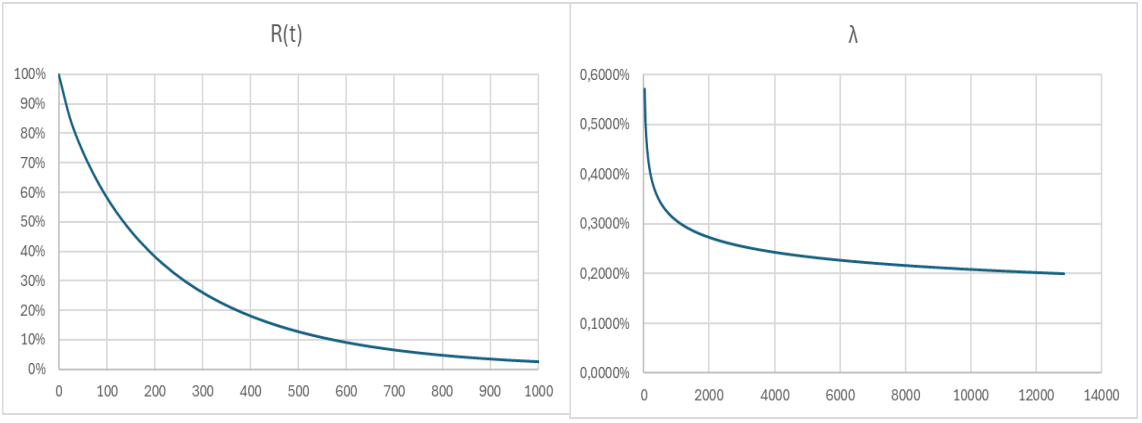
Fuente: Elaboración propia

Gráfico anexo A-7: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-07



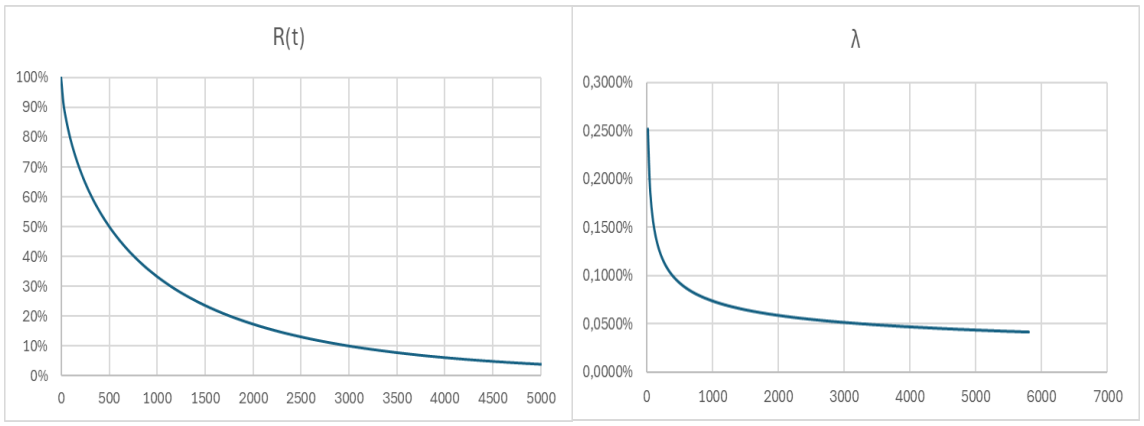
Fuente: Elaboración propia

Gráfico anexo A-8: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-08



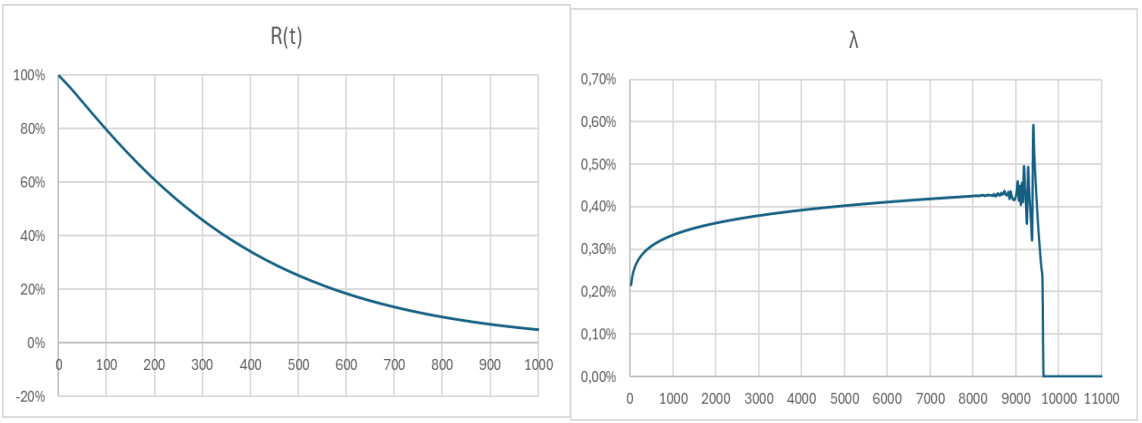
Fuente: Elaboración propia

Gráfico anexo A-9: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-09



Fuente: Elaboración propia

Gráfico anexo A-10: Comportamiento de confiabilidad y tasa de fallas para CUC-10



Fuente: Elaboración propia

2. Cálculos de gestión de tiempo PERT y diagramas de red.

El método PERT (Program Evaluation and Review Technique) es una herramienta de gestión del tiempo utilizada para planificar y programar proyectos mediante la definición de las actividades y sus relaciones de dependencia. Para ello, emplea diagramas de red, los cuales permiten representar gráficamente la secuencia de ejecución de las tareas e identificar la ruta crítica que determina la duración total del proyecto.

2.1. PERT

A manera de ejemplo se utilizará la programación de la tarea "**limpieza y engrase de guías lineales"**

Tabla anexo A-3: PERT (1/2)

#	CODIGO	ACTIVIDAD	PREDECESORA	OPTIMISTA	PROBABLE	PESIMISTA	DURACIÓN ESTIMADA	σ	σ^2
1	A	Obtención de permisos de trabajo		15	20	45			
2	B	Preparar herramientas/ Insumos/ Repuestos	A	15	20	30			
3	C	Posicionamiento de equipo	B	3	5	10			
4	D	Realizar LOTO	C	10	15	20			
5	E	Limpiar y engrasar las guías lineales.	D	30	35	50			
6	F	Retirar LOTO y verificar engrase de guías	E	15	20	40			
Total				**88**	**115**	**195**			

