

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE MECANICA VIÑA DEL MAR – CHILE

PROPUESTA DE DISEÑO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO PARA
MÁQUINA CORTADORA
LÁSER EN EL ÁREA DE METALMECÁNICA

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno: Cesar Emilio Flores D'angelo

Profesor Guía: Ing. Pablo Andrés Duque Ramírez

Año 2025

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 DISEÑO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO PARA MAQUINA CORTADORA LÁSER EN EL AREA DE METALMECANICA.**

Nombre del candidato(a): Cesar Emilio Flores D'angelo

Carrera / Grado: Ingeniero en mantenimiento industrial.

Campus: Viña del mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pablo Andrés Duque Ramírez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 28-07-26

Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28-07-2026

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

“Renovación Tecnológica y Elaboración de un sistema integral de gestión del mantenimiento para optimizar el proceso de corte metálico metalmecánico”

El presente trabajo de título desarrolla el diseño de un sistema integral de gestión del mantenimiento asociado a la nueva máquina cortadora láser TRUMPF TruLáser Serie 1000. La investigación surge a partir de un análisis técnico y operativo del equipo anterior, la punzonadora TRUMPF Trumatic 2020R, el cual presentaba obsolescencia tecnológica, baja disponibilidad, elevados costos correctivos, limitaciones de repuestos y riesgos de seguridad ocupacional.

El diagnóstico del equipo existente se desarrolló a partir de registros internos de mantenimiento del año 2024, considerando los criterios de recopilación de datos de confiabilidad y mantenimiento establecidos por la norma ISO 14224;2016. Bajo este enfoque, se evidencio un MTBF promedio de 170,13 horas, un MTTR de 73,2 horas y una disponibilidad operacional cercana al 69,92%, valores que reflejan una condición desfavorable para un proceso productivo considerado critico dentro de la cadena de fabricación. Esta situación generaba detenciones no programadas, externalización de servicios de corte, aumento de costos operacionales y perdida de continuidad en el proceso metalmecánico.

Frente a esta problemática, se plantea la necesidad de fortalecer la gestión del mantenimiento mediante una estructura, trazable y alineada con buenas prácticas de gestión de activos. Para ello, se consideran criterios asociados a confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, ciclo de vida, seguridad operacional y control de información técnica, tomando como referencia las normas ISO 14224, ISO 17359, ISO 55000 e ISO 60812, además la documentación técnica del fabricante.

En el Capítulo 1 se desarrolla el diagnóstico de la situación actual del proceso de corte metálico, considerando las limitaciones técnicas de la punzonadora, el desgaste del sistema CNC, las fallas recurrentes, los costos de reparación, la externalización productiva, los riesgos asociados al ruido y la obsolescencia tecnológica. Este análisis permite justificar la renovación tecnológica y establecer la necesidad de contar con una estructura formal de mantenimiento para el nuevo sistema de corte láser.

El Capítulo 2 se elabora la base documental y técnica del sistema de gestión del mantenimiento para la TruLáser Serie 1000. Esta propuesta incluye el plan de mantenimiento preventivo, checklist de inspección, rutinas e instructivos técnicos, matriz FMECA y formato de orden de trabajo. Estos documentos permiten estandarizar las actividades de mantenimiento, asignar responsabilidades, controlar la ejecución de tareas y asegurar la trazabilidad de fallas, recursos, repuestos y tiempos de intervención.

En el Capítulo 3 se establecen los indicadores clave de desempeño necesarios para controlar el comportamiento técnico y económico del nuevo sistema de corte. Se consideran indicadores de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, productividad, costos y ciclo de vida, junto con una estructura básica para la captura, validación y análisis de datos de mantenimiento. De esta manera, la propuesta permite transformar los registros operativos en información útil para la toma de decisiones.

Finalmente, se concluye que la elaboración de este sistema integral de gestión del mantenimiento permitirá fortalecer la planificación, ejecución, control y mejora continua de las actividades asociadas al proceso de corte metálico. Asimismo, la propuesta contribuye a reducir la dependencia del mantenimiento correctivo, mejorar la disponibilidad operacional, controlar los costos asociados al activo y generar una base técnica documentada para la gestión futura de la máquina durante su ciclo de vida.

índice

Resumen.....	2
Siglas y simbología.....	8
Introducción	10
Objetivos	12
Objetivo general.....	12
Alcance y metodología del trabajo.	13
Capítulo 1 Análisis de la situación actual y diagnóstico del proceso de corte metálico.	14
1.1 Contexto de la empresa.....	14
1.2 Descripción del proceso de corte metálico actual.....	15
1.3 Ventajas de Trumatic 2020R	17
1.4 Limitaciones.....	18
1.5 Datos de disponibilidad y confiabilidad.....	20
1.6 Costos asociados a detenciones no programadas y externalización.	23
1.7 Riesgos de seguridad y salud ocupacional.	26
1.7.1 Efectos del ruido en la salud.....	27
1.7.2 Requerimientos normativos.	27
1.7.3 Consecuencias de la falta de control auditivo.....	28
1.7.4 Evaluación de exposición al ruido.....	28
1.8 Obsolescencia Tecnológica.....	29
1.8.1 Etapa del ciclo de vida tecnológico	30
1.8.2 Implicaciones para la gestión del mantenimiento.	31
1.9 Justificación de la renovación.....	31
1.9.1 Tecnico-Economica.....	32
1.9.2 Seguridad y salud ocupacional.....	33
1.9.3 Criterios generales de implementación	33
1.10 Cierre del diagnóstico	34
Capítulo 2 Gestión del Mantenimiento TruLaser 1000	35
2. Introducción al capítulo.	35
2.1 Seguridad Operacional.....	36
2.1.1 Riesgos asociados al sistema laser.....	36
2.1.2 Riesgos de gases Industriales.....	37

2.1.3 Riesgos eléctricos y neumáticos.	37
2.1.4 Equipos de protección personal (EPP).	38
2.1.5 Prevención de incendios	38
2.1.6 Señalización y Entrenamiento.	39
2.2 Plan de Mantenimiento (Anexo B)	40
2.2.1 Estructura del Plan de Mantenimiento.	41
2.2.2 Checklist de inspección y mantenimiento (Anexo C).	42
2.2.3 Aplicación del análisis FMECA.	43
2.2.4 Rutinas e Instructivos técnicos de mantenimiento.	44
2.2.5 Orden de trabajo.	46
2.2.6 Gestión de registros y trazabilidad documental	47
2.3 Cierre del capítulo.	48
Capítulo 3 Diseño de indicadores KPI de Mantenimiento.	49
3 Introducción al capítulo.	49
3.1 Marco normativo aplicado.	50
3.1.1 ISO 14224: Recopilación de datos de confiabilidad y mantenimiento.	52
3.1.2 ISO 17359: Monitorización Condicional de equipos (CBM).	53
3.1.3 ISO 55000: Gestión de activos físicos.	54
3.1.4 Documentación técnica TRUMPF	55
3.2 KPI de confiabilidad	57
3.2.1 MTBF (Mean Time Between Failures)	58
3.2.2 Distribución de Weibull.	59
3.2.3 Tasa de falla instantánea λ (t).	60
3.2.4 Función de confiabilidad.	61
3.2.5 Beneficios esperados del análisis de confiabilidad.	62
3.3 KPI de mantenibilidad.	63
3.3.1 MTTR – Mean Time To Repair (Tiempo medio de reparación).	63
3.3.2 Tiempo de respuesta del mantenimiento.	64
3.3.3 Mantenibilidad instantánea $M(t)$	65
3.3.4 Relación entre KPI de mantenibilidad y la disponibilidad.	66
3.3.5 Beneficios directos de implementar estos KPI.	67
3.4 KPI de disponibilidad.	67
3.4.1 Disponibilidad intrínseca (A_i).	68

3.4.2 Disponibilidad Operativa (Ao)	68
3.4.3 Disponibilidad total (At).	69
3.4.4 Impacto del KPI de disponibilidad en la gestión del proceso.	70
3.5 Productividad – OEE (Overall Equipment Effectiveness).	70
3.5.1 Definición general del OEE.	71
3.5.2 Las seis grandes pérdidas del OEE.	72
3.5.3 Interpretación del OEE.	73
3.5.4 Beneficios de implementar KPI y OEE.	74
3.6 KPI de Costas y Ciclo de Vida (LCC).	75
3.6.1 Definición de costo del ciclo de vida (LCC).	75
3.6.2 Componentes del LCC aplicados al sistema de corte láser.	76
3.6.3 Costos de adquisición (C _{adq}).	77
3.6.4 Costos de operación.	77
3.6.5 Costos de mantenimiento (C _{mtto}).	77
3.6.6 Costos por fallas (C _{fallas}).	78
3.6.7 Costos de reemplazo. (C _{reemplazo}).	78
3.6.8 KPI derivados del LCC.....	78
3.6.9 Rol estratégico del LCC en la empresa.....	79
3.6.10 Importancia de integrar LCC con KPI técnicos.	81
3.7 Beneficios esperados.....	81
3.8 Implementación del sistema KPI.	82
3.8.1 Captura de datos operacional y de mantenimiento.	83
3.8.2 Validación de la información.	84
3.8.3 Control estadístico.	85
4 Conclusión indicadores KPI.	87
Conclusión	89
Referencias.....	91

Índice de Tablas

Tabla 1. Variables Críticas del proceso de punzonado.....	16
Tabla 2 Datos técnicos maquina cortadora TRUMPF Trumatic 2020R	20
Tabla 3 Indicadores generales de mantenimiento de la TRUMPF Trumatic 2020R.....	21
Tabla 4. Costos de mantenimiento correctivo asociado a paradas no programadas	24
Tabla 5 Resumen costos de reparación y externalización año 2024	25
Tabla 6. Tabla de evaluación de ruido	29
Tabla 7 "Instructivos de mantenimiento"	45
Tabla 8. Resumen marco normativo	51
Tabla 9. Resumen, relación entre referencias normativas y técnicas utilizadas.....	56
Tabla 10. Comparación económica esperada entre sistema actual y sistema propuesto	80
Tabla 11. Propuesta de implementación del sistema KPI.	86

Índice de Gráficos

Gráficos 1 Distribución Weibull.....	23
Gráficos 2"Gráfico de costos"	26

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Esquema de proceso	¡Error! Marcador no definido.
--	-------------------------------

Índice de Anexo

Anexo_ A.....	94
Anexo_ B.....	95
Anexo_ C.....	97
Anexo_ D.....	98
Anexo_ E.....	101
Anexo_ F.....	103

Siglas y simbología.

Auditoría técnica: Proceso de verificación del cumplimiento normativo según ISO 14224, ISO 17359 y ISO 55000.

CBM: *Condition-Based Maintenance* (Mantenimiento Basado en Condición).
Mantenimientos definidos por condición real del equipo.

CNC: *Computer Numerical Control* (Control Numérico Computarizado).
Sistema de control de la máquina de corte.

CO₂ Laser: *Carbon Dioxide Laser* (Láser de dióxido de carbono).
Tecnología de corte utilizada por la TruLaser 1000.

DT: *Down Time* (Tiempo Fuera de Servicio).
Tiempo total en que la máquina está detenida por fallas o mantenimientos.

FMECA: *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*
(Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad).

HMI: *Human Machine Interfaz* (Interfaz Hombre-Máquina).
Interfaz táctil utilizada para operar la TruLaser 1000.

ISO 14224: *Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data*
(Recopilación y estructuración de datos de mantenimiento y confiabilidad).

ISO 17359: *Condition Monitoring and Diagnostics of Machines*
(Directrices para monitoreo condicional).

ISO 55000: *Asset Management — Overview, Principles and Terminology*
(Gestión de Activos Físicos).

ISO 11553-1: Safety of machinery — Laser processing machines *Seguridad de máquinas láser de procesamiento – Requisitos generales.*

ISO 14118: Safety of machinery — Prevention of unexpected start-up
Prevención de arranques inesperados .

ISO 3744: Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Engineering method
Método de ingeniería para determinar niveles de ruido.

ISO 45001: Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use
Sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional.

ISO 9612: Acoustics — Determination of occupational noise exposure — Engineering method
Determinación de la exposición ocupacional al ruido.

ISO 1999: Acoustics — Estimation of noise-induced hearing loss*Estimación de la pérdida auditiva inducida por ruido***ISO 60812: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)***Análisis de modos de falla y sus efectos.***KPI:** *Key Performance Indicator* (Indicador Clave de Desempeño).

Indicadores diseñados en el Capítulo 3.

MTBF: *Mean Time Between Failures* (Tiempo Medio Entre Fallas).

Indicador de confiabilidad.

MTTR: *Mean Time To Repair* (Tiempo Medio de Reparación).

Indicador de mantenibilidad.

OEE: *Overall Equipment Effectiveness* (Eficiencia Global del Equipo).

Indicador compuesto

OT: *Orden de Trabajo.*

Documento fundamental para trazabilidad de mantenimiento.

R(t): *Reliability Function* (Función de Confiabilidad).

Función probabilística usada en KPI de confiabilidad.

RCM: *Reliability-Centered Maintenance* (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad).

Metodología base del Capítulo 3.

SPC: *Statistical Process Control* (Control Estadístico del Proceso).

Usado en validación y monitoreo de KPI.

Sensor láser / óptico:

Parte del sistema de protección y medición de la TruLaser 1000.)

TCO: *Total Cost of Ownership* (Costo Total de Propiedad).

Indicador económico

TruLaser 1000:

Nombre comercial de la máquina de corte láser del proyecto.

TRUMPF:

Fabricante alemán del equipo.

Introducción

Eaton Chile es una empresa dedicada a la fabricación e integración de salas eléctricas, orientadas principalmente a la gran minería, energía e infraestructura industrial. Debido a que estas soluciones se aplican en instalaciones críticas, sus procesos de fabricación deben cumplir altos estándares de calidad, seguridad, confiabilidad y continuidad operacional.

Dentro de la organización, el área metalmecánica cumple un rol fundamental, ya que fabrica estructuras, tableros y componentes metálicos utilizados en las salas eléctricas. En este proceso, el corte de planchas metálicas constituye una de las primeras etapas productivas, por lo que cualquier falla o detención afecta directamente la planificación, los tiempos de entrega y los costos operacionales.

Actualmente, el corte metálico se realiza mediante una máquina punzonadora TRUMPF Trumatic 2020R. Si bien este equipo ha sido relevante para la operación del área, hoy presenta limitaciones asociadas a su antigüedad, desgaste acumulado, obsolescencia tecnológica, dificultad para conseguir repuestos y aumento de intervenciones correctivas. Estas condiciones han disminuido su confiabilidad operacional y han generado dependencia de servicios externos de corte.

De acuerdo con los registros internos de mantenimiento del año 2024, la máquina presenta un MTBF promedio de 170,13 horas, un MTTR de 73,2 horas y una disponibilidad operacional cercana al 69,92 %. Estos indicadores se analizan bajo el enfoque de la norma ISO 14224:2016, la cual establece criterios para recopilar, clasificar y analizar datos de confiabilidad y mantenimiento en activos industriales. Los resultados evidencian una condición desfavorable para un equipo que cumple una función crítica dentro del proceso productivo.

A esto se suma que la máquina presenta niveles de ruido superiores a 90 dB(A), según antecedentes de medición del área de trabajo, lo que representa un riesgo para la salud ocupacional del personal expuesto y exige medidas de control conforme a la normativa vigente.

La situación descrita evidencia la necesidad de renovar la tecnología de corte y, al mismo tiempo, fortalecer la forma en que se gestiona el mantenimiento del proceso. En este sentido, se requiere mejorar la planificación preventiva, la trazabilidad de las

intervenciones, el uso de órdenes de trabajo, el registro de fallas, la gestión documental y el control mediante indicadores de desempeño.

Frente a este escenario, se proyecta el reemplazo de la punzonadora por una máquina de corte láser TRUMPF TruLaser Serie 1000, equipo que incorpora tecnología de corte óptico, mesa de trabajo de 3000 x 1500 mm y sistema CNC Sinumerik 840D. Esta incorporación busca mejorar la precisión del corte, reducir tiempos de procesamiento, disminuir reprocesos y aumentar la eficiencia del proceso.

Sin embargo, la incorporación de una nueva máquina no asegura por sí sola una mejora sostenida. Para lograrlo, es necesario elaborar una propuesta de gestión del mantenimiento que permita ordenar actividades, definir responsabilidades, registrar información técnica, controlar el desempeño del equipo y apoyar la toma de decisiones durante su ciclo de vida.

Por esta razón, el presente trabajo de título se orienta a elaborar una propuesta de sistema integral de gestión del mantenimiento para una máquina cortadora láser en el área metalmecánica. La propuesta considera el diagnóstico técnico y económico del proceso actual, la elaboración de documentación técnica y administrativa, la aplicación de herramientas de análisis de fallas y la definición de indicadores clave de desempeño.

El desarrollo se apoya en buenas prácticas de gestión de activos, confiabilidad operacional, mantenibilidad, seguridad y mantenimiento basado en condición, considerando como referencia las normas ISO 55000, ISO 14224, ISO 17359 e ISO 60812, además de la documentación técnica del fabricante TRUMPF.

Metodológicamente, el trabajo se organiza en tres etapas: diagnóstico de la situación actual del proceso de corte metálico, elaboración de la documentación técnica y administrativa para la gestión del mantenimiento del nuevo sistema de corte láser, y definición de indicadores de desempeño para controlar el comportamiento futuro del equipo y apoyar la mejora continua.

De esta manera, el trabajo busca entregar una propuesta aplicable a la empresa, orientada a fortalecer la planificación, ejecución, control y mejora continua del mantenimiento, reducir la dependencia del mantenimiento correctivo y aportar una base técnica para gestionar la máquina cortadora láser durante su ciclo de vida.

Objetivos

Objetivo general.

Elaborar una propuesta de sistema integral de gestión del mantenimiento para una máquina cortadora láser en el área metalmecánica, considerando su impacto dentro del proceso de corte metálico, el diagnóstico técnico del sistema actual, la documentación técnica y administrativa del mantenimiento, y la definición de indicadores de desempeño que permitan mejorar la disponibilidad, confiabilidad y continuidad operacional.

1. Analizar la situación actual del proceso de corte metálico del área metalmecánica, considerando las limitaciones técnicas y operativas de la máquina TRUMPF Trumatic 2020R, sus indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, además de los costos de mantenimiento, externalización productiva, obsolescencia tecnológica y riesgos de seguridad operacional.
2. Elaborar la documentación técnica y administrativa necesaria para la gestión del mantenimiento de la máquina cortadora láser TRUMPF TruLaser Serie 1000, incorporando plan de mantenimiento preventivo, checklist de inspección, rutinas e instructivos técnicos, registros de mantenimiento, orden de trabajo y análisis FMECA, con el fin de estandarizar la planificación, ejecución y trazabilidad de las intervenciones.
3. Definir indicadores clave de desempeño para el control del mantenimiento y operación del sistema de corte láser, considerando variables de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, productividad, costos y ciclo de vida, con el propósito de apoyar la toma de decisiones, el seguimiento del desempeño y la mejora continua del proceso.

Alcance y metodología del trabajo.

El presente trabajo se enfoca en la elaboración de una propuesta de gestión del mantenimiento para una máquina cortadora láser en el área metalmecánica, considerando su impacto dentro del proceso de corte metálico. Si bien el análisis se centra en la incorporación de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, la propuesta no se limita únicamente al equipo, sino que considera los elementos necesarios para fortalecer la gestión del mantenimiento del proceso, tales como planificación preventiva, documentación técnica, registros, órdenes de trabajo, análisis de fallas, indicadores de desempeño y mejora continua.

El alcance del trabajo comprende el diagnóstico de la situación actual del proceso de corte metálico, el análisis de las principales limitaciones de la máquina punzonadora TRUMPF Trumatic 2020R, la justificación técnica de la renovación tecnológica y la elaboración de herramientas documentales para la gestión del mantenimiento del nuevo sistema de corte láser.

Desde el punto de vista metodológico, el desarrollo del trabajo se organiza en tres etapas. En primer lugar, se realiza un diagnóstico técnico, operativo y económico del proceso actual, considerando indicadores de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, costos de mantenimiento, externalización productiva, obsolescencia tecnológica y seguridad operacional. En segundo lugar, se elabora la documentación técnica y administrativa necesaria para la gestión del mantenimiento, incluyendo plan preventivo, checklist, rutinas, instructivos, registros, orden de trabajo y análisis FMECA. Finalmente, se definen indicadores clave de desempeño que permitan controlar el comportamiento futuro del equipo y apoyar la toma de decisiones dentro del área.

La metodología utilizada corresponde a un enfoque aplicado de tipo técnico-descriptivo, basado en el análisis de información operacional, registros internos de mantenimiento, antecedentes técnicos del fabricante y criterios normativos asociados a gestión de activos, confiabilidad y mantenimiento industrial. Para ello, se consideran como referencia las normas ISO 55000, ISO 14224, ISO 17359 e ISO 60812, las cuales permiten estructurar la propuesta desde una perspectiva de ciclo de vida, trazabilidad, análisis de fallas y control del desempeño.

De esta forma, el trabajo busca entregar una propuesta aplicable a la empresa, orientada a ordenar la gestión del mantenimiento del sistema de corte láser y generar una base técnica que permita planificar, ejecutar, registrar, controlar y mejorar las actividades de mantenimiento durante la operación del activo.

Capítulo 1 Análisis de la situación actual y diagnóstico del proceso de corte metálico.

El presente capítulo tiene como propósito analizar la situación actual del proceso de corte metálico del área metalmecánica, considerando el desempeño técnico, operativo, económico y de seguridad asociado a la máquina punzonadora TRUMPF Trumatic 2020R. Este diagnóstico permite identificar las principales brechas existentes en la operación y mantenimiento del equipo, así como su impacto en la continuidad productiva del área.

El análisis se desarrolla a partir de antecedentes internos de mantenimiento, registros de paradas no programadas, datos de disponibilidad, costos asociados a mantenimiento correctivo y externalización, además de antecedentes de seguridad ocupacional relacionados con la exposición a ruido. Estos elementos permiten fundamentar la necesidad de renovar la tecnología de corte y, al mismo tiempo, establecer la base para la elaboración de una propuesta de gestión del mantenimiento aplicable al nuevo sistema de corte láser.

De esta manera, el capítulo no se limita a describir las condiciones de una máquina específica, sino que busca relacionar el estado actual del activo con el desempeño del proceso de corte metálico, la gestión de activos físicos y la necesidad de contar con información confiable para la toma de decisiones

1.1 Contexto de la empresa.

La organización objeto de estudio pertenece al sector eléctrico-industrial y se especializa en la fabricación e integración de salas eléctricas modulares orientadas principalmente a la gran minería, el sector energético y proyectos de infraestructura. Estos clientes requieren altos niveles de calidad, seguridad, confiabilidad y continuidad operacional, debido a que sus instalaciones forman parte de procesos productivos críticos.

Dentro de esta cadena de valor, el área metalmecánica cumple un rol relevante, ya que es responsable de fabricar estructuras metálicas, tableros y componentes base utilizados en

la construcción de salas eléctricas. Esta área permite reducir la dependencia de proveedores externos, mejorar los tiempos de respuesta y mantener mayor control sobre la trazabilidad del proceso de fabricación.

La planta opera bajo un régimen de tres turnos diarios de ocho horas, alcanzando una disponibilidad calendario aproximada de 8.760 horas anuales. El área metalmecánica cuenta con una dotación aproximada de 35 trabajadores, distribuidos en actividades de corte, doblado, soldadura y ensamblaje, además del personal técnico de mantenimiento y supervisión que brinda soporte a la operación.

El proceso de corte metálico tiene un impacto directo en la continuidad productiva, debido a que corresponde a una de las primeras etapas en la fabricación de los componentes estructurales. Por esta razón, cualquier falla, detención o indisponibilidad en esta etapa puede generar retrasos en la producción, aumento de costos, reprocesos y necesidad de externalizar trabajos de corte.

La información presentada en este capítulo se basa en antecedentes internos del área metalmecánica, registros de mantenimiento del año 2024 y observación directa de las condiciones operativas. Estos antecedentes permiten contextualizar la criticidad del proceso de corte y justificar la necesidad de fortalecer la gestión del mantenimiento mediante una propuesta más estructurada y trazable.

1.2 Descripción del proceso de corte metálico actual.

El proceso de corte metálico del área metalmecánica se realiza actualmente mediante una máquina punzonadora TRUMPF Trumatic 2020R. Este proceso consiste en la generación de perforaciones, ranuras y cortes sobre láminas metálicas mediante la acción mecánica de punzones, los cuales deforman y separan el material según el diseño requerido para cada componente.

