

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO EN
ACTIVOS CRÍTICOS DE FABLAB
UNIVERSITARIO

Francisco Javier Gallardo Ramírez

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Ing. Nelson Álvarez Campillay

Profesor Correferente: Ing. Luis Guzmán Bonet

Diciembre 2019

Agradecimientos

Quiero partir este párrafo expresando mi más profundo agradecimiento a mi madre Viviana, por entregarme la posibilidad de estudiar sin preocupaciones, darme apoyo y cariño para poder conseguir sacar mi carrera adelante. A mi padre Gustavo por tener la fortaleza de darme conversaciones difíciles cuando más necesitaba un guía, siempre estuviste ahí y siempre estarás en mi corazón junto con mi madre. A mis hermanos Gustavo, Marcelo y Pamela, gracias por ser un ejemplo de esfuerzo y dedicación.

A mis amigos Esteban y Fabián, sé que el futuro será prospero para ustedes, porque a las personas de bien, le pasan cosas buenas, gracias por compartir conmigo momentos de sus vidas.

A Alejandro, hay conversaciones y consejos que no necesariamente me tenías que dar, pero siempre tuviste una buena disposición a enseñarme cosas que solo se adquieren con la experiencia profesional, y siempre estaré agradecido por ello.

A los miembros de FabLab Maximiliano, José Tomás y José, por facilitarme la información necesaria para poder realizar este trabajo.

Son incontables las personas que han compartido he influido en mi vida positivamente para conseguir ser un profesional, a todos ustedes, mis mejores deseos y el mayor de mis agradecimientos.

Y para terminar estas palabras, un agradecimiento especial a los profesores Nelson y Luís por ser un ejemplo y un referente para el camino que se avecina posterior a este último trabajo universitario.

Resumen

La Universidad Técnica Federico Santa María cuenta con un laboratorio de fabricación digital (FabLab), el cual se encarga de apoyar a personas internas y externas de la universidad en la elaboración de proyectos de innovación que incluyan operaciones de manufactura mecánica y eléctrica.

La organización cuenta con planes de mantenimiento los cuales se basan principalmente en acciones para disminuir el desgaste prematuro de los componentes de sus equipos, donde no se cuenta con un sistema de registro de actividades de mantenimiento trazable, ni con mecanismos para predecir fallas funcionales, por lo cual el foco del presente trabajo de título es el área de mantenimiento.

Inicialmente se recopila información y se documenta la situación actual de la organización, para posteriormente proponer una forma de trabajar la información disponible y verificar la calidad de esta mediante la norma **ISO 14.224**. Ya teniendo conocimiento de la situación actual y de la calidad de información recopilada, se procede a realizar a la evaluación de criticidad mediante la norma **ISO 31.000**.

Haciendo referencia a la norma se establecen valoraciones para definir qué impacto han tenido para la organización las fallas registradas de sus equipos, con lo cual se seleccionan los más críticos.

Ya habiéndose seleccionado los activos críticos, se determinan acciones de mantenimiento mediante la metodología **RCM** donde se reconocen los modos de falla, y se seleccionan los de mayor impacto para la organización, los cuales son tratados mediante acciones proactivas de mantenimiento y tareas de búsquedas de fallas.

Se genera un sistema de administración del trabajo que permita sustentar el área de mantenimiento apoyado de herramientas **LEAN** y se genera un plan de mantenimiento añadiendo actividades rutinarias adicionales en conjunto con las determinadas por el análisis **RCM**. Se estiman y comparan los costos anuales de mantenimiento, generándose una reducción esperada mayor al 50%.

Abstract

The Technical University Federico Santa María has a digital manufacturing laboratory (FabLab), which is responsible for supporting internal and external people of the university in the development of innovation projects that include mechanical and electrical manufacturing operations.

The organization has maintenance plans which are mainly based on actions to reduce premature wear of the components of its equipment, where there is no system for recording traceable maintenance activities, nor mechanisms to predict functional failures, for The focus of this title work is the maintenance area.

Initially, information is collected and the current situation of the organization is documented, to subsequently propose a way of working the available information and verify its quality by means of **ISO 14.224**. If there is knowledge of the current situation and the quality of information collected, an evaluation of the criticism will be carried out using the **ISO 31.000** standard.

With reference to the standard, classifications were registered to define what impact the registered failures of their equipment have had for the organization, with which the most critical are selected.

Having already selected the critical assets, maintenance actions are determined through the **RCM** methodology where the failure modes are recognized, and the ones with the greatest impact for the organization are selected, which are treated through proactive maintenance actions and fault search tasks.

A work administration system is generated that supports the maintenance area supported by **LEAN** tools and an aggregate maintenance plan of additional routine activities is generated in conjunction with those corresponding by the **RCM** analysis. Annual maintenance costs are estimated and compared, generating an expected reduction greater than 50%.

Glosario

Para mejorar el entendimiento del presente trabajo, se extraen y definen conceptos claves de las normas ISO 31.000 [1], ISO 14.224[2] y SAE JA 1011[3]:

Activo: Elemento, cosa o entidad que tiene un valor potencial o real para una organización, su definición puede variar donde puede ser tangible o intangible, financiero o no financiero.

Consecuencia: Resultado de un evento que afecta de forma positiva o negativa, directa o indirectamente en los objetivos de la organización.

Edad: Medida de tiempo de exposición al estrés calculada desde el momento en que un elemento o componente entra en servicio.

Función: Lo que el propietario o usuario de un activo o sistema físico quiere que haga.

Falla Funcional: Estado en el que un activo o sistema físico no puede realizar una función específica a un nivel de rendimiento deseado.

Falla múltiple: Un evento que ocurre si una función protegida falla mientras su dispositivo o sistema de protección está en un estado fallido.

Fallo oculto: Modo de falla cuyos efectos no son evidentes para los operadores en circunstancias normales en el momento de su ocurrencia.

Falla potencial: Una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en proceso de ello.

Fuente de riesgo: Elemento que solo o en combinación tiene el potencial de generar riesgo.

Gestión de riesgo: Actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización con respecto al riesgo. Las cuales van orientadas a tomar decisiones sobre prácticas y procesos para minimizar el efecto de las incertidumbres sobre el cumplimiento de los objetivos de la organización.

Incertidumbre: Estado de deficiencia de información relacionada con la comprensión de un evento o variable que puede generar riesgo.

Mantenibilidad: Capacidad de ser mantenido o restaurado a un estado que permita el desempeño del activo según sea necesario, bajo determinadas condiciones de uso y mantenimiento.

Mantenimiento: Combinación de todas las acciones técnicas y de gestión destinadas a mantener un elemento o restaurarlo a un estado que cum pueda funcionar según sea necesario.

Modo de falla: Un único evento que produce la falla funcional.

Riesgo: Efecto de la incertidumbre sobre los objetivos de la organización. El cual puede ser positivo o negativo sobre el cumplimiento de los objetivos de la organización.

Stakeholder: Persona u organización que puede afectar, verse afectada o percibirse afectada por una decisión, actividad o resultado de la organización.

Taxonomía: Clasificación sistemática de artículos en grupos genéricos en función de factores comunes.

Acrónimos

FabLab	:	Fabric Laboratory. Laboratorio de Fabricación.
FFI	:	Failure Finding Interval Intervalo de búsqueda de fallas.
FMEA	:	Failure Mode and Effect Analysis. Análisis de modos de falla y efectos.
Laser	:	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.
MIT	:	Massachusetts Institute of technology Instituto Tecnológico de Massachusetts.
MTBF	:	Mean Time Between Failures. Tiempo Medio entre Fallas.
RPN	:	Risk priority Number. Número de prioridad de riesgo.
OSHA	:	Occupational Safety and Health administration. Administración de Seguridad y Salud ocupacional.
OT	:	Orden de Trabajo.
RCM	:	Reliability Centered Maintenance. Mantenimiento centrado en la confiabilidad.
SMD	:	Surface Mount Device Dispositivo de montaje en superficie.
SIPOC	:	Suppliers Inputs Process Outputs and Costumers. Proveedores Entradas Proceso Salidas y Clientes.

Índice de contenidos

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Glosario	iv
Acrónimos	vi
Índice de contenidos	vii
Introducción	xix
1. Objetivos	1
2. Metodología de trabajo	2
3. Antecedentes generales	4
3.1 La institución	4
3.2 Misión Universidad Técnica Federico Santa María.....	4
3.3 Visión Universidad Técnica Federico Santa María	5
3.4 Campus San Joaquín	5
4. Marco teórico.....	6
4.1 Descripción de activos principales de FabLab.....	6
4.1.1 Router CNC	7
4.1.2 Impresora 3D	8
4.1.3 Torno	11
4.1.4 Sistema de Cortado Laser	13
4.1.5 Impresora de placas de circuito	23
4.2 Gestión del riesgo y evaluación de criticidad: ISO 31.000.....	25
4.3 Selección de herramientas de evaluación de riesgo según norma ISO 31.010	28

4.3.1	Lluvia de ideas (Brainstorming)	29
4.3.2	Índices de Riesgo.....	30
4.3.3	Análisis de modos de falla y efectos (FMEA).....	31
4.3.4	Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).....	35
4.4	Cultura Organizacional	36
4.5	Obtención de mediciones de calidad mediante norma ISO 14.224	37
4.5.1	Definición de calidad de datos.....	37
4.5.2	Medidas de planificación.....	37
4.5.3	Verificación de calidad	39
4.5.4	Limitaciones y problemas.....	40
4.6	Conceptos de calidad de mediciones	41
4.6.1	Aspectos básicos de calidad en un sistema de medición	41
4.6.2	Estudio R&R corto	43
4.7	Etapas evolutivas del mantenimiento	44
4.7.1	Etapa I: Acciones de mantenimiento correctivo.....	45
4.7.2	Etapa II: Acciones de mantenimiento preventivas y predicción de fallas	45
4.7.3	Etapa III: Enfoque hacia la organización táctica del mantenimiento	46
4.8	Políticas de mantenimiento	47
4.8.1	Mantenimiento Correctivo.....	47
4.8.2	Mantenimiento Preventivo	48
4.8.3	Mantenimiento predictivo.....	51
4.8.4	Tareas de búsquedas de fallas.....	54
4.8.4.1	Intervalo de búsqueda de fallas (FFI)	55
4.8.5	Rediseño	57

