

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

PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO
A ACTIVOS FÍSICOS DE LABORATORIO ÓPTICO EN CHILE

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Ingeniero en MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL

Alumno:

Alberto José Larraguibel Arancibia

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO A ACTIVOS FÍSICOS DE LABORATORIO OPTICO EN CHILE.

Nombre del candidato(a): Alberto José Larraguibel Arancibia

Carrera / Grado: Ing. Mantenimiento Industrial

Campus: Viña del Mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Baldi González, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 17-06-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 17-06-2026 Firma:

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

RESUMEN

La presente investigación desarrolla una propuesta de implementación de gestión de mantenimiento, a activos físicos de un laboratorio óptico en Chile, utilizando la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, como enfoque principal. El estudio se contextualiza en un laboratorio óptico representativo del sector nacional, caracterizado por procesos altamente automatizados y equipos de alta precisión, donde la confiabilidad de los activos resulta clave para garantizar la calidad del producto final y continuidad operacional.

En una primera etapa, se analizó el contexto operacional del laboratorio óptico y se identificaron los equipos involucrados en el proceso productivo. Mediante la aplicación de una matriz cualitativa de criticidad, se determinó que la Generadora CNC, es el equipo más crítico del sistema, debido a su impacto directo en la producción, la calidad óptica y los costos operacionales.

Posteriormente, se desarrolló un análisis funcional y un FMECA, cualitativo del equipo crítico, identificando los principales modos de falla, sus efectos y su nivel de criticidad, mediante el uso del Número de Prioridad de Riesgo. Este análisis permitió priorizar los riesgos más relevantes y establecer la base técnica para la toma de decisiones de mantenimiento.

Finalmente, se elaboró un Plan de Mantenimiento basado en RCM, aplicando el Árbol Lógico de Decisiones para definir tareas preventivas, predictivas, correctivas planificadas y seguridad. El plan incluye ordenes de trabajo estandarizadas, checklists, cronograma mensual, inventario mínimo de repuestos, evaluación técnica y económica, e indicadores de control. Los resultados demuestran que la propuesta es técnica y económicamente viable, y que su implementación contribuiría significativamente a mejorar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operativa de la Generadora CNC, fortaleciendo la gestión de mantenimiento del laboratorio óptico.

ÍNDICE

RESUMEN

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVO GENERAL 2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 2

CAPÍTULO 1: CONTEXTO OPERACIONAL Y SELECCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO 3

1 INDUSTRIA ÓPTICA..... 4

1.1 LABORATORIO ÓPTICO..... 4

1.2 CONTEXTO OPERACIONAL 5

1.2.1 Etapas del proceso productivo en un Laboratorio Óptico 6

1.2.2 Bloqueo del Lente 6

1.2.3 Tallado CNC (Generación de la superficie)..... 6

1.2.4 Pulido o “Fining” 7

1.2.5 Desbloqueo y Lavado..... 7

1.2.6 Recubrimiento y Tratamiento superficiales 7

1.2.7 Marcado Laser..... 8

1.2.8 Control de Calidad 8

1.2.9 Montaje y Despacho..... 8

1.3 PROBLEMÁTICA..... 8

1.4 ANÁLISIS DE CRITICIDAD A EQUIPOS DE LABORATORIO
ÓPTICO 10

1.4.1 IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS. 10

1.4.2 MATRIZ CUALITATIVA DE RIESGO 12

1.5 EQUIPOS CRÍTICOS DEL LABORATORIO ÓPTICO..... 16

**CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO Y ANÁLISIS FMECA
17**

2 INTRODUCCIÓN AL EQUIPO GENERADORA CNC 18

2.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA GENERADORA CNC SATISLOH VFT-MACRO	18
2.2	FUNCIÓN PRINCIPAL DEL EQUIPO	19
2.2.1	Características técnicas relevantes	20
2.2.2	Límites del sistema.....	20
2.3	SUBSISTEMAS PRINCIPALES	21
2.3.1	Husillo principal.....	21
2.3.2	Sistema neumático ABS.....	21
2.3.3	Sistema de refrigeración y ventilación	21
2.3.4	Sistema eléctrico, control y seguridad	21
2.3.5	Sistema de movimientos X – Y – Z	22
2.4	SIPOC DEL SISTEMA CRÍTICO	22
2.5	FUNCIONES PRINCIPALES Y SECUNDARIAS DEL EQUIPO	23
2.5.1	Fallas funcionales del identificadas	23
2.6	ANÁLISIS FMECA PARA GENERADORA CNC SATISLOH ..	24
2.7	JERARQUIZACIÓN DE LOS MODOS DE FALLA MEDIANTE EL NPR	26
2.7.1	Análisis de los Modos de Falla	30
2.7.2	Analisis Cuantitativo de Fallas Críticas	31
2.7.3	Evaluación de Confiabilidad Operacional	32
CAPITULO 3: PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO		35
3	PROGRAMA DE ACTIVIDADES Y TAREAS DE MANTENIMIENTO	36
3.1	ANÁLISIS DE PROPUESTA	36
3.2	DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM.....	36
3.3	EXPLICACIÓN DEL ÁRBOL LÓGICO DE DECISIONES RCM	36
3.3.1	Clasificación de las consecuencias de falla.....	37
3.3.2	Evaluación de tareas proactivas	37
3.3.3	Árbol lógico de decisiones	38
3.4	HOJA DE DECISIÓN RCM – GENERADORA CNC	39

3.5	CONSOLIDACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO.....	39
3.5.1	Catálogo de tareas de mantenimiento	40
3.6	ORDENES DE TRABAJO ESTANDARIZADAS	41
3.7	HOJA DE VIDA	45
3.8	CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO – ENFOQUE MENSUAL	45
3.8.1	Descripción del Cronograma Gantt Mensual.....	45
3.8.2	Criterios de Construcción del Cronograma.....	46
3.8.3	Cronograma Gantt Mensual – Plan de Mantenimiento Equipo CNC	46
3.8.4	Ventajas del Cronograma Mensual	47
3.9	INVENTARIO MÍNIMO DE REPUESTOS PARA GENERADORA CNC	47
3.10	COSTOS DEL MANTENIMIENTO.....	48
3.10.1	Evaluación Técnica del Plan de Mantenimiento	50
3.10.2	Evaluación Económica del Plan de Mantenimiento.....	51
3.10.3	Costos Operativos y Optimización del Gasto	52
3.11	ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD Y GESTIÓN DEL RIESGO	52
3.11.1	Proyección de Sostenibilidad Financiera	52
3.12	FACTÁBILIDAD Y EFICIENCIA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO	53
3.12.1	Evaluación de Factibilidad y Implementación Instrumental.....	53
3.12.2	Eficiencia del Plan de Mantenimiento	53
3.13	BENEFICIOS OPERACIONALES ASOCIADOS A LA IMPLEMENTACIÓN.....	54
3.13.1	Estabilización de la Capacidad Productiva	54
3.13.2	Optimización del Ciclo de Vida de Herramientas Críticas	55
3.13.3	Mejora en la Calidad de Entrega.....	55
3.14	Limitaciones del Análisis Económico y de Confiabilidad.....	55
	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....	56
	BIBLIOGRAFÍA.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Logo Laboratorio Óptico Optiland.....4

Figura 1-2: Diagrama de flujo de la producción de Laboratorio Óptico.....5

Figura 1-3: Matriz de riesgo..... 15

Figura 2-1: Generadora CNC Satisfloh VFT-Macro..... 18

Figura 2-2: Proceso de fresado de acción simple..... 19

Figura 2-3: Etapa de giro fino 20

Figura 2-4: Grabado de lente con punta de herramienta separada. 20

Figura 3-1: Árbol lógico de decisiones 38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Equipos Laboratorio Óptico 11

Tabla 1-2: Factor de frecuencia de falla..... 12

Tabla 1-3: Factor de flexibilidad operacional 13

Tabla 1-4: Factor de impacto operacional..... 13

Tabla 1-5: Factor costos de mantención..... 13

Tabla 1-6: Factor de impacto a la seguridad, higiene y medio ambiente..... 14

Tabla 1-7: Clasificación según criticidad..... 14

Tabla 1-8: Evaluación de equipos. 14

Tabla 2-1: Características técnicas..... 20

Tabla 2-2: Analisis SIPOC..... 22

Tabla 2-3: Funciones principales y secundarias del equipo..... 23

Tabla 2-4: Fallas funcionales 23

Tabla 2-5: Análisis FMECA (Sistema de sujecion)..... 24

Tabla 2-6: Análisis FMECA (Sistema de movimientos) 25

Tabla 2-7: Análisis FMECA (Husillo, lubricación y herramienta)..... 25

Tabla 2-8: Análisis FMECA (Sistema de refrigeración)..... 26

Tabla 2-9: Análisis FMECA (Control, Energía y Seguridad)..... 26

Tabla 2-10: Valores NPR 28

Tabla 2-11: Valores NPR Sujeción ABS 28

Tabla 2-12: Valores NPR Movimientos X - Y – Z 28

Tabla 2-13: Valores NPR Generación óptica..... 29

Tabla 2-14: Valores NPR Refrigeración y ventilación 29

Tabla 2-15: Valores NPR Control, energía y Seguridad..... 29

Tabla 2-16: Tabla Técnica 31

Tabla 2-17: Datos base..... 32

Tabla 2-18: Resumen anual de fallas y tiempos de detención por subsistemas de la Generadora CNC 33

Tabla 3-1: Hoja de Decisión RCM..... 39

Tabla 3-2: Consolidación de Tareas de Mantenimiento 39

Tabla 3-3: Catálogo de Tareas RCM 41

Tabla 3-4: Formato estándar de orden de trabajo..... 42

Tabla 3-5 Check List..... 42

Tabla 3-6: Orden de Trabajo Oficial 43

Tabla 3-7: Plan Maestro de Mantenimiento..... 44

Tabla 3-8: Hoja de vida Generadora CNC 45

Tabla 3-9: Cronograma Gantt Mensual 46

Tabla 3-10: Inventario de Repuestos.....48

Tabla 3-11 Presupuesto de inversión inicial 49

Tabla 3-12: Repuestos y suministros 49

Tabla 3-13: Parámetros operativos 50

Tabla 3-14: Costos 50

Tabla 3-15: Flujo de caja proyectado a 3 años.....52

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

FF	.	Frecuencia de fallos
C	.	Consecuencia de los eventos de falla
IO	.	Impacto operacional
FO	.	Flexibilidad operacional
CM	.	Costos de mantenimiento
SHA	.	Impacto en seguridad, higiene y medio ambiente
FMECA	.	Análisis de modos de falla, efectos y criticidad
RCM	.	Mantenimiento centrado en confiabilidad
NPR	.	Numero prioritario de riesgos

B. SIMBOLOGÍA

x	.	Multiplicación
+	.	Suma
Rpm	.	Revoluciones por minuto
VDC	.	Voltaje corriente continua
°C	.	Grados Celsius
mm	.	Milímetros
Ec.	.	Ecuación
≥	.	Mayor o igual que
≤	.	Menor o igual que

INTRODUCCIÓN

En los entornos industriales actuales, la competitividad de las organizaciones depende en gran medida de la capacidad para mantener sus activos físicos operando de manera confiable, segura y eficiente. En este contexto, la gestión del mantenimiento ha evolucionado desde enfoques reactivos orientados a la reparación de fallas hacia estrategias integrales que buscan maximizar la disponibilidad de los equipos, optimizar los costos del ciclo de vida y asegurar la continuidad operacional de los procesos productivos.

La creciente automatización de los sistemas industriales ha incrementado la dependencia de equipos de alta complejidad tecnológica, donde una falla no solo genera costos directos asociados a la reparación, sino también pérdidas derivadas de interrupciones productivas, incumplimientos de plazos de entrega, disminución de la calidad y reducción de la competitividad empresarial. Como consecuencia las metodologías modernas de mantenimiento han incorporado conceptos de confiabilidad análisis de riesgo y gestión de activos con el propósito de orientar los recursos hacia aquellos equipos cuyo desempeño resulta crítico para la operación.

En este contexto se encuentra el laboratorio óptico dedicado a la fabricación y procesamiento de lentes oftálmicos mediante tecnologías de generación digital. Su operación contempla una producción que fluctúa entre 500 y 800 órdenes diarias, lo que representa aproximadamente 170.000 órdenes procesadas al año. Para sostener este nivel de producción, la organización dispone de equipamiento especializado que constituye la base de su capacidad operativa, destacando las Generadora CNC, responsables de la generación geométrica de las superficies ópticas previo a las etapas de pulido y terminación.

Frente a este escenario, la gestión del mantenimiento adquiere un rol fundamental dentro de la estrategia operacional de la organización. Mas allá de asegurar la disponibilidad física de los equipos, el mantenimiento debe contribuir a preservar la precisión geométrica del proceso, controlar los mecanismos de degradación de los componentes críticos y optimizar la utilización de los recursos asociados a la producción. Para ello, resulta necesario implementar metodologías que permitan establecer estrategias de intervención basadas en criterios técnicos, funcionales y económicos.

OBJETIVO GENERAL

Proponer un plan de gestión de mantenimiento, basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, aplicado a un activo físico crítico de un laboratorio óptico en Chile, con el fin de proponer estrategias de mantenimiento orientadas a disminuir las pérdidas operacionales y costos asociados a fallas funcionales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el equipo crítico del laboratorio óptico, mediante un análisis de criticidad operacional, aplicado a sus activos físicos.
- Ejecutar el análisis de modos, efectos y criticidad de fallas para jerarquizar los componentes críticos del activo seleccionado.
- Elaborar el plan de tareas de mantenimiento, para el equipo seleccionado, integrando los requerimientos técnicos y recursos económicos necesarios según los resultados del análisis RCM.

CAPÍTULO 1: CONTEXTO OPERACIONAL Y SELECCIÓN DEL EQUIPO

CRÍTICO

1 INDUSTRIA ÓPTICA

A nivel internacional, la industria de los laboratorios ópticos ha evolucionado hacia un modelo de manufactura avanzada de alta precisión, impulsado por la adopción de tecnologías de talla digital y recubrimientos de capa delgada bajo condiciones de vacío controlado. Este mercado global, valorado en más de 224 mil millones de dólares, exige una disponibilidad operativa superior al 95% para mantener la competitividad en un entorno donde la precisión nanométrica es el estándar de calidad. En el contexto nacional, la industria óptica en Chile atraviesa un proceso de tecnificación acelerada para responder a la creciente demanda de soluciones oftálmicas de alta complejidad, con actores locales que integran equipos automatizados de diagnóstico y producción. No obstante, este salto tecnológico impone el desafío crítico de transitar desde prácticas de mantenimiento reactivas hacia estrategias de gestión de activos basadas en la confiabilidad, esto resulta fundamental para garantizar la integridad metrológica de los instrumentos y mitigar el riesgo de lucro cesante por fallas inesperadas en una infraestructura cada vez más sofisticada.

1.1 LABORATORIO ÓPTICO

El Laboratorio óptico Optiland es una empresa chilena especializada en el diseño, fabricación y distribución de productos ópticos, incluyendo lentes oftálmicos y soluciones de óptica avanzada. La compañía se ha posicionado como un actor relevante en la industria óptica nacional, ofreciendo no solo productos de alta calidad sino también un servicio integral que combina innovación tecnológica y atención personalizada.