Tras determinar los tiempos "optimista", "probable" y "pesimista" de las actividades propuestas para la tarea y su dependencia, es necesario calcular la duración estimada, desviación estándar (σ) y varianza (σ^2) de cada actividad. Esto con la finalidad de obtener información importante que permita evaluar la posibilidad de terminar el proyecto en un tiempo "X".

Las fórmulas para calcular lo anterior son las siguientes:

2.1.1. Duración estimada:

$$\frac{a + 4b + c}{6}$$

Ej. Actividad A:

$$\frac{15 + 4 \times 20 + 45}{6} = 23$$

2.1.2. Desviación estándar (σ):

$$\frac{c - a}{6}$$

$$\frac{45 - 15}{6} = 5$$

2.1.3. Varianza (σ^2):

$$\left(\frac{c - a}{6}\right)^2$$

$$(5)^2 = 25$$

2.1.4. Resultados:

Aplicando esto a todas las tareas se tiene lo siguiente:

Tabla anexo A-4: PERT (2/2)

#	CODIGO	ACTIVIDAD	PREDECESORA	OPTIMISTA	PROBABLE	PESIMISTA	DURACIÓN ESTIMADA	σ	σ^2
1	A	Obtención de permisos de trabajo		15	20	45	**23**	5,00	25,00
2	B	Preparar herramientas/ Insumos/ Repuestos	A	15	20	30	**21**	2,50	6,25
3	C	Posicionamiento de equipo	B	3	5	10	**6**	1,17	1,36
4	D	Realizar LOTO	C	10	15	20	**15**	1,67	2,78
5	E	Limpiar y engrasar las guías lineales.	D	30	35	50	**37**	3,33	11,11
6	F	Retirar LOTO y verificar engrase de guías	E	15	20	40	**23**	4,17	17,36
Total				**88**	**115**	**195**	**124**		**63,86**

Fuente: elaboración propia

Donde la fila de "totales" corresponde a la suma de cada columna.

Volviendo al comienzo se mencionó que estos valores permitían conocer si una tarea se realizará en un tiempo determinado, esta información la entrega la suma de varianzas. En este caso el valor de **63,86** permite concluir que la duración podría superar el valor estimado. Lo anterior se puede justificar calculando la variable **"Z"**.