4.9	Aplicación de Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) mediante la norma SAE JA 1011	58
4.9.1	Pasos del Análisis RCM	58
4.9.2	Selección de política de mantenimiento	60
4.1	Gestión Visual.....	61
4.2	Costos de mantenimiento	63
5.	Situación actual de FabLab	64
5.1	Aspectos generales	64
5.2	Contexto operacional de Fablab	66
5.2.1	Contexto interno	66
5.2.2	Contexto externo	75
5.3	Perfil de Mantenimiento	76
5.4	Verificación de calidad de sistemas de medición mediante norma ISO 14.22478	
5.5	Limitaciones y problemas a considerar en la aplicación de un sistema de datos	81
5.6	Estudio R&R de indicador de gestión y Trazabilidad de datos	83
5.6.1	Estudio R&R (Corto) para propuesto de indicador de uso medio	83
5.6.2	Estudio de trazabilidad	86
6.	Evaluación de criticidad mediante norma ISO 31.000	89
6.1	Definición de alcance, contexto y criterio de riesgo.....	89
6.1.1	Definición de alcance	89
6.1.2	Definición de contexto.....	92
6.1.3	Definición de criterio de riesgo	93
6.2	Valoración del riesgo	97
6.2.1	Identificación del riesgo	97
6.2.2	Análisis de riesgo	101

6.2.3	Evaluación de riesgo.....	103
6.3	Tratamiento del riesgo	105
7.	Análisis RCM de sistemas de cortado laser y actividades de mantenimiento de FabLab.....	106
7.1	Definición de contexto operacional	107
7.2	Descripciones funcionales de los equipos	108
7.3	Identificación de fallas funcionales	108
7.4	Identificación de Modos de falla	109
7.5	Identificación de efectos	109
7.6	Selección de modos de falla críticos mediante Valoración NPR.....	109
7.7	Análisis de modos de falla críticos	112
7.8	Análisis de actividades de mantenimiento de FabLab y modos de falla	114
8.	Propuesta de plan de mantenimiento, y recursos necesarios	116
8.1	Elaboración de sistema de administración del trabajo	116
8.1.1	Panel de mantenimiento y gestión visual	117
8.2	Generación de actividades de mantenimiento mediante proceso lógico de decisión RCM	119
8.2.1	Activo de Sistema crítico: Enfriador	120
8.2.2	Activo de sistema crítico: Cortadora Laser	122
8.2.3	Activo de sistema crítico: Compresor	124
8.2.4	Subsistema de sistema crítico: Extractor	125
8.2.5	Diseño de tarea a condición de calidad de producto para Cortadora laser ...	126
8.2.6	Frecuencia de tareas de sustitución cíclica	126
8.2.7	Frecuencia de tareas de búsqueda de fallas	127
8.3	Mantenimientos Rutinarios.....	128
8.4	Elaboración de plan de mantenimiento.....	129

8.4.1	Inspecciones Rutinarias	131
8.5	Estimación de costos.....	132
9.	Conclusiones	137
9.1	Conclusiones Principales	137
9.2	Conclusiones Secundarias.....	140
9.3	Recomendaciones	141
	Referencias	142
A.	Evaluación de calidad	A-1
B.	Evaluación de Criticidad	A-7
C.	Estructuras Técnicas de Equipos.....	A-13
D.	Análisis RCM.....	A-18
E.	Orden de trabajo y registros de actividades RCM.....	A-46
F.	Estimación de costos anuales de plan de mantenimiento	A-51

Índice de Diagramas

Diagrama 4.1: Diagrama de flujo de procesos asociados a equipos secundarios de cortadora laser.....	13
Diagrama 4.2: Diagrama de partes internas del equipo de refrigeración.....	17
Diagrama 4.3: Diagrama de flujo de filtro de 4 etapas presente en sistema de cortado laser.	19
Diagrama 4.4: Proceso de gestión de riesgo según norma ISO 31.000.	27
Diagrama 4.5: Pasos para la realización del análisis de modos de falla y efectos FMEA..	32
Diagrama 4.6: Etapas evolutivas de los enfoques de mantenimiento en la industria.	44
Diagrama 5.1: Organigrama de FabLab con separación de distintos niveles jerárquicos. .	67
Diagrama 5.2: Proceso diario de operación de activos principales de FabLab descritos mediante la herramienta SIPOC.	71
Diagrama 5.3: Diagrama de Ishikawa que expone las fuentes de limitaciones o problemas que se deben considerar al momento de generar una fuente de datos según la norma ISO 14.224.	82
Diagrama 7.1: Análisis RCM para obtener modos de falla críticos y posteriormente seleccionar políticas de mantenimiento.....	106
Diagrama C.1: Estructura técnica de enfriador.....	A-14
Diagrama C.2: Estructura técnica de equipo de cortado laser.	A-15
Diagrama C.3: Estructura técnica de equipo de compresor de pistón sin aceite.	A-16
Diagrama C.4: Estructura técnica de extractor de sistema de cortado laser.	A-17
Diagrama D.1: Algoritmo de decisión RCM	A-44

Índice de Figuras

Figura 2.1: Pasos y aspectos principales de la metodología de trabajo.....	3
Figura 4.1: Ilustración que muestra las partes principales del Router CNC	7
Figura 4.2: Partes principales de la impresora 3D vistas desde la cara frontal.	9
Figura 4.3 Partes principales de la impresora 3D vistas desde la cara posterior.	9
Figura 4.4: Ilustración que muestra las principales partes del torno.	11

Figura 4.5: Componentes asociados a la operación de corte de máquinas de corte Laser.	14
Figura 4.6: Partes principales de máquina cortadora laser.	15
Figura 4.7: Elementos externos de equipo enfriador CW-3000 vistos desde la cara frontal.	18
Figura 4.8: Elementos externos de equipo enfriador CW-3000 vistos desde la cara posterior.	18
Figura 4.9: Partes principales de una bomba de vacío centrífuga.	20
Figura 4.10: Explosionado de compresor de pistón sin aceite.	21
Figura 4.11: Partes principales de impresora de circuito Cirqoid.	23
Figura 4.12: Comportamiento de frecuencia de fallo en el tiempo de componente con una vida promedio estimable para la realización de mantenimiento preventivo.	50
Figura 4.13: Comportamiento de probabilidad condicional de falla de componente con estimación de vida útil determinada mediante probabilidad de falla nula.	50
Figura 4.14: Fijación de límite de vida segura mediante gráfico de probabilidad condicional de falla.	50
Figura 4.15: Curva P-F donde se muestra el estado de un componente en función de tiempo y los puntos característicos para detección mediante actividad predictiva de mantenimiento.	52
Figura 5.1: Layout de Fablab basado en modelo del departamento de arquitectura UTFSM.	65
Figura 5.2: Gráfico de uso medio unitario mensual de activos de FabLab, con tabla de medias y desviaciones estándar de cada categoría.	74
Figura 6.1: Matriz de riesgo de modos de falla reales de activos de FabLab.	104
Figura 8.1: Propuesta de panel para registro y coordinación de actividades de mantenimiento.	118
Figura 8.2: Estandarización de las actividades principales de mantenimiento mediante gestión visual.	132
Figura A.1: Evaluación de Repetibilidad y Reproducibilidad aplicada a indicador de uso medio unitario mensual utilizando la metodología de [17], para posterior evaluación de trazabilidad de sus registros. Resultados de encargado A.	A-2

Figura A.2: Evaluación de Repetibilidad y Reproducibilidad aplicada a indicador de uso medio unitario mensual utilizando la metodología de [17], para posterior evaluación de trazabilidad de sus registros. Resultados de encargado B.	A-3
Figura A.3: Obtención de evaluación de error de medición R&R y trazabilidad para cálculo y registros de indicador de uso medio unitario mensual de equipos.	A-4
Figura A.4: Planilla de registro de uso de máquinas de FabLab.	A-5
Figura A.5: Planilla de registro de uso de máquinas de FabLab con mejoras en la toma de datos y trazabilidad.	A-6
Figura E.1: Orden de trabajo para realizar actividades de mantenimiento.	A-47
Figura E.2: Tareas a condición sujetas a test de calidad de corte para máquina cortadora laser.	A-48
Figura E.3: Tareas de búsqueda de fallas de dispositivos de seguridad y tareas a condición primaria para sistema de cortado laser.	A-49
Figura E.4: Rutina de inspección semanal de equipos de cortado laser.	A-50

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Conceptos básicos de la calidad de mediciones.	42
Tabla 4.2: Método simplificado para cálculo de intervalo de búsqueda de fallas.	56
Tabla 4.3: Funciones de la gestión visual en base a los síntomas organizacionales.	62
Tabla 5.1: Muestra del registro del historial de FabLab desde el primer semestre 2018, se puede identificar máquina, categoría, modo de falla y fecha.	73
Tabla 5.2: Ranking de uso medio unitario mensual para las categorías principales de activos.	75
Tabla 5.3: Resultados de rangos entre los cálculos de uso medio unitario mensual por parte de dos encargados de turno de FabLab.	84
Tabla 5.4: Desviación estándar y error de proceso sobre tolerancia, se puede apreciar que este es menor al 30% de la tolerancia, lo cual en base al criterio del autor [17], es aceptable.	85
Tabla 5.5: Tabla resultado de puntaje de trazabilidad de mediciones aleatorias del registro de uso de equipos de FabLab.	87