Figura 1-1. Logo Laboratorio Óptico Optiland

Fuente: Sitio web oficial de Optiland

1.2 CONTEXTO OPERACIONAL

El laboratorio óptico en Chile se enmarca en una industria altamente técnica donde la precisión y calidad del producto final dependen directamente del desempeño y confiabilidad de los equipos utilizados en los procesos de fabricación. Empresas como Optiland operan bajo estándares de exactitud micrométrica, en los cuales una mínima desviación puede comprometer las propiedades ópticas de los lentes y posteriormente la satisfacción del cliente.

El entorno operacional del laboratorio se caracteriza por un flujo de producción continuo, que abarca desde el tallado de lentes mediante maquinas CNC generadoras, hasta el pulido, recubrimiento y marcado laser. Estos procesos son autorizados y de alta exigencia, lo que implica un uso constante de los equipos durante extensas jornadas laborales.

En este contexto, los equipos trabajan en condiciones de alta precisión y tolerancias mínimas, donde variables como temperatura, vibración, limpieza del ambiente y calibración periódica son determinantes para mantener la calidad del producto. Cualquier desviación o falla en una maquina puede provocar una interrupción total del proceso, pérdida de material y retrasos significativos en la entrega de los pedidos.

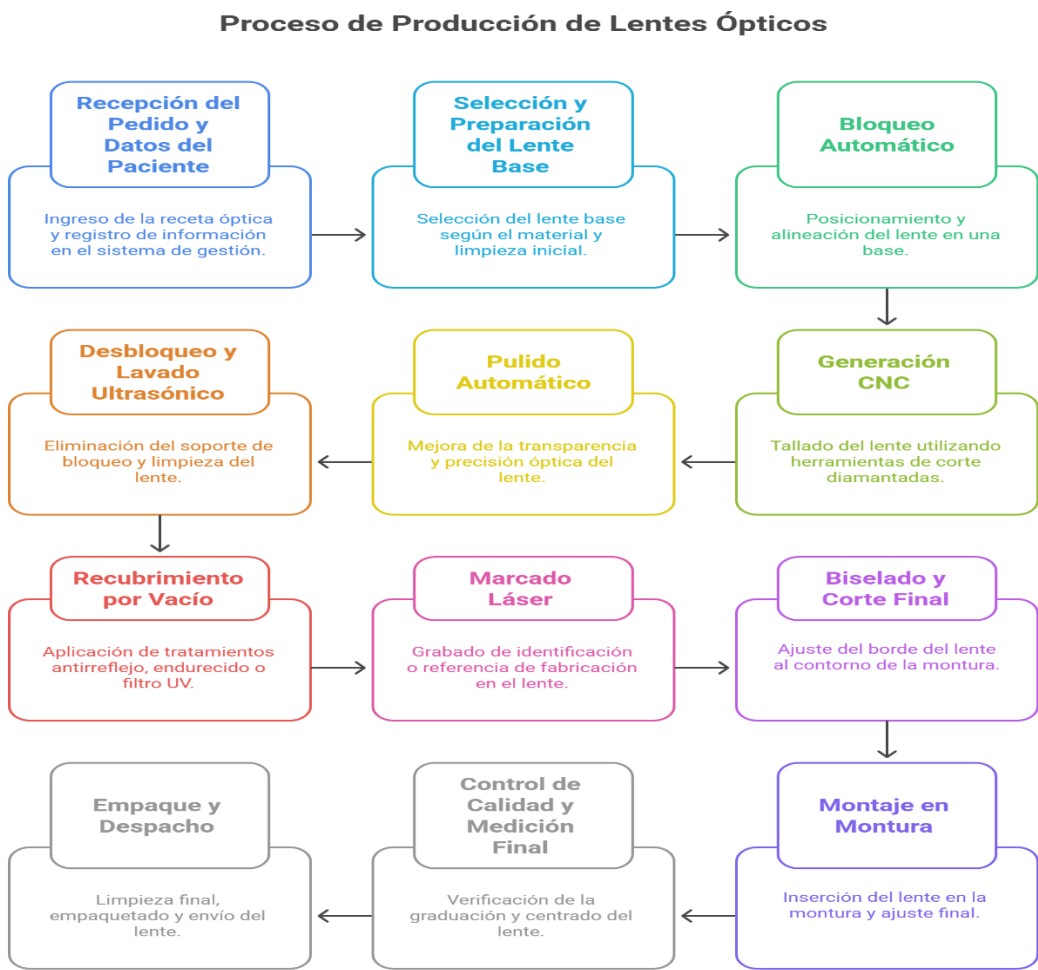


Figura 1-2: Diagrama de flujo de la producción de Laboratorio Óptico

Fuente: Figura de elaboración propia con base en el levantamiento de procesos en el laboratorio óptico

1.2.1 Etapas del proceso productivo en un Laboratorio Óptico

El proceso productivo de lentes oftálmicos en un laboratorio óptico moderno, como el de Optiland, se desarrolla a través de una secuencia de etapas altamente automatizadas que requieren precisión micrométrica y control estricto de calidad. Cada fase del proceso depende del correcto funcionamiento de equipos específicos, cuya confiabilidad resulta esencial para la continuidad operacional.

1.2.2 Bloqueo del Lente

Esta es la etapa inicial del proceso, en la que se fija el lente semifabricado (generalmente un disco de material plástico como CR-39 o policarbonato) a un soporte metálico o plástico denominado blocker.

El objetivo del bloqueo es asegurar la correcta alineación y sujeción del lente antes de ser mecanizado.

- Equipos utilizados: Bloqueadoras automáticas.
- Riesgos o fallas comunes: Desalineación del lente, burbujas en el adhesivo o error de centrado.
- Mantenimiento crítico: Limpieza de sistemas de succión y calibración de centrado óptico.

1.2.3 Tallado CNC (Generación de la superficie)

En esta fase, una vez bloqueado, el lente pasa a la generadora CNC, donde se realiza el tallado de la superficie posterior. Mediante herramientas de diamante y control numérico computarizado (CNC), se eliminan micras de material hasta obtener la curvatura deseada según la graduación requerida. Esta etapa define la potencia óptica del lente y requiere precisión micrométrica.

- Equipos utilizados: Generadora CNC (por ejemplo, Satisloh o Schneider).
- Objetivo: Modelar la superficie posterior del lente con una precisión de micras.
- Riesgos o fallas comunes: Vibraciones, desalineación del eje o desgaste del husillo.
- Mantenimiento crítico: Monitoreo de vibraciones, lubricación de ejes lineales y calibración periódica.

1.2.4 Pulido o “Finishing”

El lente tallado presenta una superficie rugosa. En esta etapa, se realiza el pulido utilizando moldes con compuestos abrasivos finos y líquidos de pulido especiales. El objetivo es obtener una superficie completamente transparente y ópticamente lisa. Durante el proceso, el lente pasa por diferentes fases de abrasión y refinamiento hasta alcanzar la calidad óptica necesaria para el montaje.

- Equipos utilizados: Pulidoras automáticas
- Operación: Se utilizan moldes o “pads” con compuestos abrasivos finos y líquidos de pulido.
- Riesgos o fallas comunes: Desgaste de pads, contaminación del fluido o presión inadecuada.
- Mantenimiento Crítico: Sustitución programada de pads y limpieza de bombas de circulación.

1.2.5 Desbloqueo y Lavado

Luego del pulido, el lente se separa del soporte o block. Posteriormente, se somete a un lavado mediante equipos automáticos o ultrasonido que eliminan residuos de abrasivos, adhesivos o partículas de polvo. El resultado es un lente completamente limpio y listo para el proceso de recubrimiento.

- Equipos utilizados: Estaciones de desbloqueo y lavadoras ultrasónicas.
- Riesgos o fallas comunes: Restos de adhesivo, contaminación superficial.
- Mantenimiento crítico: Limpieza de filtros y control del nivel de agua y detergente.

1.2.6 Recubrimiento y Tratamiento superficiales

Los lentes pasan por procesos de recubrimiento donde se aplican tratamientos antirreflejo, endurecedores y filtros UV mediante técnicas de vacío y deposición de capas finas.

En esta fase se aplican diferentes tratamientos superficiales que mejoran las propiedades ópticas y mecánicas del lente.

Los tratamientos más comunes son:

- Endurecido: Mejora la resistencia al rayado.
- Antirreflejo (AR): Reduce los reflejos y mejora la transmisión de luz.
- Filtro UV o Blue Light: Protege contra la radiación ultravioleta y la luz azul.

Estos recubrimientos se aplican mediante procesos de deposición al vacío, donde capas delgadas se adhieren molecularmente a la superficie del lente.

1.2.7 Marcado Laser

Finalizando el recubrimiento, los lentes se someten a marcado laser, proceso mediante el cual se graban logotipos, códigos de identificación o referencias de montaje.

Este proceso se realiza con láser de precisión que no altera las propiedades ópticas del lente.

1.2.8 Control de Calidad

Cada lente fabricado pasa por una serie de inspecciones ópticas y dimensionales.

En esta etapa se verifican:

- Potencia y curvatura
- Alineación del eje óptico
- Transmisión de luz y ausencia de defectos.

El control de calidad garantiza que el producto cumpla con las normas internacionales (ISO 8980, en 1836) y con las especificaciones entregadas por el cliente.

1.2.9 Montaje y Despacho

Finalmente, los lentes aprobados se envían a la sección de montaje o ensamblaje, donde se adaptan a las monturas ópticas solicitadas.

Posteriormente, son embalados, etiquetados y despachados las ópticas o distribuidores.

1.3 PROBLEMÁTICA

El laboratorio óptico de Optiland cuenta con un conjunto de equipos altamente especializados, tales como generadoras CNC, pulidoras automáticas, bloqueadoras, recubridoras y marcadoras laser, los cuales constituyen activos críticos para garantizar la continuidad de la producción de lentes oftálmicos. La organización mantiene una producción que fluctúa entre 500 y 800 ordenes diarias, lo que representa mas de 170.000 ordenes procesadas anualmente y exige una elevada disponibilidad de los recursos productivos involucrados en las distintas etapas de fabricación.

Actualmente, la gestión del mantenimiento se enfrenta a los siguientes desafíos:

1. Ausencia de un plan sistemático de mantenimiento:

Las actividades de mantenimiento tienden a ejecutarse de forma reactiva, es decir, una vez que ocurre la falla. Esto incrementa el riesgo de paradas inesperadas en las máquinas y genera retrasos en los plazos de entrega comprometidos con los clientes.

2. Falta de información consolidada:

No existe un historial centralizado y completo sobre las fallas más frecuentes, los repuestos utilizados ni los tiempos de inactividad asociados. Esto limita la capacidad de análisis para anticipar fallas y tomar decisiones basadas en datos.

3. Costos elevados en correctivos:

La falta de planificación adecuada deriva en mayores costos por reparaciones correctivas de emergencia, que suelen ser más caras que las tareas preventivas o predictivas, además de afectar la disponibilidad de repuestos críticos.

4. Impacto en la calidad y confiabilidad organizacional:

Cuando una maquina presenta fallas recurrentes o paradas inesperadas, la calidad de los lentes puede verse comprometida. Esto afecta no solo la productividad sino también la satisfacción del cliente y la reputación de la empresa.

Considerando que el laboratorio mantiene una producción superior a 170.000 órdenes anuales y utiliza herramientas de precisión cuyo costo supera los 238.750 USD por año, la ausencia de una estrategia de mantenimiento basada en confiabilidad podría generar perdidas operacionales relevantes. Desde una perspectiva económica, se estima que un desgaste prematuro equivalente al 10% del consumo anual de herramientas representaría costos adicionales cercanos a 23.875 USD anuales.

Asimismo, pequeñas disminuciones en la eficiencia operacional del proceso, del orden del 3% al 5%, podrían traducirse en retrasos, reprocesos o afectación de miles de órdenes de producción durante un año de operación. Estas condiciones evidencian la necesidad de establecer mecanismos de mantenimiento orientados a controlar los modos de falla y preservar la continuidad operacional del laboratorio.

A partir de la revisión de los antecedentes disponibles se identificó que la gestión del mantenimiento se desarrolla principalmente mediante actividades preventivas definidas por fabricante y acciones correctivas ejecutadas una vez ocurrida la falla, sin la existencia de una metodología formal que permita establecer prioridades de intervencion en función de la criticidad de los activos y de las consecuencias asociadas a sus fallas. Esta situación dificulta la asignación eficiente de recursos y limita la capacidad de anticipar eventos que pueden afectar la continuidad operacional.

En este contexto surge la necesidad de implementar una metodología que permita identificar los activos más críticos dentro del proceso productivo, analizar sus modos de falla y establecer estrategias de mantenimiento técnicamente justificadas que contribuyan a mejorar la confiabilidad operacional, optimizar los costos asociados al mantenimiento y fortalecer la sostenibilidad del proceso productivo.

1.4 ANÁLISIS DE CRITICIDAD A EQUIPOS DE LABORATORIO ÓPTICO

Para determinar cuál equipo tiene la mayor criticidad, se busca clasificarlos empleando la metodología de la matriz cualitativa de riesgo. Este enfoque evalúa el nivel de riesgo asociado a diferentes factores y establece un modelo basado en factores ponderados. El análisis se realiza calculando el valor obtenido al multiplicar dos componentes clave: la Frecuencia de Falla (FF) y la Consecuencia (C) de dichas fallas. Este método permite priorizar los equipos según el impacto potencial de sus fallas, facilitando una gestión más eficiente del mantenimiento.

CRITICIDAD = FF x C (Ec. 1.1)

C: Consecuencias de los eventos de falla
FF: Factor de frecuencia de falla

La consecuencia se define a partir de cuatro factores principales: Impacto Operacional (IO), Flexibilidad Operacional (FO), Costo de Mantenimiento (CM) y el Impacto en Salud, Higiene y Medio Ambiente (SHA). Estos elementos se combinan en la siguiente fórmula para calcular su valor:

CONSECUENCIA = ((IO x FO) + CM + SHA) (Ec. 1.2)

Donde:

C: Consecuencias de los eventos de falla
FF: Factor de frecuencia de falla
IO: Impacto operacional
FO: Impacto por flexibilidad operacional en la producción
CM: Impacto en costos de mantenimiento
SHA: Impacto en Seguridad, Higiene y Medio Ambiente

1.4.1 IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS.

A continuación, se presenta una selección de equipos dentro del Laboratorio óptico los cuales tendrán un identificador ya que posteriormente serán analizados por medio de la matriz cualitativa de riesgo. (Ver tabla 1-1)

Tabla 1-1: Equipos Laboratorio Óptico

IDENTIFICADOR	EQUIPOS
I-0	Generadora CNC
I-1	Bloqueadora automática
I-2	Pulidora automática
I-3	Lavadora ultrasónica
I-4	Recubridora por vacío
I-5	Marcador laser
I-6	Frontofocometro Automatico
I-7	Sistema de aire comprimido
7-8	Sistema de climatización
I-9	Lensometro
I-10	Biseladora Automática

Fuente: Elaboración propia en base al inventario técnico del laboratorio óptico

Descripción Técnica de la maquinaria

La siguiente relación detallada la función operativa y el impacto de cada activo en la cadena de valor de la producción de lentes:

A. Línea de tallado y Generación

- I-0 Generadora CNC: Es el núcleo del proceso de tallado. Utiliza control numérico computarizado para desbastar la superficie de la lente (semi – terminada) y darle la curva exacta de la receta óptica con la alta precisión micrométrica.
- I-1 Bloqueadora automática: Encargada de fijar un soporte o “bloque” a la lente mediante una aleación o adhesivo. Esto permite que la lente sea sujeta con firmeza y precisión por la generadora y la pulidora durante el proceso.