2.1.5. Z y probabilidad de éxito:

"Z" es una variable estandarizada o estadístico normal que expresa cuántas desviaciones estándar separan un tiempo objetivo de la duración esperada del proyecto. Se calcula mediante:

$$\frac{T - T_e}{\sigma_p}$$

Donde:

- $T = tiempo\ objetivo\ establecido$
- $T_e = tiempo\ estimado\ del\ proyecto$

- $\sigma_p = desviacion\ estandar\ del\ proyecto = \sqrt{\sum \sigma^2}$

Entonces, si se desea aplicar el proyecto estableciendo un tiempo objetivo igual al estimado , se tendría el siguiente valor “Z”:

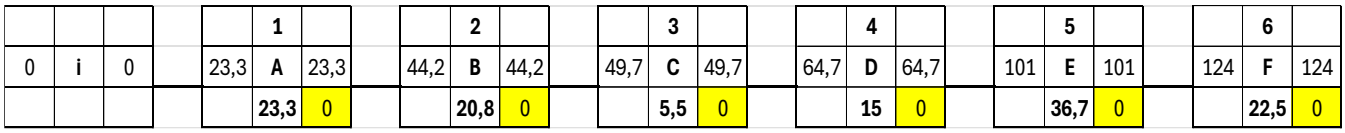
$$\frac{124 - 124}{\sqrt{63{,}86}} = 0$$

Valor que buscando en una **tabla de distribución estándar acumulada** arroja que el proyecto posee una probabilidad del **50%** de ser completado en esa duración. En cambio, si se establece una duración mayor, como por ejemplo, **130**, la probabilidad de éxito asciende al **77,3%**, disminuyendo así la incertidumbre y permitiendo tener un mejor control sobre los tiempos disponibles para la programación de planes u otros proyectos.

2.2. Diagrama de red

El diagrama de red de esta tarea es **secuencial**, o sea que cada tarea depende de la anterior, quedando de la siguiente forma:

Figura anexo A-1



Donde:

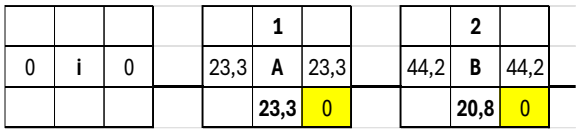
Figura anexo A-2

	#	
TERMINACIÓN MAS CERCANA	**CÓDIGO**	TERMINACIÓN MAS TARDÍA
	DURACIÓN ESTIMADA	HOLGURA

Fuente: elaboración propia

2.2.1. Terminación más cercana (EF):

Este término hace referencia al instante más temprano en que una actividad puede finalizar, suponiendo que todas sus actividades predecesoras se han completado en el menor tiempo posible y sin retrasos. Se obtiene sumando la duración de la actividad a su inicio más cercano (**ES, Early Start**). Este valor se determina mediante el recorrido hacia adelante (*forward pass*) del diagrama de red. En este caso el **"Early Start (ES)"** se ha omitido pasando directamente al **"Early Finish"**.



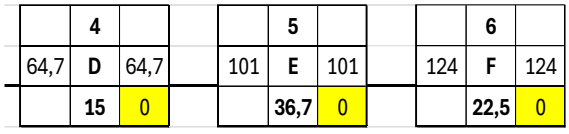
$$ES_i = 0$$

$$ES_A = 0$$

$$EF_A = 0 + 23{,}3 = 23{,}3$$

2.2.2. Terminación más tardía (LF):

El "LF" corresponde al instante máximo en que una actividad puede finalizar sin provocar un retraso en la fecha de finalización del proyecto. Se calcula a partir del inicio más tardío **(LS, Late Start)** y se determina mediante el recorrido hacia atrás (backward pass) del diagrama de red. Al igual que en el caso anterior se ha omitido el **"Late Start (LS)"** registrando únicamente el **"Late Finish".**



$$LS_F = 101$$

$$LF_F = 101{,}5 + 22{,}5 = 124$$

$$LF_E = 124 - 22{,}5 = 101{,}5$$

2.2.3. Holguras:

Las holguras corresponden al margen de tiempo del que dispone una actividad para retrasarse sin afectar la fecha de finalización del proyecto ni el inicio de las actividades sucesoras. Su cálculo permite identificar la flexibilidad existente en la programación y determinar las actividades críticas, las cuales presentan una holgura igual a cero y condicionan la duración total del proyecto.

Estas se determinan restando los tiempos del **LF** con los **EF**. En este caso, las holguras son **"0"**, puesto que como se mencionó en un principio, trabajan en secuencia, por lo que de retrasarse una actividad, todo el proyecto se verá afectado.