Tabla 6.1: Criterio para valoración de factor de impacto operacional, donde se da uso del ranking generado por el indicador propuesto “uso medio unitario mensual”.	95
Tabla 6.2: Criterio para la valoración del factor de flexibilidad.	95
Tabla 6.3: Criterio para la valoración de los costos de mantenimiento.....	96
Tabla 6.4: Criterio de valoración de factor de daño a la salud o medio ambiente.	96
Tabla 6.5: Propuesto de criterio de evaluación de criticidad mediante percentil estadístico.	97
Tabla 6.6: Factores de riesgo para la salud o medio ambiente presentes en FabLab.	99
Tabla 6.7: Jerarquización de categorías de activos principales de FabLab mediante el indicador propuesto, uso medio unitario mensual.	101
Tabla 6.8: Evaluación de índices de criticidad mediante percentiles.	103
Tabla 6.9: Jerarquización de activos en base a la criticidad acumulada de modos de falla.	104
Tabla 7.1: Contexto operacional de sistema de cortado laser.	107
Tabla 7.2: Criterio para valoración de la severidad de las consecuencias de modos de falla de activos de FabLab.	110
Tabla 7.3: Criterio para valoración de la ocurrencia de los modos de falla de activos de FabLab.	111
Tabla 7.4: Criterio para valoración de la probabilidad de detección de las fallas funcionales de activos de FabLab.	111
Tabla 7.5: Plan de mantenimiento actual de sistemas de cortado laser de FabLab.....	114
Tabla 8.1: Cálculo de frecuencia de sustitución cíclica de filtros del Extractor, en donde los ciclos mensuales permitidos se redondean hacia un número inferior conveniente para la planificación de mantenimiento.	127
Tabla 8.2 : Propuesta de plan de inspección y mantenimiento para cortadora laser.	129
Tabla 8.3: Propuesta de plan de inspección y mantenimiento para Extractor.....	130
Tabla 8.4: Propuesta de plan de inspección y mantenimiento para compresor.....	130
Tabla 8.5: Propuesta de plan de inspección y mantenimiento para equipo de refrigeración.	131
Tabla 8.6 : Estimación de inversión en dispositivos para mantenimiento predictivo y tareas de búsquedas de fallas.	133

Tabla 8.7 : Estimación de horas necesarias para realizar los planes de mantenimiento actual, y la propuesta de plan de mantenimiento.	134
Tabla 8.8 : Comparación de plan de mantenimiento actual y del propuesto, con sus respectivas diferencias porcentuales en materiales, mano de obra y costo anual de mantenimiento.	135
Tabla B.1: Análisis de factor de riesgo de costos de mantenimiento y flexibilidad de repuestos para los modos de fallas del registro de mantenimientos correctivos de activos de FabLab (1).	A-8
Tabla B.2: Análisis de factor de riesgo de costos de mantenimiento y flexibilidad de repuestos para los modos de fallas presente del registro de mantenimientos correctivos de activos de FabLab (2).	A-9
Tabla B.3: Análisis de factor de riesgo de salud y medio ambiente para los modos de fallas del registro de mantenimientos correctivos de activos de FabLab (1).	A-10
Tabla B.4: Análisis de factor de riesgo de salud y medio ambiente para los modos de fallas del registro de mantenimientos correctivos de activos de FabLab (2).	A-11
Tabla B.5: Valoración de consecuencias de modos de falla presente en el registro de mantenimientos correctivos de FabLab.	A-12
Tabla D.1: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (1).	A-19
Tabla D.2: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (2).	A-20
Tabla D.3: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (3).	A-21
Tabla D.4: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (4).	A-22
Tabla D.5: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (5).	A-23
Tabla D.6: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (1).	A-24
Tabla D.7: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (2).	A-25
Tabla D.8: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (3).	A-26
Tabla D.9: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (4).	A-27
Tabla D.10: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (5).	A-28
Tabla D.11: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (6).	A-29
Tabla D.12: Análisis RCM con valoración NPR de compresor de pistón (1).	A-30
Tabla D.13: Análisis RCM con valoración NPR de compresor de pistón (2).	A-31
Tabla D.14: Análisis RCM con valoración NPR de extractor (1).	A-32

Tabla D.15: Análisis RCM con valoración NPR de extractor (2).....	A-33
Tabla D.16: Análisis RCM con valoración NPR de extractor (3).....	A-34
Tabla D.17: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de enfriador (1).	A-35
Tabla D.18: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de enfriador (2).	A-36
Tabla D.19: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de cortadora laser (1).	A-37
Tabla D.20: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de cortadora laser (2).	A-38
Tabla D.21: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de cortadora laser (3).	A-39
Tabla D.22: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de cortadora laser (4).	A-40
Tabla D.23: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de compresor de pistón (1).	A-41
Tabla D.24: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de extractor (1).	A-42
Tabla D.25: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de extractor (2).	A-43
Tabla D.26: Tecnologías basadas en condición disponibles en el mercado.....	A-44
Tabla F.1: Estimación de costo anual de componentes de plan de mantenimiento actual y de propuesto.	A-52
Tabla F.2: Estimación de costo anual de insumos de plan de mantenimiento actual y de propuesto.	A-53
Tabla F.3: Estimación de costo de mano de obra de plan de mantenimiento actual y de propuesto.	A-54

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Cálculo de número de prioridad de riesgo para determinar causas de fallo críticos.	33
Ecuación 2: Error de repetibilidad y reproducibilidad en un proceso de medición.	43
Ecuación 3: Disponibilidad requerida determinada mediante la probabilidad máxima de falla múltiple admisible y la estimación de la probabilidad de falla de la función protegida.	55
Ecuación 4: Cálculo de intervalo de búsqueda de fallas donde T_i es el tiempo necesario entre inspección, Fbf es el factor de búsqueda de falla calculado mediante la Tabla 4.2 , y $MTBF$ es el tiempo medio entre fallas.	56
Ecuación 5: Uso medio unitario mensual de equipos, considera el total de horas mensuales de utilización de los equipos, y se divide por el total de activos con una disponibilidad mayor al 50% en la categoría.	74
Ecuación 6: Valoración semicuantitativa de criticidad para cada modo de falla.	94
Ecuación 7: Evaluación semicuantitativa de riesgo utilizando una combinación de factores de impacto operacional, costo de mantenimiento, flexibilidad de respuesta e impacto a la salud y medio ambiente. [23] utilizando ponderaciones basadas en la metodología de [18]	94

Introducción

La Universidad Técnica Federico Santa María cuenta con altos estándares de gestión y por lo cual, tiene exigencias elevadas para los distintos organismos de la Universidad. Dentro de estos organismos se encuentra FabLab, una iniciativa estudiantil de gestión interna independiente, financiada por la Universidad, la cual presenta como finalidad fomentar la innovación tecnológica facilitando implementos y máquinas herramientas de trabajo eléctrico, electrónico y mecánico para la realización de memorias y proyectos universitarios o externos.

Actualmente la organización dentro de su constante crecimiento, no cuenta con un sistema de gestión de mantenimiento que le permita generar acciones preventivas justificadas ni mecanismos para dejar un registro de ello, lo cual dificulta la adquisición de recursos para esta área dada las altas exigencias de Vicerrectoría Académica. Por lo cual es fundamental contar con herramientas y evidencia que sustenten la toma de decisiones y permitan justificar los presupuestos de mantenimientos solicitados a la Universidad.

El presente trabajo de título realiza una metodología para determinar los activos de mayor impacto en los procesos de la organización, realizando sus respectivos planes de mantenimiento basados en contexto, teniendo como objetivo aumentar la disponibilidad de los activos más importantes para sus procesos.

La realización de esta metodología entrega a la organización herramientas para tomar decisiones basadas en riesgo en el área de mantenimiento, y un sistema estructurado de administración del trabajo que permita dejar un registro de ello.

1. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo de título es generar una propuesta de plan de mantenimiento en los activos críticos de FabLab.UTFSM, buscando mejorar su disponibilidad.

Los objetivos específicos de este trabajo se detallan a continuación:

- 1.** Identificar activos, perfil de mantenimiento y situación actual de Fablab.UTFSM.
- 2.** Realizar análisis de criticidad de activos.
- 3.** Realizar análisis de modos de falla y actividades de mantenimiento de activos críticos.
- 4.** Generar propuesta de plan de mantenimiento en activos críticos.
- 5.** Estimar y analizar costos de la propuesta de plan de mantenimiento.

2. Metodología de trabajo

Para la consecución de los objetivos es necesario estructurar una metodología de trabajo, la cual se sustente en un marco teórico. Este inicia por una comprensión de los activos principales de FabLab, para posteriormente investigar normas y autores que permitan determinar con precisión la situación actual de la organización, evaluar la calidad de los datos que serán utilizados en los análisis y por último, para sustentar la metodología empleada en la evaluación de criticidad y el posterior plan de mantenimiento de la categoría de activos críticos de la organización.

A continuación de la realización del marco teórico, se realiza un estudio de la situación actual de FabLab, donde se describe el contexto interno y externo, en conjunto con el perfil de mantenimiento de la organización, lo cual genera una comprensión detallada de la organización y de la información disponible para la selección de herramientas y elaboración de procedimientos que mejor se adapten a la organización.

Teniendo conocimiento de dicho contexto, se evalúan los datos y sistemas de información de FabLab, con la finalidad de tener conocimiento de las fuentes de error e incertidumbre en la entrada de datos, permitiendo utilizar un modelo de evaluación de criticidad el cual, en conjunto con la selección de una herramienta de valoración de riesgo que se adapte mejor al contexto interno y externo de la organización, identificando los activos más críticos.

Posterior a la selección de los activos críticos, estos se deben analizar funcionalmente con la finalidad de reconocer todos los escenarios potenciales de consecuencias adversas para la organización, y verificar si las actividades de mantenimiento llevadas a cabo actualmente disminuyen su desarrollo, lo cual finalmente permite la elaboración de un propuesto de plan de mantenimiento, con su respectivo sistema de administración del trabajo y estimación de costos, el conjunto de pasos de la metodología de trabajo se presentan en la **Figura 2.1**.