La máquina permite trabajar principalmente con planchas de acero galvanizado, acero inoxidable y aluminio, materiales utilizados en la fabricación de estructuras, tableros y componentes asociados a las salas eléctricas. Sus características técnicas permiten procesar formatos estándar de planchas metálicas, con una fuerza de punzonado de 180 kN y una capacidad máxima aproximada de 6,4 mm de espesor. Además, cuenta con una torreta rotativa de 19 estaciones, lo que entrega flexibilidad para realizar diferentes geometrías de corte y perforación.

El proceso general de fabricación comienza con la preparación del archivo de corte, continúa con la carga de la plancha metálica, el posicionamiento del material, la ejecución del punzonado y finalmente la descarga e inspección de las piezas obtenidas. Este flujo se representa en la Ilustración 1, donde se muestra de forma esquemática la secuencia principal del proceso de corte metálico actual. A pesar de que la TRUMPF Trumatic 2020R ha permitido mantener la producción del área durante varios años, el proceso presenta limitaciones frente a tecnologías más modernas, como el corte láser. Entre las principales diferencias se encuentran los tiempos de preparación, la necesidad de cambio de herramientas, la generación de rebabas, el nivel de ruido, la merma de material y la dependencia de componentes mecánicos sujetos a desgaste. En la Tabla 1.1 se resumen algunas variables críticas observadas durante la operación del equipo, tales como nivel de ruido, tiempo de ciclo, merma de material y calidad superficial. Estas variables permiten visualizar los principales aspectos que afectan el desempeño del proceso y que deben ser considerados dentro del diagnóstico técnico del área.

Tabla de variables Críticas

Variable crítica	Descripción técnica	Valor observado/ Referencial	Unidad	Observación
Nivel de ruido	Intensidad sonora promedio durante el proceso de punzonado hidráulico.	90 – 94	dB (A)	Excede límite DS 594/1999
Tiempo de ciclo	Tiempo promedio entre inicio y fin de punzonado por pieza.	3 – 4	min/pza	Variable según espesor y diseño
Merma de material	Porcentaje de residuos metálicos generado respecto al total procesado.	4 - 6	%	Requiere optimización del diseño de punzonado
Calidad superficial	Presencia de rebabas o deformaciones en bordes de corte.	-	-	Requiere repaso o desbarbado posterior

Tabla 1. Variables Críticas del proceso de punzonado.

Fuente: Elaboración propia a partir de observaciones operativas (2024).

Esquema de proceso



Ilustración 1 Esquema de proceso.

Fuente: Elaboración propia.

1.3 Ventajas de Trumatic 2020R

La máquina TRUMPF Trumatic 2020R ha sido un activo relevante dentro del proceso de corte metálico del área metalmecánica, debido a que permitió durante varios años fabricar piezas y componentes necesarios para la construcción de salas eléctricas. Su incorporación representó, en su momento, una solución adecuada para el trabajo con planchas metálicas estándar y para la ejecución de perforaciones, ranuras y cortes mediante punzonado.

Entre sus principales ventajas técnicas se encuentra su capacidad de punzonado de 180 kN, lo que permite trabajar con distintos tipos de materiales metálicos dentro de los espesores definidos por el fabricante. Además, su mesa de trabajo y recorrido útil entregan flexibilidad para procesar planchas de dimensiones habituales en la industria metalmecánica.

Otro aspecto favorable corresponde a su torreta rotativa de 19 estaciones, la cual permite disponer de diferentes herramientas de punzonado para ejecutar geometrías variadas. Esto entrega versatilidad al proceso, especialmente en piezas que requieren perforaciones repetitivas o configuraciones específicas. Asimismo, el sistema SheetMaster de carga y descarga automática de láminas permite reducir la manipulación manual del material, disminuyendo tiempos auxiliares y mejorando las condiciones de seguridad del operador durante la operación normal del equipo.

No obstante, aunque estas características fueron favorables para la operación del área, actualmente deben ser evaluadas en conjunto con las limitaciones del equipo, su antigüedad, disponibilidad real, costos de mantenimiento y restricciones tecnológicas. Por esta razón, el análisis de sus ventajas permite contextualizar el desempeño histórico de la máquina, pero no elimina la necesidad de revisar su continuidad operacional frente a las exigencias actuales del proceso.

1.4 Limitaciones

A continuación, se exponen las principales limitaciones técnicas y operativas identificadas en la máquina TRUMPF Trumatic 2020R, las cuales afectan su confiabilidad, disponibilidad y eficiencia dentro del proceso productivo.

A pesar de las ventajas operativas descritas, la máquina TRUMPF Trumatic 2020R presenta actualmente una serie de limitaciones técnicas, operativas y de mantenimiento que afectan su desempeño dentro del proceso de corte metálico. Estas limitaciones se relacionan principalmente con la antigüedad del equipo, la obsolescencia de sus sistemas de control, la disponibilidad de repuestos, los tiempos de reparación y las condiciones de seguridad asociadas a su operación.

Una de las principales restricciones corresponde a su antigüedad, considerando que se trata de un equipo fabricado en el año 2003. Esto implica más de dos décadas desde su fabricación, periodo en el cual sus componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos han estado expuestos a desgaste, pérdida de precisión y mayores requerimientos de mantenimiento.

El sistema de control CNC Bosch Type 3 corresponde a una generación tecnológica anterior, lo que limita las posibilidades de actualización, compatibilidad con nuevos sistemas y soporte técnico especializado. Esta condición impacta directamente en la mantenibilidad del equipo, debido a que las fallas asociadas al control electrónico pueden requerir diagnósticos más extensos, repuestos específicos o soluciones de reacondicionamiento.

Otra limitación relevante corresponde a la dificultad para obtener repuestos originales. Al tratarse de un equipo con varios años de operación, algunos componentes presentan menor disponibilidad comercial o requieren importación, lo que aumenta los tiempos de

espera y prolonga las detenciones no programadas. Esta situación incrementa el MTTR y afecta la disponibilidad operacional del proceso.

El uso intensivo acumulado también constituye un factor de análisis. Las horas de producción reportadas, cercanas a 40.000 horas, evidencian un nivel importante de utilización del activo. Esta condición puede afectar la precisión del punzonado, las tolerancias de fabricación, la rigidez estructural y el estado de componentes sometidos a esfuerzos repetitivos.

Desde el punto de vista productivo, la capacidad máxima de espesor, aproximada a 6,4 mm para acero, restringe la fabricación de piezas de mayor espesor o componentes estructurales que podrían requerir tecnologías de corte más flexibles. Además, el proceso de punzonado puede generar rebabas o deformaciones en los bordes, lo que aumenta la necesidad de repaso manual o reprocesos.

En materia de seguridad ocupacional, el nivel sonoro medido durante la operación supera los 90 dB(A), condición que representa un riesgo para el personal expuesto y exige medidas de control conforme a la normativa vigente. Este aspecto no solo afecta la seguridad del operador, sino también las condiciones generales del entorno de trabajo.

En síntesis, la TRUMPF Trumatic 2020R fue un equipo competitivo y funcional durante gran parte de su vida útil; sin embargo, sus limitaciones actuales afectan la confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y seguridad del proceso. Estas condiciones justifican la necesidad de evaluar una renovación tecnológica y, al mismo tiempo, establecer una propuesta de gestión del mantenimiento que permita controlar de manera más efectiva el desempeño del nuevo activo.

Datos técnicos de la máquina Trumpf Trumatic 2020R.

Para complementar la descripción del proceso actual, en la Tabla 2 se presentan los principales datos técnicos de la máquina TRUMPF Trumatic 2020R utilizada en el área metalmecánica. Estos antecedentes permiten contextualizar sus capacidades de operación, dimensiones, sistema de control y condiciones generales de trabajo.

Parámetro	Valor
Marca	TRUMPF
Modelo	TRUMATIC 2020R
Año de fabricación	2003
Horas de producción reportadas	40.000 hrs Aprox.
Fuerza de punzonado	180 KN
Espesor máximo de chapa trabajable	6,4 mm.
Área de trabajo	2500 x 1250 mm en X - Y
Número de estaciones de herramientas	19 estaciones
Sistema de control CNC	Bosch Type 3 / Trumatic/ Bosch Tipo 3
Dimensiones de la maquina	Ancho 7400 mm/ Profundidad 6400 mm/ Altura 2600 mm.
Peso aproximado	15.000 kg.
Adicionales/Equipamientos	Incluye SheetMaster (sistema de carga/descarga automática de láminas)

Tabla 2. Datos técnicos maquina cortadora TRUMPF Trumatic 2020R.

Fuente: TRUMPF TC 2020R Student Manual.

Los antecedentes presentados en la Tabla 1.2 muestran que la TRUMPF Trumatic 2020R posee características adecuadas para procesos de punzonado industrial; sin embargo, también evidencian que se trata de un equipo con una antigüedad considerable, fabricado en el año 2003 y con un sistema de control CNC de generación anterior. Esta condición refuerza la necesidad de analizar su desempeño real mediante indicadores de mantenimiento, costos asociados y disponibilidad operacional.

1.5 Datos de disponibilidad y confiabilidad.

La disponibilidad y la confiabilidad son indicadores fundamentales para evaluar el desempeño de un activo físico dentro de un proceso productivo. En el caso del proceso de corte metálico, estos indicadores permiten determinar si la máquina cumple de manera continua la función requerida y si sus tiempos de detención afectan la continuidad operacional del área.

Para este análisis se utilizaron registros internos de mantenimiento correspondientes al año 2024, considerando las paradas no programadas, tiempos de reparación y horas de operación asociadas a la máquina TRUMPF Trumatic 2020R. El detalle de los eventos de falla considerados para este cálculo se presenta en el **Anexo A**, correspondiente al registro de paradas no programadas.

El tratamiento de estos datos se realizó tomando como referencia la norma ISO 14224:2016, la cual establece criterios para recopilar, clasificar y estructurar información de confiabilidad y mantenimiento en activos industriales. Bajo este enfoque, el MTBF se utiliza como indicador de confiabilidad, ya que representa el tiempo promedio de operación entre fallas. Por otra parte, el MTTR se utiliza como indicador de mantenibilidad, debido a que representa el tiempo promedio requerido para restituir el equipo a una condición operativa luego de una falla.

Para el periodo analizado, se obtuvieron los siguientes indicadores generales:

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Tiempo total de reparacio\'n}}{\text{Nú mero de fallas}}$$

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Tiempo total de reparacio\'n}}{\text{Nú mero de fallas}}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo total del periodo}} \times 100$$

Tabla de indicadores durante año 2024

Periodo observado (Año 2024)	MTBF	MTTR	Disponibilidad	Tasa de falla
8760 hrs	170.13	73,2	69,92%	0.00588

Tabla 3. Indicadores generales de mantenimiento de la TRUMPF Trumatic 2020R.

Fuente: Elaboración propia.

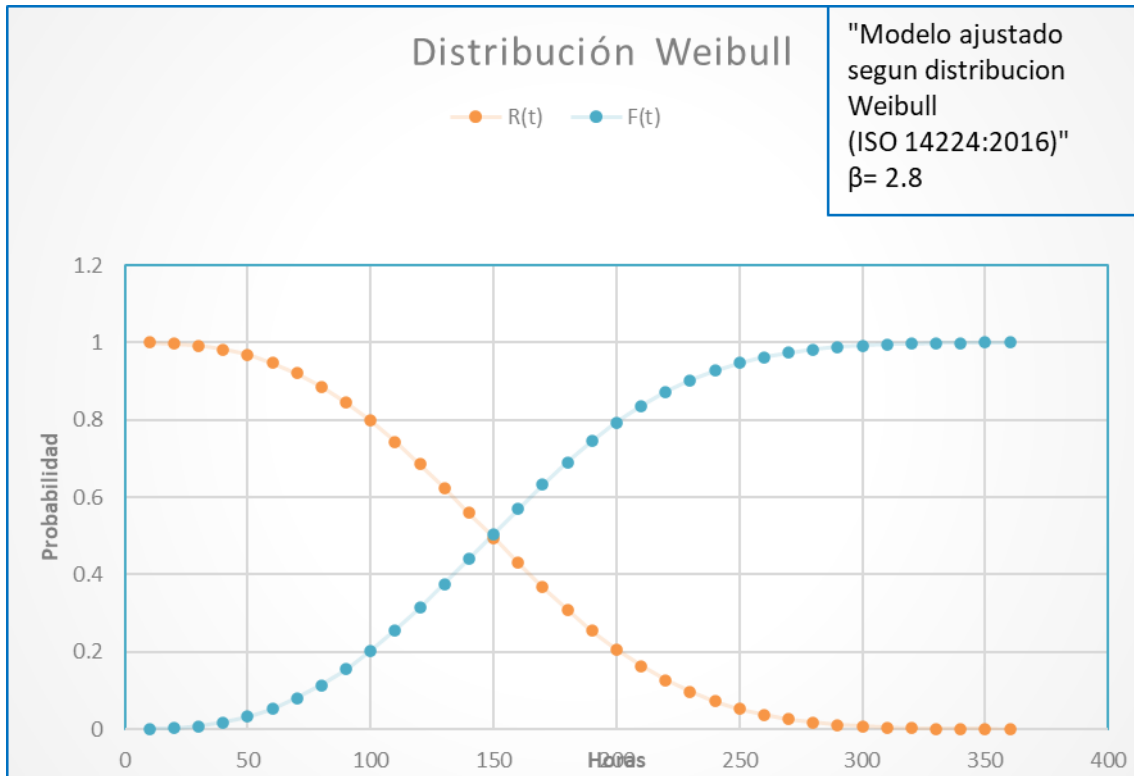
De acuerdo con la Tabla 3, la máquina presenta un MTBF de 170,13 horas y un MTTR de 73,2 horas. Estos valores reflejan una baja frecuencia promedio entre fallas y tiempos de reparación elevados para un equipo que participa en una etapa crítica del proceso productivo. La disponibilidad operacional calculada para el periodo fue de 69,92 %, lo que implica que aproximadamente un 30,08% del tiempo disponible se vio afectado por detenciones, reparaciones o condiciones asociadas a indisponibilidad del equipo.

Modelo ajustado según distribución Weibull (ISO 14224:2016)

En el Gráfico 1.1 se presentan las curvas de confiabilidad $R(t)$ y probabilidad acumulada de falla $F(t)$ del equipo TRUMPF Trumatic 2020R, ajustadas mediante una distribución Weibull. Este análisis permite representar el comportamiento de falla del activo en función del tiempo y complementar los indicadores de confiabilidad obtenidos a partir de los registros internos de mantenimiento.

El parámetro de forma obtenido corresponde a $\beta = 2,8$, lo que indica una tendencia creciente de la tasa de falla. Este comportamiento es característico de equipos que se encuentran en una etapa de desgaste o envejecimiento operacional, donde las fallas tienden a aumentar con el tiempo debido al deterioro de componentes mecánicos, eléctricos o electrónicos. Esta interpretación es coherente con la condición actual de la TRUMPF Trumatic 2020R, considerando su antigüedad, las horas acumuladas de operación, la obsolescencia del sistema CNC y la dificultad para obtener repuestos originales. En consecuencia, el análisis Weibull refuerza el diagnóstico técnico del equipo y respalda la necesidad de evaluar una renovación tecnológica dentro del proceso de corte metálico.

El uso de este modelo se considera como una herramienta complementaria al análisis de confiabilidad y mantenimiento, desarrollado bajo los criterios de recopilación y estructuración de datos establecidos por la norma ISO 14224:2016. El detalle de las paradas no programadas utilizadas como base del análisis se presenta en el **Anexo A**.



Gráficos 1 Distribución Weibull.

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los indicadores MTBF, MTTR, disponibilidad operacional y el comportamiento observado mediante distribución Weibull permiten concluir que la máquina TRUMPF Trumatic 2020R presenta una condición operacional desfavorable. Esta situación afecta la continuidad del proceso de corte metálico y justifica la necesidad de incorporar una tecnología más confiable, acompañada de una gestión del mantenimiento estructurada, documentada y orientada al ciclo de vida del activo.

1.6 Costos asociados a detenciones no programadas y externalización.

Las detenciones no programadas de la máquina TRUMPF Trumatic 2020R generan un impacto económico directo en el área metalmecánica, debido a los costos asociados a mantenimiento correctivo, compra de repuestos, servicios técnicos especializados y externalización de trabajos de corte. Estos costos afectan la continuidad del proceso productivo y reducen la eficiencia operacional del área.

Durante el año 2024, las principales fallas registradas estuvieron asociadas a desalineación de torreta, errores del sistema de control CNC y fallas en sensores de fin de carrera. El detalle de las paradas no programadas utilizadas como base del análisis se presenta en el Anexo A. A partir de estos eventos, se estimaron los costos directos de

mantenimiento correctivo, considerando horas técnicas, repuestos y servicios requeridos para restituir la operación del equipo.

En la **Tabla 4** se presentan los costos asociados a las intervenciones correctivas registradas durante el período analizado. Estos antecedentes permiten identificar el impacto económico directo de las fallas recurrentes y su relación con la condición técnica actual del equipo.

Costos de reparacion paradas no programadas

N	Fecha	TTR	Causa	Hrs TEC.	Costo hora (UF)	Total, Costo por hora	Repuestos	Costo Repuestos	Total, Servicios
1	5/6/2024	95	Desalineación torreta	8	39,485	315,880	N/A	0	315,880
2	9/6/2024	71	Error control CNC	7	39,485	276,395	N/A	0	276,395
4	26/6/2024	74.1	Sensor fin de carrera fallando	10	39,485	394,850	Sensor	76,000	470,850
5	8/7/2024	119	Desalineación torreta	8	39,485	315,880	Cilindros Hidráulicos	800,000	1,115,880
6	26/7/2024	71	Sensor fin de carrera fallando	10	39,485	394,850	Sensor	76,000	470,850
7	29/7/2024	71	Error control CNC	16	39,485	631,760	Tarjeta Control board	2,650,000	3,281,760
8	1/8/2024	103	Error control CNC	8	39,485	315,880	N/A	0	315,880
9	13/8/2024	95	Sensor fin de carrera fallando	8	39,485	315,880	N/A	0	315,880
10	7/10/2024	55.2	Desalineación torreta	32	39,485	1,263,520	N/A	0	1,263,520
11	18/10/2024	40.7	Error control CNC	8	39,485	315,880	N/A	0	315,880
12	23/10/2024	107	Error control CNC	8	39,485	315,880	N/A	0	315,880
13	12/11/2024	68.2	Sensor fin de carrera fallando	8	39,485	315,880	Sensor	76,000	391,880
14	12/12/2024	67.7	Error control CNC	16	39,485	631,760	N/A	0	631,760
Total								3,678,000	9,482,295

Tabla 4. Costos de mantenimiento correctivo asociado a paradas no programadas.

Fuente: Área de Mantenimiento.

De acuerdo con la Tabla 4, el costo total asociado a mantenimiento correctivo durante el año 2024 fue de aproximadamente \$9.482.295 CLP. Este monto considera principalmente horas de servicio técnico y repuestos utilizados en las reparaciones. Si bien este valor representa el costo directo de intervención, no refleja completamente el impacto económico de la indisponibilidad, ya que durante los periodos de detención también se generan retrasos productivos y necesidad de recurrir a servicios externos de corte.

Cuando la punzonadora no se encuentra disponible, el área debe recurrir a servicios externos para mantener la continuidad de la producción. Para este análisis se consideró un costo referencial de \$21.000 CLP por plancha procesada, correspondiente a servicios externos de corte utilizados cuando la máquina se encuentra fuera de servicio. Esta aclaración es importante, ya que el costo se considera por unidad procesada y no por hora de trabajo.

Durante el periodo analizado, se estimó una externalización promedio de 125 planchas mensuales asociadas a la indisponibilidad del equipo. Considerando el costo unitario indicado, el costo mensual aproximado por externalización corresponde a:

$$125 \text{ planchas/mes} \times 21.000 \text{ CLP/Plancha} = 2.625.000 \text{ CLP/mes}$$

$$2.625.000 \text{ CLP/mes} \times 12 \text{ meses} = 31.500.000 \text{ CLP/año}$$

Sin embargo, para efectos del análisis anual considerado por el área, se tomó como referencia un costo acumulado aproximado de \$31.500.000 CLP, asociado a servicios externos de corte durante el año 2024. Este valor considera los periodos en que fue necesario derivar trabajos fuera de la planta debido a la indisponibilidad de la punzonadora.

En la Tabla 5 se presenta el resumen de los costos asociados a mantenimiento correctivo y externalización productiva durante el año 2024.

Resumen costos de reparación y externalización

Costos parados no programadas	
Costos Producción aprox.	31,500,000
Costo mantenimiento aprox.	9,482,295
Total	40,982,295

Tabla 5 Resumen costos de reparación y externalización año 2024.

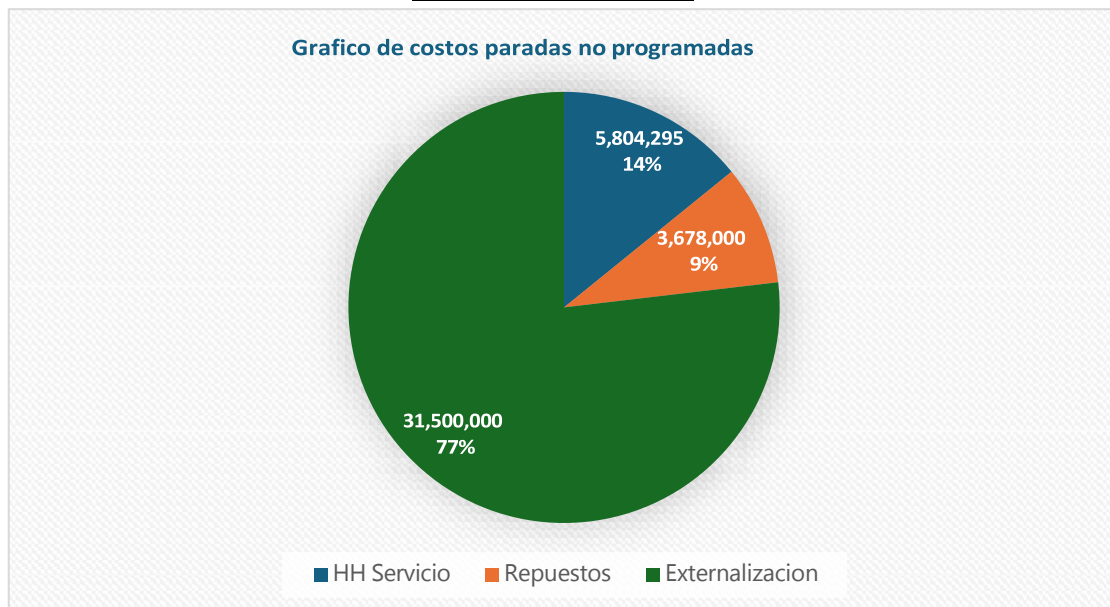
Fuente: Área de Mantenimiento y producción.

De acuerdo con la Tabla 5, el costo total estimado por detenciones no programadas y externalización productiva alcanza aproximadamente \$40.982.295 CLP durante el año 2024. Del total, el mayor impacto corresponde a la externalización de servicios de corte, equivalente a \$31.500.000 CLP, mientras que el mantenimiento correctivo representa aproximadamente \$9.482.295 CLP.

El Gráfico 1.2 permite visualizar la distribución porcentual de estos costos, donde la externalización representa la mayor proporción del gasto asociado a la indisponibilidad

del equipo. Esto demuestra que el efecto económico de las fallas no se limita al costo de reparación, sino que también afecta la planificación productiva, los tiempos de entrega y la capacidad interna del área metalmecánica.

Gráfico de Costos



Gráficos 2. Gráfico de costos

Fuente: Elaboración Propia.

En consecuencia, los costos asociados a detenciones no programadas constituyen un argumento relevante para justificar la renovación tecnológica y la elaboración de una propuesta de gestión del mantenimiento más estructurada. La implementación de un nuevo sistema de corte láser, acompañado de planificación preventiva, registros de mantenimiento, control de fallas e indicadores de desempeño, permitirá reducir la dependencia de intervenciones correctivas y entregar mayor control sobre los costos del proceso.

1.7 Riesgos de seguridad y salud ocupacional.

La seguridad y salud ocupacional constituye un aspecto relevante dentro del diagnóstico del proceso de corte metálico, debido a que las condiciones de operación de la máquina TRUMPF Trumatic 2020R exponen al personal a riesgos asociados principalmente al ruido, manipulación de planchas metálicas, partes móviles y tareas de ajuste o mantenimiento. Uno de los riesgos más significativos identificados corresponde

al nivel de ruido generado durante el proceso de punzonado. De acuerdo con antecedentes de medición asociados al área de trabajo, la máquina registra niveles superiores a 90 dB(A) durante su operación, condición que exige el uso permanente de protección auditiva y la aplicación de medidas de control conforme a la normativa vigente.