B. Limpieza y Tratamiento de Superficie

- I-3 Lavadora ultrasónica: Utiliza cavitación por ondas de alta frecuencia en soluciones acuosas para eliminar micropartículas, aceite y residuos de pulido. Es una etapa crítica previa al tratamiento de recubrimiento.
- I-4 Recubridora por vacío: Realiza la deposición de capas delgadas (antirreflejantes, espejados o capas endurecedoras) mediante procesos

físicos de vaporización en una cámara de vacío, mejorando las propiedades ópticas y la durabilidad de la lente.

C. Marcado y Verificación de Calidad

- I-5 Marcador laser: Realiza micro grabados casi invisibles en la lente (marcas de progresión, logotipos o códigos de trazabilidad). Es vital para la identificación técnica y garantía del producto.
- I-6 Frontocómetro Automático: Equipo de metrología que mide la potencia frontal (dioptrías), eje y prismas de la lente terminada para asegurar que cumple estrictamente con la prescripción médica.
- I-9 Lensómetro: Similar al frontofocómetro, se utiliza para la verificación manual o rápida de parámetros ópticos en distintas etapas del proceso o en control de calidad final.

D. Montaje y Acabado

- I-10 Biseladora Automática: Recorta el contorno de la lente terminada para que encaje perfectamente en la montura o armazón elegido, realizando el bisel (canal o borde) según la geometría de la estructura.

E. Sistemas de Soporte Crítico

- I-7 Sistema de aire comprimido: Provee la energía neumática necesaria para el movimiento de actuadores, válvulas y limpieza de superficies en casi todas las maquinas del laboratorio.
- I-8 Sistema de climatización: Controla la temperatura y humedad del ambiente, factor crítico para evitar dilataciones térmicas en el tallado y asegurar la adherencia química en la recubridora por vacío.

1.4.2 MATRIZ CUALITATIVA DE RIESGO

En las siguientes tablas se muestran los parámetros para la evaluación de los equipos ya identificados, posteriormente los resultados obtenidos para cada equipo se aplican a las ecuaciones.

Tabla 1-2: Factor de frecuencia de falla

Frecuencia de fallos (FF)	Factor
Mas 12 intervenciones /año	5
De 8 a 12 intervenciones /año	4
De 6 a 10 intervenciones /año	3
De 3 a 5 intervenciones /año	2
Menor a 2 intervenciones /año	1

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa.

Tabla 1-3: Factor de flexibilidad operacional

Flexibilidad operacional (FO)	Factor
No hay función de repuesto	6
repuestos solo por encargo a fabricante	5
existe respaldo	4
Hay opción de repuestos alternativos	3

Fuente: Elaboración propia basado en capítulo I Mantenimiento Industrial

Tabla 1-4: Factor de impacto operacional

Impacto operacional (IO)	Factor
parada inmediata de la producción del área asociada	5
impacto en niveles de producción y calidad	4
impacto en costos operacionales asociados a la detención	3
no ocurre un impacto significativo en la producción	2

Fuente: Elaboración propia basado en capítulo I Mantenimiento Industrial

Tabla 1-5: Factor costos de mantención

Costo de mantenimiento (CM)	Factor
Mayor o igual a \$1.500.000	5
entre \$1.000.000 y \$1.500.000	4
entre \$600.000 hasta \$1.000.000	3
entre \$200.000 hasta \$600.000	2
menor o igual a \$200.000	1

Fuente: Elaboración propia basado en capítulo I Mantenimiento Industrial

Tabla 1-6: Factor de impacto a la seguridad, higiene y medio ambiente

Impacto de SHA	Factor
Afecta el ambiente produciendo daños severos	7
Afecta seguridad humana tanto interna como externa	6
provoca daños menores a las instalaciones	5
el impacto en instalaciones es alto y requiere de precaución para el personal humano	4
provoca daños menores al personal propio (accidentes, incidentes)	3
provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	2
no provoca ningún tipo de daño a personas, instalaciones o al Ambiente	1

Fuente: Elaboración propia basado en capítulo I Mantenimiento Industrial

Una vez que se han establecido los parámetros a utilizar y su correspondiente ponderación como factor, se procede a evaluar cada equipo del Laboratorio óptico previamente identificada, con el fin de determinar su valor de criticidad (Consultar tabla 1-8). Después de obtener los resultados de criticidad para cada equipo, se procede a clasificar los equipos mediante una escala de acuerdo con su nivel de criticidad (Consultar tabla 1-7).

Tabla 1-7: Clasificación según criticidad

Criticidad por clasificación	Críticos	101 – 275
	Semi críticos	31 - 100
	No críticos	0 - 30

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1-8: Evaluación de equipos.

Identificador	Equipo	FF	IO	FO	CM	SHA	C	TOTAL	Clasificación
L-0	Generadora CNC	5	5	6	5	5	40	200	CRITICO
L-1	Bloqueadora automática	4	4	5	4	4	28	112	CRITICO
L-2	Pulidora automática	4	4	4	3	4	23	92	SEMI CRITICO
L-3	Recubridora por vacío	3	4	4	4	5	25	75	SEMI CRITICO
L-4	Sistema de aire comprimido	3	3	3	3	3	15	45	SEMI CRITICO
L-5	Biseladora	3	3	4	3	3	18	54	SEMI CRITICO
L-6	Lavadora ultrasónica	3	2	3	2	2	10	30	NO CRITICO
L-7	Marcador laser	2	3	3	2	2	13	26	NO CRITICO
L-8	Fronofocometro Automático	2	3	3	2	2	13	26	NO CRITICO
L-9	Sistema de climatización	2	3	3	2	2	13	26	NO CRITICO
L-10	Lensometro	1	2	2	2	1	7	7	NO CRITICO

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa.

A continuación, se esquematiza las áreas y valores que abarcan según su clasificación por criticidad en la matriz (Ver figura 1-3).

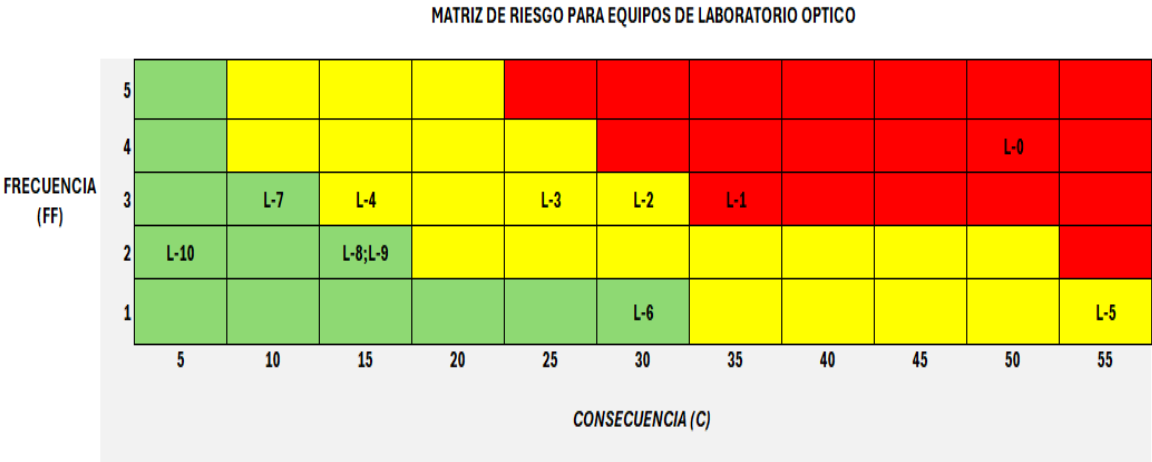


Figura 1-3: Matriz de riesgo

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa.

1.5 EQUIPOS CRÍTICOS DEL LABORATORIO ÓPTICO

A partir del análisis de criticidad realizado en el laboratorio óptico, se identificaron diversos equipos que desempeñan funciones esenciales dentro del proceso de fabricación de lentes. Cada uno de ellos fue evaluado según su probabilidad de falla y el impacto que genera en la continuidad operacional, la calidad del producto y los costos de producción.

Los resultados permitieron establecer que los equipos de Generación CNC, Recubrimiento por vacío y pulido automático concentran la mayor relevancia dentro del sistema productivo. Sin embargo, al profundizar en los criterios técnicos y funcionales, se determinó que la generadora CNC es el equipo más crítico del proceso.

El estudio de criticidad evidencia que la Generadora CNC debe ser el eje central de la gestión de mantenimiento dentro del laboratorio óptico.

Su correcto funcionamiento asegura la estabilidad del proceso completo, minimiza las pérdidas por paradas imprevistas y permite mantener la calidad óptica exigida por los estándares internacionales.

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO Y ANÁLISIS FMECA

2 INTRODUCCIÓN AL EQUIPO GENERADORA CNC

El presente capítulo tiene por objetivo describir en profundidad el equipo crítico seleccionado, la Generadora CNC Satisloh VFT-macro, y desarrollar el análisis técnico de Modos de Falla, Efectos y Criticidad como base para la propuesta de mantenimiento. Este análisis constituye una etapa central dentro de la metodología RCM cualitativa basada en riesgo, permitiendo identificar las fallas potenciales, sus causas, sus efectos operacionales y su nivel de criticidad, utilizando los criterios de probabilidad y severidad definidos en el Capítulo 1.

La información utilizada proviene del manual OEM del fabricante Satisloh, documentación interna de mantenimiento, observaciones operacionales y experiencia técnica.



Figura 2-1: Generadora CNC Satisloh VFT-Macro

Fuente: Adaptado de Satisloh (2024)

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA GENERADORA CNC SATISLOH VFT-MACRO

La Generadora CNC es un equipo de alta precisión diseñado para el tallado digital de lentes oftálmicos mediante una herramienta de diamante controlada por ejes CNC.

Forma parte del proceso central de manufactura óptica, siendo responsable del mecanizado inicial que define el diseño óptico final del lente.

En el Capítulo 1 se realizó la evaluación de criticidad de los activos pertenecientes al proceso productivo del laboratorio óptico, aplicando una matriz de riesgo cualitativa basada en las dimensiones: impacto en producción, impacto en calidad, impacto en seguridad/medio ambiente y frecuencia de falla. El resultado obtenido permitió determinar que la Generadora CNC constituye al activo con mayor nivel de criticidad dentro de la línea productiva, dado que:

- Ejecuta la etapa inicial del proceso de tallado de lentes, siendo un cuello de botella natural.
- La indisponibilidad del equipo detiene completamente la generación de lentes semi fabricados.
- Posee alta sensibilidad a fallas funcionales en su sistema CNC, sujeción, husillo y fluidos.
- Sus modos de falla generan merma de producción y pérdida directa de productividad.
- Los tiempos de reparación (MTTR) suelen ser prolongados debido a la especialización del equipo

Por esta razón, se selecciona este activo como objeto del análisis de confiabilidad bajo la metodología RCM cualitativa basada en riesgo.

2.2 FUNCIÓN PRINCIPAL DEL EQUIPO

La Generadora CNC es una máquina de control numérico diseñada para el tallado de superficies ópticas en lentes oftálmicos, integra sistemas mecatrónicos de precisión, herramientas de diamante, sistemas neumáticos y un software CNC especializado que controla los movimientos de los ejes X – Y – Z y el husillo principal.

- Tallar la superficie posterior del lente oftálmico con tolerancias micrométricas.
- Garantizar la estabilidad térmica y geométrica durante el proceso de corte.
- Operar de forma continua bajo condiciones controlada



Figura 2-2: Proceso de fresado de acción simple

Fuente: Adaptado de Satisloh (2024)



Figura 1-3: Etapa de giro fino
Fuente: Adaptado de Satisloh (2024)



Figura 2-4: Grabado de lente con punta de herramienta separada.
Fuente: Adaptado de Satisloh (2024)

2.2.1 Características técnicas relevantes

Parámetro	Valor/Descripción
Velocidad del husillo	10.000 - 60.000 rpm
Tipo de herramienta	Diamante monocristalino
Ejes CNC	X, Y, Z controlados por servomotores
Sistema de sujeción	Neumático ABS
Refrigeración	Fluido con filtración de dos etapas
Control	PLC + software propietario Satisloh

Tabla 2-1: Características técnicas
Fuente: Elaboración propia de acuerdo con manual de Generadora Satisloh VFT-Macro

2.2.2 Límites del sistema

Límite de entrada:

- Bloque óptico y parámetros de diseño digital.

Límite de operación:

- Sistema CNC, husillo, absorción neumática, refrigeración, sensores de seguridad y PLC.

Límite de salida:

- Lente tallado, listo para la etapa de pulido.

2.3 SUBSISTEMAS PRINCIPALES

2.3.1 Husillo principal

Constituye el eje rotativo de la herramienta de diamante. Define la calidad del tallado mediante velocidad, concentricidad y rigidez. Incluye rodamientos, sello, sensores térmicos y lubricación automática.

Fallos típicos:

- Vibración
- Desbalance
- Sobre calentamiento
- Desgaste de rodamientos

2.3.2 Sistema neumático ABS

Responsable del bloqueo de la lente durante el tallado. Garantiza centrado, paralelismo y firmeza durante la operación. Incluye pistón/vástago, pinza, junta ABS, fuelle de protección, válvulas y sensores asociados.

Fallos típicos:

- Fuga de aire
- Válvulas defectuosas
- Caída de presión

2.3.3 Sistema de refrigeración y ventilación

Permite controlar la temperatura del proceso y proteger componentes electrónicos. Considera bomba de refrigerante, filtros, mangueras, ventiladores y sensores de nivel.

Fallos típicos:

- Filtros obstruidos
- Bomba dañada
- Falta de flujo

2.3.4 Sistema eléctrico, control y seguridad

Compuesto por PLC, módulos de control, HMI, sensores, interbloqueos de seguridad y fuente de alimentación de 24 VDC.

Fallos típicos:

- Sensor defectuoso o desalineado.
- Modulo PLC fallado.
- Cableado suelto.

2.3.5 Sistema de movimientos X – Y – Z

Encargado del posicionamiento de la herramienta respecto al lente. Incluye servomotores, guías lineales, encoders, tornillos de bolas y fin de carrera.

Fallos típicos:

- Desalineación.
- Fallo de lectura.

2.4 SIPOC DEL SISTEMA CRÍTICO

El análisis SIPOC permite comprender de forma estructurada el flujo general del proceso en el cual opera la generadora CNC, identificando actores relevantes, los insumos necesarios, el proceso que transforma dichos insumos, los resultados obtenidos y los clientes internos que reciben estos resultados. Este enfoque facilita el entendimiento global del sistema y permite establecer con mayor claridad los límites operacionales del equipo antes de profundizar en el análisis funcional y el desarrollo del FMECA.