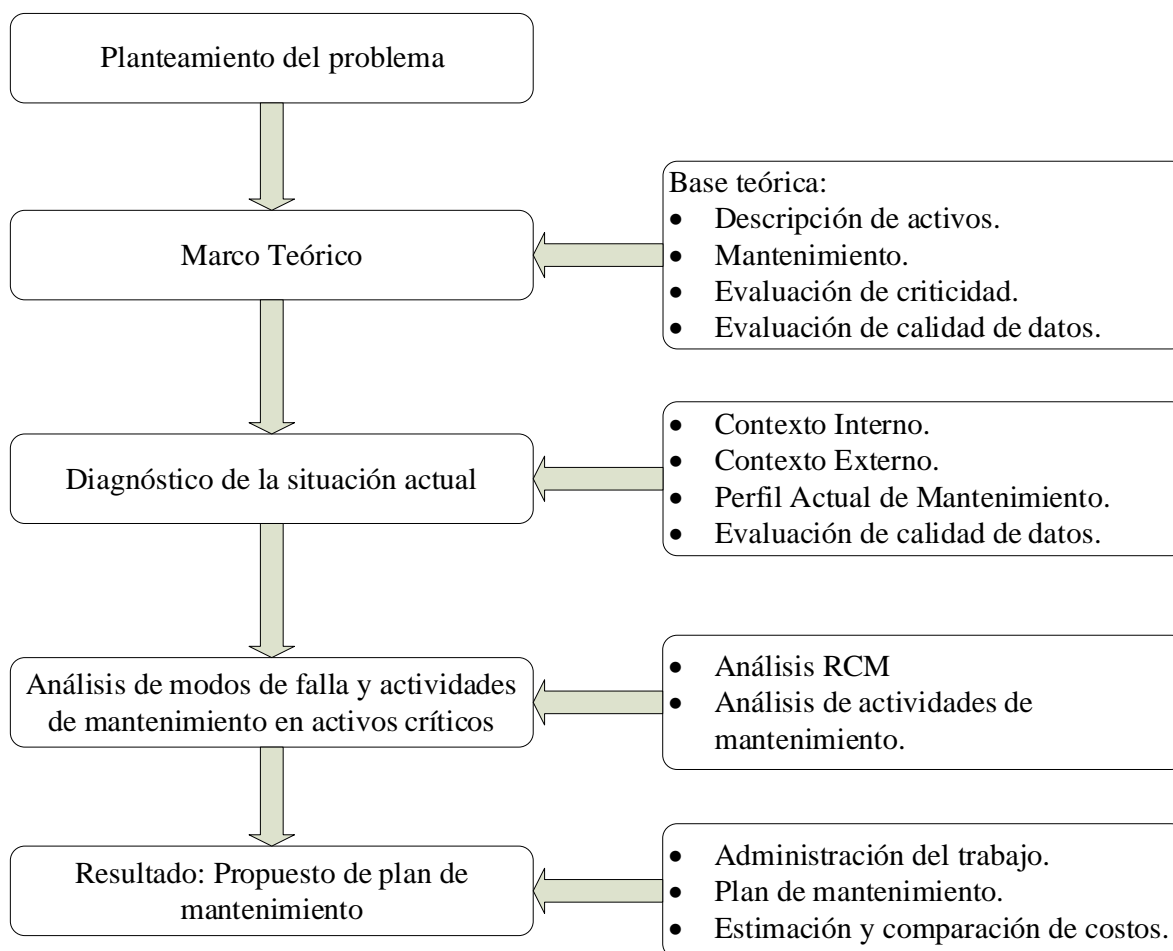


Figura 2.1: Pasos y aspectos principales de la metodología de trabajo.

Fuente: Elaboración propia.

Ya habiéndose generado como resultado el propuesto de plan de mantenimiento para los activos críticos de la organización, se concluye el trabajo con una evaluación del cumplimiento de los objetivos, de la adaptación de las metodologías utilizadas, y recomendaciones basadas en el reconocimiento de elementos que posteriormente podrían generar mejoras y memorias de titulación en las áreas abarcadas por el presente trabajo.

3. Antecedentes generales

Los laboratorios de fabricación digital se gestan en el año 2001 como concepto en el MIT, donde se caracterizan por ser espacios físicos de producción que entregan herramientas para la realización de productos a escala física o local, estos tienen una vinculación alta con el medio donde se desenvuelven, y en el caso de la Universidad Técnica Federico Santa María, se gesta FabLab el año 2013 que dada su alta dependencia de dicha universidad, se establecen algunos antecedentes generales.

3.1 La institución

La Universidad Técnica Federico Santa María es una Fundación de derecho privado, con carácter particular, y forma parte del consejo de rectores de universidades chilenas, CRUCH.

Fundada en Valparaíso, el 27 de abril de 1926, al dictarse el decreto supremo N°996 del Ministerio de Justicia, por lo que se concedió la personalidad jurídica a la “Fundación Federico Santa María”, de acuerdo a los estatutos presentados en la escritura pública. Sin embargo, no fue hasta el año 1930 que adquiere por el decreto supremo N° 3048 la calidad de plantel de educación superior y pasa a llamarse “Universidad Técnica Federico Santa María”.

Con el paso de los años el plantel se expande físicamente, diversificándose como respuesta a la amplia y creciente demanda presente en los años 70 de la casa de estudios. Con esto en el año 1969 se funda la sede de viña del mar, la cual en años anteriores operaba en la casa central de la universidad.

3.2 Misión Universidad Técnica Federico Santa María

“Crear y difundir nuevo conocimiento, y formar integralmente profesionales idóneos en el ámbito científico-tecnológico, para liderar el desarrollo del país y la humanidad”

3.3 Visión Universidad Técnica Federico Santa María

“Ser un referente científico-tecnológico nacional e internacional, que convocando a una comunidad universitaria de excelencia, estimule la difusión del conocimiento y la creación de valor, en todas sus áreas de trabajo, siendo reconocida como Universidad Líder en Ingeniería, Ciencia y Tecnología”

3.4 Campus San Joaquín

La universidad con la finalidad de expandir sus horizontes académicos y afianzar la presencia en la capital, el año 1995 crea el campus Santiago emplazado en la comuna de Las Condes, con carreras del área de la administración e Informática.

A contar del año 2008 se construyen nuevas instalaciones en la comuna de San Joaquín, con la consiguiente inauguración del campus San Joaquín en marzo del 2009, el cual cuenta con una superficie de 43.800 metros cuadrados y con 14.500 metros cuadrados construidos, partiendo su funcionamiento con sus carreras más tradicionales de Ingeniería tales como: Ingeniería Civil en obras civiles, Mecánica, Eléctrica, Química e Informática, los cuales se trasladan de campus Vitacura. Para el año 2019, cuenta adicionalmente con las carreras de Ingeniería en diseño de productos, Ingeniería civil matemática, e Ingeniería civil de minas, con un edificio de 16.000 metros cuadrados.

4. Marco teórico

En el presente capítulo se detallan los elementos necesarios para lograr una correcta comprensión de los temas a abordar en el presente trabajo. Se describen los activos principales para las operaciones de manufactura de la organización, los cuales se caracterizan por ser monitoreados (se registran sus elementos de contexto operacional), y por contar con planes de mantenimiento. Posteriormente se abordan metodologías y definiciones necesarias para definir el contexto operacional, evaluar criticidad de activos, evaluar la calidad de datos y diseñar planes de mantenimiento.

4.1 Descripción de activos principales de FabLab

Dentro de un Fablab se manufacturan proyectos de naturaleza mecánica, eléctrica o electromecánica, por lo cual a continuación se detallan los activos principales que colaboran en la realización de procesos como torneado, fresado, taladrado, impresión 3D, corte laser y manufactura de placas de circuito.

Las principales exigencias para el correcto funcionamiento de las máquinas-herramientas según [4] es la siguiente:

- **Exactitud en la fabricación:** Exactitud en los elementos constructivos de la máquina.
- **Exactitud en el trabajo:** Determina la exactitud de las piezas fabricadas, por ejemplo, tolerancias.
- **Seguridad de funcionamiento:** Las perturbaciones en el funcionamiento perjudican el trabajo.
- **Protección en el trabajo:** Que salvaguarde a los operarios contra accidentes y otro tipo de daños.

Para conservar los aspectos mencionados, las máquinas deben limpiarse con frecuencia, y realizar operaciones de mantenimiento preventivas que se adapten a sus necesidades.

A continuación, se describe el funcionamiento y componentes principales de los activos de Fablab.

4.1.1 Router CNC

Máquina CNC (control numérico computarizado) que cumple la función de hacer con precisión operaciones de corte, perforación, y perfilado en muchos materiales, y puede ser controlada mediante un computador común.

Antes de definir los ejes, se define la cara frontal o frente de la máquina como la perspectiva en al cual se ve directamente el panel de control y el variador de frecuencia. Esta máquina herramienta cuenta con 3 ejes el eje **X** funciona de izquierda a derecha vista desde la cara frontal, el eje **Y** que se mueve desde la cara frontal a la trasera del Router, y por último el eje **Z** es perpendicular a ambos, y funciona de abajo hacia arriba como sentido positivo. En la **Figura 4.1** se detalla la posición de los ejes, en conjunto con las partes principales del Router CNC.

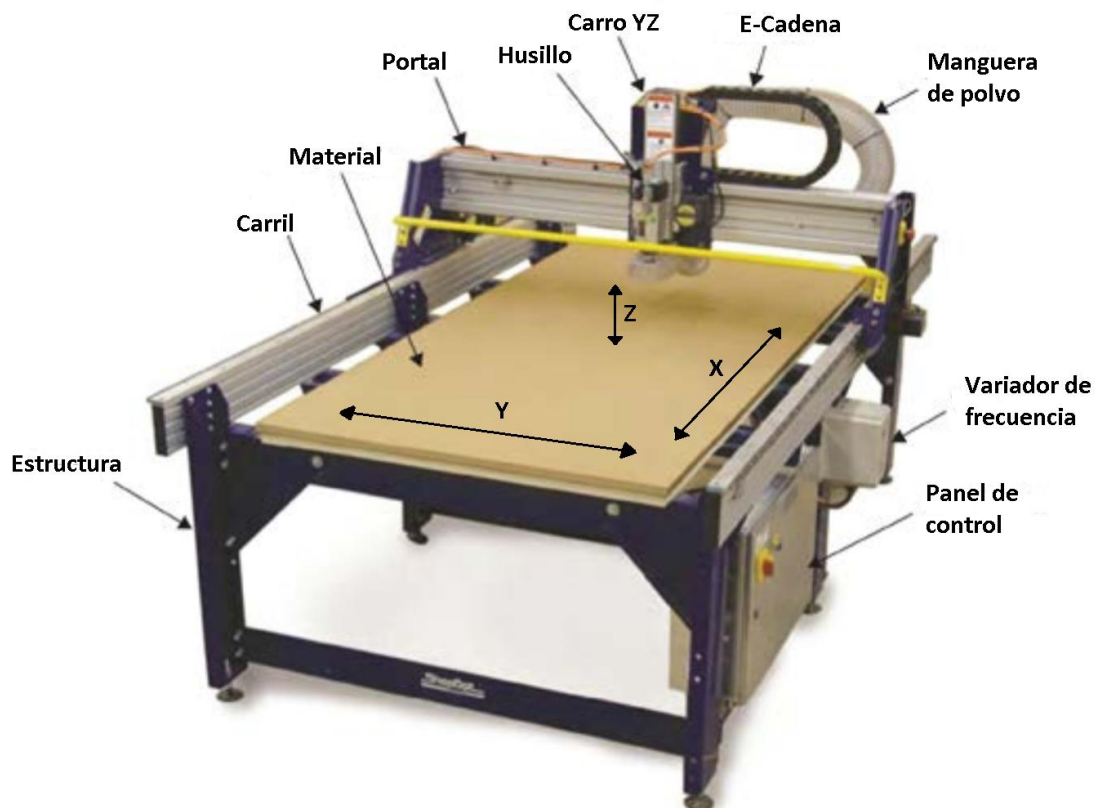


Figura 4.1: Ilustración que muestra las partes principales del Router CNC

Fuente: Elaboración propia, basado en información de manual de usuario [5].