Esta condición no solo afecta la salud del operador, sino que también incide en el ambiente general de trabajo del área metalmecánica. La exposición continua a niveles elevados de ruido puede generar fatiga, disminución de la concentración, aumento del riesgo de errores operativos y, en el largo plazo, pérdida auditiva inducida por ruido.

Desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento, estas condiciones deben considerarse dentro del análisis del activo, ya que los riesgos operacionales también forman parte del desempeño global del equipo. Por esta razón, la evaluación de seguridad no se analiza de manera aislada, sino como un factor que influye en la decisión de renovar la tecnología de corte y mejorar las condiciones de operación del proceso.

1.7.1 Efectos del ruido en la salud.

La exposición prolongada a niveles de ruido elevados puede generar efectos negativos en la salud de los trabajadores, especialmente cuando la exposición se mantiene durante jornadas completas o se repite de forma continua en el tiempo. Entre los principales efectos se encuentran:

- Pérdida auditiva por ruido excesivo (PAIR): un daño irreversible en las células del oído interno, lo que podría provocar una disminución en la capacidad auditiva.
- Fatiga laboral y disminución del rendimiento: el ruido constante interfiere en la concentración y aumenta las probabilidades de errores en las tareas diarias.
- Estrés fisiológico: el ruido intenso no solo molesta, también activa los mecanismos de respuesta del organismo, incrementando la presión arterial, la frecuencia cardíaca y el riesgo de enfermedades cardiovasculares.

1.7.2 Requerimientos normativos.

La evaluación del ruido ocupacional debe considerar los límites permisibles establecidos por la normativa vigente y las referencias técnicas aplicables. En Chile, el Decreto Supremo N.º 594 del Ministerio de Salud establece condiciones sanitarias y

ambientales básicas en los lugares de trabajo, incluyendo límites de exposición ocupacional a ruido.

Asimismo, normas como ISO 1999 e ISO 9612 entregan criterios técnicos para estimar la exposición al ruido y sus efectos sobre la salud auditiva. Estas referencias permiten orientar la evaluación de las condiciones de trabajo y definir medidas preventivas para reducir el riesgo de daño auditivo en el personal expuesto. En el caso del proceso de punzonado analizado, los niveles medidos sobrepasan los 85 dB(A), valor utilizado como referencia para establecer controles de exposición ocupacional. Por lo tanto, se requiere mantener medidas preventivas como protección auditiva, señalización, control de exposición y evaluación periódica del ambiente de trabajo.

1.7.3 Consecuencias de la falta de control auditivo.

La ausencia de medidas preventivas no solo afecta a la salud auditiva y general de los trabajadores, si no también puede derivar en:

- Aumento de licencias médicas y ausentismo laboral.
- Reducción de la productividad y calidad del trabajo.
- Responsabilidad legal y sanciones para la empresa por incumplimiento de la normativa en seguridad y salud ocupacional.

1.7.4 Evaluación de exposición al ruido.

Durante el primer semestre del año 2024, se efectúa una medición de presión sonora en el área de punzonado, con el objetivo de verificar el cumplimiento de los límites establecidos por la legislación chilena, las mediciones fueron realizadas utilizando un sonómetro integrador Larson Davis LXT tipo 1, calibrado según IEC 61672-1, con registro continuo de 30 minutos por ciclo operativo de máquina. Considerando la zona frontal del troquel, el área lateral del operador y el ambiente general del taller.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos durante la evaluación de ruido, indicando el nivel promedio en dB(A), el nivel pico en dB(C) y las principales observaciones asociadas a cada punto de medición.

Evaluación de exposición a ruido

Fecha de medición	Ubicación	Nivel promedio dB(A)	Nivel pico dB (C)	Observaciones
12/04/2024	Frente a la zona de troquel	92,4	118	Exposición directa durante ciclo de punzonado
12/04/2024	Área lateral operador	88,7	112	Exposición intermitente
12/04/2024	Área general del taller	83,1	106	Ruido de fondo durante operación mixta

Tabla 6. Tabla de evaluación de ruido.

Fuente: (Mediciones internas, 2024, Equipo Larson Davis LxT; calibrador CAL200; certificado ACHS).

1.8 Obsolescencia Tecnológica.

La obsolescencia tecnológica de la máquina TRUMPF Trumatic 2020R constituye una de las principales restricciones para asegurar la continuidad operacional del proceso de corte metálico. Esta condición se relaciona principalmente con la antigüedad del equipo, la discontinuidad de algunos componentes, la limitada disponibilidad de repuestos originales y la dificultad para acceder a soporte técnico especializado. Uno de los elementos más relevantes corresponde al sistema de control CNC Bosch Type 3, el cual pertenece a una generación tecnológica anterior. Debido a esto, existen limitaciones para realizar actualizaciones de software, integrar nuevas funcionalidades o asegurar compatibilidad con sistemas actuales de diagnóstico y control. Esta situación incrementa la complejidad de las intervenciones correctivas y aumenta los tiempos de reparación cuando se presentan fallas asociadas al sistema de control.

Además, la baja disponibilidad de repuestos originales obliga, en algunos casos, a buscar componentes reacondicionados, alternativas equivalentes o soluciones de adaptación. Si bien estas acciones permiten mantener temporalmente la operación del equipo, también

generan mayor incertidumbre técnica, aumentan los tiempos de espera y dificultan la planificación del mantenimiento.

Desde el punto de vista de la gestión de activos, la obsolescencia tecnológica debe ser analizada como parte del ciclo de vida del equipo. Un activo industrial no solo pierde desempeño por desgaste físico, sino también por la reducción del soporte del fabricante, la falta de compatibilidad tecnológica y el aumento de los costos asociados a su conservación. En este sentido, la TRUMPF Trumatic 2020R se encuentra en una etapa donde su continuidad operacional requiere mayores recursos técnicos y económicos.

Por lo anterior, la obsolescencia tecnológica no solo representa una limitación del equipo, sino también una brecha para la gestión del mantenimiento. Esta condición refuerza la necesidad de renovar la tecnología de corte y de elaborar una propuesta de mantenimiento que considere planificación, control documental, trazabilidad de fallas, gestión de repuestos e indicadores de desempeño.

1.8.1 Etapa del ciclo de vida tecnológico

El ciclo de vida de un activo industrial está determinado por su desempeño técnico, la disponibilidad de soporte del fabricante, la condición de sus componentes y la evolución tecnológica del mercado. En el caso de la TRUMPF Trumatic 2020R, se trata de un equipo fabricado en el año 2003, por lo que actualmente presenta más de dos décadas desde su fabricación. Considerando su antigüedad, las horas acumuladas de operación y las fallas registradas durante el año 2024, el equipo puede ubicarse en una etapa avanzada de su ciclo de vida. Esta fase se caracteriza por mayores requerimientos de mantenimiento, aumento de la frecuencia de fallas, dificultad para acceder a repuestos y reducción progresiva de la confiabilidad operacional.

El comportamiento observado mediante el análisis de confiabilidad, junto con el parámetro de forma de Weibull $\beta = 2,8$, indica una tendencia creciente de la tasa de falla. Esta condición es coherente con un activo que presenta desgaste, envejecimiento de componentes y limitaciones tecnológicas asociadas a su sistema de control y componentes críticos. En este contexto, la máquina ya no debe analizarse únicamente como un equipo operativo, sino como un activo que se encuentra en una etapa donde las decisiones de mantenimiento deben considerar criterios de ciclo de vida, costo, riesgo y continuidad operacional.

1.8.2 Implicaciones para la gestión del mantenimiento.

En esta etapa del ciclo de vida de la máquina punzonadora, los costos de reparación y la falta de soporte técnico especializado limitan la viabilidad del mantenimiento correctivo tradicional.

Por ello, resulta necesario planificar una estrategia de transición tecnológica orientada a:

- Reducir la dependencia de componentes electrónicos discontinuados.
- Implementar una gestión basada en el ciclo de vida.
- Incorporar criterios de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) y mantenimiento predictivo conforme a la ISO 17359

1.9 Justificación de la renovación.

La renovación de la máquina TRUMPF Trumatic 2020R por una tecnología de corte láser se justifica a partir de los antecedentes técnicos, económicos y de seguridad analizados en el diagnóstico. El equipo actual presenta baja disponibilidad operacional, altos tiempos de reparación, obsolescencia tecnológica, dificultad para obtener repuestos y costos asociados a mantenimiento correctivo y externalización productiva. Desde el enfoque de gestión de activos, esta situación se relaciona con los principios establecidos en la ISO 55000, ya que la decisión de renovar un activo debe considerar su desempeño, riesgo, costo y valor durante el ciclo de vida. En este caso, mantener en operación un equipo con baja confiabilidad y altos tiempos de indisponibilidad representa un riesgo para la continuidad del proceso de corte metálico.

Además, la máquina punzonadora cumple una función crítica dentro del área metalmecánica, debido a que su indisponibilidad afecta directamente las etapas posteriores de fabricación, como doblado, soldadura, armado y ensamblaje. Por esta razón, la renovación tecnológica no se considera únicamente como un cambio de equipo, sino como una acción orientada a mejorar la continuidad operacional, reducir riesgos y fortalecer la gestión del mantenimiento.

La incorporación de una máquina de corte láser TRUMPF TruLaser Serie 1000 permitirá mejorar la precisión del corte, reducir tiempos de preparación, disminuir reprocesos, optimizar el uso del material y mejorar las condiciones de seguridad operacional. Esta renovación debe estar acompañada de una gestión del mantenimiento estructurada,

basada en planificación preventiva, registros, trazabilidad, análisis de fallas e indicadores de desempeño, conforme a los criterios de gestión de datos de mantenimiento establecidos por la ISO 14224 y al enfoque de mantenimiento basado en condición indicado por la ISO 17359.

1.9.1 Técnico-Económica.

Desde el punto de vista técnico-económico, el cambio hacia tecnología de corte láser busca reducir las detenciones no programadas, disminuir los costos correctivos y limitar la dependencia de servicios externos de corte. Durante el año 2024, los costos asociados a mantenimiento correctivo y externalización productiva representaron un impacto relevante para el área, lo que refuerza la necesidad de mejorar la confiabilidad del proceso.

Entre los principales beneficios esperados se consideran:

- Reducción de tiempos de preparación y cambio de herramientas.
- Mayor flexibilidad para fabricar piezas con geometrías complejas.
- Mejor calidad de corte y menor necesidad de reprocesos.
- Mejor aprovechamiento del material.
- Disminución de costos asociados a fallas y reparaciones.
- Menor dependencia de externalización productiva.
- Mejora esperada en disponibilidad, rendimiento y calidad del proceso.

Esta justificación se relaciona con la **ISO 55000**, ya que la renovación permite evaluar el activo desde una perspectiva de ciclo de vida, considerando no solo el costo de adquisición, sino también los costos de operación, mantenimiento, riesgo e indisponibilidad.

1.9.2 Seguridad y salud ocupacional.

Desde el punto de vista de seguridad y salud ocupacional, la renovación tecnológica permite reducir riesgos presentes en el proceso actual de punzonado. Uno de los aspectos más relevantes corresponde al nivel de ruido, ya que la TRUMPF Trumatic 2020R presenta valores superiores a 90 dB(A), condición que exige controles permanentes para proteger al personal expuesto. Esta evaluación se relaciona con los lineamientos de la ISO 45001, orientada a la gestión de seguridad y salud en el trabajo, y con normas técnicas como ISO 1999 e ISO 9612, utilizadas como referencia para la evaluación de exposición ocupacional al ruido. Asimismo, la seguridad en máquinas de procesamiento láser debe considerar criterios asociados a la ISO 11553-1 y a la IEC 60825-1, especialmente por los riesgos derivados de la radiación láser y la operación del equipo. La tecnología de corte láser incorpora cabina cerrada, sistemas de enclavamiento y operación mediante interfaz HMI, lo que permite disminuir la exposición directa del operador a fuentes de riesgo. Además, al no requerir punzones ni ajustes mecánicos frecuentes, se reducen actividades manuales que pueden generar golpes, cortes o atrapamientos.

En consecuencia, la renovación tecnológica contribuye tanto a mejorar el desempeño productivo como a fortalecer las condiciones de seguridad del área metalmecánica.

1.9.3 Criterios generales de implementación

Para que la incorporación de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000 sea efectiva, se deben considerar criterios de implementación asociados a instalación, puesta en marcha, operación segura y mantenimiento futuro. Estos aspectos permiten asegurar que el nuevo equipo no solo sea incorporado al proceso productivo, sino que también pueda ser gestionado de forma ordenada desde el inicio de su ciclo de vida.

Entre los principales aspectos a considerar se encuentran:

- Instalación y nivelación del equipo.
- Conexión eléctrica y adecuaciones de servicios.
- Sistema de gases de asistencia.
- Sistema de extracción de humos.
- Capacitación de operadores y mantenedores.
- Definición de repuestos críticos iniciales.

- Elaboración de plan de mantenimiento, checklist, OT y registros.
- Validación de puesta en marcha con producción y mantenimiento.

Estos criterios permiten relacionar la renovación tecnológica con la gestión del mantenimiento, asegurando que el nuevo activo cuente con una base técnica y documental desde su entrada en operación.

1.10 Cierre del diagnóstico

El análisis desarrollado en este capítulo permite concluir que la máquina TRUMPF Trumatic 2020R presenta limitaciones técnicas, económicas y de seguridad que afectan el desempeño del proceso de corte metálico del área metalmecánica. Entre los principales aspectos identificados se encuentran la baja disponibilidad operacional, los altos tiempos de reparación, la obsolescencia tecnológica, la dificultad para obtener repuestos, los costos asociados a mantenimiento correctivo y externalización, además de los riesgos derivados de la exposición a ruido.

Estos antecedentes permiten justificar la necesidad de renovar la tecnología de corte utilizada actualmente. Sin embargo, la incorporación de una nueva máquina no debe entenderse únicamente como un reemplazo de equipo, sino como una oportunidad para fortalecer la gestión del mantenimiento desde el inicio de su ciclo de vida.

Por esta razón, el siguiente capítulo desarrolla la base técnica y documental para la gestión del mantenimiento de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, considerando seguridad operacional, planificación preventiva, checklist, rutinas técnicas, análisis FMECA, orden de trabajo, registros e indicadores que permitan asegurar trazabilidad y control sobre las actividades de mantenimiento.

Capítulo 2 Gestión del Mantenimiento TruLaser 1000

2. Introducción al capítulo.

En el capítulo anterior se analizó la situación actual del proceso de corte metálico del área metalmecánica, identificando las principales limitaciones técnicas, económicas y de seguridad asociadas a la máquina TRUMPF Trumatic 2020R. Dicho diagnóstico permitió justificar la renovación tecnológica hacia una máquina de corte láser TRUMPF TruLaser Serie 1000 y evidenció la necesidad de contar con una gestión del mantenimiento más ordenada, trazable y orientada al ciclo de vida del activo.

El presente capítulo desarrolla la base técnica y documental para la gestión del mantenimiento del nuevo sistema de corte láser. Para ello, se consideran las recomendaciones del fabricante TRUMPF, los antecedentes técnicos del equipo y criterios normativos asociados a mantenimiento, confiabilidad, seguridad operacional y gestión de activos.

El aporte principal de este capítulo consiste en elaborar y adaptar la información técnica disponible para transformarla en herramientas aplicables a la realidad operativa del área metalmecánica. En este sentido, no se trata únicamente de reproducir instrucciones del fabricante, sino de estructurar una propuesta documental que permita planificar, ejecutar, registrar y controlar las actividades de mantenimiento desde la puesta en marcha del equipo.

La propuesta incluye aspectos de seguridad operacional, plan de mantenimiento preventivo, checklist de inspección, rutinas e instructivos técnicos, análisis FMECA y formato de orden de trabajo. Estos documentos se vinculan entre sí para asegurar trazabilidad, asignación de responsabilidades, control de cumplimiento y generación de información útil para la toma de decisiones.

2.1 Seguridad Operacional.

La seguridad operacional constituye un requisito fundamental para la operación y mantenimiento de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, debido a que el equipo incorpora tecnología láser, sistemas eléctricos, neumáticos, gases de asistencia y componentes móviles automatizados. Por esta razón, toda actividad de operación, inspección o mantenimiento debe ejecutarse bajo condiciones controladas, con personal capacitado y siguiendo los procedimientos definidos por el fabricante y la normativa aplicable. De acuerdo con la documentación técnica TRUMPF, el equipo utiliza un sistema láser de alta energía, por lo que las intervenciones deben realizarse respetando las condiciones de seguridad establecidas para este tipo de tecnología. En este sentido, la seguridad no debe entenderse como un elemento separado del mantenimiento, sino como parte del sistema integral de gestión, ya que permite reducir riesgos, evitar daños al personal y asegurar la continuidad operacional del activo.

Las medidas de seguridad consideradas en esta propuesta se relacionan con el control de radiación láser, manejo de gases industriales, bloqueo de energías, prevención de incendios, uso de elementos de protección personal, señalización y capacitación del personal. Estos aspectos se integran a las rutinas de mantenimiento, checklist de inspección y órdenes de trabajo, con el fin de asegurar que cada intervención sea planificada, registrada y ejecutada de forma segura.

2.1.1 Riesgos asociados al sistema laser.

El sistema láser utilizado por la TRUMPF TruLaser Serie 1000 puede generar riesgos relevantes para la vista y la piel en caso de exposición directa o indirecta al haz. Por esta razón, el equipo debe operar con sus resguardos, cabina, enclavamientos y dispositivos de seguridad en condiciones funcionales.

Según los criterios establecidos en normas como **IEC 60825-1** e **ISO 11553-1**, las máquinas de procesamiento láser deben contar con medidas de protección, señalización y control de acceso, especialmente cuando existe riesgo de exposición a radiación láser. Por ello, ninguna intervención debe realizarse con protecciones anuladas o sistemas de seguridad desactivados.

Para efectos del sistema de mantenimiento propuesto, la verificación de resguardos, enclavamientos, sensores y señalización debe incorporarse en los checklist e instructivos técnicos, de manera que la condición de seguridad del equipo sea revisada periódicamente y quede registrada como parte de la trazabilidad del mantenimiento.

2.1.2 Riesgos de gases Industriales.

La máquina de corte láser utiliza gases de asistencia, tales como oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono, los cuales permiten mejorar el proceso de corte según el material y espesor trabajado. Estos gases se manejan a presión, por lo que una fuga, conexión deficiente o manipulación incorrecta puede generar riesgos de incendio, atmósferas deficientes de oxígeno o daños al personal. Por esta razón, las líneas, válvulas, reguladores, mangueras y conexiones deben ser inspeccionadas periódicamente. Además, el área debe contar con ventilación adecuada y condiciones que permitan evitar acumulaciones peligrosas de gases. El personal encargado de operar o intervenir estos sistemas debe utilizar los elementos de protección personal definidos para la tarea.

Dentro de la propuesta de mantenimiento, la revisión del sistema de gases debe formar parte de las rutinas preventivas y de los registros de inspección, permitiendo controlar desviaciones antes de que se transformen en fallas operacionales o incidentes de seguridad.

2.1.3 Riesgos eléctricos y neumáticos.

El sistema de control CNC, los motores de accionamiento, tableros eléctricos, sensores y sistemas auxiliares de la máquina operan con energía eléctrica, mientras que algunos mecanismos de movimiento y asistencia utilizan energía neumática. Estas fuentes de energía representan riesgos durante actividades de inspección, ajuste o mantenimiento si no se controlan adecuadamente.

Antes de realizar cualquier intervención, se debe aplicar un procedimiento de bloqueo y etiquetado de energías, conocido como **LOTO** (*Lockout-Tagout*), con el objetivo de evitar arranques inesperados o liberación accidental de energía. Este criterio se relaciona con la **ISO 14118**, orientada a la prevención de puesta en marcha intempestiva de máquinas.

Asimismo, los sistemas neumáticos deben ser descargados antes de intervenir válvulas, actuadores o líneas de presión. Estas medidas deben quedar indicadas en los instructivos técnicos de mantenimiento y verificarse mediante la orden de trabajo correspondiente.

2.1.4 Equipos de protección personal (EPP).

El uso de elementos de protección personal es obligatorio durante la operación y mantenimiento de la máquina, de acuerdo con el tipo de actividad a realizar y los riesgos presentes. Según las recomendaciones del fabricante y los criterios generales de seguridad ocupacional asociados a la **ISO 45001**, el personal debe utilizar los siguientes elementos cuando corresponda:

- Gafas o protección visual adecuada para trabajos asociados al sistema láser.
- Guantes de seguridad según la tarea ejecutada.
- Ropa de trabajo adecuada, preferentemente de material resistente y no inflamable.
- Calzado de seguridad con suela antideslizante.
- Protección auditiva cuando las condiciones del entorno lo requieran.
- Protección respiratoria en actividades asociadas a extracción de humos o limpieza de filtros, si corresponde.

La selección de los EPP debe estar asociada a la evaluación de riesgos de cada actividad, por lo que debe ser considerada en los instructivos técnicos, checklist y permisos de trabajo cuando la intervención lo requiera.

2.1.5 Prevención de incendios.

El proceso de corte láser puede generar chispas, temperatura elevada y partículas incandescentes, por lo que la prevención de incendios es un aspecto relevante dentro de la operación segura del equipo. El área de trabajo debe mantenerse limpia, libre de materiales combustibles, aceites, residuos inflamables o elementos que puedan favorecer la propagación de fuego. El sistema de extracción de humos y partículas debe permanecer operativo durante el proceso de corte, ya que contribuye a controlar contaminantes y reducir acumulaciones peligrosas. Además, debe existir disponibilidad de extintores adecuados y el personal debe conocer su ubicación y forma de uso.

Dentro del mantenimiento preventivo, se deben considerar inspecciones periódicas al sistema de extracción, filtros, ductos, acumulación de residuos y condiciones generales del entorno de trabajo. Estas actividades deben registrarse para asegurar trazabilidad y control.

2.1.6 Señalización y Entrenamiento.

El área de operación de la TRUMPF TruLaser Serie 1000 debe contar con señalización visible relacionada con riesgos láser, gases industriales, energía eléctrica, uso obligatorio de EPP y restricciones de acceso. Esta señalización permite advertir al personal sobre los riesgos presentes y delimitar las zonas de operación e intervención.

Además, el personal operador y mantenedor debe recibir capacitación en operación segura del equipo, bloqueo de energías, manejo de gases, respuesta ante emergencias, uso de EPP y aplicación de los procedimientos de mantenimiento. Esta capacitación debe actualizarse de forma periódica, especialmente cuando existan cambios en el proceso, incorporación de nuevo personal o modificaciones en los procedimientos. La formación del personal constituye un elemento clave para la gestión del mantenimiento, ya que permite asegurar que las rutinas preventivas, inspecciones y órdenes de trabajo sean ejecutadas correctamente. Por ello, se recomienda mantener registros de capacitación como parte de la documentación del sistema de gestión.

En síntesis, la seguridad operacional de la TRUMPF TruLaser Serie 1000 debe integrarse directamente al sistema de mantenimiento propuesto. Cada actividad preventiva, correctiva o de inspección debe considerar los riesgos asociados, las medidas de control requeridas y el registro correspondiente. De esta manera, la gestión del mantenimiento no solo contribuye a la disponibilidad del equipo, sino también a la operación segura del proceso de corte láser.

2.2 Plan de Mantenimiento (Anexo B).

El plan de mantenimiento propuesto para la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000 tiene como finalidad asegurar la continuidad operacional, confiabilidad y seguridad del nuevo sistema de corte láser. Este plan se elabora considerando las recomendaciones del fabricante TRUMPF, los requerimientos operativos del área metalmecánica y los criterios de gestión de mantenimiento establecidos por normas como ISO 14224, ISO 17359 e ISO 55000.

El aporte de este trabajo consiste en transformar la información técnica del fabricante en una herramienta de gestión aplicable a la realidad de la planta. Para ello, las actividades de mantenimiento fueron ordenadas por sistema, frecuencia, responsable, tipo de intervención y registro asociado. De esta manera, el plan no se limita a indicar tareas de mantenimiento, sino que permite planificar, ejecutar, controlar y dejar evidencia de las actividades realizadas. El plan considera actividades preventivas programadas con frecuencia diaria, semanal, mensual, trimestral, semestral y anual. Estas actividades abarcan los sistemas principales de la máquina, tales como sistema óptico, cabezal de corte, sistema neumático, refrigeración, control CNC, extracción de humos y dispositivos de seguridad. Cada actividad debe quedar respaldada mediante checklist, orden de trabajo o registro de mantenimiento, según corresponda.