Generadora CNC Satisfloh VFT- macro				
Suppliers (Proveedores)	Inputs (Entradas)	Process (Proceso)	Outputs (Salidas)	Customers (Clientes)
Satisfloh (OEM): Repuestos originales y soporte técnico.	Lente Semifabricado: Bloqueado y listo para tallar.	1. Carga y Montaje: Posicionamiento del lente en el sistema de sujeción ABS.	Lente Tallado: Con acabado superficial "Cut-to-Polish".	Área de Pulido: Proceso subsiguiente de acabado final.
Fabricante de Insumos: Bloques de lentes y moldes.	Herramientas de Diamante: Discos PCD y puntas MCD calibradas.	2. Sincronización LMS: Carga de la receta digital y parámetros de diseño CNC.	Datos de Proceso: Tiempos de ciclo y registro de parámetros reales.	Control de Calidad: Verificación de potencias y geometría.
Área de Pre-bloqueo: Preparación previa del lente.	Datos de Diseño (LMS): Receta digital con geometría freeform.	3. Tallado CNC: Ejecución de fresado (Husillo) y torneado (Fast-Tool).	Registro de Alarmas: Reporte de desviaciones o errores de seguimiento.	Depto. Mantenimiento: Recibe reporte de horas/ciclos para RCM.
Servicios Generales: Aire comprimido (6 bar) y energía eléctrica.	Fluido Refrigerante: Mezcla agua/aditivo filtrada y a temperatura estable.	4. Control Térmico: Refrigeración activa y recirculación del fluido.	Viruta/Residuos: Policarbonato o CR-39 removido del proceso.	Ingeniería de Procesos: Análisis de eficiencia y optimización.
Dpto. Mantenimiento: Insumos de limpieza y kits de calibración.	Señales de Seguridad: Sensores de puerta, vacío y presión activos.	5. Limpieza y Liberación: Soplado automático del lente y apertura de cámara.	Certificado de Ciclo: Validación de que el proceso finalizó correctamente.	Producción / Despacho: Flujo continuo de la orden de trabajo.

Tabla 2-2: Analisis SIPOC
Fuente: Elaboración propia con base en el flujo de proceso de la generadora Satisfloh VFT-macro

El diagrama SIPOC desarrollado permite visualizar la cadena de valor de la Generadora VFT- macro, identificando los puntos críticos de control necesarios para la metodología RCM. Se destaca la interdependencia entre los proveedores de energía y fluidos con la estabilidad del proceso de tallado. Al mapear la “Viruta” y los “Datos de Proceso” como salidas clave, se justifica técnicamente la necesidad de tareas de mantenimiento proactivo

en los filtros de refrigeración y la calibración instrumental de los ejes, asegurando que el output final cumpla con los estándares de calidad del área de pulido y minimice la merma operacional.

2.5 FUNCIONES PRINCIPALES Y SECUNDARIAS DEL EQUIPO

La identificación funcional se realiza conforme a la norma IEC 60812 y la metodología FMEA

Funciones Generadora CNC		
Función Principal	1	Generar una superficie óptica mediante el movimiento controlado de la herramienta.
	2	Sujetar firmemente la lente durante todo el proceso.
	3	Mantener condiciones de temperatura estables mediante refrigeración.
	4	Mantener precisión geométrica de ejes X - Y - Z.
Función Secundaria	1	Proteger al operador mediante interbloques.
	2	Proveer información clara mediante HMI
	3	Transferir comandos y controlar proceso mediante PLC
	4	Garantizar suministro eléctrico continuo.

Tabla 2-3: Funciones principales y secundarias del equipo
Fuente: Elaboración propia en base manual de Generadora Satisfloh VFT-Macro

2.5.1 Fallas funcionales del identificadas

Las fallas funcionales representan las condiciones bajo las cuales la Generadora CNC no es capaz de cumplir su función, ya sea primaria o secundaria. Las fallas fueron identificadas utilizando la metodología establecida en la norma SAE JA1011 y considerando los criterios de desempeño definidos por el fabricante.

Función	Falla funcional
Sujeción del lente	No sujeta, sujeta con baja fuerza, sujeción inestable
Movimiento preciso X-Y-Z	Movimiento incorrecto, desalineación, pérdida de referencia
Generación óptica	Superficie mal tallada, vibración, falta de RPM
Control térmico	Sobrecalentamiento, falta de fluido
Seguridad	Interbloques no detienen equipos, botón emergencia no activa
Control	HMI no responde, PLC colgado

Tabla 2-4: Fallas funcionales
Fuente: Elaboración propia con apoyo de información entregada por laboratorio óptico

2.6 ANÁLISIS FMECA PARA GENERADORA CNC SATISLOH

El análisis FMECA constituye una de las etapas centrales dentro del desarrollo metodológico del RCM, ya que permite identificar de forma sistemática los modos de falla asociados a cada función del equipo, sus efectos sobre el proceso productivo y su impacto en seguridad, operación y calidad. Este análisis de desarrollo siguiendo los lineamientos establecidos por las normas IEC 60812:2018 y SAE JA 1011/JA1012, que definen los requisitos formales para la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

Para la Generadora CNC Satisloh, el FMECA se estructuro a partir de la identificación previa de las funciones principales y secundarias del equipo, las cuales fueron desglosadas en fallas funcionales. En base a esto se definirá los modos de falla específicos, considerando información del fabricante, experiencia operativa, fotografías del manual del equipos y conocimiento especializado del proceso.

Una vez identificado el modo de falla, se procede a evaluar cada uno de los efectos que genera, especialmente aquellos que impiden que el proceso cumpla sus funciones, se presentan a continuación.

Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de Falla	Efecto de Falla
Sistema de sujeción	Sujetar y centrar el lente con una fuerza de retracción durante el ciclo de tallado.	A. Incapacidad absoluta de realizar la sujeción del bloque (No cierra o no retrae). (Total)	1.1 Pinza o cono de acople con acumulación crítica de residuos/suciedad.	La lente queda mal centrada; piezas rechazadas; paro del ciclo
				Reducción de fuerza de sujeción; piezas se desprenden
		B. Sujeción con fuerza inferior a 2.5 kN. (Falla de precisión). (Parcial)	1.2 Desgaste superficial del vástago o sistema ABS.	Imposibilidad de sujetar herramienta; riesgo de daño mayor
			1.3 Tornillo de apriete fisurado o con pérdida de torque.	Ingresa contaminante al eje X; deriva en fallas mayores
	Proteger los componentes internos del eje (rodamientos y guías) contra el ingreso de partículas y refrigerante.	A. Pérdida de integridad de la barrera de protección.	1.4 Fuelle del eje X perforado o desgastado por fatiga.	Salpicadura excesiva, contaminación interior
			1.5 Juntas de protección /sellos dinámicos dañados.	Lente sale proyectada; daño de herramienta

Tabla 2-5: Análisis FMECA (Sistema de sujecion)
Fuente: Elaboracion propia en base a información entregada por laboratorio óptico

Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de falla
Sistema de movimientos (ejes X–Y–Z)	Posicionar la herramienta respecto al lente con precisión.	A. Incapacidad absoluta de movimiento en cualquiera de los ejes. (Total) B. Pérdida de precisión y desviación posicional. (Parcial)	2.1 Desalienación geométrica del eje X. 2.2 Juego excesivo en guías lineales 2.3 Falla de potencia o comunicación en servodirve del eje X.	Errores de centrado óptico; lentes fuera de tolerancia; marcas de vibración; detención inmediata por error de seguimiento.
	Proporcionar retroalimentación de posición en tiempo real mediante encoders.	A. Pérdida de señal de posición B. Error de lectura o pérdida de pulsos aleatoria.	2.4 Enconder del eje Y defectuoso o contaminado con partículas.	Descontrol de trayectoria; colisión mecánica inminente; activación de parada de emergencia por discrepancia de datos.
	Limitar la carrera física de los ejes mediante sensores de fin de carrera para evitar impactos mecánicos.	A. Incapacidad de detectar el límite físico de carrera. (Total)	2.5 Sensor de fin de carrera averiado o cableado en corto circuito.	Movimientos fuera de rango; colisión contra los topes físicos; daños estructurales en el tornillo de bolas y servomotor.
	Mantener los parámetros de compensación almacenados en la memoria del CNC para asegurar repetibilidad.	A. Pérdida de datos de calibración o parámetros de origen.	2.6 corrupción de memoria o alteración no autorizada de parámetros de offset.	Lentes con geometría errónea constante; necesidad de recalibración total del equipo; lucro cesante por reconfiguración.

Tabla 2-6: Análisis FMECA (Sistema de movimientos)
Fuente: Elaboracion propia en base a información entregada por laboratorio óptico

Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de falla
Husillo, lubricación y herramienta	Girar herramienta a velocidad estable	A. Falla de rotación del husillo	3.1 Falta de lubricación en rodamientos	Incremento de temperatura y ruido; riesgo de trabamiento
			3.2 Desbalance de la porta-herramienta	Vibración, marcas en la lente, incremento de carga del motor
	Mantener la hermeticidad del sistema de lubricación	A. Fuga de lubricante	3.3 Desgaste o fractura del sello por fatiga	Contaminación química del lente; pérdida de adherencia del bloque; riesgo de deslizamiento de la herramienta.
	Monitorear temperatura	A. Pérdida total de la señal de monitoreo térmico	3.4 Sensor de temperatura descalibrado o con cableado abierto.	Riesgo de daño catastrófico en el husillo por no detectar sobre calentamiento a tiempo.
		B. Error de lectura superior (Falla de precisión)		
	Mantener alineación concéntrica del eje del husillo respecto al eje óptico	A. Desviación geométrica (concentricidad o perpendicularidad)	3.6 Desajuste mecánico de los pernos de anclaje del carro del husillo por vibración ciclica.	Lente con error de centro óptico o prisma no deseado; rechazo masivo de producción en control de calidad.

Tabla 2-7: Análisis FMECA (Husillo, lubricación y herramienta)
Fuente: Elaboracion propia en base a información entregada por laboratorio óptico

Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de falla
Sistema de refrigeración	Suministrar fluido refrigerante a una temperatura constante durante el ciclo de tallado	A. Incapaz de suministrar fluido refrigerante (Falla total).	4.1 Bomba de refrigerante quemada	Cese de flujo inmediato; sobrecalentamiento de la herramienta de diamante; detención por alarma térmica; riesgo de fractura del lente
		B. Temperatura del fluido superior a la que corresponde (Falla parcial).	4.2 Filtro principal saturado	Disminución de la eficiencia de evacuación de viruta; incremento térmico en la zona de corte; acabado superficial rugoso.
	Contener la totalidad del fluido dentro del circuito, asegurando hermeticidad en mangueras y conexiones.	A. Pérdida de hermeticidad en cualquier componente del circuito (Fuga).	4.3 Fatiga de material en manguera flexible o racor rápido suelto	Derrame de fluido en zona de trabajo; riesgo de cortocircuito por salpicaduras; contaminación del área; pérdida de presión de servicio.
	Mantener la temperatura interna del gabinete eléctrico mediante ventilación forzada.	A. Temperatura interna del gabinete superior al límite de diseño	4.4 Filtros de ventilación obstruidos o motor de ventilador gripado	Estrés térmico en componentes electrónicos; disparos térmicos de los variadores; reducción de vida útil del PLC y fuentes de poder.

Tabla 2-8: Análisis FMECA (Sistema de refrigeración)
Fuente: Elaboracion propia en base a información entregada por laboratorio óptico

Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de falla
Control, Energía y Seguridad	Suministrar energía eléctrica para alimentar la totalidad de sensores y actuadores del sistema.	A. Incapacidad total de suministro de tensión de control.	5.1 Fallo de conmutación o corto circuito interno en la fuente de poder.	Caída general de señales; el PLC entra en estado de stop; imposibilidad de iniciar ciclo de trabajo.
		B. Tensión de salida fuera del rango operacional.		
	Ejecutar el programa de mecanizado CNC.	A. Interrupción bloqueo en la ejecución del código de programa.	5.2 Error de desbordamiento de memoria o corrupción en el firmware en el PLC.	Ciclo de tallado interrumpido; riesgo de colisión de ejes por pérdida de control; requiere intervención del fabricante.
	Garantizar cierre de resguardos mediante un sistema de interbloqueo.	A. Circuito de seguridad inoperante (no detecta apertura de puerta).	5.3 Sensor magnético de seguridad desalineado o contactos internos soldados.	Permite operación con zona de peligro expuesta; alto riesgo de accidente grave por contacto con husillo.
	Iniciar una parada de emergencia ante activación de cualquier pulsador del sistema.	A. Incapacidad de detener el movimiento de los ejes de forma inmediata ante emergencia.	5.4 Bloqueo mecánico del pulsador o falla en el relevador de seguridad.	Imposibilidad de mitigar un evento peligroso en tiempo real; riesgo vital para el personal y daños al activo.

Tabla 2-9: Análisis FMECA (Control, Energía y Seguridad)
Fuente: Elaboración Propia en base a información entregada por laboratorio óptico

2.7 JERARQUIZACIÓN DE LOS MODOS DE FALLA MEDIANTE EL NPR

La jerarquización de los modos de falla se realizó aplicando el Numero de Prioridad de Riesgo (NPR), calculando como el producto de los valores cualitativos asignados a la Ocurrencia (O), Detección (D) y Severidad (S). Este procedimiento se fundamenta en los lineamientos de la norma IEC 60812:2018, donde el NPR constituye un indicador del nivel de criticidad relativa entre los distintos modos de falla evaluados dentro del FMECA.

El enfoque utilizando en este estudio corresponde a una evaluación cualitativa de criticidad, en la cual cada uno de los parámetros O, D y S se valora en una escala ordinal de tres niveles (1 = bajo, 2 = medio, 3 = alto).

Esta escala es consistente con los criterios establecidos en RCM cuando se cuenta con un historial estadístico amplio, pero si con conocimiento experto del funcionamiento del equipo y del impacto operativo de sus fallas. La fórmula aplicada es:

$$\text{NPR} = \text{O} \times \text{D} \times \text{S}$$

Una vez determinado el NPR para cada modo de falla, se estableció una clasificación cualitativa para priorizar la acción de mantenimiento:

Alta criticidad: NPR entre 12 y 18

Criticidad media: NPR entre 6 y 9

Criticidad baja: NPR entre 1 y 4

Los modos de falla clasificados como de alta criticidad representan riesgos significativos para la continuidad operacional, la calidad del producto óptico y/o la integridad del equipo; por lo tanto, son priorizados en la siguiente etapa de RCM para el desarrollo de tareas preventivas, predictivas o correctivas según corresponda. Los modos de criticidad media requieren monitoreo y mitigación planificación, mientras que las de criticidad baja pueden gestionarse mediante mantenimiento correctivo controlado o prácticas de inspección de rutina.

Para la Generadora CNC, los resultados obtenidos del FMECA permitieron identificar como modos de falla críticos aquellos asociados a:

- Fallas del sistema de medición y posicionamiento
- Fallas de refrigeración que deterioran la estabilidad térmica
- Condiciones mecánicas que afectan directamente la calidad óptica.

Estos modos de falla presentan valores elevados de severidad, dada su influencia directa en la calidad del tallado, y valores significativos de ocurrencia y dificultad de detección cuando no se aplican tareas sistemáticas de inspección o monitoreo. En consecuencia, constituyen los modos seleccionados para la toma de decisiones en el Capítulo 3, donde se aplica el Árbol lógico RCM para definir tareas más adecuadas para cada uno.

Esta jerarquización permite orientar los esfuerzos de mantenimiento hacia las fallas con mayor impacto técnico y económico, cumpliendo los principios del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad al asegurar que cada tarea propuesta sea necesaria, efectiva y técnicamente justificable.