A continuación, se describen las partes principales del Router CNC [5]:

Portal: Estructura encargada de soportar el motor y la herramienta de trabajo, teniendo como principal función hacer variar la posición de la herramienta en el eje Y.

Manguera de polvo: Elemento mecánico encargado de aspirar el polvo producto del mecanizado.

Carril: Elementos mecánicos encargados de sujetar el portal y producir el movimiento de trabajo en dirección del eje X.

Husillo: Elemento mecánico encargado de sujetar, transmitir el torque y velocidad de giro a la herramienta de trabajo.

Variador de frecuencia: Encargado de variar la velocidad de corte en base a la frecuencia del voltaje suministrado al motor.

E-Cadena: Elemento encargado de cubrir el cableado de alimentación y de señales eléctricas del husillo.

Carro YZ: Elemento mecánico encargado de controlar la profundidad del mecanizado.

Estructura: Elemento encargado de absorber vibraciones del mecanizado y de dar soporte al resto de los elementos del Router CNC.

Panel de control: Caja de componentes del sistema eléctrico, donde se encuentran las placas de control y de potencia.

4.1.2 Impresora 3D

La máquina de impresión 3D cumple principalmente la función de crear un objeto físico, considerando como entrada un modelo digital, esta tecnología parte en la década de los 80's con el nombre de "prototipado rápido".

La tecnología de impresión 3D es a menudo llamada, manufactura por adición dado que, en comparación con la manufactura convencional basada en la remoción de material, esta tecnología se basa en la adición de material hasta generar la pieza o modelo deseado. En la **Figura 4.2** y **Figura 4.3** se muestran algunos de los componentes principales de la impresora 3D [6]:

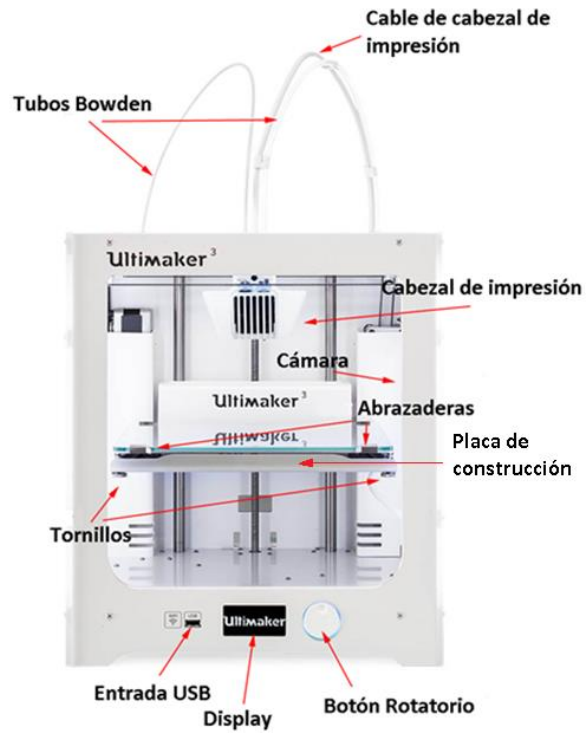


Figura 4.2: Partes principales de la impresora 3D vistas desde la cara frontal.

Fuente: Elaboración propia, basado en manual de usuario de impresora 3D Ultimaker 3[6].



Figura 4.3 Partes principales de la impresora 3D vistas desde la cara posterior.

Fuente: Elaboración propia, basado en manual de usuario de impresora 3D ultimaker 3[6].

A continuación, se describen las partes principales de la impresora 3D:

Cabezal de impresión: Elemento mecánico encargado de calentar y adicionar el filamento a la pieza de trabajo, esta cuenta con insertos intercambiables los cuales dependen del material y de la temperatura de cambio de estado del filamento.

Cámara: Estructura encargada de soportar el resto de los componentes mecánicos de la impresora.

Tubos Bowden: Mangueras de teflón diseñadas para ser de guía del filamento para mantener constante la distancia de este, entre el cabezal de impresión y los alimentadores.

Placa de construcción: Superficie de trabajo donde se realiza el proceso de manufactura por adición, compuesta de vidrio, dadas sus propiedades anti adherentes.

Abrazaderas y Tornillos: Elementos mecánicos encargados de dar sujeción y nivelación adecuada a la placa de construcción.

Entrada USB: Elemento electrónico con la función de permitir la entrada del diseño a trabajar en la impresora 3D.

Display: Pantalla electrónica encargada de mostrar las opciones al usuario.

Botón Rotatorio: Elemento encargado de con la rotación permitirle al usuario escoger entre las variadas opciones del equipo, y con el pulsador activar dichas opciones.

Filamento: Material de trabajo usando en la manufactura por adición para la impresión 3D.

Alimentadores: Elemento mecánico encargado de generar el movimiento del filamento hacia el cabezal de impresión mediante extrusión.

4.1.3 Torno

Es una máquina herramienta que permite mecanizar piezas de forma geométrica de revolución (cilindros, conos, hélices). Dichas máquinas operan haciendo girar la pieza mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento de avance contra la superficie de la pieza, cortando el material sobrante en forma de viruta [7].

Existen dos tipos de movimiento principales en el torno, en dirección axial a la pieza, o radial a la pieza, siendo el primero el que determina la velocidad de corte, y el segundo la profundidad de la viruta a extraer.

En la siguiente figura se muestra un torno junto con sus componentes principales[7] :

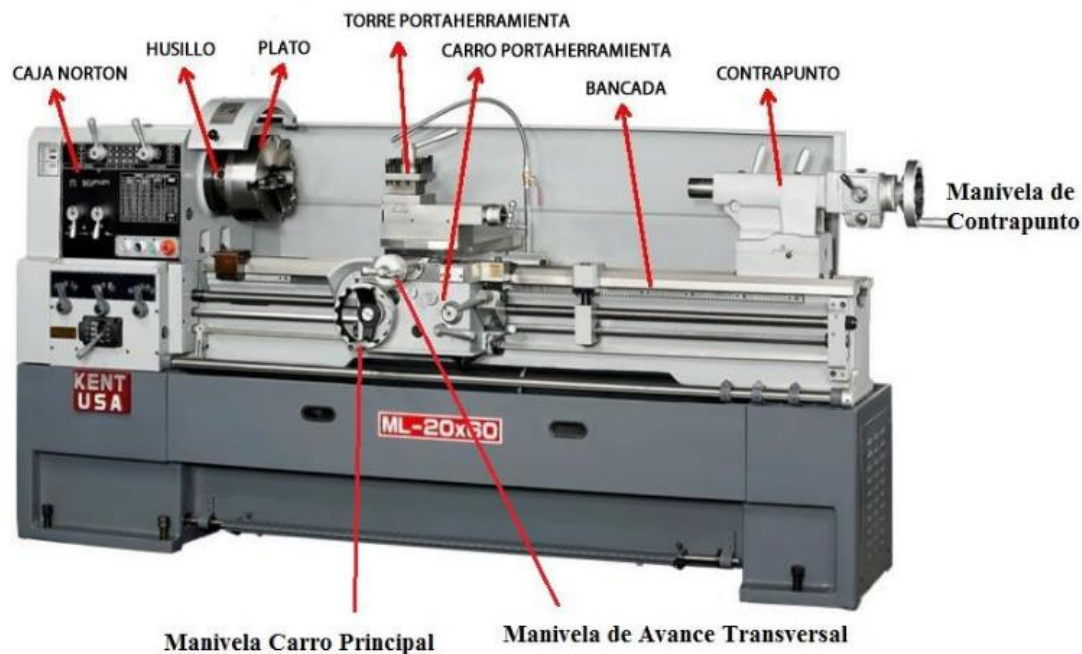


Figura 4.4: Ilustración que muestra las principales partes del torno.

Fuente: Elaboración propia, basado en información entregada por [7].

A continuación, se describen sus partes principales:

Cabezal Fijo: Compuesto por la caja Norton la cual determina la velocidad de rotación del husillo, y esta se transmite al plato que se encarga de sujetar el material a mecanizar. La caja Norton puede determinar también la rapidez de avance del cabezal móvil.

Cabezal Móvil: Este se encarga de dar la posibilidad de mayor sujeción a la pieza o poder realizar operaciones de taladrado mediante el contrapunto, donde permite la capacidad de realizar ajustes de precisión mediante la manivela de contrapunto.

Carro porta herramienta: Parte del torno encargada de generar el movimiento en dirección axial (con la manivela de carro principal) o radial (con la manivela de avance transversal) hacia la pieza de trabajo.

Bancada: Generalmente de fundición para absorber mejor las vibraciones, es la encargada de ser la estructura de los demás componentes del torno.

Torre porta herramienta: Componente encargado de sujetar la herramienta de corte, el cual es orientable, con la capacidad de rotar sobre su base en cualquier ángulo para posicionar dicha herramienta.