Desde el punto de vista normativo, la ISO 14224 permite orientar la recopilación y clasificación de datos de mantenimiento y confiabilidad; la ISO 17359 entrega lineamientos asociados al mantenimiento basado en condición; y la ISO 55000 permite vincular el mantenimiento con la gestión de activos durante el ciclo de vida. Bajo este enfoque, el plan propuesto busca generar información útil para el seguimiento del desempeño futuro del equipo.

El plan de mantenimiento preventivo se presenta en el Anexo B, donde se detallan las actividades, frecuencias, responsables y observaciones asociadas a cada sistema del equipo. Este anexo constituye la base documental para la planificación inicial del mantenimiento de la TRUMPF TruLaser Serie 1000.

2.2.1 Estructura del Plan de Mantenimiento.

La estructura del plan de mantenimiento fue elaborada a partir del manual técnico TRUMPF B1238es_L94_IC y adaptada a las condiciones de operación del área metalmecánica. Para su construcción se consideraron los sistemas críticos del equipo, las tareas recomendadas por el fabricante, la frecuencia de intervención y el responsable de ejecución.

Los principales sistemas considerados en el plan son:

- Sistema óptico.
- Sistema de corte y cabezal láser.
- Sistema neumático.
- Sistema de refrigeración.
- Sistema eléctrico y de control CNC.
- Sistema de extracción de humos.
- Sistema de seguridad y enclavamiento.

Para cada sistema se definieron actividades de inspección, limpieza, verificación, ajuste o reemplazo, según corresponda. Además, se asignaron responsables de ejecución, diferenciando entre operador, técnico de mantenimiento y servicio técnico especializado TRUMPF.

La distribución de responsabilidades permite ordenar la ejecución de las tareas y evitar que todas las actividades dependan exclusivamente del personal técnico especializado. Las tareas diarias y de inspección básica pueden ser realizadas por el operador capacitado, mientras que las actividades de mayor complejidad deben ser ejecutadas por técnicos de mantenimiento o por el servicio técnico autorizado.

Todas las actividades del plan deben registrarse mediante checklist, bitácora u orden de trabajo, con el fin de mantener trazabilidad sobre las intervenciones realizadas. Esta información será la base para calcular indicadores como cumplimiento del mantenimiento preventivo, tiempos de intervención, fallas repetitivas y disponibilidad del equipo.

2.2.2 Checklist de inspección y mantenimiento (Anexo C).

El checklist de inspección y mantenimiento se implementa como una herramienta de control operativo orientada a la detección temprana de desviaciones en la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su finalidad es apoyar el cumplimiento del plan preventivo, verificar las condiciones básicas del equipo y registrar información relevante antes, durante o después de la operación.

Este documento permite estandarizar actividades de inspección, limpieza, verificación funcional y control de seguridad. De esta manera, el operador o técnico responsable puede identificar condiciones anormales antes de que estas deriven en fallas, detenciones no programadas o riesgos para la operación. El aporte de este trabajo consiste en estructurar el checklist como un instrumento de gestión y no solo como una lista de revisión. Para ello, se incorporan campos de identificación del equipo, fecha, responsable, condición observada, resultado de inspección, observaciones y acciones requeridas. Esta información permite mantener trazabilidad de las inspecciones y generar antecedentes para el análisis posterior del mantenimiento.

El checklist considera principalmente los siguientes aspectos:

- Limpieza del área de trabajo y componentes asociados al sistema de corte.
- Revisión de presión neumática, nivel de refrigerante y alarmas del sistema.
- Comprobación del estado de filtros, boquillas, cables y conexiones.
- Verificación de dispositivos de seguridad, tales como parada de emergencia, enclavamientos y sensores de protección.
- Registro de observaciones o desviaciones detectadas durante la inspección.

Los resultados se registran mediante una condición de Conforme / No conforme, incorporando además un espacio para observaciones y firma del responsable. Cuando se detecte una condición no conforme, esta deberá generar una acción correctiva, una orden de trabajo o una revisión técnica según la criticidad de la desviación. Desde el punto de vista normativo, el uso del checklist se relaciona con los criterios de trazabilidad y recopilación de información de mantenimiento establecidos por la ISO 14224, además de los principios de gestión de activos considerados en la ISO 55000. Su aplicación permite transformar la inspección diaria en información útil para el seguimiento del equipo, el control del cumplimiento preventivo y la mejora continua.

El formato detallado del checklist se presenta en el **Anexo C**, donde se incluyen los campos de control e inspección definidos para la operación y mantenimiento inicial de la TRUMPF TruLaser Serie 1000.

2.2.3 Aplicación del análisis FMECA.

El análisis FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) se aplicó como una herramienta técnica para identificar y evaluar posibles modos de falla en los sistemas principales de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su propósito fue anticipar fallas potenciales, analizar sus efectos sobre la operación y establecer acciones preventivas que permitan reducir el riesgo de detenciones no programadas. A diferencia del diagnóstico realizado a la máquina TRUMPF Trumatic 2020R, el análisis FMECA de la TruLaser Serie 1000 se desarrolla sobre un equipo nuevo. Por esta razón, su enfoque no se basa en corregir fallas históricas del activo, sino en prevenir eventos futuros a partir de la información técnica del fabricante, las condiciones esperadas de operación y la criticidad de sus sistemas.

La metodología utilizada se basa en los lineamientos de la IEC/ISO 60812, norma que establece criterios para desarrollar análisis de modos de falla y efectos. Para este trabajo se consideraron las siguientes etapas:

- Identificación de los sistemas principales del equipo.
- Definición de posibles modos de falla.
- Determinación de los efectos asociados a cada falla.
- Identificación de causas probables.
- Asignación de valores de severidad, ocurrencia y detección.
- Cálculo del número de prioridad de riesgo.
- Definición de acciones preventivas o de control.

Para efectos de este trabajo, la información técnica del manual TRUMPF fue adaptada a una matriz FMECA aplicable a la gestión del mantenimiento del área metalmecánica. En esta matriz se consideran sistemas como el cabezal de corte, sistema óptico, refrigeración, neumática, extracción de humos, sistema eléctrico, control CNC y dispositivos de seguridad.

La elaboración de esta matriz permite priorizar las actividades de mantenimiento según el nivel de criticidad de cada modo de falla. De esta forma, las tareas preventivas no quedan definidas únicamente por frecuencia, sino también por el impacto que una falla puede tener sobre la seguridad, disponibilidad, calidad del corte y continuidad operacional. El análisis FMECA se vincula directamente con el plan de mantenimiento preventivo, los checklist de inspección, las rutinas técnicas y la orden de trabajo. Cuando un modo de falla presenta mayor criticidad, debe ser considerado con mayor prioridad dentro de la planificación, inspección o seguimiento del equipo.

El formato de la matriz FMECA elaborada para este proyecto se presenta en el **Anexo D**, donde se detallan los sistemas evaluados, modos de falla, efectos, causas, niveles de criticidad y acciones recomendadas.

2.2.4 Rutinas e Instructivos técnicos de mantenimiento.

Como complemento al plan de mantenimiento preventivo y al análisis FMECA, se elaboran rutinas e instructivos técnicos para las actividades principales de mantenimiento de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Estos documentos tienen como finalidad estandarizar la forma en que se ejecutan las tareas, indicando responsables, frecuencia, medidas de seguridad, herramientas necesarias, pasos de trabajo y criterios de aceptación. Los instructivos permiten que las actividades de mantenimiento no dependan únicamente de la experiencia del técnico u operador, sino que se realicen bajo una secuencia definida y repetible. Esto es relevante para asegurar la calidad de las intervenciones, reducir errores durante la ejecución y mantener trazabilidad de las tareas realizadas.

Para la elaboración de estas rutinas se consideraron las recomendaciones del manual técnico TRUMPF, las condiciones de operación del área metalmecánica y los lineamientos generales de mantenimiento basado en condición establecidos por la ISO 17359. Además, se integran criterios de seguridad operacional, tales como uso de elementos de protección personal, bloqueo de energías y verificación de condiciones antes de intervenir el equipo.

Cada instructivo técnico considera una estructura básica compuesta por: La estructura del documento para cada instructivo tecnico sigue el formato exigido por la ISO 17359, incluyendo los siguientes pasos.

- Identificación del documento (código, versión, fecha, autor y aprobación).
- Objetivo y alcance del procedimiento.
- Frecuencia de ejecución y responsable asignado.
- Materiales, herramientas e insumos requeridos.
- Medidas de seguridad y procedimientos de bloqueo y señalización.
- Descripción detallada y secuencial de las tareas (paso a paso).
- Parámetros de control y valores de aceptación.
- Formato de registro y referencias normativas o técnicas.

En la Tabla 7 se presentan los instructivos técnicos propuestos para los sistemas más relevantes de la TRUMPF TruLaser Serie 1000. Esta tabla permite resumir las rutinas principales que deben incorporarse al plan de mantenimiento, relacionando cada actividad con su código y frecuencia de ejecución.

Instructivos Técnicos de Mantenimientos propuestos

Código	Título del instructivo Técnico	Frecuencia
IT-01	Limpieza del área de trabajo y ventana protectora láser	Diaria
IT-02	Verificación del sistema neumático y drenaje de condensado	Semanal
IT-03	Control de nivel y calidad del agua de refrigeración	Mensual
IT-04	Revisión y calibración del cabezal de corte y sensores de altura	Trimestral
IT-05	Sustitución de filtros y mantenimiento del extractor de humos	Semestral
IT-06	Inspección general y pruebas de seguridad del sistema laser	Anual

Tabla 7. Instructivos de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

Las rutinas indicadas en la Tabla 7 permiten cubrir los sistemas críticos del equipo, tales como sistema óptico, neumático, refrigeración, cabezal de corte, extracción de humos y dispositivos de seguridad. Su aplicación permite ordenar las tareas de mantenimiento desde la puesta en marcha del activo y facilita la posterior generación de registros, órdenes de trabajo e indicadores de cumplimiento.

De esta manera, los instructivos técnicos cumplen una función práctica dentro del sistema de gestión del mantenimiento, ya que transforman las recomendaciones generales del fabricante en procedimientos aplicables a la operación diaria del área metalmecánica.

2.2.5 Orden de trabajo.

La orden de trabajo constituye uno de los documentos principales dentro del sistema de gestión del mantenimiento, ya que permite planificar, ejecutar, registrar y controlar las intervenciones realizadas sobre la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su aplicación permite asegurar trazabilidad técnica, administrativa y económica de las actividades de mantenimiento. En el contexto de este trabajo, la orden de trabajo se considera como el nexo entre el plan de mantenimiento preventivo, los checklist de inspección, las rutinas técnicas y los indicadores de desempeño. A través de este documento es posible dejar registro de las tareas ejecutadas, los tiempos utilizados, el personal responsable, los repuestos empleados, las fallas detectadas y las observaciones relevantes de cada intervención.

La estructura propuesta para la orden de trabajo considera los siguientes campos principales:

- Identificación del equipo: código, ubicación, sistema intervenido y horas de operación.
- Datos de planificación: número de orden, fecha de emisión, prioridad, tipo de mantenimiento y responsable asignado.
- Ejecución técnica: descripción de la actividad, condición encontrada, causa probable, componente afectado y acción realizada.
- Recursos utilizados: horas hombre, repuestos, herramientas, insumos y apoyo externo, si corresponde.
- Control de seguridad: verificación de permisos, bloqueo de energías, uso de EPP y condiciones seguras de trabajo.
- Cierre de la intervención: fecha de término, conformidad del trabajo, observaciones y firmas del técnico ejecutor y supervisor.

El uso de la orden de trabajo permite cumplir con criterios de registro y trazabilidad asociados a la ISO 14224, ya que facilita la recopilación de datos de fallas, tiempos de reparación, recursos utilizados y acciones de mantenimiento. Además, se relaciona con la ISO 55000, al aportar información para la gestión del activo durante su ciclo de vida.

La información obtenida mediante las órdenes de trabajo será utilizada posteriormente para calcular indicadores como MTTR, cumplimiento del mantenimiento preventivo, costos de mantenimiento, frecuencia de fallas y disponibilidad del equipo. De esta manera, la OT no solo cumple una función administrativa, sino que también se transforma en una fuente de datos para la toma de decisiones y la mejora continua.

El formato propuesto de orden de trabajo se presenta en el **Anexo E**, bajo el nombre “Orden de Trabajo”, y está diseñado para ser utilizado en actividades preventivas, correctivas, inspecciones programadas y seguimiento de desviaciones detectadas durante la operación.

2.2.6 Gestión de registros y trazabilidad documental.

La gestión de registros constituye un elemento fundamental dentro del sistema de mantenimiento propuesto, ya que permite respaldar técnicamente las actividades ejecutadas y mantener un historial ordenado del comportamiento del equipo. Para la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, los principales registros estarán asociados al plan de mantenimiento preventivo, checklist de inspección, rutinas técnicas, órdenes de trabajo, análisis FMECA y reportes de fallas.

Cada intervención realizada sobre el equipo deberá quedar documentada mediante el formato correspondiente, indicando fecha, responsable, actividad ejecutada, condición encontrada, repuestos utilizados, tiempo de intervención y observaciones relevantes. Esta información permitirá contar con una base de datos inicial para el seguimiento del activo desde su puesta en marcha.

La trazabilidad documental permite relacionar las actividades de mantenimiento con los indicadores de desempeño definidos para el equipo. Por ejemplo, las órdenes de trabajo permitirán calcular tiempos de reparación, costos, frecuencia de fallas y cumplimiento del mantenimiento preventivo. Del mismo modo, los checklist permitirán identificar desviaciones repetitivas y generar acciones correctivas antes de que se produzcan detenciones no programadas. Desde el punto de vista normativo, esta gestión se relaciona con la ISO 14224, debido a que permite recopilar y clasificar datos de mantenimiento y confiabilidad, y con la ISO 55000, al contribuir a la gestión del activo durante su ciclo de vida. De esta manera, los registros no solo cumplen una función administrativa, sino que también permiten transformar la información operativa en una herramienta para la toma de decisiones.

En consecuencia, la correcta gestión de registros permitirá fortalecer la planificación, ejecución y control del mantenimiento, asegurando que las actividades realizadas sobre la TRUMPF TruLaser Serie 1000 cuenten con respaldo documental y puedan ser evaluadas posteriormente mediante indicadores técnicos y económicos.

2.3 Cierre del capítulo.

El desarrollo de este capítulo permitió establecer la base técnica y documental para la gestión del mantenimiento de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. A partir de las recomendaciones del fabricante, los criterios normativos y las condiciones operativas del área metalmecánica, se estructuraron herramientas como el plan de mantenimiento preventivo, checklist de inspección, rutinas técnicas, análisis FMECA, orden de trabajo y registros de mantenimiento.

Estos documentos permiten ordenar la planificación, ejecución y control de las actividades de mantenimiento, asegurando que cada intervención pueda quedar respaldada mediante información técnica verificable. De esta forma, el mantenimiento deja de depender únicamente de acciones correctivas o registros aislados, y pasa a contar con una base documental que permite generar trazabilidad desde la puesta en marcha del equipo. Sin embargo, la documentación por sí sola no permite evaluar completamente el desempeño del sistema. Para que la información registrada tenga valor en la toma de decisiones, debe transformarse en indicadores que permitan medir confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, productividad, costos y cumplimiento del mantenimiento preventivo.

Por esta razón, el Capítulo 3 desarrolla los indicadores clave de desempeño asociados al nuevo sistema de corte láser. Estos KPI permitirán utilizar la información proveniente de checklist, órdenes de trabajo, registros de fallas y datos operacionales para controlar el comportamiento del equipo, identificar desviaciones y apoyar la mejora continua del proceso de corte metálico.

Capítulo 3 Diseño de indicadores KPI de Mantenimiento.

3 introducción al capítulo.

La incorporación de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000 al proceso de corte metálico representa una modernización tecnológica importante para el área metalmecánica. Sin embargo, para que esta incorporación genere resultados sostenibles, no basta con contar con un equipo nuevo; también se requiere medir y controlar su desempeño durante la operación.

En el capítulo anterior se estableció la base documental del sistema de mantenimiento, considerando plan preventivo, checklist, rutinas técnicas, análisis FMECA, órdenes de trabajo y registros de mantenimiento. Estos documentos permiten capturar información técnica desde la operación diaria y desde las intervenciones realizadas sobre el equipo. A partir de esta información, se hace necesario definir indicadores que permitan transformar los registros en datos útiles para la toma de decisiones. Actualmente, la organización no cuenta con un sistema formal de indicadores clave de desempeño aplicado al mantenimiento del proceso de corte metálico. El seguimiento realizado a la máquina anterior fue limitado y discontinuo, lo que generó una brecha importante en la disponibilidad de información histórica sobre confiabilidad, productividad, modos de falla y costos asociados. Esta condición dificulta evaluar objetivamente el comportamiento del activo y anticipar acciones de mejora.

Por esta razón, la entrada en operación de la TRUMPF TruLaser Serie 1000 requiere establecer desde el inicio una estructura de medición clara, trazable y alineada con la gestión de activos. Esta estructura debe definir qué variables serán registradas, desde qué documentos o sistemas se obtendrán los datos, con qué frecuencia serán analizados y qué indicadores permitirán evaluar el desempeño técnico, económico y operacional del equipo.

El propósito de este capítulo es definir los indicadores clave de desempeño necesarios para controlar el mantenimiento y operación del nuevo sistema de corte láser. Para ello, se consideran KPI de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, productividad, costos y ciclo de vida, los cuales se relacionan directamente con los registros generados mediante checklist, órdenes de trabajo, reportes de fallas y datos operacionales del equipo.

El desarrollo de estos indicadores se apoya en criterios de gestión de activos, recopilación de datos de mantenimiento y mantenimiento basado en condición, considerando como referencia las normas ISO 55000, ISO 14224 e ISO 17359. De esta manera, el sistema KPI propuesto busca entregar una base objetiva para evaluar el desempeño de la máquina, identificar desviaciones, priorizar acciones de mantenimiento y apoyar la mejora continua del proceso de corte metálico.

3.1 Marco normativo aplicado.

La definición de indicadores clave de desempeño para la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000 debe apoyarse en criterios normativos que permitan asegurar trazabilidad, consistencia y utilidad de la información registrada. En este contexto, las normas consideradas permiten relacionar la gestión del mantenimiento con la confiabilidad del activo, la recopilación de datos, el mantenimiento basado en condición y la mejora continua.

La **ISO 55000** entrega el enfoque general de gestión de activos, considerando el desempeño, costo, riesgo y valor durante el ciclo de vida del equipo. Desde esta perspectiva, los indicadores no deben limitarse únicamente a medir fallas o reparaciones, sino que deben aportar información para evaluar si el activo cumple su función dentro del proceso de corte metálico y si contribuye a los objetivos operacionales del área.

Por otra parte, la **ISO 14224** permite orientar la recopilación y clasificación de datos de mantenimiento y confiabilidad. Esta norma es relevante para estructurar información asociada a fallas, tiempos de reparación, modos de falla, causas, acciones ejecutadas y tiempos de indisponibilidad. Por esta razón, se relaciona directamente con indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidad operacional, tasa de falla y frecuencia de fallas repetitivas.

La **ISO 17359** aporta criterios asociados al mantenimiento basado en condición, estableciendo la importancia de monitorear variables relevantes del equipo para detectar desviaciones antes de que se transformen en fallas funcionales. En el caso de la máquina de corte láser, esta norma se vincula con la revisión de parámetros como presión neumática, temperatura, refrigeración, estado de filtros, alarmas, condición del cabezal de corte y funcionamiento de sistemas auxiliares.

Además, el análisis **FMECA**, desarrollado en el capítulo anterior bajo los lineamientos de la **IEC/ISO 60812**, permite priorizar los modos de falla según su criticidad. Esta información se relaciona con los KPI porque permite enfocar el seguimiento en los sistemas que tienen mayor impacto sobre la seguridad, disponibilidad, calidad del corte y continuidad operacional.

De esta manera, el marco normativo utilizado permite que los indicadores propuestos no sean definidos de forma aislada, sino como parte de un sistema de gestión del mantenimiento basado en datos, trazabilidad y control del desempeño. La relación entre normas, registros e indicadores se resume en la Tabla 8.

Norma/referencia.	Aplicación dentro del trabajo.	Registros asociados.	Indicadores relacionados.
ISO 55000	Gestión de activos durante el ciclo de vida	Plan de mantenimiento, OT, costos, historial del activo	Disponibilidad, costos de mantenimiento, cumplimiento del plan, ciclo de vida
ISO 14224	Recopilación y clasificación de datos de confiabilidad y mantenimiento	Órdenes de trabajo, y reportes de fallas, tiempos de reparación y	MTBF, MTTR, tasa de falla, disponibilidad
ISO 17359	Mantenimiento basado en condición y monitoreo de variables	Checklist, inspecciones, mediciones, al	Cumplimiento de inspecciones, más del equipo desviaciones detectadas, condición del equipo
IEC/ISO 60812	Análisis de modos de falla, efectos y criticidad	Matriz FMECA, acciones preventivas, criticidad de sistemas	NPR/RPN, fallas críticas, priorización de mantenimiento

Tabla 8. Resumen marco normativo

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 ISO 14224: Recopilación de datos de confiabilidad y mantenimiento.

La norma ISO 14224 se utiliza como referencia para estructurar la recopilación y clasificación de datos asociados a confiabilidad y mantenimiento de activos físicos. Su aplicación resulta relevante para este trabajo, debido a que permite definir criterios comunes para registrar fallas, tiempos de intervención, causas, modos de falla, acciones ejecutadas y repuestos utilizados. En el caso de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, esta norma permite ordenar la información generada a partir de las órdenes de trabajo, reportes de fallas y registros de mantenimiento. Para que los indicadores sean confiables, cada evento debe registrarse de manera uniforme, indicando el sistema afectado, la condición encontrada, la causa probable, el tiempo de detención, el tiempo de reparación y la acción correctiva o preventiva realizada.

La aplicación de la ISO 14224 permite evitar registros incompletos o poco comparables entre sí. Esto es especialmente importante considerando que la empresa no cuenta con un historial técnico consolidado para la nueva máquina. Por lo tanto, desde su puesta en marcha, se requiere registrar los datos con una estructura clara que permita construir una base histórica útil para el análisis posterior.

Dentro del sistema KPI propuesto, la ISO 14224 se relaciona directamente con indicadores como MTBF, MTTR, tasa de falla, disponibilidad operacional y frecuencia de fallas repetitivas. Estos indicadores dependen de la calidad de los datos registrados, por lo que la orden de trabajo y los reportes de falla deben transformarse en documentos clave para la trazabilidad del mantenimiento.

Para la TRUMPF TruLaser Serie 1000, los principales datos que deben registrarse bajo este enfoque son:

- Sistema o componente afectado.
- Modo de falla identificado.
- Causa probable de la falla.
- Efecto sobre la operación.
- Fecha y hora de inicio de la detención.
- Fecha y hora de término de la intervención.
- Tiempo total de reparación.

- Repuestos o insumos utilizados.
- Acción ejecutada.
- Responsable de la intervención

De esta forma, la ISO 14224 entrega una base metodológica para transformar los eventos de mantenimiento en información útil para el cálculo de indicadores. Su aplicación permitirá que la empresa no solo registre intervenciones, sino que también pueda analizar tendencias, identificar fallas repetitivas y tomar decisiones basadas en datos.

3.1.2 ISO 17359: Monitorización Condicional de equipos (CBM).

La norma ISO 17359 entrega lineamientos generales para implementar programas de mantenimiento basado en condición, también conocido como CBM (*Condition-Based Maintenance*). Este enfoque permite evaluar el estado real de un equipo mediante el seguimiento de variables operacionales, con el objetivo de detectar desviaciones antes de que se transformen en fallas funcionales. En el caso de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, la aplicación de esta norma resulta relevante debido a que el equipo incorpora sistemas de control, sensores internos y parámetros operacionales que pueden ser utilizados para monitorear su condición. Esta información permite complementar el mantenimiento preventivo programado con un seguimiento más preciso del comportamiento real del activo.

Para el sistema de corte láser, las principales variables que deben considerarse dentro del monitoreo de condición son la temperatura del sistema de refrigeración, presión neumática, flujo de extracción de humos, alarmas del sistema CNC, condición del cabezal de corte, estado de filtros, estabilidad térmica del resonador, potencia del haz láser y velocidad real de operación respecto de la velocidad nominal.

Estas variables permiten identificar condiciones anormales asociadas a sobre temperatura, baja presión, obstrucción de filtros, pérdida de eficiencia en la extracción, desviaciones en el corte, alarmas repetitivas o degradación de componentes críticos. Por esta razón, su registro debe incorporarse en los checklist de inspección, rutinas técnicas y reportes de mantenimiento definidos en el capítulo anterior.