Categoría	Bajo (1)	Medio (2)	Alto (3)
O – Ocurrencia	Rara	Ocasional	Frecuente
D – Detección	Fácil	Moderada	Difícil
S – Severidad	Baja	Moderada	Alta

Tabla 2-10: Valores NPR
Fuente: Elaboración propia

Sujeción ABS						
Modo de falla	Efecto	Causa	O	D	S	NPR
Pinza sucia	Pérdida de centrado	Contaminación	3	1	2	6
Pinza desgaste	Sujeción débil	Desgaste mecánico	2	2	3	12
Tornillo fisurado	Desprendimiento	Fatiga	1	3	3	9
Fuelle dañado	Entradas contaminantes	Envejecimiento	2	2	2	8
Juntas dañadas	Fuga	Desgaste	2	2	2	8
Herramienta mal fijada	Riesgo seguridad	Error humano	2	1	3	6

Tabla 2-11: Valores NPR Sujeción ABS
Fuente: Elaboración propia en base a análisis FMECA

Movimiento X - Y - Z						
Modo de falla	Efecto	Causa	O	D	S	NPR
Eje X desalineado	Error dimensional	Golpe/desgaste	2	2	3	12
Juego guías	Vibración	Falta lubricación	3	2	2	12
Encoder defectuoso	Pérdida referencia	Fallo eléctrico	2	3	3	18
Tornillo bolas desgaste	Backlash	Desgaste natural	2	2	3	12
Servomotor falla	Paro equipo	Sobre temperatura	1	2	3	6
Fin carrera falla	Riesgo seguridad	Desalineación	2	1	3	6
Offset incorrecto	Piezas fuera tolerancia	Parámetro modificado	2	1	3	6

Tabla 2-12: Valores NPR Movimientos X - Y - Z
Fuente: Elaboración propia en base a análisis FMECA

Generación óptica						
Modo de falla	Efecto	Causa	O	D	S	NPR
Falta lubricación	Daño husillo	Fuga	2	2	3	12
Desbalance herramienta	Vibración	Montaje incorrecto	2	1	3	6
Sello dañado	Fuga aceite	Envejecimiento	2	2	2	8
Sensor temperatura falla	Sin alarma	Fallo eléctrico	1	3	3	9
Alineamiento incorrecto	Acabado deficiente	Golpe	2	2	3	12
Resonancia	Vibración excesiva	RPM inadecuado	2	2	3	12

Tabla 2-13: Valores NPR Generación óptica
Fuente: Elaboración propia en base a analisis FMECA

Refrigeración y ventilación						
Modo	Efecto	Causa	O	D	S	NPR
Bomba quemada	Sin refrigeración	Sobrecarga	1	3	3	9
Filtro saturado	Flujo bajo	No limpieza	3	1	2	6
Manguera fisurada	Fuga	Envejecimiento	2	2	2	8
Fluido contaminado	Sobrecalentamiento	Falta recambio	3	2	3	18
Sensor nivel falla	Sin alarma	Corrosión	1	3	3	9
Ventiladores obstruidos	Sobre temperatura	Suciedad	3	1	2	6

Tabla 2-14: Valores NPR Refrigeración y ventilación
Fuente: Elaboración propia en base a analisis FMECA

Control, energía y seguridad						
Modo	Efecto	Causa	O	D	S	NPR
Fuente 24 V falla	Paro total	Sobrecarga	1	2	3	6
PLC colgado	Pérdida control	Error firmware	1	3	3	9
HMI falla	Sin control	Fallos conectores	2	2	2	8
Breaker disparado	Paro máquina	Borne flojo	2	2	3	12
Sensor puerta falla	Riesgo operador	Desalineación	1	1	3	3
Botón emergencia falla	Sin paro	Suciedad	1	1	3	3

Tabla 2-15: Valores NPR Control, energía y Seguridad
Fuente: Elaboración propia en base a analisis FMECA

2.7.1 Análisis de los Modos de Falla

Como resultado del proceso de jerarquización cualitativa basado en el Numero de Prioridad de Riesgo, se identificaron los modos de falla que presentan el mayor nivel de criticidad para la operación de la Generadora CNC. Estos modos corresponden a aquellos cuyo nivel de severidad, ocurrencia y dificultad de detección generan un riesgo significativo para la continuidad del proceso productivo y para la calidad óptica de las lentes fabricadas.

Los modos de falla priorizados se concentran principalmente en los subsistemas de movimientos X – Y – Z, husillo y lubricación, sistema de sujeción BAS y sistema de refrigeración, lo que evidencia la sensibilidad del equipo a desviaciones mecánicas, condiciones terminas inestables y fallas en los elementos de posicionamiento y rotación de alta precisión.

De manera particular, los modos *de* falla con NPR más altos corresponden a:

- Encoder defectuoso o con pérdida de señal, afectando el control de posición.
- Fluido refrigerante contaminado o degradado, generando inestabilidad térmica y sobre cargas.
- Desalineación del eje X o backlash en el tornillo de bolas, provocando errores geométricos en el tallado.
- Juego excesivo en guías líneas, aumentando vibraciones y reduciendo la precisión.
- Resonancia o desbalance del husillo, afectando directamente la calidad superficial del lente.
- Falla en el sistema ABS de sujeción, comprometiendo la estabilidad del lente durante el mecanizado.

Estos modos de falla representan los puntos de intervención prioritaria y constituyen la base técnica para el diseño del plan de mantenimiento en el capítulo siguiente.

A partir de la jerarquización obtenida, es posible establecer con claridad que fallas requieren acciones preventivas estructuradas y cuáles pueden ser gestionadas mediante mantenimiento correctivo planificado. El análisis cualitativo desarrollado entrega trazabilidad técnica suficiente para fundamentar la toma de decisiones que definirá la estrategia de mantenimiento más adecuada para cada modo de falla.

Este capítulo posterior consolidara las tareas de mantenimiento propuestas y demostrara la aplicabilidad real del enfoque RCM en un laboratorio óptico, entregando una propuesta integral y técnicamente fundamentada.

2.7.2 Análisis Cuantitativo de Fallas Críticas

Una vez realizada la jerarquización cualitativa de los modos de falla mediante el Número de Prioridad de Riesgo, se desarrolló un análisis cuantitativo referencial con el propósito de complementar la evaluación de criticidad y determinar el impacto operacional de las fallas identificadas en la Generadora CNC Satisloh VFT – Macro.

El análisis se elaboró utilizando antecedentes operacionales recopilados desde el laboratorio óptico, observaciones del comportamiento funcional del activo, información entregada por el personal técnico y criterios de confiabilidad industrial asociados al desempeño de equipos CNC de precisión.

Debido a que la organización no dispone de un historial estadístico estructurado de mantenimiento, los valores utilizados corresponden a estimaciones técnicas coherentes con la frecuencia observada de fallas funcionales y los tiempos de intervencion reportados durante la operación normal del equipo.

Los resultados obtenidos permitieron identificar que las fallas asociadas a los sistemas de movimiento X-Y-Z, generación óptica y refrigeración representan las principales fuentes de pérdida operacional del proceso productivo.

Estas fallas afectan directamente variables críticas del proceso óptico, tales como:

- Precisión geométrica del lente.
- Calidad superficial del mecanizado.
- Estabilidad térmica del proceso.
- Continuidad operacional del flujo productivo.
- Generación de scrap y reprocesos.

Subsistema	Modos de falla dominantes	Fallas estimadas/año	Tiempo promedio de detención	Consecuencia operacional
Movimiento X-Y-Z	Encoder defectuoso, backlash, desalineación	4	6 h	Error dimensional y scrap
Generación óptica	Vibración, resonancia, desgaste husillo	3	8 h	Mala calidad superficial
Refrigeración	Fluido contaminado, filtros saturados	3	4 h	Sobrecalentamiento
Sujeción ABS	Fuga neumática, desgaste pinza	2	3 h	Pérdida de centrado

Tabla 2-16: Tabla Técnica
Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por laboratorio óptico

Parámetro	Valor
Producción anual estimada	264.000 cortes
Días operación año	264
Horas turno promedio	8 h
Horas operación año	2.112 h
Fallas significativas identificadas FMECA	12

Tabla 2-17: Datos base
Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por laboratorio óptico

El comportamiento operacional observado evidencia que los subsistemas de movimiento X-Y-Z y generación óptica concentran los mayores tiempos de detención y las consecuencias más severas sobre el proceso productivo.

Esto se debe principalmente a que dichos subsistemas intervienen directamente sobre el posicionamiento geométrico y la calidad mecanizado del lente oftálmico, requiriendo tolerancias extremadamente reducidas para asegurar el cumplimiento de los estándares ópticos exigidos por el proceso.

De igual manera, las fallas relacionadas con vibración, resonancia o desalineación del husillo principal afectan directamente la estabilidad dinámica del proceso de corte, deteriorando la calidad superficial y aumentando significativamente la probabilidad de scrap óptico.

Por otra parte, los sistemas de refrigeración presentan una influencia indirecta, pero altamente relevante sobre la estabilidad operacional del activo, debido a que la contaminación del fluido refrigerante y las variaciones térmicas generan alteraciones dimensionales progresivas sobre los componentes mecánicos de precisión.

2.7.3 Evaluación de Confiabilidad Operacional

Con el objetivo de evaluar el desempeño funcional de la Generadora CNC desde el punto de vista de confiabilidad industrial, se estimaron indicadores operacionales asociados a frecuencia de falla, mantenibilidad y disponibilidad del activo.

La evaluación se desarrolló considerando un régimen operacional aproximado de 4320 horas anuales, correspondiente a una operación continua en jornada productiva industrial. A partir de los antecedentes operacionales recopilados, se estimó un total aproximado de 12 fallas funcionales relevantes por año, asociados principalmente a subsistemas identificados previamente mediante el análisis FMECA.

El indicado MTBF obtenido corresponde a:

$$MTBF = \frac{\text{Horas de operación}}{\text{Número de fallas}} = \frac{2112}{12} = 176 \text{ horas}$$

El resultado obtenido indica que, en promedio, la Generadora CNC presenta una falla funcional relevante cada 176 horas de operación.

Desde el punto de vista de confiabilidad operacional, este comportamiento evidencia una susceptibilidad moderada a eventos de falla, particularmente considerando el nivel de criticidad del activo y su impacto directo sobre el proceso de fabricación óptica.

La frecuencia de falla observada se encuentra fuertemente influenciada por:

- Desgaste progresivo de componentes de componentes mecánicos de precisión.
- Contaminación del sistema de refrigeración.
- Perdida gradual de alineación geométrica.
- Vibraciones asociadas al husillo principal.
- Degradación de sensores y sistemas de posicionamiento.

En sistemas CNC de manufactura óptica, pequeñas desviaciones funcionales pueden provocar consecuencias operacionales severas debido a las altas exigencias de precisión dimensional requeridas por el proceso.

Por esta razón, la confiabilidad operacional del activo no debe evaluarse únicamente desde la frecuencia de falla, sino también considerando el impacto de dichas fallas generan sobre calidad, scrap y continuidad operacional.

- Diagnostico técnico.
- Desmontaje parcial de componentes.
- Ajustes de alineación.
- Recalibración operacional.
- Validación funcional posterior a la reparacion.

Subsistema	Fallas/año	Tiempo promedio (h)	Horas detenidas/año
Movimiento X-Y-Z	4	6	24
Generación óptica	3	8	24
Refrigeración	3	4	12
Sujeción ABS	2	3	6
Total	12	-	66 h

Tabla 2-18: Resumen anual de fallas y tiempos de detención por subsistemas de la Generadora CNC
Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por laboratorio óptico

El indicador obtenido corresponde a:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de detención}}{\text{Número de fallas}} = \frac{66}{12} = 5.5 \text{ horas}$$

Los mayores tiempos de recuperación se concentran en fallas relacionadas con encoder, husillo principal y sistemas de guiado lineal, debido a que estos componentes requieren procesos adicionales de calibración geométrica y validación dimensional posterior a la intervención.

Esta condición incrementa el impacto operacional de las fallas, especialmente considerando que la Generadora CNC, corresponde al activo mas critico dentro del flujo de producción del laboratorio óptico.

A partir de los indicadores MTBF y MTTR calculados previamente, se estimó la disponibilidad operacional de la Generadora CNC.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{176}{176+5.5} \times 100 = 96.97\%$$

El valor obtenido representa la probabilidad de que el activo se encuentre operativo en condiciones normales de funcionamiento.

Si bien la disponibilidad estimada es relativamente alta, el análisis operacional evidencia que las altas funcionales generan consecuencias significativas sobre:

- Calidad óptica del producto.
- Cumplimiento de tiempo de producción.
- Scrap operacional.
- Reprocesos.
- Costos correctivos.

Es importante destacar que una alta disponibilidad operacional no implica necesariamente un desempeño optimo del proceso productivo.

En sistemas CNC de manufactura óptica, pequeñas desviaciones funcionales pueden mantener el equipo operativo desde el punto de vista mecánico, pero generar simultáneamente perdidas relevantes asociadas a calidad superficial, desviaciones geométricas y reprocesos.

Por esta razón, la criticidad operacional del activo no debe evaluarse únicamente mediante indicadores tradicionales de disponibilidad, sino también considerando el impacto funcional de las fallas sobre la estabilidad del proceso y la calidad del producto final.

CAPITULO 3: PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO

3 PROGRAMA DE ACTIVIDADES Y TAREAS DE MANTENIMIENTO

3.1 ANÁLISIS DE PROPUESTA

El presente capítulo desarrolla el Plan de Mantenimiento basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para la Generadora CNC, identificada como el activo prioritario del laboratorio óptico debido a su alta criticidad operacional y a su impacto directo en la calidad del proceso de tallado.

A partir del análisis funcional y del FMECA cualitativo del Capítulo 2, se definieron los modos de falla críticos y sus consecuencias. Esto permitirá aplicar el Árbol Lógico de decisiones RCM, con el objetivo de determinar las estrategias de mantenimiento más efectivas, ya sean predictivas, preventivas, correctivas planificadas o de rediseño.

El resultado de este proceso metodológico se traduce en un Plan de Mantenimiento técnico, estructurado y justificadamente económico, orientado a mejorar la confiabilidad del equipo, disminuir scrap, asegurar la continuidad operacional y optimizar el uso de recursos.

3.2 DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM

Previo a la aplicación del Árbol Lógico de Decisiones, la metodología RCM establece el uso del Diagrama de Decisión, el cual constituye el marco conceptual que guía la selección racional de las estrategias de mantenimiento. Este diagrama define la secuencia lógica de análisis que permite evaluar las consecuencias de cada modo de falla y determinar el tipo de intervención más apropiada desde un punto de vista técnico, operativo y económico.

El Diagrama de Decisión RCM se basa en el principio de que no todas las fallas deben tratarse de la misma forma, y que la estrategia de mantenimiento debe seleccionarse en función de las consecuencias reales de la falla sobre la seguridad, el medio ambiente, la operación y los costos. Este enfoque evita la aplicación indiscriminada de tareas preventivas y permite priorizar aquellas acciones que efectivamente reducen el riesgo.

3.3 EXPLICACIÓN DEL ÁRBOL LÓGICO DE DECISIONES RCM

Una vez identificados y jerarquizados los modos de falla críticos mediante el análisis FMECA, procede a la definición de las tareas de mantenimiento utilizando el Árbol Lógico de Decisiones del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM, conforme a la metodología desarrollada por John Moubray y formalizada en la norma SAE JA1011. Este árbol lógico permite evaluar sistemáticamente las consecuencias de cada modo de falla, estableciendo una secuencia estructurada de preguntas que orientan la selección de

la estrategia de mantenimiento más adecuada. La lógica del árbol se basa en la clasificación de las fallas según su visibilidad, impacto en seguridad, medio ambiente y operación, así como en la factibilidad técnica y económica de las tareas proactivas.