4.1.4 Sistema de Cortado Laser

Para que un sistema de cortado laser pueda funcionar, se debe contar con la máquina cortadora laser, a la cual se le adiciona un extractor de materiales de desecho, un enfriador para refrigerar el tubo de CO₂, y un compresor para mantener limpia de cenizas la zona de corte, tal como se muestra en el **Diagrama 4.1:**

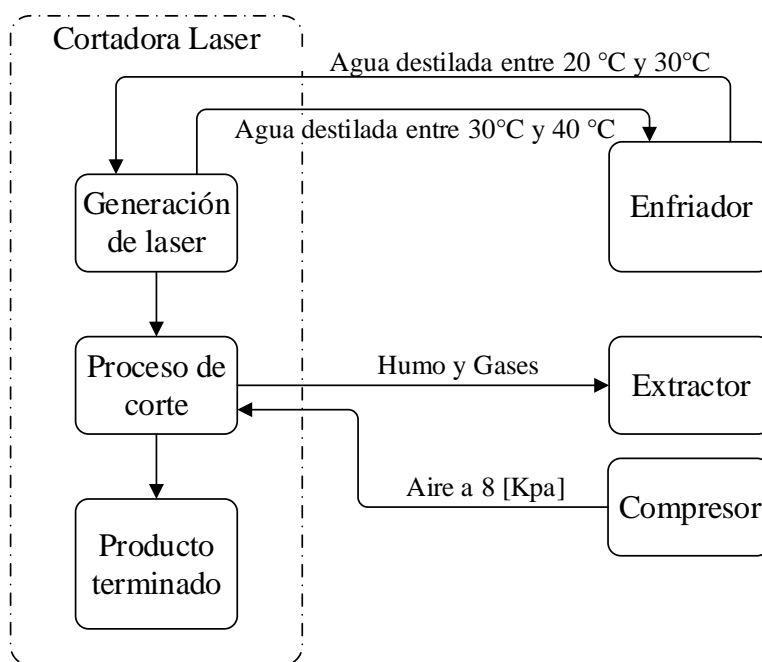


Diagrama 4.1: Diagrama de flujo de procesos asociados a equipos secundarios de cortadora laser.

Fuente: Elaboración propia, basado en manual de usuario de cortadora laser [8].

A continuación, se detallan en el mismo orden, cortadora laser, el extractor y el equipo de refrigeración.

1.1.1.1 Cortadora Laser

Una máquina cortadora Laser de CO₂ funciona por estimulación eléctrica de moléculas dentro de una mezcla de dióxido de carbono, cuando se enfoca a una lente este invisible haz de alta intensidad puede vaporizar una variedad de materiales, dependiendo de la intensidad y la velocidad con la cual se proyecta el haz, esta puede ser utilizada para grabar o cortar. Dadas las características físicas de los activos, una vista general no permite una descripción de las partes principales involucradas en el proceso, por lo cual se presentan en la **Figura 4.5**

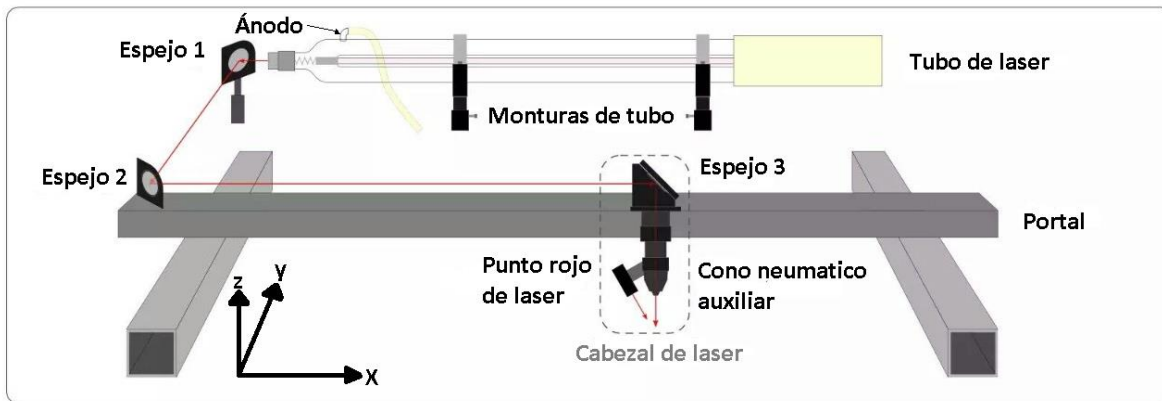


Figura 4.5: Componentes asociados a la operación de corte de máquinas de cortado Laser.

Fuente: Elaboración propia, basado en manual de usuario [8].

El haz de láser generado en el tubo, se cambia dirección mediante los espejos 1,2 y 3, hasta llegar al cono el cual está encargado de dirigir el haz para generar el corte, el portal realiza movimiento en el plano XY, mientras que la profundidad de corte queda determinada por el tiempo que se mantiene el láser en la posición.

Ya reconociendo los componentes asociados a la operación de corte, se presenta una perspectiva general de las partes de la máquina de cortado laser, con su respectiva descripción basada en la documentación técnica disponible [8] y la experiencia de los miembros de FabLab.



Figura 4.6: Partes principales de máquina cortadora láser.

Fuente: Elaboración propia, reconocimiento de componentes mediante [8] en colaboración con los miembros de FabLab.

Puertas: La puerta superior está compuesta principalmente de un vidrio con filtro de radiación UV con la finalidad de proteger la vista del operario de la radiación generada en el proceso de corte, dicha puerta se abre para depositar el material a cortar y en caso de ser necesario, ejecutar operaciones de calibración y mantenimiento. La puerta inferior está diseñada para operaciones de limpieza de residuos de la operación de corte y mantenimiento de la transmisión del activo. Ambas puertas cuentan con dispositivos de seguridad de interruptores magnéticos de contacto, que no permiten la operación en caso de que alguna de ellas se encuentre abierta.

Mesa de Corte: Compuesta de una rejilla de acero con resistencia mayor a la potencia máxima de corte, en esta se deposita el material a utilizar en la operación de corte.

Parada de emergencia: Elemento con la finalidad de detener el funcionamiento del equipo en caso de anomalías de operación.

Corta corriente: Elemento con la finalidad de cortar el suministro eléctrico del sistema para la realización de mantenimientos, o para detener el funcionamiento del equipo en caso de anomalías de operación, en redundancia con la parada de emergencia.

Sistema eléctrico: Ubicado generalmente en el costado derecho de las máquinas cortadoras laser, se encuentran las placas de control, las cuales le dan ordenes al sistema para su funcionamiento, la placa de control de potencia, fuente de poder y transformador los cuales entregan el suministro eléctrico al sistema para su funcionamiento.

Panel de control: Compuesto de una pantalla y botones electrónicos, encargados de dar la orden de ejecución de la operación de corte cargada desde un computador externo.

2.1.1.1 Enfriador

Equipo que funciona con un sistema de refrigeración por termólisis, el cual consiste en un intercambiador de calor, el cual está conectado al tubo de Co₂ tal como se muestra en el siguiente diagrama:

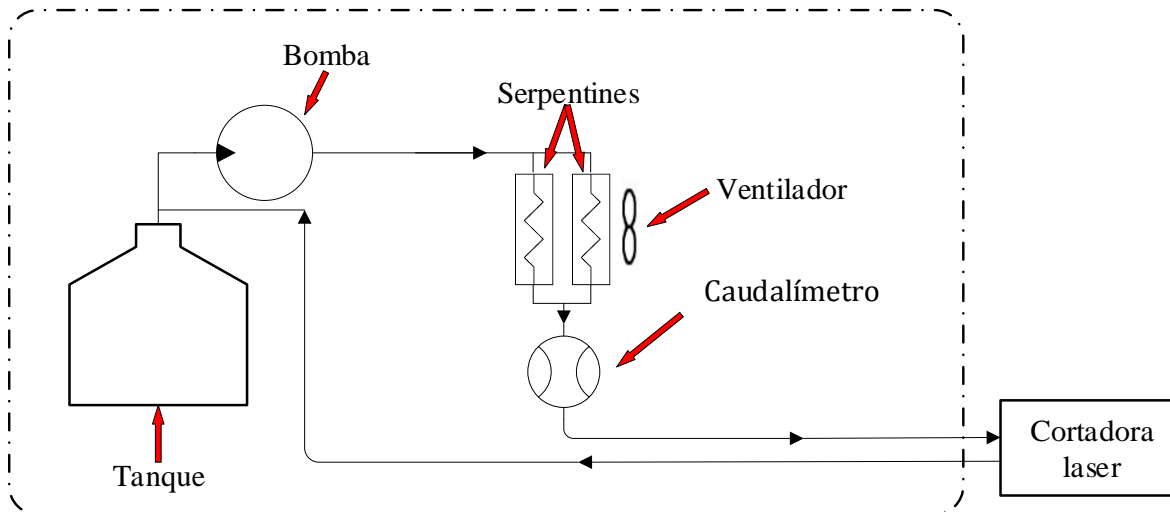


Diagrama 4.2: Diagrama de partes internas del equipo de refrigeración.

Fuente: Elaboración propia, basada en inspección visual en colaboración con miembros de FabLab, he información entregada por proveedores.

A continuación, se describen cada uno de los elementos internos del equipo:

Tanque: Recipiente que contiene el agua utilizada como fluido refrigerante del sistema.

Bomba: Elemento mecánico encargado de generar el movimiento del agua, este es unidireccional.

Serpentines: Elemento mecánico por el cual circula fluido y su geometría permite una transferencia de calor más eficiente por convección.

Ventilador: Elemento mecánico encargado de aumentar la velocidad del flujo de aire que genera contacto con los serpentines.

Caudalímetro: Elemento mecánico encargado de medir el caudal que va pasando hacia la cortadora láser, este cuenta con un sensor magnético el cual detecta el flujo de agua y se desactiva en caso de no realizarse flujo de agua.

Ya teniendo en consideración estos elementos internos, a continuación, se muestran los elementos externos del equipo:



Figura 4.7: Elementos externos de equipo enfriador CW-3000 vistos desde la cara frontal.

Fuente: Manual de usuario enfriador CW-3000 [9].

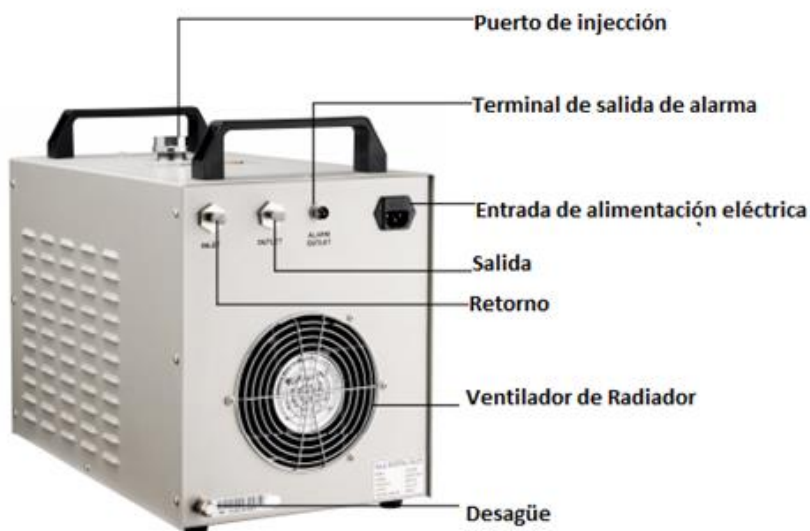


Figura 4.8: Elementos externos de equipo enfriador CW-3000 vistos desde la cara posterior.