3. Cálculo del costo de materiales en CLP/h

Tabla anexo A-5

TAREA	MATERIALES	COSTO UNITARIO POR TAREA	CANTIDAD NECESARIA POR TAREA [Un, Lt, Kg, ect)	VIDA ÚTIL DEL PRODUCTO [AÑOS O USOS]	HORAS/AÑO	DURACIÓN TAREA	COSTO/HORA ESPERADO POR TAREA
Inspección del nivel de refrigerante							
Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	Juego de llaves punta corona	$40.000	1	5	6882,86	2,50	$1
Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	Juego de llaves Allen	$20.000	1	5	6882,86	2,50	$1
Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	Alicate	$15.000	1	5	6882,86	2,50	$0
Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	Linterna	$20.000	1	5	6882,86	2,50	$1

Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	Juego de sellos O´rings	$30.000	1	1	6882,86	2,50	$12.000
Reemplazar sellos y mangueras del sistema de refrigeración.	Mangueras	$120.000	2	1	2294,29	2,50	$96.000
Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable, limpiar filtro metálico.	Escalera	$90.000	1	10	6882,86	2,50	$1
Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable, limpiar filtro metálico.	Filtro multibolsa	$34.142	5	1	6882,86	2,50	$68.284

Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable, limpiar filtro metálico.	Filtro desechable	$8.000	5	1	6882,86	2,50	$16.000
Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable, limpiar filtro metálico.	hidro lavadora	$140.000	1	10	6882,86	2,50	$2
Realizar mantenimiento a los extractores de aire del equipo (reemplazar filtros multibolsa y desechable,	juego de destornilladores	$30.000	1	10	6882,86	2,50	$0

limpiar filtro metálico.							
Revisar el espacio de entrehierro de los motores lineales.	Galgas de medición	$10.000	1	5	6882,86	2,00	$0
Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	Multímetro de pH	$1.143.060	1	10	6882,86	0,67	$17
Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	Electrodo pH	$547.040	1	2	6882,86	0,67	$40
Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante,	Electrodo CE	$561.000	1	2	6882,86	0,67	$41

aceite de corte e hidráulico del equipo.							
Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	Electrodo OD	$565.000	1	2	6882,86	0,67	$41
Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	Membranas y electrolito OD	$50.000	1	1	6882,86	0,67	$7
Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	Baterías	$575	4	1	6882,86	0,67	$0
Medir niveles de alcalinidad	Refractómetro manual	$35.900	1	5	2294,29	0,67	$3

y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.							
Medir niveles de alcalinidad y contaminación del refrigerante, aceite de corte e hidráulico del equipo.	Kit de manchas de aceite	$400.000	1	10	2294,29	0,67	$17
Implementar separadores resistentes al desgaste y corrosión para los cables y mangueras de la catenaria y separarlos por componente, terminal.							
Inspeccionar los conectores de los motores lineales, asegurándose	Limpiador de contactos	$5.000	1	0,08	6882,86	0,25	$9

de que estén bien conectados.							
Inspeccionar los conectores de los motores lineales, asegurándose de que estén bien conectados.	Linterna	$20.000	1	5	6882,86	0,25	$1
Inspeccionar los conectores de los motores lineales, asegurándose de que estén bien conectados.	Paño de limpieza	$1.330	1	1	6882,86	0,25	$5.320
Reemplazar los sellos (burletes) del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas (estructura, bisagras y pestillos).	Espátula recta	$7.990	1	5	6882,86	1,50	$0
Reemplazar los sellos	Burletes	$23.990	1	1	6882,86	1,50	$15.993

(burletes) del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas (estructura, bisagras y pestillos).							
Reemplazar los sellos (burletes) del tablero eléctrico y verificar el estado de las puertas (estructura, bisagras y pestillos).	destornillador	$7.000	1	10	6882,86	1,50	$0
Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	Filtro	$6.000	1	1	6882,86	1,50	$4.000
Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	Termómetro laser	$70.000	1	5	6882,86	1,50	$2

Realizar mantenimiento al aire acondicionado del tablero eléctrico.	Aspiradora industrial	$300.000	1	5	6882,86	1,50	$9
Limpiar y engrasar las guías lineales.	Mobilgear EP0 (18Kg)	$124.000	0,038	1	6882,86	0,75	$236
Reemplazar los sellos del pantógrafo.	Espátula recta	$7.990	1	5	6882,86	6,00	$0
Reemplazar los sellos del pantógrafo.	Sello barredor	$60.000	1	1	6882,86	6,00	$10.000
Reemplazar los sellos del pantógrafo.	Sello intermedio	$60.000	1	1	6882,86	6,00	$10.000
Medir el nivel de aislación de los motores y revisar que no se encuentren rallados.	Ohmímetro	$1.036.630	1	20	6882,86	4,00	$8
Reemplazar filtros de la FRL.	Filtro 25µ	$15.000	1	0.5	6882,86	0,35	$42.857
Reemplazar filtros de la FRL.	Filtro 0,01µ	$15.000	1	0.5	6882,86	0,35	$42.857