La aplicación de la ISO 17359 permite orientar la transición desde un mantenimiento basado únicamente en frecuencias hacia un mantenimiento apoyado en la condición real

del equipo. Esto no significa eliminar el mantenimiento preventivo, sino complementarlo con información técnica que permita ajustar frecuencias, priorizar intervenciones y anticipar fallas. Dentro del sistema KPI propuesto, esta norma se relaciona con indicadores como cumplimiento de inspecciones, cantidad de desviaciones detectadas, alarmas repetitivas, porcentaje de acciones preventivas generadas por condición y reducción de detenciones no programadas. De esta manera, los datos obtenidos desde el monitoreo de condición permiten fortalecer la toma de decisiones y mejorar la confiabilidad operacional del sistema de corte láser.

3.1.3 ISO 55000: Gestión de activos físicos.

La norma ISO 55000 entrega principios generales para la gestión de activos físicos durante su ciclo de vida, considerando el equilibrio entre desempeño, costo, riesgo y valor para la organización. Su aplicación es relevante para este trabajo, debido a que la TRUMPF TruLaser Serie 1000 debe ser gestionada como un activo crítico dentro del proceso de corte metálico del área metalmecánica. Desde este enfoque, el mantenimiento no se limita a ejecutar actividades preventivas o correctivas, sino que debe contribuir a asegurar la disponibilidad, confiabilidad y continuidad operacional del equipo. Por esta razón, los indicadores definidos en este capítulo permitirán evaluar el comportamiento del activo y apoyar la toma de decisiones durante su operación.

En el caso de la máquina de corte láser, la gestión de activos debe considerar variables como disponibilidad, mantenibilidad, costos de mantenimiento, cumplimiento del plan preventivo, consumo de repuestos y productividad del proceso. Estos datos se obtendrán a partir de los registros definidos en el capítulo anterior, tales como órdenes de trabajo, checklist, reportes de fallas y rutinas técnicas.

De esta manera, la ISO 55000 permite vincular la gestión del mantenimiento con el ciclo de vida del equipo, asegurando que la información registrada sea utilizada para controlar el desempeño del activo, reducir riesgos operacionales y aportar valor al proceso productivo.

3.1.4 Documentación técnica TRUMPF.

La documentación técnica del fabricante TRUMPF constituye una referencia fundamental para la definición de indicadores y criterios de mantenimiento aplicables a la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Esta documentación entrega información sobre condiciones de operación, sistemas principales del equipo, medidas de seguridad, actividades de mantenimiento recomendadas, parámetros de control y requerimientos técnicos para una operación segura y confiable.

En el contexto de este trabajo, la información del fabricante se utiliza como base para estructurar el plan de mantenimiento preventivo, checklist de inspección, rutinas técnicas y criterios de seguimiento del equipo. De esta manera, las recomendaciones TRUMPF se adaptan a la realidad operativa del área metalmecánica, permitiendo transformar la información técnica en herramientas aplicables para la gestión del mantenimiento.

La documentación TRUMPF también permite identificar sistemas relevantes para el control del desempeño, tales como sistema óptico, cabezal de corte, refrigeración, neumática, extracción de humos, sistema eléctrico, control CNC y dispositivos de seguridad. Estos sistemas deben ser considerados dentro de los registros de mantenimiento, ya que su condición influye directamente en la disponibilidad, calidad del corte, seguridad operacional y continuidad productiva.

Además, los parámetros técnicos indicados por el fabricante permiten establecer criterios de aceptación durante inspecciones y actividades preventivas. Por ejemplo, la revisión de presiones, temperaturas, alarmas, niveles, limpieza, estado de filtros y funcionamiento de dispositivos de seguridad puede incorporarse en checklist y órdenes de trabajo para generar información útil para el seguimiento del activo.

Por lo tanto, la documentación técnica TRUMPF no se utiliza únicamente como respaldo del equipo, sino como una base para definir actividades, registros y variables de control. Su incorporación dentro del sistema KPI permite asegurar que los indicadores propuestos estén relacionados con las condiciones reales de operación y mantenimiento de la máquina de corte láser.

En la Tabla 9 se resume la relación entre las referencias normativas y técnicas utilizadas, los registros asociados y los indicadores que pueden obtenerse a partir de dicha información. Esta relación permite visualizar que los KPI propuestos no se definen de manera aislada, sino que se sustentan en una base documental y técnica aplicable a la gestión del mantenimiento.

Tabla 9. Relación entre referencias aplicadas, registros e indicadores de mantenimiento.

Referencia	Aplicación dentro del trabajo	Registros asociados	Indicadores relacionados
ISO 14224	Recopilación y clasificación de datos de confiabilidad y mantenimiento.	Órdenes de trabajo, reportes de fallas, tiempos de reparación y registros de intervención.	MTBF, MTTR, tasa de falla, disponibilidad operacional y fallas repetitivas.
ISO 17359	Monitoreo de condición del equipo y detección temprana de desviaciones.	Checklist, inspecciones, alarmas CNC, mediciones operacionales y registros de condición.	Cumplimiento de inspecciones, desviaciones detectadas, alarmas repetitivas y condición del equipo.
ISO 55000	Gestión del activo físico durante su ciclo de vida, considerando desempeño, costo, riesgo y valor.	Historial del activo, plan de mantenimiento, costos, repuestos y registros de desempeño.	Disponibilidad, costos de mantenimiento, cumplimiento del plan preventivo y desempeño del activo.
Documentación técnica TRUMPF	Definición de actividades, parámetros técnicos, criterios de seguridad y recomendaciones de mantenimiento.	Plan preventivo, rutinas técnicas, checklist, manuales y registros de mantenimiento.	Cumplimiento del mantenimiento preventivo, seguridad operacional, calidad del corte y continuidad productiva.

Tabla 9. Resumen, relación entre referencias normativas y técnicas utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 9 permite establecer una conexión directa entre las normas revisadas, los documentos desarrollados en el capítulo anterior y los indicadores definidos en el presente capítulo. De esta forma, la información registrada mediante órdenes de trabajo, checklist, rutinas técnicas y reportes de fallas podrá ser utilizada como base para evaluar el desempeño de la TRUMPF TruLaser Serie 1000.

En consecuencia, el marco normativo aplicado permite estructurar un sistema de control basado en datos trazables, donde cada indicador se relaciona con una fuente de información definida. Esto permite fortalecer la toma de decisiones, mejorar la planificación del mantenimiento y apoyar la mejora continua del proceso de corte metálico.

3.2 KPI de confiabilidad.

Los KPI de confiabilidad permiten evaluar la capacidad de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000 para cumplir su función durante un periodo determinado sin presentar fallas. En el proceso de corte metálico, estos indicadores son relevantes porque permiten controlar la estabilidad operacional del equipo y detectar tendencias que puedan afectar la continuidad productiva.

Debido a que la TRUMPF TruLaser Serie 1000 corresponde a un nuevo activo para el área metalmecánica, será necesario construir un historial técnico desde su puesta en marcha. Para ello, cada evento de falla deberá quedar registrado mediante órdenes de trabajo, reportes de falla y registros de mantenimiento, considerando el sistema afectado, modo de falla, causa probable, tiempo de detención y acción ejecutada.

Dentro de esta categoría se consideran indicadores como el tiempo medio entre fallas, la distribución de Weibull, la tasa de falla instantánea y la función de confiabilidad. Estos indicadores permiten analizar la frecuencia de fallas, el comportamiento del activo en el tiempo y la probabilidad de operación sin falla durante un periodo determinado.

La información necesaria para calcular estos KPI provendrá principalmente de las órdenes de trabajo, registros de fallas, datos de operación y antecedentes técnicos del equipo. Su análisis permitirá identificar sistemas críticos, evaluar tendencias de deterioro y definir acciones preventivas orientadas a mejorar la confiabilidad operacional del sistema de corte láser.

En consecuencia, los KPI de confiabilidad constituyen una base para el seguimiento técnico del nuevo activo, permitiendo transformar los registros de mantenimiento en información útil para la toma de decisiones y la mejora continua del proceso.

3.2.1 MTBF (Mean Time Between Failures).

El tiempo medio entre fallas, conocido como MTBF (*Mean Time Between Failures*), corresponde a un indicador de confiabilidad que permite estimar el tiempo promedio de operación de un equipo entre un evento de falla y otro. Para la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, este indicador permitirá evaluar el comportamiento del nuevo sistema de corte láser desde su puesta en marcha. El MTBF será calculado a partir de los registros de operación, órdenes de trabajo y reportes de falla generados durante el funcionamiento del equipo. Para ello, cada evento deberá quedar documentado indicando fecha, sistema afectado, modo de falla, causa probable, tiempo de detención y acción ejecutada.

El indicador se calcula mediante la siguiente expresión:

$$MTBF = \frac{T_{operativo}}{N_{fallas}}$$

Donde:

- **Tiempo total de operación:** corresponde al periodo en que el sistema se encuentra operando o disponible para cumplir su función productiva.
- **Número total de fallas:** corresponde a los eventos que generan pérdida total o parcial de la función del sistema o equipo evaluado.

Para efectos de esta propuesta, el MTBF deberá analizarse de forma mensual y anual, tanto a nivel general del proceso de corte como por sistema crítico del equipo, tales como cabezal de corte, sistema óptico, refrigeración, neumática, extracción de humos, control CNC y dispositivos de seguridad.

De esta manera, el MTBF permitirá identificar tendencias de falla, evaluar la efectividad del mantenimiento preventivo y apoyar la toma de decisiones para mejorar la confiabilidad, disponibilidad y continuidad operacional del proceso de corte metálico.

3.2.2 Distribución de Weibull.

La distribución de Weibull se utiliza como una herramienta de análisis de confiabilidad que permite estudiar el comportamiento de las fallas en función del tiempo. Su aplicación es útil para identificar si un sistema presenta fallas tempranas, fallas aleatorias o fallas asociadas a desgaste progresivo. En este trabajo, el análisis Weibull se considera como una herramienta de apoyo para evaluar el comportamiento futuro del sistema de corte láser del área metalmecánica. A medida que se generen registros históricos de operación y fallas de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, será posible ajustar la distribución y analizar la tendencia de falla del activo dentro del proceso productivo.

El comportamiento de la distribución se interpreta principalmente mediante el parámetro de forma β . Cuando $\beta < 1$, las fallas se asocian generalmente a fallas iniciales o problemas de puesta en marcha. Cuando $\beta = 1$, el comportamiento se considera aleatorio. En cambio, cuando $\beta > 1$, existe una tendencia creciente de la tasa de falla, lo que puede relacionarse con desgaste, envejecimiento o deterioro progresivo de componentes.

Para el sistema de corte láser, este análisis permitirá identificar si las fallas se concentran en una etapa específica del ciclo de vida del activo o si se presentan de forma aleatoria durante la operación. Esta información será útil para ajustar frecuencias de mantenimiento, priorizar inspecciones y definir acciones preventivas sobre sistemas críticos como cabezal de corte, refrigeración, sistema óptico, neumática, extracción de humos y control CNC. La distribución de Weibull no reemplaza a los registros de mantenimiento ni a los indicadores básicos como MTBF o MTTR, sino que los complementa. Su valor principal está en entregar una visión más detallada del comportamiento de falla del sistema, permitiendo anticipar tendencias y apoyar la toma de decisiones dentro de la gestión del mantenimiento. De esta manera, el uso de Weibull permitirá fortalecer el análisis de confiabilidad del proceso de corte metálico, aportando información para mejorar la planificación preventiva, reducir detenciones no programadas y controlar el desempeño del activo durante su ciclo de vida.

3.2.3 Tasa de falla instantánea $\lambda(t)$.

La tasa de falla instantánea permite estimar la frecuencia con que un sistema puede presentar fallas durante un periodo determinado de operación. Este indicador complementa el análisis de confiabilidad, ya que permite observar si la probabilidad de falla aumenta, disminuye o se mantiene estable a medida que el activo acumula horas de funcionamiento.

En el contexto de este trabajo, la tasa de falla será utilizada para evaluar el comportamiento del sistema de corte láser del área metalmecánica, considerando como activo principal la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su seguimiento permitirá identificar tendencias asociadas a deterioro de componentes, condiciones operacionales inadecuadas o deficiencias en la planificación del mantenimiento.

De forma general, la tasa de falla puede estimarse a partir del inverso del MTBF, mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}}$$

Donde:

λ : corresponde a la tasa de falla del sistema o equipo evaluado.

MTBF: corresponde al tiempo medio entre fallas.

Cuando se utiliza el modelo de Weibull, la tasa de falla instantánea puede expresarse como:

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

Donde:

- $\lambda(t)$: tasa de falla instantánea en el tiempo (t).
- β : parámetro de forma.
- η : parámetro de escala.
- t : tiempo de operación.

Para el sistema de corte metálico, el seguimiento de este indicador permitirá identificar si las fallas aumentan con el tiempo, lo que puede estar asociado a desgaste de componentes, deficiencias en el mantenimiento preventivo, condiciones operacionales inadecuadas o fallas repetitivas en subsistemas específicos.

Este indicador deberá analizarse junto con los registros de mantenimiento, órdenes de trabajo y reportes de falla, con el fin de identificar las causas principales de los eventos y definir acciones preventivas o correctivas según corresponda.

3.2.4 Función de confiabilidad.

La función de confiabilidad permite estimar la probabilidad de que un sistema opere sin fallas durante un periodo determinado. En el contexto del proceso de corte metálico, este indicador permite evaluar la probabilidad de que el sistema de corte láser mantenga su función productiva durante un intervalo de tiempo definido.

Cuando se considera una tasa de falla constante, la función de confiabilidad puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Donde:

- $R(t)$ confiabilidad del sistema en el tiempo (t).
- λ : tasa de falla.
- (t): tiempo de operación.

En caso de utilizar la distribución de Weibull, la función de confiabilidad se expresa como:

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

- $R(t)$: probabilidad de operación sin falla hasta el tiempo (t).
- (t): Tiempo de operación.
- η : parámetro de escala.
- β : parámetro de forma.

Para la TRUMPF TruLaser Serie 1000, esta función deberá construirse progresivamente a partir de los registros históricos generados desde su puesta en marcha. La información necesaria provendrá de órdenes de trabajo, reportes de falla, registros de operación y antecedentes de mantenimiento.

El análisis de la función de confiabilidad permitirá estimar la probabilidad de que el sistema de corte láser opere sin interrupciones durante un periodo determinado. Esta información será útil para definir ventanas de mantenimiento, evaluar la efectividad del plan preventivo y anticipar posibles detenciones no programadas.

De esta manera, la función de confiabilidad se transforma en una herramienta de apoyo para la gestión del mantenimiento, ya que permite relacionar el comportamiento técnico del activo con la continuidad operacional del proceso de corte metálico.

3.2.5 Beneficios esperados del análisis de confiabilidad.

La aplicación de indicadores de confiabilidad permitirá contar con una base técnica para evaluar el comportamiento del sistema de corte metálico durante su operación. A través del MTBF, la tasa de falla, la distribución de Weibull y la función de confiabilidad, será posible analizar la frecuencia de fallas, identificar tendencias de deterioro y estimar la probabilidad de operación sin falla del sistema. Estos indicadores permitirán que el área de mantenimiento no solo registre eventos correctivos, sino que también utilice la información para anticipar problemas y mejorar la planificación preventiva. De esta manera, las órdenes de trabajo, reportes de falla y registros de operación se transforman en antecedentes útiles para la toma de decisiones.

Entre los principales beneficios esperados se encuentran la reducción de detenciones no programadas, el aumento del tiempo operativo disponible, la identificación de sistemas críticos, la priorización de acciones preventivas y el ajuste de frecuencias de mantenimiento según el comportamiento real del activo.

Además, el análisis de confiabilidad permitirá evaluar el desempeño del sistema de corte láser dentro del proceso productivo del área metalmecánica, considerando no solo la condición de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, sino también su impacto sobre la continuidad operacional, la planificación de producción y las etapas posteriores de fabricación.

En consecuencia, estos indicadores contribuyen a fortalecer la gestión del mantenimiento, ya que permiten pasar de un control basado principalmente en intervenciones correctivas a un sistema apoyado en datos, trazabilidad y mejora continua.

3.3 KPI de mantenibilidad.

Los KPI de mantenibilidad permiten evaluar la capacidad del sistema de mantenimiento para restituir la función del equipo o proceso después de una falla. En el contexto del sistema de corte metálico del área metalmecánica, estos indicadores son relevantes porque permiten medir la rapidez, eficiencia y efectividad con que se recupera la operación luego de una detención.

En este trabajo, la mantenibilidad se analiza considerando el sistema de corte láser como parte del proceso productivo, y no únicamente como una característica aislada de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Por esta razón, los indicadores deben relacionarse con los tiempos de reparación, la respuesta del personal de mantenimiento, la disponibilidad de repuestos, la existencia de procedimientos técnicos y la calidad de los registros generados mediante órdenes de trabajo.

Los principales KPI de mantenibilidad considerados corresponden al MTTR, tiempo de respuesta del mantenimiento, mantenibilidad instantánea y su relación con la disponibilidad operacional. Estos indicadores permitirán identificar oportunidades de mejora en la atención de fallas, planificación de recursos, capacitación técnica y control de tiempos improductivos.

De esta manera, la mantenibilidad se incorpora como una dimensión clave dentro de la gestión del mantenimiento, ya que no solo interesa reducir la frecuencia de fallas, sino también disminuir el tiempo requerido para recuperar la operación del sistema de corte metálico.

3.3.1 MTTR – Mean Time To Repair (Tiempo medio de reparación).

El tiempo medio de reparación, conocido como MTTR (Mean Time To Repair), corresponde al tiempo promedio requerido para restituir la función de un sistema o equipo después de una falla. En el contexto del proceso de corte metálico, este indicador permite medir la capacidad de respuesta del mantenimiento frente a detenciones que afecten la continuidad operacional del sistema de corte láser.

El MTTR se calcula mediante la siguiente expresión:

$$MTTR = \frac{TTR}{N_f}$$

- MTTR: tiempo medio entre fallas.
- TTR: tiempo total de reparación acumulada durante el periodo evaluado.
- N_f : número total de fallas registradas en el mismo periodo.

Para que este indicador sea representativo, cada intervención correctiva deberá quedar registrada mediante una orden de trabajo, indicando hora de inicio, hora de término, sistema intervenido, causa probable, repuestos utilizados, responsable de la intervención y condición final del equipo. En la TRUMPF TruLaser Serie 1000, el MTTR deberá analizarse tanto a nivel general del sistema de corte como por subsistemas críticos, tales como cabezal de corte, sistema óptico, refrigeración, neumática, extracción de humos, control CNC y dispositivos de seguridad. Esto permitirá identificar qué sistemas requieren mayor tiempo de intervención y dónde se deben priorizar mejoras en repuestos, capacitación, procedimientos o soporte técnico.

Un MTTR elevado puede estar asociado a diagnósticos prolongados, falta de repuestos críticos, dependencia de servicio técnico externo, ausencia de procedimientos estandarizados o baja disponibilidad de personal especializado. Por el contrario, una disminución del MTTR evidencia una mayor capacidad de respuesta del área de mantenimiento.

De esta manera, el MTTR permite evaluar la mantenibilidad del sistema de corte láser y apoyar la toma de decisiones orientadas a reducir tiempos de detención, mejorar la planificación de repuestos y aumentar la continuidad operacional del proceso de corte metálico.

3.3.2 Tiempo de respuesta del mantenimiento.

El tiempo de respuesta del mantenimiento permite medir el periodo transcurrido entre la notificación de una falla y el inicio efectivo de la intervención técnica. Este indicador es relevante para el sistema de corte metálico, ya que una respuesta tardía puede aumentar el tiempo total de detención y afectar la continuidad operacional del área.

Este KPI se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_{\text{respuesta}} = t_{\text{inicio}} - t_{\text{notificación}}.$$

Donde:

- $T_{\text{respuesta}}$: tiempo de respuesta del mantenimiento.
- t_{inicio} : hora de inicio de la intervención.
- $t_{\text{notificación}}$: hora de notificación de falla.

Para su aplicación, cada evento deberá registrarse en la orden de trabajo, indicando hora de aviso, hora de llegada del personal técnico, hora de inicio de la intervención y causa de la detención. Esta información permitirá identificar demoras asociadas a disponibilidad de personal, repuestos, herramientas, diagnóstico o coordinación interna. En el caso del sistema de corte láser, este indicador ayudará a controlar la capacidad de reacción del área de mantenimiento frente a fallas que puedan afectar la operación de la TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su seguimiento permitirá mejorar la planificación de recursos, reducir tiempos improductivos y apoyar la continuidad del proceso de corte metálico.

3.3.3 Mantenibilidad instantánea $M(t)$.

La mantenibilidad instantánea ($M(t)$) permite estimar la probabilidad de que un sistema o equipo sea reparado dentro de un tiempo determinado. Este indicador complementa el análisis del MTTR, ya que no solo considera el tiempo promedio de reparación, sino también la probabilidad de recuperación del sistema en un intervalo definido.

La función de mantenibilidad puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

- $M(t)$: probabilidad de que el sistema sea reparado antes del tiempo (t).
- μ : tasa de reparación.
- (t): tiempo de reparación.
- μ es la tasa de reparación, inversa a MTTR:

La tasa de reparación puede estimarse a partir del MTTR mediante la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

Para el sistema de corte láser, este indicador permitirá evaluar la capacidad de recuperación del proceso ante fallas que afecten la operación de la TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su análisis deberá apoyarse en los tiempos registrados en las órdenes de trabajo y reportes de mantenimiento.

De esta manera, la mantenibilidad instantánea permitirá complementar el seguimiento del MTTR, entregando una referencia sobre la probabilidad de restituir la operación del sistema dentro de un tiempo determinado.

3.3.4 Relación entre KPI de mantenibilidad y la disponibilidad.

Los indicadores de mantenibilidad se relacionan directamente con la disponibilidad operacional del sistema de corte metálico, ya que mientras menor sea el tiempo requerido para reparar una falla, menor será el tiempo de detención del proceso. Por esta razón, el MTTR, el tiempo de respuesta del mantenimiento y la mantenibilidad instantánea influyen directamente en la capacidad del sistema para volver a operar en condiciones normales.

En términos generales, la disponibilidad depende de la relación entre el tiempo medio entre fallas y el tiempo medio de reparación, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde:

- (A): disponibilidad del sistema.
- (MTBF): tiempo medio entre fallas.
- (MTTR): tiempo medio de reparación.

En el caso del sistema de corte láser, una reducción del MTTR permitirá mejorar la disponibilidad operacional y disminuir el impacto de las detenciones sobre la producción. Para ello, será necesario contar con repuestos críticos, procedimientos técnicos, personal capacitado y registros confiables de cada intervención.

De esta manera, los KPI de mantenibilidad no solo permiten evaluar la rapidez de reparación, sino también el efecto que tienen las intervenciones de mantenimiento sobre la continuidad operacional del proceso de corte metálico.

3.3.5 Beneficios directos de implementar estos KPI.

La implementación de KPI de mantenibilidad permitirá evaluar de forma más precisa la capacidad del área de mantenimiento para recuperar la operación del sistema de corte metálico luego de una falla. A través del MTTR, el tiempo de respuesta del mantenimiento y la mantenibilidad instantánea, será posible identificar demoras, recursos críticos y oportunidades de mejora en las intervenciones técnicas.

Estos indicadores permitirán mejorar la planificación de repuestos, reducir tiempos improductivos, fortalecer la capacitación del personal y estandarizar los procedimientos de reparación. Además, facilitarán el análisis de fallas repetitivas y la evaluación del desempeño del mantenimiento frente a detenciones del sistema de corte láser.

En consecuencia, los KPI de mantenibilidad aportan información relevante para disminuir los tiempos de reparación, aumentar la disponibilidad operacional y fortalecer la continuidad del proceso de corte metálico del área metalmecánica.

3.4 KPI de disponibilidad.

Los KPI de disponibilidad permiten evaluar la capacidad del sistema de corte metálico para encontrarse operativo cuando es requerido por producción. Este indicador es fundamental dentro de la gestión del mantenimiento, ya que relaciona la confiabilidad del sistema con la rapidez de recuperación ante fallas. En este trabajo, la disponibilidad se aplica al sistema de corte láser del área metalmecánica, considerando como activo principal la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su análisis permitirá determinar si el nuevo sistema cumple con los requerimientos de continuidad operacional y si las acciones de mantenimiento contribuyen a reducir los tiempos de indisponibilidad.

La disponibilidad puede analizarse desde distintas perspectivas, tales como disponibilidad intrínseca, disponibilidad operativa y disponibilidad total. Cada una permite evaluar el desempeño del sistema considerando diferentes condiciones, desde el comportamiento técnico del activo hasta las restricciones reales de operación, mantenimiento, repuestos y gestión.