3.3.1 Clasificación de las consecuencias de falla

El Árbol Lógico de Decisiones RCM es una herramienta que permite definir, de manera estructurada, la estrategia de mantenimiento más apropiada para cada modo de falla, a partir de una secuencia de preguntas relacionadas con sus consecuencias.

Este árbol clasifica los modos de falla según las siguientes categorías:

- Fallas ocultas (H): no evidentes para el operador durante condiciones normales.
- Fallas con impacto en seguridad (S): pueden causar daño a personas.
- Fallas con impacto ambiental (E): pueden generar incumplimiento normativos o contaminación:
- Fallas con impacto operacional (O): afectan producción, calidad o costos operativos.
- Fallas sin impacto operacional significativo (N).

En función de esta clasificación, el árbol evalúa la factibilidad de aplicar tareas de mantenimiento tales como:

- Mantenimiento a condición.
- Reacondicionamiento cíclico.
- Sustitución cíclica.
- Tareas de búsqueda de fallas.
- Combinación de tareas.
- Rediseño del sistema, cuando ninguna tarea resulta efectiva.

3.3.2 Evaluación de tareas proactivas

Una vez identificada la categoría de consecuencia, el árbol lógico evalúa la factibilidad de aplicar distintas estrategias de mantenimiento, mediante preguntas secuenciales:

- Tareas a condición: Se evalúa si es técnicamente factible y económicamente conveniente detectar el modo de falla antes de que ocurra la falla funcional, mediante el monitoreo de una condición física medible (vibración, temperatura, presión desgaste, etc.)

- Tareas de reacondicionamiento cíclico: Corresponden a intervenciones periódicas destinadas a restaurar el componente a una condición cercana a la original antes de que se produzca la falla.
- Tareas de sustitución cíclica: Implican el reemplazo programado del componente en función de su vida útil conocida o estimada.
- Tareas de búsqueda de fallas: Aplicables principalmente a fallas ocultas, con el objetivo de verificar periódicamente que la función de protección o respaldo esté disponible.
- Combinación de tareas: En ciertos casos, el árbol permite justificar la aplicación de más de una estrategia cuando ninguna tarea individual es suficiente para controlar el riesgo.

Cuando ninguna de las tareas proactivas anteriores resulta técnica o económicamente viable, el árbol conduce a la conclusión de “ningún mantenimiento proactivo”, debiendo justificarse esta decisión o evaluarse la necesidad de un rediseño del sistema.

3.3.3 Árbol lógico de decisiones

Al conocer los modos y efecto de fallas y sus consecuencias podemos determinar si la falla es merecedora de prevención, esfuerzos para predecirla, algún tipo de intervención periódica para evitarla, rediseño para eliminarla, o simplemente ninguna acción. Para realizar este proceso se debe seguir el árbol lógico de decisiones del RCM y de esta forma encontrar cuales son las tareas adecuadas y el programa de mantenimiento a realizar a los activos físicos.

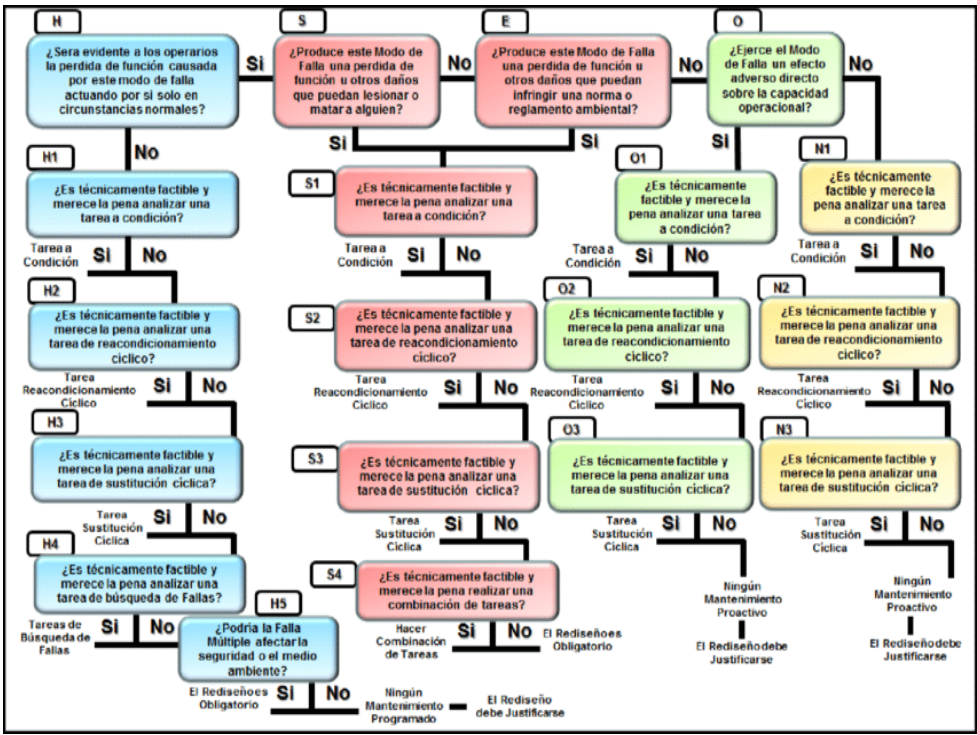


Figura 3-1: Árbol lógico de decisiones

Fuente: Basado en el modelo de decisión RCM II de John Moubray

3.4 HOJA DE DECISIÓN RCM – GENERADORA CNC

Sistema activo: GENERADORA CNC																
Ref.	Referencia de información			Evolución de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tarea propuesta	Frecuencia inicial	Responsable
								S1	S2	S3						
								O1	O2	O3						
	Función	Falla Funcional	Modo de Falla	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4			
1	Mecanizar lentes dentro de tolerancias	Incapacidad de mecanizar correctamente	Desgaste del husillo	Si	No	No	Si	Si						Inspección vibracional y dimensional del husillo	Mensual	Técnico mantenimiento
2	Mecanizar lentes dentro de tolerancias	Incapacidad de mecanizar correctamente	Desalineación de ejes X-Y-Z	Si	No	No	Si	Si						Verificación geométrica y alineación CNC	Trimestral	Técnico especializado
3	Mantener estabilidad térmica	Sobrecalentamiento del sistema	Obstrucción de boquillas refrigerante	Si	No	No	Si	Si						Limpieza y verificación sistema refrigeración	Mensual	Operador entrenado
4	Sujetar lente de forma segura	Incapacidad de sujeción	Pérdida de presión neumática	Si	Si			Si						Inspección de fugas y presión neumática	Mensual	Técnico mantenimiento
5	Sujetar lente de forma segura	Incapacidad de sujeción	Desgaste sistema ABS	Si	Si			Si						Reemplazo ciclico componentes ABS	Semestral	Técnico especializado
6	Operar de forma continua	Detención no programada	Fallo de contactores eléctricos	Si	Si			Si						Inspección térmica y apriete eléctrico	Trimestral	Técnico especializado
7	Operar de forma continua	Detención no programada	Sobrecarga eléctrica	Si	Si			Si						Medición de corrientes y balance de carga	Trimestral	Técnico especializado
8	Operar de forma segura	Operación insegura	Fallo enclavamientos de seguridad	No				No	No	No	Si			Prueba funcional de enclavamientos de seguridad	Mensual	Prevencionista / Mantenición
9	Operar de forma segura	Operación insegura	Bypass de sistemas de seguridad	No				No	No	No	Si			Auditoría de seguridad y rediseño de procedimiento	Anual	Ingeniería / Prevención
10	Mantener precisión dimensional	Pérdida de precisión	Desgaste de guías lineales	Si	No	No	Si	Si						Inspección de holguras y lubricación controlada	Mensual	Técnico mantenimiento

Tabla 3-1: Hoja de Decisión RCM
Fuente: Elaboración propia con base en el diagrama de decisión de Moubray y el contexto operacional del equipo

3.5 CONSOLIDACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO

CONSOLIDACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO			
Tipo de tarea	Descripción	Frecuencia	Responsable
A condición	Inspección vibracional husillo	Mensual	Mantenición
A condición	Inspección presión neumática	Mensual	Mantenición
Cíclica	Reemplazo componentes ABS	Semestral	Mantenición
Cíclica	Verificación geométrica CNC	Trimestral	Especialista
Seguridad	Pruebas enclavamientos	Mensual	Mantenición
Correctiva planificada	Ajuste alineación ejes	Según condición	Especialista

Tabla 3-2: Consolidación de Tareas de Mantenimiento
Fuente: Elaboración propia en base hoja de decisiones RCM

3.5.1 Catálogo de tareas de mantenimiento

El catálogo de tareas de mantenimiento para la Generadora CNC constituye la base técnica del plan de mantenimiento propuesto. Este catálogo se elaboró a partir del análisis FMECA cualitativo presentado en el capítulo 2, considerando información del fabricante, experiencia operacional del laboratorio óptico y criterios de confiabilidad industrial.

Los modos de falla fueron organizados por subsistemas funcionales, tales como:

- Movimiento X-Y-Z
- Generación Óptica
- Refrigeración y ventilación
- Control, energía y seguridad
- Sistema de sujeción ABS

Para cada modo de falla se identificaron:

- Efectos funcionales y operacionales
- Causas probables
- Consecuencias en seguridad, medio ambiente y operación.
- Nivel de riesgo mediante el Numero de Prioridad de Riesgo (NPR)

Esta estructuración permite:

- Priorizar los modos de falla críticos
- Evitar un enfoque reactivo
- Fundamentar técnicamente la selección de tareas de mantenimiento mediante metodología RCM

El catálogo no busca eliminar completamente las fallas, sino gestionar el riesgo asociado a ellas, en coherencia con los principios establecidos en SAE JA 1011 y la metodología RCM II de Moubray.

CATÁLOGO DE TAREAS RCM					
Código tarea	Subsistema	Modo de falla	Tipo de tarea RCM	Descripción técnica de la tarea	Técnica aplicada
RCM-01	Movimiento X-Y-Z	Eje desalineado	A condición	Verificar alineación de ejes con reloj comparador y patrón geométrico	Inspección geométrica
RCM-02	Movimiento X-Y-Z	Juego en guías	Reacondicionamiento cíclico	Ajuste mecánico y lubricación de guías lineales	Mecánica de precisión
RCM-03	Movimiento X-Y-Z	Encoder defectuoso	Sustitución cíclica	Reemplazo de encoder según horas de servicio	Instrumentación
RCM-04	Generación óptica	Falta de lubricación	A condición	Inspección de nivel y estado de lubricante del husillo	Análisis visual
RCM-05	Generación óptica	Desbalance herramienta	A condición	Balanceo dinámico de herramienta	Balanceo
RCM-06	Refrigeración	Fluido contaminado	Sustitución cíclica	Drenaje y recambio de fluido refrigerante	Mantenimiento químico
RCM-07	Refrigeración	Filtro saturado	Sustitución cíclica	Cambio de filtros de refrigeración	Mecánica
RCM-08	Control eléctrico	Fuente 24V falla	A condición	Medición de tensión y carga de fuente	Medición eléctrica
RCM-09	Seguridad	Botón emergencia falla	Búsqueda de fallas	Prueba funcional del circuito de parada de emergencia	Prueba funcional

Tabla 3-3: Catálogo de Tareas RCM
Fuente: Elaboración propia en base a hoja de decisiones RCM

3.6 ORDENES DE TRABAJO ESTANDARIZADAS

Para cada orden de trabajo se relacionan las acciones de mantenimiento que se deben practicar al equipo con base a los requerimientos de lubricación, electricidad, mecánica e instrumentación. De esta manera los operarios podrán recurrir a ellos al recibir una orden de trabajo.

Las ordenes de trabajo se utilizan con el objetivo de dar al operario unos pasos sistemáticos de las actividades de mantenimiento a realizar. En estas órdenes se encuentra la naturaleza de la actividad, materiales necesarios para ejecución, quien realiza el mantenimiento, fecha y hora de este, así como también tiempo estimado de ejecución, entre dos ítems necesarios para una correcta orientación del operario que se dispone a ejecutar la actividad encomendada y principalmente la orden de trabajo que se asigna.

La responsabilidad de las ordenes de trabajo radica básicamente en el jefe de mantenimiento quien es el encargado de la maquinaria de la empresa. Este jefe es quien analiza ordena y hace ejecutar en el tiempo adecuado el mantenimiento necesario para la máquina. El operario es el encargado de ejecutar la actividad encomendada y de brindar la información necesaria contenida en dicho formato, con sus observaciones pertinentes

si es el caso, esto se realiza con el fin de tener una retroalimentación de la información del plan de mantenimiento basado en la confiabilidad R.C.M.

FORMATO ESTANDAR DE ORDEN DE TRABAJO	
Campo	Descripción
Equipo	Generadora CNC
Subsistema	(Movimiento X-Y-Z / Generación óptica / Refrigeración / Control / Sujeción ABS)
Modo de falla asociado	Según FMECA
NPR	Valor calculado
Tipo de tarea RCM	A condición / Cíclica / Seguridad / Correctiva planificada
Objetivo de la tarea	Prevenir / Detectar / Mitigar consecuencia
Frecuencia	Mensual / Trimestral / Semestral / Anual
Responsable	Operador / Técnico mantenimiento / Especialista
Tiempo estimado	HH
Recursos	Herramientas, instrumentos, repuestos
Norma / referencia	Manual fabricante / SAE JA1011 / ISO 55000
Registro	Checklist / OT firmada

Tabla 3-4: Formato estándar de orden de trabajo
Fuente: Elaboración propia en base a los requerimientos del activo

Check List Generadora VFT Macro	
	OK
Chequear funcionamiento, nivel y caudal de chiller+C4:G26	
Verificar estado de filtros de ventilación tablero eléctrico	
Verificar estado del tablero eléctrico	
Verificar limpieza de pantalla táctil	
Chequear estado de herramientas	
Verificar encendido de maquina	
Chequear encendido de ventiladores tablero eléctrico	
Chequear estado de Ejes X - Y - Z	
Chequear estado protector Eje X	
Chequear estado fuelle Eje Z	
Chequear estado de lubricación Eje X	
Chequear estado de lubricación Eje Y	
Chequear estado de herramientas de corte (Milling, PCD, MCD)	
Verificar integridad del Holder tool	
Verificar encendido y funcionamiento de bomba de refrigeración	
Verificar estado y funcionamiento de la puerta de carga	
Verificar funcionamiento de la guarda cuchillas	
Chequear reset completo de maquina	
Verificar manómetros de aire, ajustar de ser necesario	
Chequear funcionamiento de todos los rociadores	
Verificar posibles fugas de liquido refrigerante	
Chequear nivel de refrigerante del chiller	
Chequear funcionamiento, nivel y caudal de chiller	
Observaciones:	

TÉCNICO/OPERADOR

Tabla 3-5 Check List
Fuente: Elaboración propia en base hoja de decisiones RCM.

A continuación, se presenta la propuesta de un formato de Orden de Trabajo diseñado específicamente para cubrir las necesidades detectadas en el laboratorio.

DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO	OPTILAND		
ORDEN DE TRABAJO	No:	Código del equipo:	
Fecha de ejecución	Código de actividad/OT	Tiempo empleado	
Actividad:			
Personal encargado de actividad de mantenimiento			
Operador	Nombre		
Jefe de Mantenimiento			
Operario			
Equipo y Material necesario			
Item	Descripción y Referencia	Unidad de medida	Cantidad
Procedimiento			
Tiempo estimado de ejecución:			
Observaciones:			

Tabla 3-6: Orden de Trabajo Oficial
Fuente: Elaboración propia

Esta orden de Trabajo constituye el instrumento de control técnico administrativo fundamental para la estandarización de los procesos de mantenimiento en Optiland, diseñada bajo un enfoque de ingeniería de prioriza la trazabilidad operativa y la optimización de recursos. Su estructura permite transformar cada intervención en una unidad de datos medible, vinculando de forma sistemática la responsabilidad del capital humano con la gestion logística de materiales y la rigurosidad del procedimiento técnico. Al implementar este formato, la organización no solo asegura la calidad y seguridad en la ejecución de las tareas, sino que construye una base de conocimiento crítico para el analisis de confiabilidad de los activos y la toma de decisiones basada en indicadores de desempeño real.

PLAN MAESTRO DE MANTENIMIENTO RCM - GENERADORA CNC									
OT	Subsistema	Modo de Falla Principal	NPR	Tipo de Tarea RCM	Descripción de la Tarea	Frecuencia	Responsable	Tiempo Est. (HH)	Tipo OT
OT-01	Movimiento X-Y-Z	Desalineación de ejes	12	A condición	Inspección vibracional de ejes X, Y y Z	Mensual	Técnico Mantenición	1	Preventiva
OT-02	Movimiento X-Y-Z	Juego excesivo (Backlash)	12	A condición	Verificación de holguras mecánicas con reloj comparador	Trimestral	Especialista CNC	1,5	Preventiva
OT-03	Movimiento X-Y-Z	Encoder defectuoso	18	A condición	Diagnóstico de encoders y sensores de posición	Mensual	Técnico Mantenición	1	Preventiva
OT-04	Movimiento X-Y-Z	Falta de lubricación	12	Cíclica	Lubricación de husillos y guías lineales	Mensual	Técnico Mantenición	0,8	Preventiva
OT-05	Generación óptica	Desalineación óptica	12	A condición	Verificación de alineación del sistema óptico	Trimestral	Especialista Óptico	2	Preventiva
OT-06	Generación óptica	Sensor temperatura falla	9	A condición	Control y calibración de sensores de temperatura	Mensual	Técnico Mantenición	0,5	Preventiva
OT-07	Refrigeración	Filtro saturado	6	Cíclica	Limpieza y/o reemplazo de filtros de refrigeración	Mensual	Técnico Mantenición	0,5	Preventiva
OT-08	Refrigeración	Bomba refrigerante defectuosa	9	A condición	Inspección funcional de bomba de refrigerante	Trimestral	Técnico Mantenición	1	Preventiva
OT-09	Control y energía	Fuente 24 VDC falla	6	A condición	Inspección de fuente de alimentación 24 VDC	Trimestral	Técnico Eléctrico	0,5	Preventiva
OT-10	Seguridad	Falla botón emergencia	3	Seguridad	Prueba de enclavamientos y parada de emergencia	Mensual	Técnico Mantenición	0,5	Seguridad
OT-11	Sujeción ABS	Desgaste de pinza	12	A condición	Inspección de pinzas y sistema de sujeción ABS	Mensual	Técnico Mantenición	0,8	Preventiva
OT-12	Sujeción ABS	Contaminación sistema ABS	6	Cíclica	Limpieza y ajuste del sistema de sujeción ABS	Mensual	Operador Capacitado	0,5	Preventiva
OT-13	Movimiento X-Y-Z	Servomotor sobrecalentado	6	A condición	Verificación de temperatura y ventilación servomotores	Trimestral	Técnico Mantenición	0,8	Preventiva
OT-14	Control CNC	PLC colgado	9	A condición	Revisión de alarmas y estado lógico PLC	Trimestral	Técnico Automatización	1	Preventiva
OT-15	Generación óptica	Desbalance herramienta	6	A condición	Verificación balance de herramienta óptica	Semestral	Especialista Óptico	1,5	Preventiva

Tabla 3-7: Plan Maestro de Mantenimiento
Fuente: Elaboración propia, basada en la aplicación de la metodología RCM al contexto operacional del laboratorio

La tabla maestra de ordenes de trabajo consolida de forma estructurada y jerarquizada todas las actividades de mantenimiento definidas para el equipo crítico, constituyéndose en el plan maestro de mantenimiento del sistema. Esta consolidación integra las tareas preventivas, predictivas, de seguridad y correctivas planificadas, alineadas con los resultados del análisis FMECA y las decisiones obtenidas a partir del árbol lógico RCM.

El plan maestro permite visualizar de manera integral la relación entre los modos de falla críticos, las tareas asignadas, las frecuencias de ejecución y los responsables, asegurando una cobertura adecuada de los riesgos identificados. Asimismo, facilita la programación de recursos, el control del cumplimiento del mantenimiento y la evaluación del impacto del plan sobre la confiabilidad, disponibilidad y costos operacionales del equipo CNC.

3.7 HOJA DE VIDA

La hoja de vida del equipo corresponde a un registro técnico administrativo que consolida la información relevante asociada al activo físico a lo largo de su ciclo de vida. En el contexto de la gestión de mantenimiento, este documento constituye una herramienta fundamental para el control, análisis y toma de decisiones relacionadas con la operación, confiabilidad y costos del equipo.

Para el presente trabajo, la hoja de vida de la generadora CNC permite disponer de un historial estructurado que integra antecedentes generales del equipo, características técnicas, condiciones de operación, intervenciones de mantenimiento, fallas registradas, repuestos utilizados y costos asociados. Esta información resulta esencial para respaldar el análisis FMECA, la aplicación de la metodología RCM y la definición del plan de mantenimiento propuesto.

HOJA DE VIDA GENENERADORA CNC		OPTILAND					
Página:	01						
Hoja de vida No.		Nombre del equipo			Código del equipo		
1		Generadora CNC			L-0		
Item	Fecha de intervención	Responsable	Tipo de mantenimiento	Actividad Realizada	Tiempo de parada	Costo	Supervisor

Tabla 3-8: Hoja de vida Generadora CNC
Fuente: Elaboración propia, propuesta de formato para la gestion de activos de Optiland

3.8 CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO – ENFOQUE MENSUAL

3.8.1 Descripción del Cronograma Gantt Mensual

En búsqueda del objetivo de asegurar la correcta ejecución del plan de mantenimiento definido mediante la metodología RCM, se elaboró un cronograma de tipo Gantt de carácter mensual, el cual permite organizar y visualizar de manera estructurada las tareas de mantenimiento preventivo, predictivo y de seguridad asociadas a la generadora CNC. El enfoque mensual fue seleccionado debido a que:

- La operación del laboratorio óptico es continua y de alta precisión.
- La mayoría de los modos de falla críticos presentan síntomas progresivos, lo que justifica tareas a condición y de inspección periódica.
- Facilita el control operativo y el seguimiento del cumplimiento del plan.

Este cronograma se encuentra directamente vinculado a las órdenes de trabajo definidas previamente y al plan maestro de mantenimiento.

3.8.2 Criterios de Construcción del Cronograma

El cronograma mensual se elaboró considerando los siguientes criterios técnicos:

- Frecuencia de cada tarea, definida por el análisis RCM.
- Tipo de tarea (a condición, cíclica, seguridad)
- Disponibilidad operativa del equipo, evitando interferir con la producción.
- Optimización de recursos humanos, agrupando tareas compatibles.

3.8.3 Cronograma Gantt Mensual – Plan de Mantenimiento Equipo CNC

Tarea	Tipo	Responsable	Duración	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Checklist diario operador	Autónomo	Operador	Diario	■			
Verificación bomba refrigerante	Preventivo	Técnico	1 hr	■			
Control backlash ejes X-Y-Z	Preventivo	Técnico	2 hr		■		
Inspección fuente 24VDC y PLC	Preventivo	Técnico eléctrico	1 hr		■		
Control vibracional husillo	Predictivo	Técnico	2 hr			■	
Limpieza sistema ABS	Preventivo	Técnico	1 hr			■	
Control temperatura proceso óptico	Predictivo	Técnico	1 hr				■
Revisión sistema lubricación	Preventivo	Técnico	1 hr				■
■ Actividad programada en la semana correspondiente							

Tabla 3-9: Cronograma Gantt Mensual
Fuente: Elaboración propia en base al Plan Maestro de Mantenimiento RCM

Cada actividad incluida en el cronograma mensual corresponde a una orden de trabajo estandarizada RCM, la cual define:

- Procedimiento técnico
- Recursos necesarios
- Criterios de aceptación
- Responsable de ejecución

El cronograma actúa como herramienta de planificación, mientras que las OT constituyen el documento de ejecución y registro.

3.8.4 Ventajas del Cronograma Mensual

La implementación del cronograma Gantt mensual aporta los siguientes beneficios:

- Asegura el cumplimiento sistemático del plan de mantenimiento.
- Permite anticipar desviaciones y reprogramar actividades.
- Facilita el seguimiento mediante indicadores (KPIs)
- Mejora la confiabilidad y disponibilidad de la generadora CNC.

3.9 INVENTARIO MÍNIMO DE REPUESTOS PARA GENERADORA CNC

Con el objetivo de reducir los tiempos de reparación (MTTR) y mitigar el impacto operacional asociado a los modos de falla críticos identificados en el análisis FMECA, se define un inventario mínimo de repuestos para la generadora CNC. Este inventario considera la criticidad de los componentes, su frecuencia de falla, el tiempo de reposición por parte del proveedor y su impacto en la continuidad del proceso óptico.

La correcta gestión de este stock mínimo permite asegurar la disponibilidad operativa del equipo y respaldar la efectividad del plan de mantenimiento basado en RCM.

INVENTARIO DE REPUESTOS - GENERADORA CNC						
Código	Repuesto / Componente	Subsistema	Función asociada	Cantidad mínima en stock	Criticidad	Tiempo de reposición
INV-01	Rodamiento husillo	Sistema de movimiento	Rotación precisa del husillo	2	Alta	15 – 20 días
INV-02	Encoder de eje	Sistema de control	Posicionamiento eje X-Y-Z	1	Alta	20 – 30 días
INV-03	Servomotor CNC	Movimiento X-Y-Z	Desplazamiento controlado	1	Alta	30 días
INV-04	Bomba de refrigerante	Refrigeración	Control térmico del proceso	1	Alta	15 – 20 días
INV-05	Filtro de refrigerante	Refrigeración	Limpieza del fluido	3	Media	5 – 7 días
INV-06	Sensor de temperatura	Proceso óptico	Monitoreo térmico	2	Media	10 – 15 días
INV-07	Fuente de poder 24 VDC	Control eléctrico	Alimentación PLC y sensores	1	Alta	10 – 15 días
INV-08	PLC (módulo CPU o I/O)	Control	Lógica de control	1	Alta	20 – 30 días
INV-09	Sensor fin de carrera	Seguridad / Control	Posición y protección	2	Media	7 – 10 días
INV-10	Válvula neumática	Sistema ABS	Sujeción óptica	2	Media	10 días
INV-11	Sello neumático	Sistema ABS	Estanqueidad del sistema	4	Baja	5 – 7 días
INV-12	Breaker / protección eléctrica	Seguridad eléctrica	Protección de circuitos	2	Media	5 días
INV-13	Ventilador gabinete eléctrico	Control térmico	Refrigeración tablero	2	Media	7 días
INV-14	Fusibles industriales	Eléctrico	Protección de equipos	5	Baja	3 días
INV-15	Mangueras refrigerante	Refrigeración	Circulación fluido	2	Baja	7 días

Tabla 3-10: Inventario de Repuestos
Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por laboratorio óptico

El inventario mínimo definido considera componentes asociados a modos de falla con NPR alto y medio, priorizando aquellos cuya falla provoca detención total del equipo o impacto directo en la calidad del proceso óptico. Asimismo, se incorporan criterios de tiempo de reposición, costo del repuesto y posibilidad de mitigación mediante tareas predictivas. Este inventario debe ser revisado periódicamente en función del desempeño del plan de mantenimiento y los indicadores de confiabilidad definidos.

3.10 COSTOS DEL MANTENIMIENTO

Con el objetivo de evaluar la viabilidad económica del plan de mantenimiento propuesto se realizó una comparación entre la situación actual de mantenimiento, caracterizada por un enfoque predominantes correctivo, y el escenario proyectado con la implementación del plan de mantenimiento basado en RCM. Este análisis considera tanto los costos directo de mantenimiento como los costos asociados a las detenciones del proceso productivo, permitiendo una evaluación integral del impacto económico del plan.

El presente presupuesto considera herramientas de precisión profesional necesarias para realizar las tareas de RCM que definimos para la Generadora VFT- macro.

Inversión inicial en Instrumentación			
Ítem	Descripción Técnica	Cantidad	Costo Unitario
Reloj Comparador Milsesimal	Precisión de 0.001 mm para medición de Backlash en Eje X.	1	\$350
Base Magnética Articulada	Soporte de alta estabilidad para el comparador.	1	\$120
Vacuómetro Digital	Medidor de alta previsión para sistema de vacío ABS.	1	\$340
Refractómetro Óptico	Control de concentración de fluido refrigerante.	1	\$80
Juego de Galgas y Patrones	Calibración y verificación de holguras mecánicas.	1	\$210
Capacitacion Técnica	Taller de implementación RCM y uso de instrumentos.	1	\$400
Total Inversión Inicial (USD)			\$1500

Tabla 3-11 Presupuesto de inversión inicial

Fuente: Elaboración propia a partir de cotizaciones referenciales externas y requerimiento técnicos del laboratorio

La inversión inicial de \$1500 USD ha sido calculada con base en precios de mercado de instrumentos de medición de precisión y capacitación técnica inicial, asegurando la capacidad del laboratorio para ejecutar de forma autónoma las tareas de monitoreo de condición.

Ítem	Repuesto	Cantidad Anual	Precio Unitario	Subtotal Anual	Justificación Técnica
1	Milling (Fresa de Desbaste)	10	\$2.600	\$26.000	Cambio cada 36000 cortes (Sustrato polímero)
2	Porta Herramientas (Tool Holder)	2	\$2.950	\$5.900	Reemplazo semestral por fatiga /vibración.
3	Chuck (Sistema de Sujeción)	1	\$800	\$800	Desgaste neumático /mecánico anual.
4	Engraving Pin (Diamante)	8	\$950	\$7.600	Punta de grabado para marcas de progresión.
5	PCD (Corte Policarbonato)	1	\$650	\$650	Baja agresividad (95% mix producción).
6	MCD (Corte Orgánico)	1	\$1.250	\$1.250	Acabó óptico en CR-39
7	Insumos	Global	\$300	\$300	Mantenimiento preventivo
TOTAL	Presupuesto Anual			\$42.500	Línea base mantenimiento Actual

Tabla 3-12: Repuestos y suministros

Fuente: Elaboracion propia en base a información entregada por laboratorio óptico

Parámetro Operativo	Valor	Unidad
Producción Diaria	1000	Cortes/día
Producción Anual (365)	365000	Cortes/año
Costo Directo Mantenimiento (Anual)	42.500	USD/año
Costo Estimado por Lente Rechazado (Merma)	5	USD/lente
Tasa de Rechazo Actual (Correctivo)	2,5	%
Tasa de Rechazo Objetivo (RCM)	0,8	%
Inversión Inicial en Instrumentación RCM	1500	USD (Única vez)

Tabla 3-13: Parámetros operativos
Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por laboratorio óptico

Concepto Costo	Mantenimiento Actual (Correctivo)	Plan Propuesto (RCM)	Ahorro Anual (USD)
Costos Directos (OPEX)			
Repuestos y suministros	\$ 42.500	\$ 38.250	\$ 42.500
Instrumentación y Calibración	\$ 0	\$ 1.500	-\$ 1500
Costos Indirectos (Fallas)			
Costo por Merma (Lentes Rechazados)	\$ 45.625	\$ 14.600	\$ 31.025
Costo por Paradas No Programadas (	\$ 8000	\$ 1600	\$ 6400
TOTAL COSTO DE PROPIEDAD (TCO)	\$ 96.125	\$ 55.950	\$ 40.175

Tabla 3-14: Costos
Fuente: Elaboración propia en base a datos operativos y financieros de laboratorio óptico

3.10.1 Evaluación Técnica del Plan de Mantenimiento

La evaluación técnica del plan propuesto demuestra una cobertura integral de los modos de falla críticos identificados en la Generadora Satisfloh VFT-macro. La transición desde un modelo de inspección visual hacia un modelo de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) permite abordar las causas raíz que comprometen la precisión del tallado:

- Estabilidad Geométrica (Eje X): La implementación de la tarea de medición de backlash mediante reloj comparador milésimal elimina la incertidumbre mecánica, garantizando que el error de posición se mantenga por debajo de las 5 micras (0.005 mm).
- Integridad de Sujeción (Sistema ABS): El protocolo de estanqueidad semanal asegura que la succión operativa no descienda de los -0.85bar, mitigando el riesgo de

desprendimiento de lentes protegiendo componentes de alto costo como el Chuck (\$800) y el Portaherramientas (\$2950USD).