Realizar geometría							
Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores de esta.	Paño de limpieza	$1.330	2	1	6882,86	4,00	$665
Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores de esta.	Pistola de aire sopladora	$7.000	1	3	6882,86	4,00	$0
Realizar limpieza en la catenaria y ajuste de pernos en el soporte y tensores de esta.	Aspiradora industrial	$300.000	1	5	6882,86	1,50	$9

Fuente: Elaboración propia

El costo por hora de los materiales se calculó utilizando dos factores: su vida útil (para herramientas y productos no consumibles; el tiempo de ejecución de la tarea (utilizado en insumos y materiales de un solo uso). Esto se calculó de la siguiente forma:

- **Costo por hora de las herramientas y productos no consumibles:** En este caso, el cálculo del costo por hora se determinó multiplicando el **costo unitario** de la herramienta con la **cantidad a utilizar** y dividiendo el producto en los años de **vida útil** en horas.
- **Costo por hora de insumos y materiales de un solo uso:** al igual que de la forma anterior el valor del costo por hora para estos elementos se calculó con el producto entre el **costo unitario** de los insumos o materiales y la **cantidad a utilizar**, pero esta vez dividiéndolo por la **duración de la actividad**, de esta forma el valor al calcular el costo de las acciones de mantenimiento se contempla en la totalidad el producto utilizado.

4. Cálculo de mejora de disponibilidad según estimación y plan propuesto.

Para determinar la indisponibilidad del periodo evaluado, se utilizaron los valores del histórico de fallas que hacían referencia a una perdida detención del equipo a causa de una avería en el eje Z. Estos valores también fueron utilizados para la realización del Jack Knife visto en el capítulo 1 de este documento.

Tabla anexo A-6

Sistema	Total de fallas (aproximado)	TPFS
Eje Z	10	644,31

Fuente: Elaboración propia

Considerando que el horizonte de evaluación ha sido de 2 años, y que se trabajan 5640 horas anuales aproximadamente (3 turnos de 8 horas por 235 días laborales), se realizaron los siguientes cálculos:

$$TFS\ total = Total\ de\ fallas\ \times TPFS$$
$$= 10 \times 644{,}31$$
$$= 6443{,}08$$

$$TFS\ anual\ por\ equipo = \frac{TFS\ total}{Horizonte\ de\ evaluacion\ \times N°\ de\ equipos}$$
$$= \frac{6443{,}08}{2 \times 7}$$
$$= 460{,}22[Hrs]$$

$$\text{Disponibilidad anual promedio del periodo} = \frac{TO - TFS}{TO}$$
$$= \frac{5640 - 460{,}22}{5640} \sim 92\%$$

Ahora bien, para proseguir con la disponibilidad futura estimada, se evalúo mediane las estimaciones del "CIF Futuro" vistas en el Capítulo tres.

Tabla anexo A-7

Fallas estimadas	TPFS
4,12	11,23

Fuente: Elaboración propia

$$TPS\ Estimado = 4{,}12 \times 11{,}23 = 46{,}27$$

$$Disponibilidad\ esperada = \frac{5640 - 46.27}{5640} \sim 99\%$$

$$Aumento\ de\ disponibilidad\ esperado$$
$$= Disponibilidad\ esperada - Disponibilidad\ anual\ promedio\ del\ periodo$$
$$= 99\% - 92\% \sim 7\%$$

REFERENCIAS

ABOUT, GOVERNANCE AND SUSTAINABILITY. (s.f.). Obtenido de HORSE Technologies: https://horse-powertrain.com/about

Aránguiz Garrido, A. (2023). *Introducción a la ingeniería de confiabilidad.* Viña del Mar: Universidad Técnica Federico Santa María.

Baldi Gonzalez, C. (2022). *Gestión de activos.* Viña del Mar: Universidad Técnica Federico Santa María.

Baldi Gonzalez, C. (2022). *Jerarquización de equipos y componentes críticos.* Viña del Mar: Universidad Técnica Federico Santa María.

Duque Ramírez, P. (2022). *Ingeniería del mantenimiento.* Viña del Mar: Universidad Técnica Federico Santa María.

Mella, V. (s.f.). *Gestión de proyectos.* Viña del Mar: Universidad Técnica Federico Santa María.

Parra Márquez, C. A. (2022). *Gestión de Activos.* Viña del Mar: Universidad Técnica Federico Santa María.

Parra Márquez, C. A., & Crespo Márquez, A. (2015). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos.* INGEMAN.