Por esta razón, los KPI de disponibilidad permitirán relacionar los registros de fallas, tiempos de reparación, horas de operación y detenciones del proceso, entregando información útil para la toma de decisiones y la mejora continua del mantenimiento.

3.4.1 Disponibilidad intrínseca (A_i).

La disponibilidad intrínseca permite evaluar la capacidad teórica del sistema para operar, considerando únicamente la relación entre confiabilidad y mantenibilidad. Este indicador se calcula a partir del MTBF y el MTTR, sin incluir demoras externas como espera de repuestos, coordinación administrativa o disponibilidad de servicio técnico.

La disponibilidad intrínseca se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde:

- (A_i): disponibilidad intrínseca del sistema.
- (MTBF): tiempo medio entre fallas.
- (MTTR): tiempo medio de reparación.

En el caso del sistema de corte láser, este indicador permitirá evaluar el desempeño técnico esperado de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, considerando la frecuencia de fallas y el tiempo necesario para restituir su operación. Su cálculo deberá realizarse a partir de los registros de fallas y órdenes de trabajo generadas durante la operación del equipo. De esta manera, la disponibilidad intrínseca permitirá analizar si el activo presenta un comportamiento técnico adecuado y servirá como referencia para comparar el desempeño real del sistema de corte metálico con sus condiciones ideales de operación.

3.4.2 Disponibilidad Operativa (A_o).

La disponibilidad operativa permite evaluar la capacidad real del sistema para estar disponible durante la operación, considerando no solo los tiempos de falla y reparación, sino también las demoras asociadas al mantenimiento, repuestos, espera de personal técnico u otras condiciones propias del proceso.

Su expresión general es:

$$A_o = \frac{T_{operacional\ real}}{T_{operativo\ real} + T_{fuera\ de\ servicio}}$$

Donde:

- (Ao): disponibilidad operativa del sistema.
- (T operacional): tiempo operativo real.
- (T fuera de servicio): tiempo total de detención o indisponibilidad.

En el caso del sistema de corte láser, la disponibilidad operativa permitirá medir el comportamiento real de la TRUMPF TruLaser Serie 1000 dentro del área metalmecánica. Para su cálculo, se deberán considerar las horas efectivas de operación, las detenciones no programadas, los tiempos de reparación y las demoras asociadas a la gestión del mantenimiento. Este indicador será útil para comparar el desempeño esperado del equipo con su desempeño real en planta. De esta manera, permitirá identificar si las pérdidas de disponibilidad se deben principalmente a fallas técnicas, tiempos de espera, falta de repuestos, coordinación interna o condiciones operacionales del proceso de corte metálico.

3.4.3 Disponibilidad total (At).

La disponibilidad total permite evaluar el porcentaje de tiempo en que el sistema de corte metálico se encuentra disponible respecto al tiempo total considerado para el análisis. Este indicador entrega una visión global del desempeño del sistema, ya que considera tanto el tiempo operativo como las detenciones que afectan la continuidad del proceso.

La disponibilidad total se calcula mediante la siguiente expresión:

$$At = \frac{T \text{ disponible para producir}}{T \text{ calendario total}}$$

Donde:

- (At): disponibilidad total del sistema.
- *T disponible para producir*: incluye todas las horas útiles del periodo evaluado.
- *T calendario total*: corresponde al total de horas del periodo evaluado.

Para el sistema de corte láser, este indicador permitirá evaluar el nivel general de utilización de la TRUMPF TruLaser Serie 1000 dentro del área metalmecánica. Su cálculo deberá considerar las horas disponibles del periodo, las horas efectivas de operación y las detenciones registradas por fallas, mantenimiento u otras causas asociadas al proceso.

De esta manera, la disponibilidad total permitirá comparar el desempeño del nuevo sistema con la línea base del proceso anterior, identificando si la incorporación del equipo y la gestión del mantenimiento contribuyen a mejorar la continuidad operacional del área.

3.4.4 Impacto del KPI de disponibilidad en la gestión del proceso.

El seguimiento de la disponibilidad permitirá evaluar el impacto real del mantenimiento sobre la continuidad operacional del sistema de corte metálico. A través de este indicador será posible identificar cuánto tiempo permanece disponible el sistema y qué factores generan pérdidas de operación. En el caso de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, la disponibilidad deberá analizarse en conjunto con los registros de fallas, tiempos de reparación, órdenes de trabajo y datos operacionales del equipo. Esto permitirá diferenciar si las detenciones se originan por fallas técnicas, falta de repuestos, tiempos de espera, mantenimiento programado o condiciones propias del proceso productivo.

Este KPI también permitirá comparar el desempeño del nuevo sistema de corte láser con la situación anterior del proceso, donde la máquina TRUMPF Trumatic 2020R presentó una disponibilidad operacional baja y altos tiempos de reparación. De esta forma, la disponibilidad se transforma en un indicador clave para verificar si la renovación tecnológica y la propuesta de mantenimiento generan mejoras reales en la operación.

En consecuencia, el control de la disponibilidad permitirá apoyar la toma de decisiones del área de mantenimiento y producción, priorizar acciones de mejora, reducir tiempos de indisponibilidad y fortalecer la continuidad operacional del proceso de corte metálico.

3.5 Productividad – OEE (Overall Equipment Effectiveness).

El indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness) permite evaluar la eficiencia global de un equipo o sistema productivo, considerando la relación entre disponibilidad, rendimiento y calidad. A diferencia de los KPI de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad revisados anteriormente, el OEE integra factores operacionales que afectan directamente la productividad del proceso. En el contexto de este trabajo, el OEE se aplicará al sistema de corte metálico del área metalmecánica, considerando como activo principal la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su propósito será medir cuánto de la capacidad instalada se utiliza realmente, qué pérdidas afectan el proceso de corte y cuál es el rendimiento global del sistema bajo condiciones reales de operación.

Este indicador permitirá relacionar las detenciones del equipo, la velocidad real de corte, los tiempos de ciclo, la cantidad de piezas producidas y la calidad del producto final. De esta manera, el OEE no solo mide el desempeño técnico de la máquina, sino también el impacto del mantenimiento y de la operación sobre la productividad del área.

La aplicación de este KPI permitirá identificar pérdidas asociadas a fallas, ajustes, micro paros, reducción de velocidad, piezas defectuosas y retrabajos. Por lo tanto, su seguimiento será útil para priorizar acciones de mejora, optimizar el uso del sistema de corte láser y apoyar la continuidad del proceso productivo.

3.5.1 Definición general del OEE.

El OEE (Overall Equipment Effectiveness) se define como el producto de tres factores principales: disponibilidad, performance y calidad. Cada uno de estos componentes representa una pérdida distinta dentro del proceso productivo, por lo que su análisis permite identificar dónde se generan las principales ineficiencias del sistema de corte metálico.

$$OEE = Disponibilidad \times Performance \times Calidad.$$

Donde:

Disponibilidad: representa el tiempo real en que el sistema se encuentra disponible para producir respecto al tiempo programado.

Performance: representa la relación entre el rendimiento real del sistema y su rendimiento teórico o nominal.

Calidad: representa la proporción de piezas buenas respecto al total de piezas producidas.

En el caso del sistema de corte láser del área metalmecánica, este indicador permitirá evaluar de manera integrada el efecto de las detenciones, pérdidas de velocidad, micro paros, piezas defectuosas y retrabajos. De esta forma, el OEE no solo mide la eficiencia de la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000, sino también el desempeño global del proceso de corte metálico bajo condiciones reales de operación.

3.5.2 Las seis grandes pérdidas del OEE.

El OEE se estructura sobre el modelo de las seis grandes pérdidas, las cuales representan las principales causas de ineficiencia dentro de un proceso productivo. En el caso del sistema de corte metálico, estas pérdidas permiten identificar los factores que afectan la disponibilidad, el rendimiento y la calidad del proceso.

Para la TRUMPF TruLaser Serie 1000, las seis grandes pérdidas se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Fallas del equipo (Disponibilidad).

corresponden a detenciones no programadas provocadas por fallas en sistemas críticos, tales como CNC, ejes, sistema óptico, cabezal de corte, refrigeración o componentes eléctricos. Estas pérdidas afectan directamente la disponibilidad.

2. Preparaciones y ajustes (Disponibilidad).

incluyen cambios de boquillas, calibraciones, alineación óptica, ajustes de parámetros y preparación del equipo antes de iniciar la producción. Estas actividades reducen el tiempo disponible para producir

3. Paradas menores y micro paros (Performance).

corresponden a interrupciones breves durante la operación, tales como alarmas momentáneas del CNC, errores de lectura, ajustes menores o pequeñas detenciones del proceso. Estas pérdidas afectan principalmente la performance.

4. Reducción de velocidad (Performance).

se presenta cuando el corte se realiza por debajo de la velocidad nominal debido a condiciones del material, desgaste de lentes o boquillas, mala extracción de humos, parámetros inadecuados o limitaciones del proceso.

5. Piezas defectuosas producidas durante el arranque (Calidad).

corresponden a productos no conformes generados al inicio de la operación, generalmente asociados a descalibración, mala alineación del cabezal, temperatura inadecuada o parámetros iniciales incorrectos.

6. Scrap y retrabajos (Calidad).

corresponden a piezas que no cumplen tolerancias dimensionales o calidad de corte, debido a problemas ópticos, térmicos, de programación, material o condición del equipo.

La identificación de estas pérdidas permitirá analizar con mayor precisión el comportamiento del sistema de corte láser y determinar qué factores afectan con mayor fuerza el OEE. De esta manera, el indicador no solo entregará un valor porcentual, sino también información útil para orientar acciones de mejora en mantenimiento, operación, calidad y planificación productiva.

3.5.3 Interpretación del OEE.

La interpretación del OEE permite clasificar el nivel de eficiencia global del sistema productivo y determinar si existen pérdidas relevantes asociadas a disponibilidad, performance o calidad. En el caso del sistema de corte metálico, este indicador permitirá evaluar si la TRUMPF TruLaser Serie 1000 está siendo utilizada de forma eficiente dentro del proceso del área metalmecánica.

El OEE se basa en el enfoque del Mantenimiento Productivo Total, TPM, donde se analizan las pérdidas que afectan la eficiencia del equipo o sistema productivo. Además, su uso se relaciona con los criterios de medición de desempeño productivo considerados en la ISO 22400, la cual aborda indicadores clave de desempeño para operaciones de manufactura.

Los valores de referencia del OEE pueden variar según el tipo de industria, nivel de automatización, complejidad del proceso y condiciones de operación. Sin embargo, para efectos de análisis general.

<u>OEE %</u>	<u>Interpretación.</u>
85-100%	Nivel de clase mundial, asociado a alta eficiencia y control del proceso.
75-85%	Buen nivel de desempeño operacional, con pérdidas controladas.
60-75%	Nivel aceptable, pero con oportunidades de mejora relevantes.
< 60%	Nivel bajo de eficiencia. Indica pérdidas importantes en disponibilidad, rendimiento o calidad.

Esto permite utilizar el OEE como una referencia para evaluar el desempeño del sistema de corte láser. No obstante, el análisis no debe limitarse al valor final del indicador, ya que un mismo resultado puede deberse a causas distintas. Por ejemplo, un OEE bajo puede estar asociado a baja disponibilidad por fallas, baja performance por reducción de velocidad o baja calidad por piezas defectuosas.

Por esta razón, el OEE deberá analizarse junto con sus tres componentes principales. Esta revisión permitirá identificar la causa predominante de pérdida y definir acciones específicas de mantenimiento, operación o control de calidad.

De esta manera, la interpretación del OEE permitirá transformar los datos de producción y mantenimiento en información útil para mejorar la eficiencia del proceso de corte metálico y apoyar la toma de decisiones dentro del área.

3.5.4 Beneficios de implementar KPI y OEE.

La implementación del KPI y OEE permitirá evaluar de manera integral el desempeño del sistema de corte metálico, considerando disponibilidad, performance y calidad. A diferencia de otros indicadores que analizan solo fallas o tiempos de reparación, el OEE permite identificar pérdidas productivas que afectan directamente la eficiencia del proceso. En el caso del sistema de corte láser, este indicador permitirá detectar si las principales pérdidas se relacionan con detenciones no programadas, reducción de velocidad, ajustes, micro paros, piezas defectuosas o retrabajos. Esta información será útil para orientar acciones de mejora tanto en mantenimiento como en operación y control de calidad.

Entre los principales beneficios esperados se encuentran:

- Mayor control sobre las pérdidas productivas del proceso.
- Identificación de causas que afectan disponibilidad, performance y calidad.
- Mejor planificación de mantenimiento y producción.
- Reducción de detenciones, reprocesos y tiempos improductivos.
- Apoyo a la toma de decisiones mediante información cuantificable.
- Mejora progresiva de la eficiencia del sistema de corte metálico.

De esta manera, el OEE permitirá complementar los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, entregando una visión más completa del desempeño del nuevo sistema de corte láser dentro del área metalmecánica.

3.6 KPI de Costas y Ciclo de Vida (LCC).

La gestión económica del mantenimiento constituye un elemento relevante dentro del sistema de indicadores propuesto, ya que permite evaluar el impacto financiero asociado al funcionamiento del sistema de corte metálico durante su ciclo de vida. En este contexto, el análisis de costos no debe limitarse al valor de adquisición de la máquina, sino que debe considerar también operación, mantenimiento, fallas, repuestos, detenciones y reemplazo de componentes críticos.

En este trabajo, el enfoque de costo de ciclo de vida, conocido como LCC (Life Cycle Cost), se aplica al sistema de corte láser del área metalmecánica, considerando como activo principal la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su aplicación permitirá estimar el costo real de mantener operativo el proceso de corte y comparar su desempeño económico con la situación anterior, donde existían costos asociados a fallas correctivas, baja disponibilidad y externalización productiva.

El análisis LCC permite vincular los costos con indicadores técnicos como MTBF, MTTR, disponibilidad y OEE. De esta manera, las fallas, tiempos de reparación, consumo de repuestos y pérdidas productivas podrán transformarse en información económica útil para la toma de decisiones.

Por lo tanto, los KPI de costos y ciclo de vida permitirán apoyar la planificación presupuestaria, justificar inversiones en mantenimiento preventivo, controlar gastos asociados a fallas y evaluar si la gestión del nuevo sistema de corte láser aporta valor al proceso productivo del área metalmecánica.

3.6.1 Definición de costo del ciclo de vida (LCC).

El costo del ciclo de vida, conocido como LCC (Life Cycle Cost), corresponde al costo total asociado a un activo o sistema durante todas las etapas de su vida útil. Este análisis considera no solo la inversión inicial, sino también los costos de operación, mantenimiento, repuestos, energía, detenciones, externalización y disposición final. En el contexto de este trabajo, el LCC permite evaluar el impacto económico del sistema de corte metálico del área metalmecánica, considerando como activo principal la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. Su aplicación permite relacionar los costos del mantenimiento con el desempeño técnico del

proceso, especialmente en aspectos como disponibilidad, confiabilidad, tiempos de reparación y eficiencia operacional.

El costo del ciclo de vida puede expresarse de forma general mediante la siguiente ecuación:

$$LCC = C_{adq} + C_{op} + C_{mtto} + C_{fallas} + C_{reemplazo}$$

Donde:

- C_{adq} = costo de adquisición.
- C_{op} = costos de operación (energía, consumibles, gases, etc.).
- C_{mtto} = costos de mantenimiento (preventivo + calibraciones + mano de obra)
- C_{fallas} = costos derivados de fallas correctivas.
- $C_{reemplazo}$ = costos de renovación de componentes críticos.

Para el sistema de corte láser, este indicador permitirá controlar los costos asociados a la operación del equipo, las intervenciones de mantenimiento, el consumo de repuestos, las detenciones no programadas y eventuales servicios externos. De esta manera, el LCC entrega una visión económica más completa que el análisis basado únicamente en el costo de adquisición de la máquina.

La aplicación de este enfoque permitirá evaluar si la incorporación de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, junto con la propuesta de gestión del mantenimiento, contribuye a reducir costos por fallas, mejorar la continuidad operacional y aportar mayor valor al proceso productivo del área metalmecánica.

3.6.2 Componentes del LCC aplicados al sistema de corte láser.

Los componentes del costo del ciclo de vida permiten clasificar los principales costos asociados al sistema de corte láser durante su operación. Esta clasificación facilita el análisis económico del activo y permite identificar qué elementos tienen mayor impacto sobre el costo total del proceso de corte metálico.

Para la TRUMPF TruLaser Serie 1000, los componentes considerados dentro del LCC corresponden a costos de adquisición, operación, mantenimiento, fallas y reemplazo de componentes críticos. Cada uno de estos costos debe ser registrado y controlado mediante información proveniente de compras, órdenes de trabajo, registros de mantenimiento, consumo de repuestos y datos operacionales del equipo.

3.6.3 Costos de adquisición (C_{adq}).

Los costos de adquisición corresponden a la inversión inicial necesaria para incorporar el sistema de corte láser al área metalmecánica. Dentro de este componente se consideran la compra del equipo, instalación, capacitación inicial, puesta en marcha y adecuaciones necesarias para su operación. Este costo representa una inversión fija inicial, pero sirve como referencia para evaluar el retorno económico del equipo durante su ciclo de vida. Además, permite comparar la inversión con los beneficios esperados en términos de disponibilidad, productividad, reducción de externalización y mejora del proceso de corte metálico.

3.6.4 Costos de operación.

Los costos de operación corresponden a los gastos asociados al funcionamiento normal del sistema de corte láser. Estos costos incluyen energía eléctrica, gases de asistencia, consumibles, materiales auxiliares, filtros de extracción y actividades de limpieza o preparación del material.

De forma general, este componente puede expresarse como:

$$C_{\text{op}} = C_{\text{energía}} + C_{\text{consumibles}} + C_{\text{materiales auxiliares}}.$$

El seguimiento de estos costos permitirá identificar cuánto representa el uso normal del equipo dentro del costo total del proceso. Además, facilitará el análisis de eficiencia operacional, especialmente cuando se relacione con indicadores como OEE, productividad y costo por pieza producida.

3.6.5 Costos de mantenimiento (C_{mtto}).

Los costos de mantenimiento consideran los gastos asociados a la conservación del sistema de corte láser en condiciones operativas. Incluyen mantenimiento preventivo, actividades basadas en condición, calibraciones, mano de obra, servicios técnicos y repuestos utilizados en intervenciones programadas.

De forma general, este componente puede expresarse como:

$$C_{\text{mtto}} = C_{\text{preventivo}} + C_{\text{predictivo}} + C_{\text{calibraciones}} + C_{\text{mano de obra}}.$$

Dentro de este componente se consideran actividades como inspecciones periódicas, alineación óptica, calibraciones CNC, limpieza del cabezal, revisión de sistemas auxiliares y recambios programados. Su control permitirá evaluar si el plan de

mantenimiento preventivo se ejecuta de forma eficiente y si contribuye a reducir fallas no programadas.

3.6.6 Costos por fallas (C_{fallas}).

Los costos por fallas corresponden a los gastos generados por eventos no programados que afectan la operación del sistema de corte láser. Estos costos pueden incluir repuestos correctivos, mano de obra, tiempo perdido, pérdida de producción, scrap, retrabajos y eventual externalización de trabajos de corte.

De forma general, este componente puede expresarse como:

$$C_{\text{fallas}} = C_{\text{repuestos}} + C_{\text{mano de obra}} + C_{\text{tiempo perdido}}.$$

En el caso del proceso de corte metálico, este indicador permitirá cuantificar impactos económicos que anteriormente podían quedar dispersos o sin registro formal. Para ello, será necesario asociar cada falla registrada en la orden de trabajo con sus costos directos e indirectos.

3.6.7 Costos de reemplazo. ($C_{\text{reemplazo}}$).

Los costos de reemplazo corresponden a los gastos asociados a la renovación de componentes críticos del sistema de corte láser durante su vida útil. Estos componentes pueden incluir cabezal de corte, lentes, módulos del resonador, placas electrónicas, guías lineales, sensores, filtros especiales o elementos del sistema de refrigeración.

$$C_{\text{reemplazo}} = C_{\text{componentes críticos}} + C_{\text{obsolescencia}}.$$

El seguimiento de este componente permitirá anticipar inversiones futuras, planificar repuestos críticos y evitar que el reemplazo de componentes relevantes se realice únicamente de forma reactiva. De esta manera, el costo de reemplazo se transforma en una herramienta de planificación económica dentro del ciclo de vida del activo.

3.6.8 KPI derivados del LCC.

A partir del análisis de costo del ciclo de vida es posible definir indicadores económicos que permitan controlar el impacto financiero del sistema de corte metálico durante su operación. Estos KPI permiten relacionar los costos de mantenimiento, operación y fallas con el desempeño real del proceso.

Para el sistema de corte láser, los principales KPI derivados del LCC corresponden al costo de mantenimiento por hora operativa, costo por pieza producida y costo de falla por hora de detención.

El costo de mantenimiento por hora operativa permite relacionar el gasto total de mantenimiento con las horas reales de operación del sistema:

- Costo por hora de operación (C_h).

$$C_h = \frac{LCC}{\text{Horas totales operadas.}}$$

- Costo por pieza producida. (C_p).

$$C_p = \frac{C_{op} + C_{mtto} + C_{fallas}}{\text{Unidades producidas.}}$$

- Costo de falla por hora (C_{fh}).

$$C_{fh} = \frac{C_{fallas}}{\text{Horas de falla.}}$$

Estos indicadores deberán calcularse a partir de órdenes de trabajo, registros de repuestos, costos de mantenimiento, horas de operación y reportes de producción. Su seguimiento permitirá identificar desviaciones económicas, evaluar la eficiencia del mantenimiento y apoyar decisiones relacionadas con repuestos, servicios externos y planificación presupuestaria.

De esta manera, los KPI derivados del LCC permiten complementar los indicadores técnicos del sistema de corte láser con una visión económica del proceso, facilitando la toma de decisiones basada en costos, desempeño y continuidad operacional.

3.6.9 Rol estratégico del LCC en la empresa.

La comparación económica entre el sistema actual de punzonado y el sistema propuesto de corte láser permite evaluar el impacto esperado de la renovación tecnológica sobre los costos del proceso de corte metálico. Esta comparación no debe considerar únicamente el costo de adquisición del nuevo equipo, sino también los costos asociados a mantenimiento, fallas, disponibilidad, externalización y continuidad operacional.

En el sistema actual, la máquina TRUMPF Trumatic 2020R presenta costos relevantes asociados a mantenimiento correctivo, tiempos prolongados de reparación, dificultad para obtener repuestos y externalización de trabajos de corte durante periodos de indisponibilidad. Estos antecedentes fueron analizados en el diagnóstico del Capítulo 1 y permiten establecer una línea base para evaluar el desempeño económico del sistema propuesto.

Con la incorporación de la TRUMPF TruLaser Serie 1000 se espera reducir la frecuencia de fallas, disminuir los tiempos de reparación, mejorar la disponibilidad operacional y reducir la dependencia de servicios externos de corte. Además, al contar con un plan de mantenimiento preventivo, checklist, órdenes de trabajo y registros de seguimiento, será posible controlar de mejor forma los costos asociados al ciclo de vida del activo.

La Tabla 10 presenta una comparación general entre el sistema actual y el sistema propuesto, considerando los principales aspectos técnicos y económicos que influyen en el costo del proceso.

Aspecto evaluado	Sistema actual: TRUMP Trumatic 2020 R	Sistema propuesto: TRUMPF TruLáser Serie 1000
Tipo de mantenimiento predominante	Correctivo y reactivo	Preventivo, documentado y apoyado en condición
Disponibilidad operacional	Baja, según diagnóstico del año 2024	Esperada mayor, mediante control preventivo
Tiempos de reparación	Elevados por antigüedad y repuestos	Esperados menores por equipo nuevo y planificación
Repuestos	Dificultad de obtención por obsolescencia	Repuestos definidos desde la puesta en marcha
Externalización de corte	Alta durante detenciones del equipo	Esperada menor por mayor continuidad operacional
Costos correctivos	Relevantes por fallas no programadas	Esperados menores mediante mantenimiento planificado
Trazabilidad de información	Limitada y dispersa	Estructurada mediante OT, checklist y registros
Impacto productivo	Retrasos y dependencia externa	Mayor control del proceso interno

Tabla 10. Comparación económica esperada entre sistema actual y sistema propuesto.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 10 permite visualizar que la mejora económica esperada no depende únicamente del cambio de tecnología, sino también de la forma en que se gestione el mantenimiento del nuevo sistema. Por esta razón, la propuesta considera herramientas documentales e indicadores que permitirán registrar costos, controlar fallas y evaluar el desempeño del sistema de corte láser durante su operación.