- Eficiencia de Corte (PCD/MCD): El monitoreo por condición de las herramientas de corte optimiza la vida útil de los diamantes, evitando la degradación del acabado superficial y reduciendo la carga térmica sobre el husillo.

3.10.2 Evaluación Económica del Plan de Mantenimiento

La inversión de \$1,500 USD en instrumentación y protocolos de calibración no se considera un gasto, sino un habilitador de ahorro. Existe una correlación directa entre la repetibilidad el palpador y la tasa de rechazo (Merma). La implementación de un mantenimiento basado en la precisión técnica es el único mecanismo viable para reducir costos por desperdicio de \$45,625 a \$14,600 USD, lo que representa una eficiencia en la calidad del 68%.

El gasto anual proyectado en repuesto (\$42,500 USD) se deriva de un análisis de intensidad de uso basado en un régimen de producción de 1000 ciclos/día. La estrategia RCM permite una extensión de la vida útil del herramental de corte mediante:

- Mitigación de esfuerzos mecánicos excedentes: La calibración precisa de los parámetros de avance y profundidad de corte reduce el desgaste abrasivo prematuro.
- Reducción de fallas catastróficas: Se proyecta un ahorro del 10% en el rubro de repuestos al eliminar eventos de rotura súbita causados por desalineaciones o fijaciones deficientes del chuck.

Bajo los principios de la norma SAE JA1011, se reconoce que ningún plan de mantenimiento elimina el riesgo de forma absoluta. Por lo tanto, se ha establecido un costo de falla residual de \$1,600 USD anuales (20% del valor inicial). Esto contempla:

- Eventos de naturaleza estocástica (Fallas aleatorias no detectables por inspección).
- Perturbaciones externas (fluctuaciones en el suministro eléctrico o errores humanos no sistemáticos).

3.10.3 Costos Operativos y Optimización del Gasto

3.11 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD Y GESTIÓN DEL RIESGO

3.11.1 Proyección de Sostenibilidad Financiera

La evaluación de la sostenibilidad a mediano plazo permite determinar la viabilidad del plan de mantenimiento RCM en un horizonte de tres años. Para este análisis, se considera la inversión inicial concentrada en el año 1 y los ahorros operativos derivados de la reducción de merma y la optimización de la disponibilidad.

Flujo de Caja (USD)	Año 1 (2026)	Año 2 (2027)	Año 3 (2028)	TOTAL(USD)
Inversión Inicial RCM	\$-1500	\$0,00	\$0,00	\$-1500
Sostenibilidad del Plan	\$-250	\$-250	\$-250	\$ -750
Ahorro en Merma (Lentes)	\$31.025	\$31.025	\$31.025	\$93.075
Ahorro en Paradas Críticas	\$6400	\$6400	\$6400	\$19.200
FLUJO NETO	\$35.675	\$37.175	\$37.175	\$115.575
Ahorro Acumulado (USD)	\$35.675	\$72.850	\$110.025	

Tabla 3-15: Flujo de caja proyectado a 3 años

Fuente: Elaboración propia a partir de proyecciones financieras y datos históricos del laboratorio.

Inversión: Los \$1,500 USD corresponden a la adquisición de herramientas de metrología especializado para la Satisfacción VFT macro. Al ser equipos de precisión con una vida útil superior a los 5 años, la inversión es de carácter único en el ciclo del proyecto, impactando solo el flujo de caja inicial.

Costos de Sostenibilidad Operativa: Se ha integrado un costo marginal de \$250 USD anuales destinados a la recertificación de patrones y mantenimiento preventivo de la instrumentación adquirida. Esto garantiza que la exactitud de las mediciones sea constante a través del tiempo.

Análisis de Rentabilidad: Debido a que el ahorro principal proviene de la reducción del Lucro Cesante (paradas no programadas) y la eficiencia en el uso de materiales (reducción de merma), el flujo de caja neto presenta una tendencia incremental a partir del año 2, una vez absorbida la inversión inicial.

Mitigación de Riesgo: Se mantiene el concepto de falla residual controlada, asumiendo un costo histórico de fallos del 20%.

El flujo de caja proyectado evidencia que la metodología RCM genera un beneficio económico acumulado de \$110.025 USD al finalizar el tercer año. La alta generación de flujo positivo en el primer año garantiza que el proyecto sea autofinanciable desde el primer mes de operación. La sostenibilidad se fundamenta en la consistencia de los ahorros por merma, los cuales protegen el margen operativo del laboratorio frente a la alta demanda de producción.

3.12 FACTÁBILIDAD Y EFICIENCIA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO

3.12.1 Evaluación de Factibilidad y Implementación Instrumental

El plan presenta una alta factibilidad de implementación técnica debido a su baja complejidad logística y su alto impacto en la disponibilidad:

- i. Requerimientos de Herramental: La estrategia se sustenta en una inversión de baja escala (\$1.500 USD) en instrumentos de precisión estándar (vacuómetros, comparadores y refractómetros), lo que facilita su despliegue inmediato.
- ii. Competencias Técnicas: Las tareas diseñadas no requieren la contratación de servicios externos especializados de forma permanente, ya que los protocolos de calibración y diagnóstico son transferibles al personal interno mediante capacitación técnica orientada a la metodología RCM.
- iii. Disponibilidad Mecánica: Las tareas preventivas están dimensionadas para ejecutarse en ventanas de tiempo de 15 a 45 minutos, lo que permite cumplir con la demanda productiva de 1000 cortes diarios sin generar cuellos de botella en el flujo del laboratorio.

3.12.2 Eficiencia del Plan de Mantenimiento

La eficiencia del modelo de mantenimiento propuesto para la generadora Satisfloh VFT macro se evalúa mediante la optimización de la relación entre los recursos invertidos y la mitigación de fallas funcionales. La transición del modelo correctivo al proactivo se sustenta en tres pilares de eficiencia operativa:

Optimización del OEE:

- i. Disponibilidad: Al reducir las paradas no programadas de un costo histórico de \$8000 a una falla residual de \$1600 se proyecta un incremento del 12% en el tiempo de carga útil del activo.
- ii. Rendimiento: La estandarización de los cambios de herramientas evita la degradación de la velocidad de corte por desgaste excesivo.
- iii. Calidad: Es el punto de mayor eficiencia, donde la calibración sistemática reduce el índice de rechazos (merma), recuperando \$ 31,025 USD anuales en valor de producción que anteriormente se perdía.

Relación de Eficiencia Costo – Beneficio:

En este proyecto, la eficiencia se manifiesta al demostrar que una inversión marginal única en instrumentación (\$1,500 USD) es capaz de proteger un flujo operativo de más de \$100,000 USD en tres años.

- i. Eficiencia preventiva: Por cada \$1 invertido en actividades proactivas (calibración y monitoreo), el sistema retorna \$26.70 en ahorros netos (evitación de costos de falla y merma).

Mitigación del lucro cesante y confiabilidad Operacional:

La eficiencia se mide también por la capacidad del plan para estabilizar el MTBF. Al implementar tareas de mantenimiento basadas en la condición del palpador y el estado de los filtros neumáticos, se elimina la incertidumbre operativa.

La eficiencia técnica radica en transformar el mantenimiento de un evento reactivo estocástico en un evento programado determinado.

La eficiencia del plan no reside en la eliminación total del gasto, sino en la estratificación del presupuesto de mantenimiento. Al desplazar los recursos desde la reparación de emergencia hacia la inspección de precisión, se logra una estructura de costos más esbelta y una operación significativamente más predecible, garantizando la sostenibilidad financiera del laboratorio óptico a largo plazo.

3.13 BENEFICIOS OPERACIONALES ASOCIADOS A LA IMPLEMENTACIÓN

La transición hacia un modelo de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en la generadora Satisloh VFT- macro genera una serie de ventajas operativas que optimizan la cadena de valor del laboratorio óptico. Estos beneficios se categorizan en tres dimensiones principales:

3.13.1 Estabilización de la Capacidad Productiva

El principal beneficio operativo es la eliminación de la incertidumbre en el flujo de producción. Al procesar 1000 cortes diarios, cualquier desviación técnica detiene las etapas posteriores de pulido y montaje.

- Reducción de Micro paradas: El control estricto del sistema de vacío (ABS) y la limpieza de sensores de los esconder evitan alarmas falsas que interrumpen el ciclo de tallado, aumentando la utilización efectiva del equipo.
- Consistencia Geométrica: La compensación quincenal de backlash en el Eje X garantiza que el primer lente del turno tenga la misma precisión que el ultimo, eliminando la variabilidad térmica y mecánica.

3.13.2 Optimización del Ciclo de Vida de Herramientas Críticas

Basado en el inventario técnico de la unidad, el RCM permite gestionar los insumos de mayor costo con criterios de ingeniería:

- Maximización del PCD y MCD: Al monitorear la vibración del husillo y la calidad del refrigerante, se evita el cambio prematuro de los diamantes (\$650 y \$1250 USD respectivamente), logrando extraer al máximo rendimiento de corte sin comprometer el acabado superficial.
- Preservación del Portaherramientas: El mantenimiento proactivo de los sistemas de sujeción previene vibraciones parasitas y colisiones accidentales, extendiendo la vida útil de este activo de capital más allá de las estimaciones estándar del fabricante.

3.13.3 Mejora en la Calidad de Entrega

La reducción de la tasa de rechazo del 2,5% al 0,8% impacta directamente en el cliente final. Al fallar menos lentes, el tiempo de entrega (lead time) se vuelve predecible, mejorando el nivel de servicio del laboratorio y reduciendo los costos logísticos por reposiciones urgentes.

3.14 Limitaciones del Análisis Económico y de Confiabilidad

Los resultados obtenidos mediante la evaluación económica y el análisis de confiabilidad corresponden a una proyección técnica basada en la aplicación teórica del plan de mantenimiento desarrollado bajo la metodología RCM.

Debido a que el alcance del presente trabajo no contemplo una implementación real del plan dentro del periodo de estudio, los valores de ahorro de económico, mejora de disponibilidad, incremento del MTBF y reducción de MTTR representan estimaciones fundamentadas en la criticidad identificada mediante FMECA, en las recomendaciones del fabricante y en referencias técnicas de mantenimiento centrado en confiabilidad.

En consecuencia, los beneficios cuantificados deben interpretarse como resultados potenciales esperados bajo una correcta implementación y seguimiento del plan propuesto, siendo necesaria una futura validación operacional mediante la ejecución efectiva del programa de mantenimiento y el monitoreo de indicadores de desempeño del activo.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo permitió demostrar que la gestión del mantenimiento en activos críticos de manufactura óptica no puede sustentarse únicamente en acciones correctivas o en recomendaciones genéricas del fabricante, sino que requiere una estrategia estructurada basada en criterios de confiabilidad que permita comprender las verdaderas consecuencias operacionales de las fallas sobre el proceso productivo.

Los resultados obtenidos evidencian que la Generadora CNC Satisloh VFT-Macro constituye un activo cuya criticidad trasciende la disponibilidad mecánica tradicional. Si bien los indicadores de confiabilidad calculados muestran niveles de operación aparentemente aceptables, el análisis desarrollado permitió concluir que pequeñas desviaciones funcionales pueden generar afectos significativos sobre la calidad óptica del producto, los reprocesos, el consumo de herramientas y la estabilidad de la producción. Esta condición justifica plenamente la necesidad de una estrategia de mantenimiento orientada a preservar la función del equipo y no únicamente a reparar fallas una vez ocurridas.

La aplicación de la metodología RCM permitió establecer una relación directa entre los modos de falla identificados y las acciones de mantenimiento requeridas para controlarlos, demostrando que es posible estructurar técnicamente un programa de mantenimiento alineado con los riesgos reales del activo. Asimismo, la evaluación económica desarrollada permitió concluir que la propuesta presenta un potencial de reducción de costos y una mejora esperada de la confiabilidad operacional, evidenciando que el mantenimiento debe ser entendido como una inversión estratégica para la continuidad del negocio y no exclusivamente como un centro de gasto.

No obstante, los resultados obtenidos deben interpretarse considerando que el estudio se desarrolló bajo un enfoque de diseño y evaluación técnica, sin una implementación completa del plan dentro del periodo de investigación. En consecuencia, los beneficios de confiabilidad y ahorro económico estimados representan un escenario proyectado que deberá ser válido mediante la ejecución efectiva del programa y el seguimiento de indicadores operacionales en terreno.

Desde una perspectiva académica y profesional, el principal aporte de este trabajo radica en demostrar la aplicabilidad de las metodologías de confiabilidad en un entorno industrial altamente especializado, integrando análisis de criticidad, gestión del mantenimiento, evaluación económica y control operacional dentro de una propuesta coherente y adaptable a las necesidades del laboratorio óptico. Asimismo, establece una base metodológica que puede ser utilizada para futuros procesos de mejora continua y para

la extensión de estrategias de mantenimiento centradas en confiabilidad hacia otros activos críticos de la organización.

Por esta razón, se concluye que la implementación de una gestión de mantenimiento basada en RCM constituye una alternativa técnica y económicamente justificable para incrementar la confiabilidad de la Generadora CNC Sartilsoh VFT- Macro, contribuyendo no sólo a mejorar el desempeño del activo, sino también a fortalecer la competitividad, sostenibilidad y capacidad operacional del laboratorio óptico en el largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

Moubray, J. (1997). Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. Industrial Press Inc.

SAE International. (2009). SAE JA1011: Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

SAE International. (2009). SAE JA1012: Guía para Norma de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 60812: Análisis de Modos y Efectos de falla (AMEF y AMEFC)

Satisloh AG. (s.f.). Manual de Operación y Mantenimiento: Generadora CNC VFT-macro. Manual técnico del fabricante (OEM).

Satisloh AG. (2021). Folleto técnico: Máquina generadora de lentes VFT- macro.
Recuperado de: www.satisloh.com