Fuente: Manual de usuario enfriador CW-3000 [9] .

3.1.1.1 Extractor

En el proceso de cortado laser se producen gases, residuos y material particulado, el cual selectivamente se filtra en cuatro etapas depositándose en cada uno de los filtros, los cuales en periodos determinados de operación son remplazados, en el siguiente diagrama se muestra el funcionamiento del sistema de filtrado de cuatro etapas:

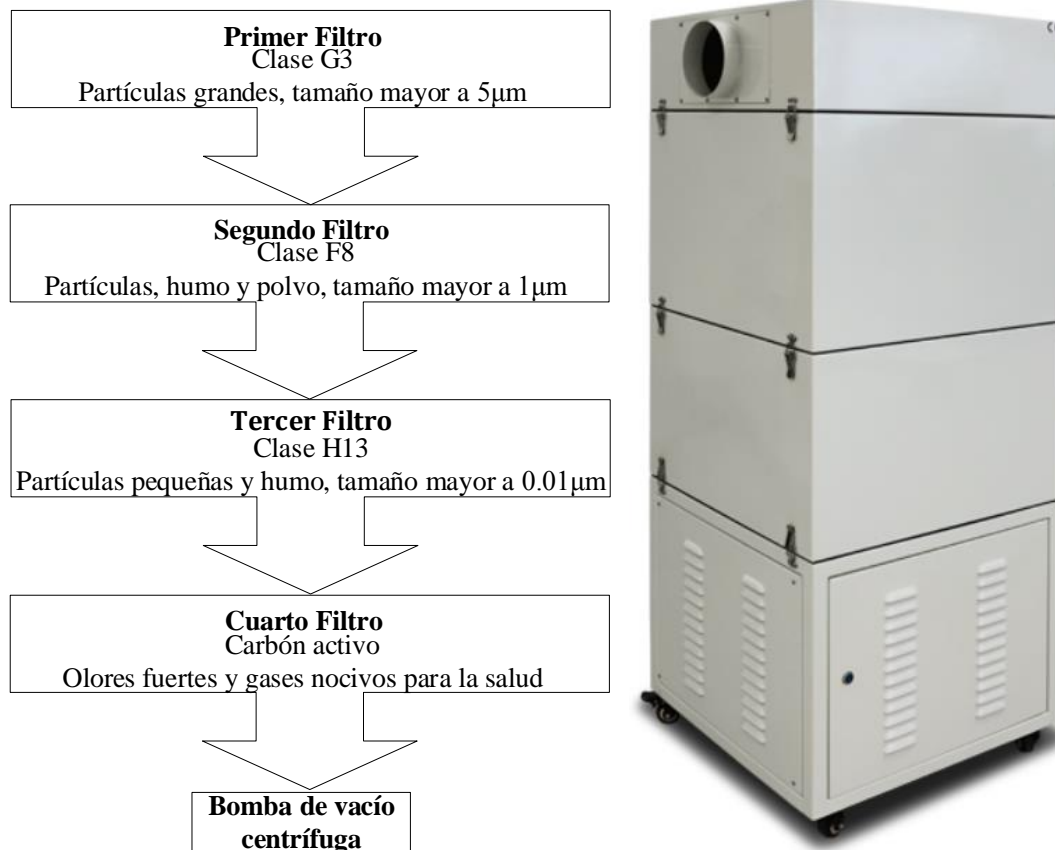


Diagrama 4.3: Diagrama de flujo de filtro de 4 etapas presente en sistema de cortado laser.

Fuente: Elaboración propia, basado en información entregada por FabLab y proveedor de producto.

Las nomenclaturas G3, F8, están presentes en la norma EN-779 de filtros de aire, mientras que la clase H13 en la norma EN-1822 de filtros absolutos, en ambas se señalan las especificaciones técnicas de los filtros.

La bomba de vacío centrífuga con la que cuenta el Extractor tiene los siguientes componentes principales:

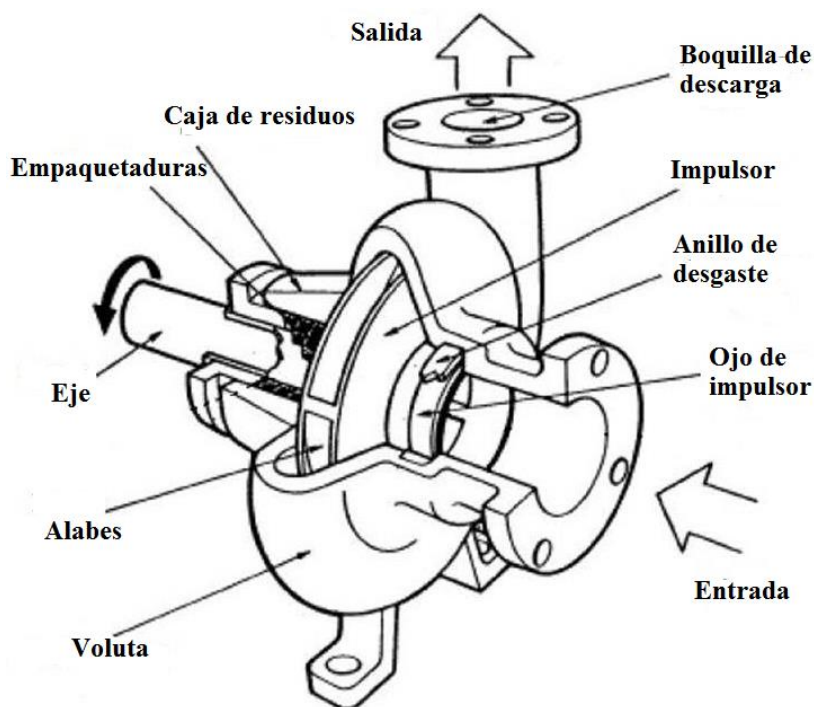


Figura 4.9: Partes principales de una bomba de vacío centrífuga.

Fuente: Elaboración propia, basado en la información entregada por [10].

Este equipo cumple la función principal de generar una presión de vacío para la evacuación de gases y partículas nocivas para la salud y para el proceso de manufactura, en donde sus componentes principales son los siguientes:

Empaquetaduras y anillo de desgaste: Cumplen la función de evitar filtraciones de aire y partículas hacia otras zonas de la bomba, haciendo que el flujo neto sea por el ojo del impulsor, los alabes y la boquilla de descarga.

Caja de residuos: Cumple la función principal de evitar la filtración de polvo hacia el motor eléctrico al cual está conectado el eje.

Impulsor: Encargado de generar la presión negativa de vacío necesaria para el funcionamiento de la bomba centrífuga. Generando la entrada de fluido desde el ojo del impulsor, haciéndolo pasar por la boquilla de descarga.

4.1.1.1 Compresor de pistón sin aceite

Basado en lo expuesto por [8], dentro del proceso de cortado laser se producen gases, residuos y material particulado el cual debe ser extraído de la máquina cortadora laser mediante un compresor sin aceite con las siguientes finalidades:

- Eliminar humedad que puede dañar los componentes ópticos.
- Suprimir las temperaturas de trabajo para evitar inflamación.
- Eliminar polvo y subproductos del proceso de cortado laser.

En donde este tipo de compresor cuenta con el siguiente explosionado:

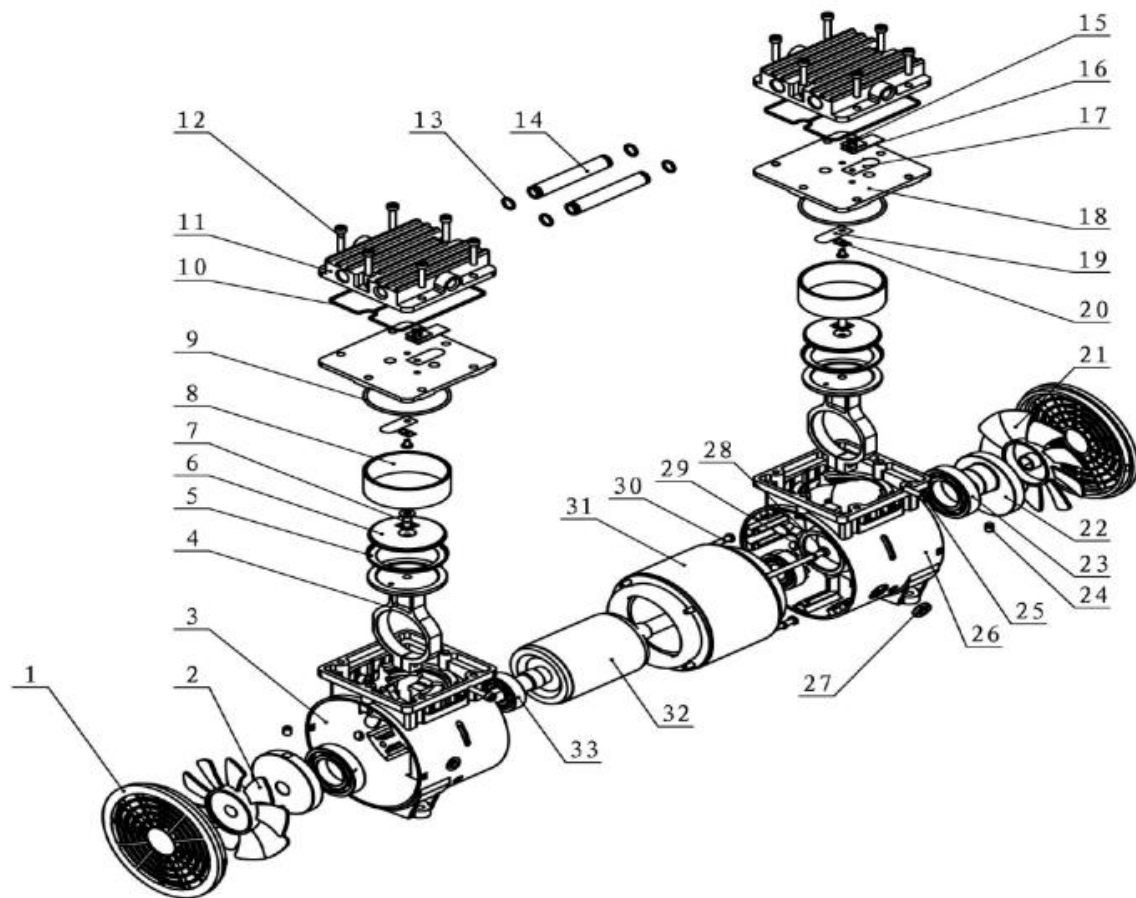


Figura 4.10: Explosionado de compresor de pistón sin aceite.