De esta manera, la comparación económica esperada permite justificar la necesidad de implementar una gestión de mantenimiento más estructurada, orientada a reducir costos correctivos, mejorar la disponibilidad y fortalecer la continuidad operacional del proceso de corte metálico.

3.6.10 Importancia de integrar LCC con KPI técnicos.

La integración del LCC con los KPI técnicos permite relacionar los costos del sistema de corte metálico con su desempeño operacional. De esta manera, indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidad y OEE no se analizan de forma independiente, sino asociados al impacto económico que generan las fallas, reparaciones, detenciones y pérdidas productivas. En el caso de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, esta integración permitirá identificar cómo el comportamiento técnico del equipo influye en los costos de mantenimiento y operación. Por ejemplo, una mayor frecuencia de fallas puede aumentar los costos correctivos, mientras que tiempos elevados de reparación pueden generar mayor indisponibilidad y afectar la continuidad del proceso.

Por esta razón, el análisis conjunto entre LCC y KPI técnicos permitirá apoyar la toma de decisiones del área de mantenimiento, especialmente en la planificación de repuestos, priorización de intervenciones, control de costos y evaluación del desempeño del sistema durante su ciclo de vida.

De esta forma, el LCC complementa los indicadores técnicos al entregar una visión económica del mantenimiento, permitiendo controlar no solo la condición del activo, sino también el costo asociado a mantener operativo el proceso de corte metálico.

3.7 Beneficios esperados.

La implementación de KPI de costos y ciclo de vida permitirá controlar de mejor manera los gastos asociados al sistema de corte metálico durante su operación. Estos indicadores entregarán información sobre costos de mantenimiento, repuestos, fallas, tiempos de detención, operación y eventuales servicios externos requeridos por el proceso.

En el caso de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, estos KPI permitirán evaluar si el nuevo sistema de corte láser mantiene un comportamiento económico favorable durante su ciclo de vida. Además, ayudarán a comparar los costos reales de

operación con la situación anterior del proceso, donde existían gastos asociados a mantenimiento correctivo, baja disponibilidad y externalización de trabajos de corte.

Entre los principales beneficios esperados se encuentran:

- Mayor control de los costos de mantenimiento.
- Identificación de fallas o componentes con mayor impacto económico.
- Mejor planificación de repuestos críticos.
- Apoyo a la planificación presupuestaria del área.
- Evaluación económica del desempeño del sistema de corte láser.
- Reducción progresiva de costos asociados a detenciones no programadas.

De esta manera, los KPI de costos y ciclo de vida permitirán complementar los indicadores técnicos desarrollados en este capítulo, entregando una visión más completa del desempeño del sistema. Su aplicación contribuirá a mejorar la toma de decisiones, controlar los gastos de mantenimiento y fortalecer la gestión económica del proceso de corte metálico del área metalmecánica.

3.8 Implementación del sistema KPI.

La implementación del sistema KPI tiene como finalidad establecer una forma ordenada de registrar, analizar y utilizar la información generada por el sistema de corte metálico. Para que los indicadores definidos en este capítulo sean útiles, no basta con contar con fórmulas de cálculo; también es necesario definir cómo se capturarán los datos, quién será responsable de validarlos y con qué frecuencia serán revisados.

En el caso de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, la implementación de los KPI deberá apoyarse en los documentos desarrollados en el capítulo anterior, tales como órdenes de trabajo, checklist, rutinas técnicas, reportes de falla y registros de mantenimiento. Estos documentos permitirán generar la información necesaria para calcular indicadores de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, OEE y costos de ciclo de vida. La aplicación del sistema deberá realizarse desde la puesta en marcha del equipo, con el objetivo de construir un historial técnico y económico desde el inicio de su operación. Esto permitirá comparar el comportamiento real del sistema de corte láser con los objetivos definidos por el área de mantenimiento y producción.

Para una correcta implementación, se consideran cuatro etapas principales: captura de datos, validación de información, análisis de indicadores y generación de acciones de mejora. Estas etapas permiten asegurar que los KPI no queden solo como indicadores teóricos, sino que sean utilizados como herramienta de control y apoyo a la toma de decisiones.

De esta manera, la implementación del sistema KPI permitirá fortalecer la trazabilidad de la información, mejorar el seguimiento del desempeño del activo y apoyar la mejora continua del proceso de corte metálico del área metalmecánica.

3.8.1 Captura de datos operacional y de mantenimiento.

La captura de datos corresponde a la primera etapa para implementar el sistema KPI. Su objetivo es recopilar información confiable sobre la operación, mantenimiento y desempeño del sistema de corte metálico, utilizando registros definidos previamente, tales como checklist, órdenes de trabajo, reportes de falla y registros de producción. En el caso de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, los datos deberán registrarse desde la puesta en marcha del equipo, con el fin de construir un historial técnico desde el inicio de su ciclo de vida. Esta información permitirá calcular indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidad, OEE y costos asociados al mantenimiento.

Los principales datos que deberán capturarse son:

- Horas de operación del sistema.
- Detenciones no programadas.
- Tiempo de inicio y término de cada intervención.
- Sistema o componente afectado.
- Modo de falla y causa probable.
- Repuestos e insumos utilizados.
- Cantidad de piezas producidas.
- Piezas rechazadas o reprocesadas.
- Costos asociados a mantenimiento y fallas.
- Observaciones registradas por operador o técnico.

La captura de datos deberá ser realizada principalmente por operadores y técnicos de mantenimiento, según el tipo de información requerida. El operador podrá registrar

condiciones básicas de funcionamiento, alarmas, limpieza, producción y desviaciones detectadas durante la operación. Por su parte, el técnico de mantenimiento deberá registrar las intervenciones ejecutadas, tiempos de reparación, repuestos utilizados y condición final del equipo. De esta manera, la captura de datos permitirá transformar las actividades diarias de operación y mantenimiento en información útil para el cálculo de indicadores y el seguimiento del desempeño del sistema de corte metálico.

3.8.2 Validación de la información.

La validación de la información corresponde a la revisión de los datos registrados durante la operación y mantenimiento del sistema de corte metálico. Esta etapa permite verificar que los registros estén completos, sean coherentes y puedan utilizarse correctamente para el cálculo de los indicadores definidos. En el caso de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, la validación deberá considerar la revisión de órdenes de trabajo, checklist, reportes de falla, registros de producción y antecedentes de costos. Esta actividad deberá ser realizada por el supervisor o responsable de mantenimiento, verificando que cada intervención cuente con fecha, responsable, sistema afectado, causa probable, tiempo de detención, acción ejecutada y condición final del equipo.

Una vez validada, la información deberá almacenarse de forma ordenada en una base de datos o registro centralizado del área de mantenimiento. Esta base deberá permitir consultar el historial del equipo, identificar fallas repetitivas, controlar tiempos de reparación, revisar consumo de repuestos y calcular indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidad, OEE y costos de ciclo de vida.

El almacenamiento ordenado de la información permitirá mantener trazabilidad sobre el comportamiento del sistema de corte láser desde su puesta en marcha. Además, facilitará la comparación de resultados mensuales y anuales, permitiendo detectar desviaciones y apoyar la toma de decisiones.

De esta manera, la validación y almacenamiento de la información aseguran que los KPI se calculen sobre datos confiables, evitando errores de interpretación y fortaleciendo el control del mantenimiento del proceso de corte metálico.

3.8.3 Control estadístico.

El análisis de indicadores corresponde a la etapa en que los datos validados se transforman en información útil para la toma de decisiones. En esta fase se calculan los KPI definidos en el capítulo, tales como MTBF, MTTR, disponibilidad, OEE y costos asociados al ciclo de vida del sistema de corte metálico. En el caso de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, el análisis deberá realizarse de forma periódica, preferentemente mensual, con el objetivo de identificar tendencias, desviaciones y oportunidades de mejora. Los resultados obtenidos permitirán evaluar si el sistema mantiene un comportamiento adecuado o si existen pérdidas asociadas a fallas, reparaciones prolongadas, baja productividad, piezas defectuosas o aumento de costos.

El control estadístico permitirá comparar los resultados obtenidos con valores históricos, metas internas o rangos de referencia definidos por el área de mantenimiento y producción. Para ello, se podrán utilizar tablas de seguimiento, gráficos de tendencia y reportes mensuales que permitan visualizar la evolución de los indicadores.

Cuando un KPI presente desviaciones relevantes, se deberá revisar la información de respaldo, tales como órdenes de trabajo, checklist, reportes de falla y registros de producción. Esto permitirá identificar la causa principal del problema y definir acciones correctivas o preventivas según corresponda.

De esta manera, el análisis de indicadores y control estadístico permitirá que el sistema KPI no se limite al cálculo de valores, sino que funcione como una herramienta de seguimiento, control y mejora continua del proceso de corte metálico.

3.8.4 Generación de tendencias y mejora continua.

La mejora continua basada en KPI corresponde a la utilización de los indicadores como apoyo para definir acciones correctivas, preventivas y de optimización del mantenimiento. Su objetivo es que los resultados obtenidos no queden solo como registros estadísticos, sino que permitan generar decisiones concretas sobre el sistema de corte metálico. En el caso de la TRUMPF TruLaser Serie 1000, los indicadores deberán revisarse periódicamente para identificar desviaciones en confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, OEE y costos. Cuando un KPI presente un resultado desfavorable, se deberá analizar la causa asociada y definir acciones de mejora, tales como ajustes en el plan preventivo, actualización de checklist, capacitación del personal, revisión de

repuestos críticos o modificación de rutinas técnicas. Las acciones definidas deberán quedar registradas y contar con responsable, plazo de ejecución y seguimiento posterior. Esto permitirá verificar si la medida aplicada generó una mejora real en el comportamiento del sistema. De esta manera, la mejora continua basada en KPI permitirá fortalecer la gestión del mantenimiento, reducir la repetición de fallas y mantener un control más efectivo sobre la continuidad operacional del proceso de corte metálico.

Para complementar la implementación del sistema KPI, en la Tabla 11 se presenta una propuesta básica de responsabilidades, frecuencia de revisión y registros asociados. Esta tabla permite ordenar la aplicación práctica de los indicadores dentro del área metalmecánica.

Etapas	Actividad principal	Responsable	Frecuencia	Registro asociado
Captura de datos	Registrar operación, fallas, detenciones, producción y observaciones del equipo.	Operador / Técnico de mantenimiento	Diario / por evento	Checklist, orden de trabajo, reporte de falla
Validación de información	Revisar que los datos registrados estén completos y sean coherentes.	Supervisor de mantenimiento	Semanal	OT cerradas, checklist revisados, base de datos
Cálculo de KPI	Calcular MTBF, MTTR, disponibilidad, OEE y costos asociados.	Planificador o encargado de mantenimiento	Mensual	Planilla KPI, registros de mantenimiento
Análisis de resultados	Identificar desviaciones, tendencias y principales causas de pérdida.	Jefatura de mantenimiento / producción	Mensual	Reporte de indicadores
Acciones de mejora	Definir acciones correctivas, preventivas o ajustes al plan de mantenimiento	Mantenimiento / Producción	Mensual o según criticidad	Plan de acción, actualización de rutinas
Seguimiento	Verificar cumplimiento de acciones y evolución de los indicadores.	Supervisor de mantenimiento	Mensual / trimestral	Informe de seguimiento KPI

Tabla 11. Propuesta de implementación del sistema KPI.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 11 permite visualizar que la implementación del sistema KPI requiere una participación coordinada entre operación, mantenimiento y supervisión. Cada etapa cumple una función específica dentro del control del sistema de corte metálico, desde el registro inicial de datos hasta el seguimiento de las acciones de mejora.

En consecuencia, la aplicación de los KPI no debe entenderse solo como el cálculo de indicadores, sino como un proceso de gestión que permite registrar información, validarla, analizarla y utilizarla para mejorar el desempeño del sistema de corte láser. Esta estructura permitirá fortalecer la trazabilidad del mantenimiento y apoyar la toma de decisiones dentro del área metalmecánica.

4 Conclusión indicadores KPI.

La implementación del sistema de indicadores clave de desempeño, KPI, para el sistema de corte metálico del área metalmecánica constituye una herramienta relevante para fortalecer la gestión del mantenimiento de la TRUMPF TruLaser Serie 1000. A través de estos indicadores será posible superar la falta de registros técnicos, operativos y económicos consolidados, generando una base de información útil para la toma de decisiones. En este capítulo se definieron indicadores asociados a confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, productividad y costos de ciclo de vida. Estos KPI permiten evaluar el comportamiento del sistema de corte láser desde distintas dimensiones, considerando la frecuencia de fallas, tiempos de reparación, continuidad operacional, eficiencia productiva, calidad del proceso y costos asociados al mantenimiento.

El logro del primer objetivo específico se evidencia mediante la utilización de la línea base obtenida en el diagnóstico del proceso actual, donde se identificaron problemas de disponibilidad, mantenibilidad, costos correctivos, externalización y baja trazabilidad de información. Estos antecedentes permitieron definir qué indicadores serán necesarios para controlar el desempeño futuro del nuevo sistema de corte.

El logro del segundo objetivo específico se evidencia mediante la relación entre los KPI propuestos y la documentación técnica desarrollada en el capítulo anterior, tales como plan de mantenimiento, checklist, rutinas técnicas, análisis FMECA, órdenes de trabajo y registros de mantenimiento. Estos documentos permitirán capturar los datos necesarios para calcular los indicadores y mantener trazabilidad sobre las actividades ejecutadas.

El logro del tercer objetivo específico se evidencia directamente en este capítulo, mediante la definición de indicadores de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, OEE y costos de ciclo de vida. Además, se establece una forma básica de implementación basada en captura de datos, validación de información, análisis de indicadores, generación de acciones de mejora y asignación de responsabilidades.

De esta manera, el objetivo general del trabajo se ve reflejado en la integración entre diagnóstico, documentación técnica e indicadores de desempeño. La propuesta no se limita a incorporar una nueva máquina, sino que busca establecer una base de gestión del mantenimiento para el sistema de corte metálico, orientada a mejorar la disponibilidad, confiabilidad, continuidad operacional y control económico del proceso. En consecuencia, los KPI desarrollados permitirán transformar los registros de operación y mantenimiento en información útil para la mejora continua. Su aplicación permitirá evaluar el desempeño real del sistema de corte láser, identificar desviaciones, priorizar acciones preventivas y apoyar la toma de decisiones del área metalmecánica durante el ciclo de vida del activo.

Conclusión.

El desarrollo de este trabajo permitió elaborar una propuesta de gestión del mantenimiento para el sistema de corte metálico del área metalmecánica, considerando como activo principal la máquina TRUMPF TruLaser Serie 1000. La propuesta se estructuró a partir del diagnóstico técnico, operativo y económico del sistema actual, la elaboración de documentación técnica y administrativa, y la definición de indicadores clave de desempeño para controlar el comportamiento futuro del proceso.

A partir del diagnóstico realizado en el Capítulo 1, se evidenció que la máquina TRUMPF Trumatic 2020R presentaba limitaciones relevantes asociadas a obsolescencia tecnológica, baja disponibilidad operacional, altos tiempos de reparación, dificultad para obtener repuestos, costos de mantenimiento correctivo, externalización productiva y riesgos de seguridad por exposición a ruido. Estos antecedentes permitieron justificar la necesidad de renovación tecnológica y establecer una línea base para comparar el desempeño futuro del nuevo sistema de corte láser. El primer objetivo específico se cumple mediante el análisis de la situación actual del proceso de corte metálico, donde se evaluaron las condiciones técnicas y operativas de la máquina existente, sus indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, además de los costos asociados a mantenimiento correctivo y externalización. Este análisis permitió identificar las principales brechas del proceso y fundamentar la necesidad de fortalecer la gestión del mantenimiento.

El segundo objetivo específico se cumple a través de la elaboración de la documentación técnica y administrativa para la TRUMPF TruLaser Serie 1000. En este sentido, se desarrollaron herramientas como el plan de mantenimiento preventivo, checklist de inspección, rutinas técnicas, análisis FMECA, orden de trabajo y registros de mantenimiento. Estos documentos permiten ordenar la planificación, ejecución, control y trazabilidad de las actividades de mantenimiento desde la puesta en marcha del equipo.

El tercer objetivo específico se cumple mediante la definición de indicadores clave de desempeño asociados a confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, productividad, costos y ciclo de vida. Estos KPI permitirán transformar los registros de operación y mantenimiento en información útil para la toma de decisiones, facilitando el seguimiento del sistema de corte láser y la identificación de desviaciones durante su operación.

De esta manera, el objetivo general del trabajo se cumple al integrar diagnóstico, documentación técnica, análisis de fallas, registros e indicadores dentro de una propuesta aplicable al área metalmecánica. La propuesta no se limita al reemplazo de una máquina, sino que busca establecer una base de gestión del mantenimiento orientada a mejorar la disponibilidad, confiabilidad, continuidad operacional y control económico del proceso de corte metálico. Finalmente, se concluye que la incorporación de la TRUMPF TruLaser Serie 1000 debe ir acompañada de una gestión de mantenimiento estructurada, documentada y basada en datos. La correcta aplicación de la propuesta permitirá reducir la dependencia del mantenimiento correctivo, mejorar la trazabilidad de las intervenciones, controlar los costos asociados al ciclo de vida del activo y apoyar la mejora continua del proceso productivo.

Referencias.

- International Organization for Standardization. (2016). *ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 17359: Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55002: Asset management — Guidance on the application of ISO 55001*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 60812: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2013). *ISO 1999: Acoustics — Estimation of noise-induced hearing loss*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14118: Safety of machinery — Prevention of unexpected start-up*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001: Occupational health and safety management systems — Requirements*. ISO.
- TRUMPF GmbH + Co. KG. (2023). *Manual técnico: TruLaser Serie 1000. Código: B1238es_L94_IC*. TRUMPF.
- TRUMPF GmbH + Co. KG. (2023). *Instrucciones de servicio y mantenimiento — Sistemas de corte láser CO₂*. TRUMPF.
- TRUMPF GmbH + Co. KG. (2022). *Guía de operación CNC para equipos de corte industrial*. TRUMPF.
- Ebeling, C. E. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. McGraw-Hill.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance (RCM II)*. Industrial Press.
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. (2004). *RCM — Gateway to World Class Maintenance*. Elsevier.
- Blanchard, B. S. (2004). *Logistics Engineering and Management*. Pearson.

- Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC Press.
- Barringer, H. P., & Weber, D. P. (1996). *Life Cycle Cost Tutorials*. Barringer & Associates.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.
- Vorne Industries. (2020). *OEE Industry Standard: Complete Guide*. Vorne.
- Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using OEE: Literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3517–3535.
- Amadi-Echendu, J. (2004). *Managing physical assets: Engineering methodology and applications*. Springer.
- Mitchell, J. S. (2007). *Physical Asset Management Handbook*. Clarion Technical.
- Kelly, A., & Harris, M. (1978). *Management of Industrial Maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- Ministerio de Salud de Chile. (1999). *Decreto Supremo 594: Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo*. Gobierno de Chile.
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Environmental Noise Guidelines*. OMS.
- International Labour Organization. (2010). *Noise in the workplace — Hazard prevention guide*. ILO.
- Abernethy, R. (2006). *The New Weibull Handbook* (5th ed.). Abernethy Reliability.
- Montgomery, D. C. (2012). *Statistical Quality Control: A Modern Introduction* (7th ed.). Wiley.
- Nelson, W. (2004). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analyses*. Wiley.
- Jardine, A., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing CBM. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 1483–1510.
- Peng, Y., Dong, M., & Zuo, M. J. (2010). Current status of machine prognostics in CBM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, 297–313.
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Butterworth-Heinemann.

Hastings, N. A. (2010). *Physical Asset Management*. Springer.

Anexo_A

NUMERO	INICIO FALLA	FIN FALLA	TTR	MODO DE FALLA
1	2024-01-02 03:56	2024-01-04 03:38	47.7	Lubricación insuficiente
2	2024-01-06 07:08	2024-01-08 18:02	58.9	Atasco de chapa
3	2024-01-09 03:18	2024-01-13 12:24	105.1	Lubricación insuficiente
4	2024-01-13 13:24	2024-01-16 13:00	71.6	Lubricación insuficiente
5	2024-01-27 03:56	2024-01-31 00:20	92.4	Herramienta desgastada
6	2024-02-16 17:37	2024-02-20 03:31	81.9	Falla hidráulica
7	2024-03-04 13:10	2024-03-06 18:46	53.6	Herramienta desgastada
8	2024-03-28 01:45	2024-03-31 10:39	80.9	Atasco de chapa
9	2024-04-04 06:25	2024-04-06 18:19	59.9	Atasco de chapa
10	2024-04-07 09:16	2024-04-09 21:04	59.8	Lubricación insuficiente
11	2024-04-19 14:15	2024-04-22 11:33	69.3	Falla hidráulica
12	2024-04-24 11:07	2024-04-26 02:19	39.2	Sobre temperatura motor eje X
13	2024-05-19 11:17	2024-05-23 16:53	101.6	Falla hidráulica
14	2024-05-24 23:48	2024-05-27 04:42	52.9	Atasco de chapa
15	2024-06-05 09:23	2024-06-09 08:23	95	Desalineación de torreta
16	2024-06-09 09:23	2024-06-12 07:35	70.2	Error control CNC Bosch
17	2024-06-12 08:35	2024-06-16 22:35	110	Atasco de chapa
18	2024-06-20 09:38	2024-06-22 14:44	53.1	Falla hidráulica
19	2024-06-22 15:44	2024-06-25 03:44	60	Herramienta desgastada
20	2024-06-26 17:51	2024-06-29 21:09	75.3	Sensor fin de carrera fallando
21	2024-06-30 19:01	2024-07-02 04:01	33	Herramienta desgastada
22	2024-07-02 05:01	2024-07-05 22:25	89.4	Falla hidráulica
23	2024-07-08 23:53	2024-07-13 13:53	110	Desalineación de torreta
24	2024-07-13 14:53	2024-07-17 18:11	99.3	Atasco de chapa
25	2024-07-26 04:31	2024-07-29 19:43	87.2	Sensor fin de carrera fallando
26	2024-07-29 20:43	2024-08-01 12:19	63.6	Error control CNC Bosch
27	2024-08-01 13:19	2024-08-05 22:13	104.9	Error control CNC Bosch
28	2024-08-13 15:14	2024-08-17 16:44	97.5	Sensor fin de carrera fallando
29	2024-08-17 17:44	2024-08-20 22:32	76.8	Falla hidráulica
30	2024-10-04 17:22	2024-10-07 12:28	67.1	Herramienta desgastada
31	2024-10-07 13:28	2024-10-10 00:28	59	Desalineación de torreta
32	2024-10-18 17:13	2024-10-20 12:43	43.5	Error control CNC Bosch
33	2024-10-23 20:00	2024-10-28 02:48	102.8	Error control CNC Bosch
34	2024-11-01 15:31	2024-11-03 00:31	33	Herramienta desgastada
35	2024-11-12 16:05	2024-11-15 02:53	58.8	Sensor fin de carrera fallando
36	2024-12-12 06:38	2024-12-15 05:32	70.9	Error control CNC Bosch

Anexo A "Registro e paradas no programadas 2024"

Fuente: (Registros de Mantenimiento)

Plan de Mantenimiento Anual					Realizado	
Sistema	Tarea/Descripcion	Responsable	Fecha	Si	No	
Tareas de inspeccion y MantenimientoDiarias						
sistivo de aspiración	Extractor de polvo compacto Camfil MF 8.x: controlar los depósitos desechables	Operador				
	Revisión de la indicación de la presión diferencial	Operador				
	Limpieza de los componentes del módulo de aspiración	Operador				
ador de boquillas	Comprobación de boquillas, portaboquillas y roscas de las boquillas	Operador				
na	Comprobar la cabina de protección y ventana protectora contra radiación láser	Operador				
ador de palets	Comprobación de la presencia de daños en la bandeja auxiliar	Operador				
	Limpieza y, en caso necesario, sustitución de los listones de apoyo y los soportes de listone	Operador				
	Comprobar el dispositivo de captura y los listones de las bandejas	Operador				
	Comprobación y, en caso necesario, sustitución de las cha	Operador				
d de corte	Limpieza del portaboquillas	Operador				
	Limpieza y, dado el caso, sustitución de las boquillas	Operador				
a óptica de seguridad	Controle la barrera óptica de seguridad	Operador				
Tareas de inspeccion y Mantenimiento Semanales						
des de refrigeracion KLH	Compruebe la estera filtrante y límpiela	Operador				
	Compruebe el nivel de llenado	Operador				
na	Limpieza de la máquina y de la zona de trabajo	Operador				
Tareas de Inspeccion y Mantenimiento Mensuales						
sitivo de aspiracion	Extractor de polvo compacto Camfil MF 8.4, 8.5, 8.6 A2: Control y, en caso necesario, limpieza de la cámara de ciclón	Operador				
	Limpieza del codo del tubo y el tubo de aspiración	Operador				
	Comprobar la cámara de gas puro en el extractor de polvo compacto	Operador				
	Control de las válvulas de limpieza	Operador				
ador de boquillas	Comprobación de la placa de calibración y los cepillos de limpieza de la boquilla	Operador				
	Limpieza de la chapa de cubierta de la unidad de acciona miento	Operador				
de instrumentos	Opción de corte con aire comprimido: cambio de filtro de carbón activo 1 y 2	Matenimiento				
ador de palets	Limpieza de la placa de calibración y los cepillos de lim pieza de la boquilla	Operador				
d de Movimiento	Realización de un diagnóstico de la máquina	Operador				
io de distribucion	Cambie el filtro de aire del ventilador del armario eléctrico	Matenimiento				
portador de chatarra	Comprobación de las láminas de goma	Operador				
Tareas de Inspeccion y Mantenimiento Bimestrales						
d de Movimiento	Comprobación y limpieza de la cadena energética X, Y y Z	Matenimiento				
Maquina	Control y, en caso necesario, limpieza del cristal de proteccion de la camara	Operador				
Placa de instrumentos	Comprobar o sustituir los elementos filtrantes del filtro previo	Matenimiento				

Anexo_B

Tareas de inspeccion y Mantenimiento Semestrales					
Dispositivo de aspiracion	Control del manorreductor y del suministro de aire comprimido	Operador			
Unidad de Movimiento	Limpieza de la guía de conducción, la junta de saliente y el separador de los ejes	Operador			
	Limpie la cremallera del eje Y	Operador			
Unidad de Movimiento	Comprobación de la protección anticolidión de la unidad de corte	Servicio TRUMPF			
	Compruebe el eje y los rodamientos del accionamiento de rosca de bolas del eje Z.	Servicio TRUMPF			
	Control y limpieza de los fuelles de los ejes X y Z	Operador			
	Control y limpieza de los fuelles del eje Y	Operador			
	Limpie la cubeta colectora de grasa	Operador			
	Limpiar la chapa protectora de salpicaduras del eje Z y la chapa de fondo en el carro Y	Operador			
	Comprobar y ajustar el offset del diodo de posicionamiento	Servicio TRUMPF			
	Comprobación de los tubos de lubricación para determinar si se ha introducido aire y, dado el caso, purga	Operador			
	Comprobar el juego de inversión de la cremallera (eje X e Y)	Servicio TRUMPF			
	Comprobación del interruptor de referencia de los ejes X, Y y Z	Servicio TRUMPF			
Placa de intrumentros	Opción de corte con aire comprimido: cambio de los elementos filtrantes	Operador			
	CoolLine: cambio del filtro de agua	Operador			
	Comprobación del nivel de lubricante (lubricación centralizada)	Operador			
Maquina	Comprobación de la impermeabilidad a la luz en la cabina de protección	Servicio TRUMPF			
	Revisión de los tubos flexibles del grupo hidráulico				
Bastidor de la Maquina	Limpieza de las cremalleras y guías de conducción del eje X	Operador			
Cambiador de palets	Limpieza y lubricación de la cadena, el dispositivo de arrastre y el listón de arrastre del mecanismo de transporte de las bandejas	Matenimiento			
	Sujeción de la cadena del transporte de bandejas	Servicio TRUMPF			
	Control de los rodillos de rodaje y los cepillos en las bandejas	Operador			
	Cambiador de bandejas eléctrico: limpie y lubrique la cuña de elevación	Operador			
	Cambiador de bandejas eléctrico: limpie y lubrique las guías lineales	Operador			
Unidad de Corte	Comprobación de la resistencia entre la bandeja y la carcasa de la unidad de corte	Servicio TRUMPF			
Part station	Comprobación de las uniones por tornillos	Operador			
Tareas de inspeccion y Mantenimiento Anuales					
Dispositivo de aspiracion	Comprobar elementos filtrantes del extractor de polvo compacto	Operador			
	Controle los extintores	Operador			
Panel de Manejo	Comprobar la función de soporte remoto	Servicio TRUMPF			
Unidad de Movimiento	Cambio de la junta de saliente del carro de guía (eje Y)	Servicio TRUMPF			
	Comprobar los carriles guía, los carros guía y las cremalleras y limpiarlos si es necesario.	Servicio TRUMPF			
	Elimine el exceso de grasa del husillo del eje Z.	Servicio TRUMPF			
Unidad de Refrigeracion KLH	Cambiar el agua de refrigeración	Matenimiento			
	Comprobación del ventilador	Servicio TRUMPF			
Laser Circuito Refrigeracion	Procesamiento del agua de refrigeración	Matenimiento			
Equipo Laser	Comprobación de estanqueidad del sistema de refrigeración	Servicio TRUMPF			
	Compruebe la imagen de la cámara	Servicio TRUMPF			
	Recupere y compruebe el informe CM en el SIS	Servicio TRUMPF			
	Registre los valores de control mediante el programa de servicio de la máquina (LLK-T y LLK-X)	Servicio TRUMPF			
Armario de distribucion	Limpie el armario de distribución	Matenimiento			
	Comprobar el pulsador de parada de emergencia	Operador			
	Comprobación del control de la puerta	Servicio TRUMPF			
	Contador de horas de servicio (módulos accionadores): comprobar ventilador	Servicio TRUMPF			
	Compruebe la función de entrada/salida del ventilador del armario eléctrico	Matenimiento			
Unidad de Corte	Comprobación del cable de fibra óptica y de las mangueras de refrigeración	Servicio TRUMPF			

Anexo_C

CHECK LIST MANTENIMIENTO			
Equipo		Fecha	
Operador responsable		Firma Tecnico	
REQUISITOS DEL SITIO		PELIGROS DEL TRABAJO IDENTIFICADOS	
☐ Señalización del Area		☐ Trabajos con energia	☐ Ruido excesivo > 80 dB
☐ Guantes de cabritilla		☐ Retroalimentacion electrica	☐ Atmosfera peligrosa
☐ Zapatos de Seguridad		☐ Materiales peligrosos	☐ Riesgo de Arc Flash
☐ Ropa Ignifuga		☐ Riesgo de Incendio	☐ Riesgo de atrapamiento
☐ Lentes de seguridad		☐ Caídas al mismo nivel	☐ Riesgo de cortes
☐ Extintores CO ₂ /ABC		☐ Caídas a distinto nivel	
☐ Candado de bloquea		☐ Proyeccion de particulas	
Codigo	Descripcion de la Tarea	Se realizo	Observaciones
Inspeccion y tareas diarias			
M-01	Limpieza del area y extraccion activa		
M-02	Revision de la indicacion de presion diferencial		
M-03	Limpieza de componentes del modulo de aspiracion		
M-04	Comprobacion de boquillas, portaboquillas y roscas de boquillas		
M-05	Comprobar la cabina de proteccion y ventana contra radiacion laser		
M-05	Comprobacion de la presencia de daños en la bandeja auxiliar		
M-06	Limpieza y en caso necesario, sustitucion de los listones de apoyo y los soportes de listones		
M-07	Comprobar el dispositivo de captura y los listones de las bandejas		
M-08	Limpieza del portaboquillas		
M-09	limpieza y en caso de ser necesario sustitucion de las boqui		
M-10	Pruebas de seguridad a barrera optica		
M-11	Pruebas de seguridad a E-STOP		
M-12	Limpieza de residuos metalicos en laminas de goma		
M-13	Revisar estados de correas		
M-14	Limpieza y comprobacion de estado intercambiador de calo		
Inspeccion y tareas semanales			
M-15	Compuebe la esfera filtrante y limpiela		
M-16	Compruebe el nivel de llenado		
M-17	Limpieza de la maquina y zona de trabajo		

Item	Sistema	Subsistema	Funcion	Falla Funcional	Modo de Falla	Causas Probables	Efectos	S	D	O	Controles Actuales	Acciones Recomendadas	Responsable	Fecha Objetivo	Criticidad
1	Seguridad	Seguridad Barrera Optica	Proteger al operador deteniendo la máquina ante una intrusión	Perdida de función de intrusiones y detención automática de la maquina, comprometiendo la protección del operador	Barrera óptica desalineada/ Falla en la detección	Suciedad, desalineación, daño de emisor/receptor cableado suelto	Riesgo de accidente ,posible lesión, detencion no programada	10	4	5	Inspeccion funcional periódica del operador	1- Alinear y Limpiar. 2- verificar cableado. 3- Prueba funcional documentada. 4- Reemplazo de modulo. 5- Agregar ckeck list.	Operador/ Mantenimiento		200
		Parada de Emergencia	Detener máquina al accionar E- stop	Falla en la función de detención inmediata de la máquina ante la activación del sistema de parada de emergencia.	Pulsador E- stop sin respuesta o enclavamiento defectuoso	Desgaste; contactos fallando; cableado defectuoso.	Lesion al no detenerse en emergencia	10	3	5	Pruebas funcionales en rutinas de mantenimiento	1- Estandarizar prueba diaria al inicio del turno. 2- Reemplazar pulsadores con ciclos altos. 3- Verificar relé de seguridad y PLC	Operador/ Mantenimiento		150
2	Control de puerta	Cabina láser	Asegurar enclavamiento de puertas y blindaje.	Perdida de la función de enclavamiento de puertas y cabina, permitiendo accesos no seguros durante la operación.	Interruptor de puerta no detecta cierre o ventana protectora dañada	Desalineación, daño mecánico, desgaste, suciedad	Exposición a radiación láser; riesgo ocular; paro de produccion	10	4	6	Control funcional programado;inspeccion visual	1- Reajuste/sustitucion de sensores. 2- Reemplazo de ventana dañada. 3- Registro de pruebas. 4- incluir prueba interlock semanal.	Operador/ Servicio TRUMPF		240
3	Sistema de Aspiracion	Extractor de Polvo	Extraer humo y partículas producidas por el corte.	Reducción o pérdida de la capacidad de extracción de humos y partículas generadas durante el proceso de corte.	Filtros saturados o ciclon obstruido	Falta de limpieza; polvo fino; fallo de valvulas de limpieza	Incendio/explosion de contaminacion; calidad deficiente; detencion de la maquina	9	6	6	Limpieza según plan; revisión de válvulas	1- Seguir programa de limpieza 2- tener stock de filtros 3- inspeccion de ciclon y camara de gas.	Operador/ Mantenimiento		324
4	Suministro de Aire/gases	Manorreductor	Alimentar aire/ gas de corte en presion/ Caudal adecuado. N2 alta presion 90m3/h O2 20 m3/h.	Entrega inadecuada de presión y/o caudal de aire y gases de proceso, afectando la calidad y continuidad del corte.	Manorreductor desajustado o con fugas	Desgaste, contaminacion, vibraciones	Corte deficiente; rebabas scrap; posible sobrepresiones en mangueras.	7	5	5	Control visual y funcional	1- Calibracion trimestral 2- filtros coalescentes. 3- inspeccion de fugas con espuma; 4- reemplazo preventivo de filtros.	Operador/ Mantenimiento		175
5	Unidad de refrigeracion	KLH	Mantener temperatura del láser y ejes entre 25 y 30 grados celcius	Desviación del control térmico del láser y de los ejes, superando el rango operativo de temperatura permitido.	Baja calidad/ contaminacion de agua de refrigeracion	Intervalos largos, mezcla inadecuada,	Sobrecalentamiento del láser; daño de sellos; parada no planificada	9	5	5	Cambio de agua periodico; Filtro de agua	1- (pH conductividad) 2- aditivos biocidas aprobados 3- flush del circuito 4- alarmas de caudal y temperatura	Mantenimiento		225
		Estanqueidad	Evitar perdida de refrigerante	Pérdida de estanqueidad del circuito de refrigeración, provocando disminución del nivel o flujo de refrigerante,	Fugas en mangueras/ empalmes de sistema	Envejecimiento, vibracion, abrazaderas flojas.	Cavitacion de bomba; sobrecalentamiento; daño del laser	9	4	6	Inspeccion visual y presion	1- Reemplazo preventivo de mangueras criticas. 2- Pruebas de presion anuales. 3- Registros de par de apriete.	Servicio TRUMPF/ Mantenimiento		216

7	Optico	Cristal de proteccion camara/ cabezal	Protege optica y mantener calidad del haz	Deterioro de la función de protección óptica, afectando la calidad del haz y proceso de corte.	Cristal protector sucio/ Dañado	Salpicaduras, humo, manejo inadecuado	Perdida de calidad del corte; reflejos; daño de optica superior	8	6	4	Limpieza/ inspeccion según plan	1- Stock de cristales. 2- limpieza con kit aprobado. 3- Limite de uso por horas. 4- capacitacion al operador.	Operador		192
		Fibra optica del laser	Transmitir energia laser a la cabeza de corte	Interrupción o degradación en la transmisión de energía láser hacia la cabeza de corte.	Daño/ dobles en cable de fibra o microfisuras	Ruteo incorrecto, radio curvatura menor a lo permitido, impacto en fibra optica	Perdida de potencia; fallo catastrofico del laser; riesgo de arco optico	9	3	6	Inspeccion visual programada	1- Soportes anti-tension. 2- radios minimos. 3- kit de inspeccion. 4- bloqueo de area durante revision	Servicio TRUMPF		162
8	Transmision ejes	Lubricacion centralizada	Reducir friccion en ejes X/Y/Z	Lubricación insuficiente en los ejes X/Y/Z, incrementando fricción, desgaste y pérdida de precisión.	Bajo nivel o burbujeo de aire en lineas de lubricacion	Fugas, obstruccion, purga insuficiente	Desgaste acelerado; juego excesivo; precision fuera de tolerancia	8	5	6	Chequo de nivel y purga; inspeccion de tubos	1- Instalar sensor de nivel. 2- Purga estandarizada. 3- Revision de mordazas y racores. 4- analisis de consumo	Mantenimiento		240
		Cremalleras/guias	Posicionar con precision	Pérdida de la capacidad de posicionamiento preciso de los ejes dentro de la tolerancias de operación	Suciedad/ exceso de grasa o falta de limpieza	Ambiente de corte, mala rutina de limpieza o lubricacion	Vibraciones; perdida de precision; defectos de corte; desgaste	7	6	5	Limpieza periodica de guias y cremalleras	1- Programa semanal con evidencia (fotos). 2- Paños y solventes aprobados. 3- Protecciones actualizadas.	Operador		210
9	Cadenas	Cadena energetica X/Y/Z	Guiar mangueras y cables sin daños	Daño o restricción en el guiado seguro de mangueras y cables durante el movimiento de ejes.	Eslabones/cables quebrados o tensados	Fatiga por ciclos, falta de inspeccion	Paro repentino; cortocircuitos; daños a fibra	8	4	6	Comprobacion , limpieza	1- Reemplazo por horas-ciclo. 2- clips anti-tension. 3- inspeccion con check list.	Mantenimiento		192
10	Ventilacion	Ventilador	Mantener temperatura interna segura (< 30°C)	Aumento de la temperatura interna por ventilación deficiente, afectando la electrónica y el sistema de control	Filtros/ventiladores obstruidos o fallando	Polvo, falta de cambio de filtro, ventilador fatigado	Sobrettemperatura; fallo de electronica; fallo en PLC	8	5	5	Cambio de filtros; prueba de ventilador; limpieza armario electrico	1- Programa trimestral. 2- Alarma de temperatura. 3- Filtros con fechas. 4- Repuestos de ventiladores	Mantenimiento		200

Tabla de Severidad		
Valor S	Descripcion	
1	Sin efecto apreciable	Falla menor, sin impacto ni interrupción
2	Impacto mínimo	No afecta el corte ni la seguridad
3	Leve pérdida de rendimiento	Ligera desviación en calidad de corte
4	Pérdida parcial de función	Necesita ajuste o limpieza
5	Pérdida notable de rendimiento	Defecto visible en piezas cortadas
6	Paro menor o reproceso	Se detiene momentáneamente la máquina
7	Paro prolongado o daño medio	Falla en lubricación o sensor no crítico
8	Paro total de máquina	Falla en motor de eje o refrigeración
9	Daño severo / riesgo medioambiental	Falla de refrigeración o incendio menor
10	Riesgo para la seguridad / daño catastrófico	Falla de barrera óptica o fuga de láser

Tabla de Ocurrencia		
Valor O	Probabilidad de Ocurrencia	Descripcion
1	Extremadamente improbable (<0.01%)	Evento histórico inexistente
2	Muy poco probable (0.1%)	Evento aislado en vida útil
3	Raro (0.5%)	Puede presentarse con desgaste extremo
4	Ocasional (1%)	Aparece tras largo uso o mantenimiento deficiente
5	Moderado (2-5%)	Posible si se omite inspección
6	Frecuente (5-10%)	Sucede varias veces al año
7	Alta frecuencia (10-20%)	Suele requerir ajuste mensual
8	Muy frecuente (20-50%)	Causa común de paros cortos
9	Casi segura (>50%)	Falla aparece regularmente
10	Inevitable	Falla se produce siempre sin acción preventiva

Tabla de Detectabilidad		
Valor D	Factibilidad de deteccion	Descripcion
1	Siempre detectable	Alarma inmediata en HMI o sensor dedicado
2	Muy fácil de detectar	Inspección visual rutinaria lo revela
3	Fácil de detectar	Monitoreo normal lo evidencia
4	Moderadamente detectable	Detectable solo con medición manual
5	Difícil de detectar	Se requiere revisión específica
6	Muy difícil de detectar	Solo visible tras paro o desviación
7	Rara vez detectable	Sin alarma; requiere diagnóstico especializado
8	Difícil de identificar antes de falla	Solo con síntomas indirectos
9	Casi imposible de detectar	Solo se conoce tras daño o paro
10	No detectable	Falla repentina sin aviso o alarma

Area: Mantenimiento industrial			Fecha: Octubre 2025		Revision/Aprobado por: Supervision de mantenimiento		Version: 01	
ALCANCE	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MATERIALES Y HERRAMIENTA	MEDIDAS DE SEGURIDAD	PROCEDIMIENTO	PARAMETROS DE CONTROL	REGISTRO	REFERENCIAS
Aplica al cabezal de corte, ventana protectora, mesa de trabajo y zona de extracción de humos de la maquina TruLaser Serie 1000	Diaria	Operador de la Maquina	1- Paño sin pelusa. 2- alcohol isopropilico. 3- Cepillo antiestático. 4- Aspiradora Industrial. 5- Guantes de nitrilo. 6- gafas de seguridad láser.	1- Aplicar procedimiento LOTO antes de comenzar. 2- Confirmar enfriamiento del cabezal. 3- Utilizar gafas de protección láser y guantes limpios	1- Apagar la máquina y confirmar ausencia de energia. 2- Retirar residuos de la mesa con aspiradora industrial. 3- Limpiar superficie y el cabezal con paño seco. 4- Limpiar la ventana protectora con alcohol isopropilico. 5- Revisar que no existan rayas o manchas. 6- Registrar ejecucion en el check list	1- Transparencia optica >=95%. 2- Area de trabajo libre de residuos visibles	Check list de mantenimiento preventivo.	Manual de TRUMPF B1238es_L94_IC pag 310-312, ISO 17359 ISO 12100 ISO 55000
Lineas de aire, filtros de condensado, valvulas, mangueras y compresores auxiliares	Semanal	Tecnico de mantenimiento	1- Llave allen. 2- recipiente de drenaje. 3- detector de fugas. 4- Manometro. 5- Guantes dielectricos.	1- Cerrar valvula principal de aire antes de intervenir. 2- Mantener presion residual <1 bar. 3- Evitar contacto directo con condensado.	1- Apagar suministro principal de aire. 2- Drenar condensado del filtro principal. 3- Revisar mangueras, acoples y valvulas. 4- Aplicar solucion jabonosa en uniones. 5- Restablecer presion y verificar fugas. 6- Registrar resultados.	1- Presion del sistema 6+-0.2 bar. 2- Fugas permitidas, Ninguna visible.	Check list semanal del sistema neumatico.	Manual de TRUMPF B1238es_L94_IC pag 315-316, ISO 17359 ISO 12100 ISO 14224:2016
Tanque , bomba, intercambiador y lineas de refrigeracion del equipo	Mensual	Tecnico de mantenimiento	1- Medidor de conductividad. 2- Termometro digital. 3- Guantes dielectricos. 4- Refrigerante TRUMPF.	1- Desconectar alimentacion electrica del enfriador. 2- Evitar derrames de liquido refrigerante.	1- Revisar nivel entre marcas MIN/MAX. 2- Medir temperatura de entrada/salida (<-30°C). 3- Verificar conductividad (≤20μS/cm). 4- Registrar valores y ajustar si es necesario.	1- Conductividad ≤20μS/cm. 2- Temperatura ≤30°C	Orden de trabajo Mensual de sistema de refrigeracion	Manual de TRUMPF B1238es_L94_IC pag 318-320, ISO 17359 ISO 55000

Cabezal de corte, sensores capacitivos, ejes CNC.	Trimestral	Tecnico TRUMPF/Especialista CNC.	1- Software de calibracion TRUMPF. 2- Laptop. 3- Regla de precision. 4- Paño optico.	1- Apagar equipo y bloquear energia. 2- Solo personal autorizado puede intervenir.	1- Ingresar al modo servicio CNC. 2- Ejecutar calibracion del sensor de altura. 3- Ajustar parametros de enfoque. 4- Realizar prueba de corte de validacion. 5- Registrar valores.	1- Precision del sensor +- 0.05%. 2- Respuesta Instantanea.	Registro de calibracion CNC	Manual de TRUMPF B1238es_L94_IC pag 325-328, ISO 17359 ISO 14224:2016
Filtros, ventiladores, ductos de salida y carcasa del extractor	Semestral	Tecnico de mantenimiento	1- Filtros TRUMPF originales. 2- Mascarilla P100. 3- Aspiradora industrial. 4- EPP completo.	1- Apagar el extractor antes de abrir. 2- Utilizar mascarilla y guantes. 3- Disponer filtros usados según norma ambiental.	1- Retirar tapa del extractor. 2- Extraer filtros usados. 3- Limpiar interior con aire seco. 4- Instalar filtros nuevos. 5- Encender y verificar flujo.	1- Flujo de aire "≥90% nominal. 2- Ruido/vibracion, normal.	Registro semestral del extractor.	Manual de TRUMPF B1238es_L94_IC pag 329-332, ISO 17359 ISO 14001.
Sistema electrico, optico, neumatico y de control de la TruLaser Serie 1000	Anual	Servicio TRUMPF/Supervisor de mantenimiento.	1- Megohmetro. 2- Multmetro. 3- Software TRUMPF. 4- Registro de calibracion.	1- Aislar fuentes de energia. 2- Ejecutar pruebas con personal autorizado. 3- Cumplir IEC 60825-1.	1- Revisar cableado y conexiones. 2- Medir resistencia de aislacion. 3- Probar enclavamiento y E-STOP. 4- Validar sensores de seguridad. 5- Emitir informe anual firmado.	1- Aislamiento electrico >1 MΩ. 2- Enclavamiento 100% operativos.	Informe anual de inspeccion.	Manual de TRUMPF B1238es_L94_IC pag 339-343, ISO 60825-1 ISO 17359 ISO 12100

Anexo_F

“Orden de Trabajo”						
Peticionario:		Codigo equipo:		Numero de OT:		
Fecha de emision:	Fecha de apertura:		Fecha de cierre:			
Codigo del equipo:		Ubicación del equipo:				
Horas de servicio:		Tipo de Mantenimiento:				
Prioridad:		A: Reparacion correctiva inmediata				
		B: Reparacion correctiva diferida				
		C: Mantenimiento preventivo, ciclico o condicion				
Permiso de trabajo 360 autorizado por:		Nombre:		Firma:		
Justificacion de retencion de trabajos:						
Frecuencia de mantenimiento:		Fecha de ultimo mantenimiento		Fecha de mantenimiento normal		
Nombre del personal de mantenimien		Nombre:				
		Nombre:				
		Nombre:				
		Nombre:				
Listado de puntos a Inspeccionar Detallar componente a Inspeccionar	1-					
	2-					
	3-					
	4-					
	5-					
	6-					
Falla o anomalia detectada:						
Componente defectuoso detectado:						
Describa la causa del fallo o anomalia:		Numero de codi				
Codigo de procedimiento de trabajo:		Aplica	No aplica	Numero de estandar		
Describa brevemente la intervencion realizada						
Cantidad horas en que se		Nomal	Extras de semana	Sabado	Domingo	Nocturno
Codigo de repuesto utilizado	Componente		Cantidad	Codigo		
Contrato externo	Numero de contrato	Repuestos	Cantidad	Descripcion del repuesto		
Nombre del personal:						
Nombre del personal:						
Nombre del personal:						