Fuente: Manual de usuario de compresor SP-9414 [11].

Se tienen los siguientes sistemas a la izquierda y derecha del compresor:

Entrada de aire: El ventilador (1), el cojinete (23) la carcasa (3) y la cobertura del ventilador (1) son los componentes encargados de generar la admisión de aire a presión atmosférica para ser comprimido.

Pistón: compuesto por el cigüeñal (22), de la biela (4), el plato de presión (6) y el anillo (5) componen el pistón el cual se encarga de mediante la admisión de aire, comprimirlo hasta la presión de trabajo, donde este se desliza sin presencia de aceite por el cilindro (8) que está conectado a la placa de la válvula (18) mediante un sello (9). La placa (17) funciona de válvula antirretorno.

Culata: La placa de válvula (18) está conectada a la culata (11) mediante un anillo de obturación el cual evita la salida del aire comprimido, el aire de la culata izquierda pasa por las mangueras de conexión (14) que cuentan con los sellos de obturación (13), para luego dirigirse a la salida del compresor, el aire de la culata derecha pasa directamente a la salida del compresor.

Sistema electromecánico: Esta cuenta principalmente por un motor que cuenta con un estator (31) el cual en conjunto con el rotor (31) generan la energía mecánica rotacional necesaria para el funcionamiento del compresor, el eje del rotor cuenta con 2 rodamientos (33) y dos rodamientos (23).

4.1.5 Impresora de placas de circuito

Estas son máquinas para prototipos de placas de circuito impreso que permite producir el diseño de la placa de circuito completo, en específico el equipo Cirqoid el cual está presente en FabLab, cuenta con la posibilidad de utilizar distintos tipos de cabezales específicos dependiendo de la operación necesaria, estos son: husillo, jeringa de pasta de soldadura o cabezal de recogida y colocación. La máquina incluye un tanque de aire incorporado para dispensar pasta de soldadura y un generador de vacío para colocar componentes **SMD**. El equipo en específico cuenta con las siguientes partes:

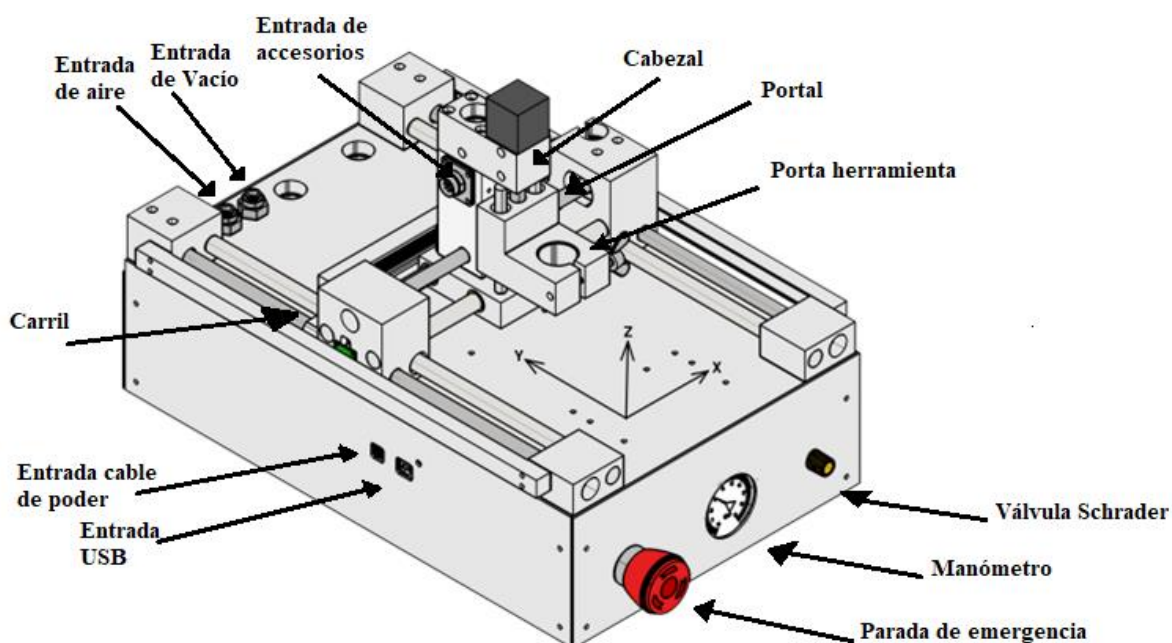


Figura 4.11: Partes principales de impresora de circuito Cirqoid.

Fuente: Elaboración propia, basado en descripciones de manual de usuario [12].

A continuación, se hace una descripción de las partes principales del equipo basadas en el manual de usuario:

Portal: Estructura encargada de soportar el cabezal, teniendo como principal función hacer variar la posición de la herramienta en el plano X.

Carril: Elementos mecánicos encargados de sujetar el portal, y producir el movimiento de trabajo en dirección del eje Y.

Porta Herramienta: Elemento mecánico encargado de sujetar la herramienta de trabajo, la cual puede variar según la operación a realizar.

Cabezal: Elemento mecánico encargado de soportar la porta herramienta y generar el movimiento en el eje Z.

Entrada de accesorios: Elemento encargado de energizar y entregar ordenes al cabezal, el cual es intercambiable según la operación de manufactura a realizar.

Entradas de aire y vacío: Conexiones para anexar un sistema accesorio de extracción de residuos de mecanizado.

Entrada USB: Entrada encargada de recibir las ordenes desde el computador para realizar las operaciones de manufactura.

Entrada de poder: Entrada encargada de recibir la alimentación eléctrica.

Parada de emergencia: Elemento con la finalidad de detener el funcionamiento del equipo en caso de anomalías de operación.

Manómetro: Elemento mecánico que mide la presión de trabajo de la extracción de residuos de mecanizado.

Válvula Schrader: Válvula de admisión de aire para el sistema, donde se puede conectar cualquier tipo de bomba compatible.

4.2 Gestión del riesgo y evaluación de criticidad: ISO 31.000

El autor [13] señala que para generar una evaluación de riesgo efectiva el año 2009 se crea la norma ISO 31.000 que estandariza el proceso de la gestión del riesgo, con lo cual se busca consensuar los distintos enfoques y definiciones que puede tener una situación en particular.

Las organizaciones trabajan de variadas formas para gestionar el riesgo, y todas ellas tienen la meta de entregar una base sólida para la toma de decisiones y de obtener información de cómo lidiar con los riesgos, por lo cual existen muchas definiciones de riesgo y de elementos para el proceso de gestión de esta, y de pautas para seguir una correcta gestión.

En la norma ISO-31.000 se tienen distintos elementos que buscan generar un estándar confiable para que se aplique a todo tipo de riesgos, entre ellos están:

- a) **Un vocabulario:** La definición de todos los términos debe ser consistente con los procesos a los que se ajuste y viceversa, para asegurar coherencia en el estándar. Considerando esto ISO combinó la creación del estándar con una revisión de vocabulario en ISO/IEC expuesta en la guía 73:2002.
- b) **Un conjunto de criterios de desempeño:** Existen claros requerimientos, que de ser seguidos, aseguran que el riesgo está siendo manejado de forma eficiente y efectiva. Los principios de una gestión de riesgo efectiva según ISO 31.000 son:
 - 1) Crear y proteger el valor.
 - 2) Ser una parte integral de todo proceso organizacional.
 - 3) Ser parte de la toma de decisiones.
 - 4) Abordar de manera explícita la incertidumbre.
 - 5) Ser sistemático, estructurado y oportuno.
 - 6) Estar basado en la mejor información disponible.
 - 7) Ajustarse a la medida.
 - 8) Tomar en cuenta el factor humano y cultural.
 - 9) Ser transparente e inclusivo.
 - 10) Ser dinámico, iterativo y sensible al cambio.
 - 11) Facilitar la mejora continua de una organización.

- c) **Un proceso común y global para la gestión de riesgo:** El proceso comienza a través de la definición de lo que la organización quiere alcanzar y los factores internos y externos que pueden influir en obtener éxito en la consecución de los objetivos (Contexto de aplicación). Es fundamental definir correctamente el contexto interno debido a que la gestión del riesgo debe estar alineado con las metas y objetivos organizacionales. Así también establecer correctamente el contexto externo, para tener en consideración los objetivos de los “stakeholders” externos, al momento de desarrollar el criterio de gestión del riesgo.

En ISO 31.000, el análisis del riesgo se preocupa del desarrollo de una comprensión de cada riesgo, sus consecuencias y su probabilidad de ocurrencia. Si bien la norma no expresa una referencia por un enfoque cualitativo o cuantitativo, ya que ambos tienen un rol, indica lo siguiente:

- Forma en la cual las consecuencias y probabilidad deben ser expresadas, y la manera en la que se combinan para determinar el riesgo, debe reflejar su tipo, la información disponible y el propósito para el cual el resultado de la valoración del riesgo será usado.
- La confianza en la determinación del nivel de riesgo y su sensibilidad a precondiciones y suposiciones, las cuales deben ser consideradas en el análisis y comunicadas a los “stakeholders”.

Finalmente, el tratamiento del riesgo es un proceso mediante el cual los controles existentes son mejorados y se desarrollan e implementan nuevos controles. Esto implica la evaluación y selección desde opciones, incluyendo análisis de costos y beneficios y establecer nuevos riesgos que pueden ser generados en cada opción, priorizando e implementando el tratamiento adecuado a través del proceso planeado.

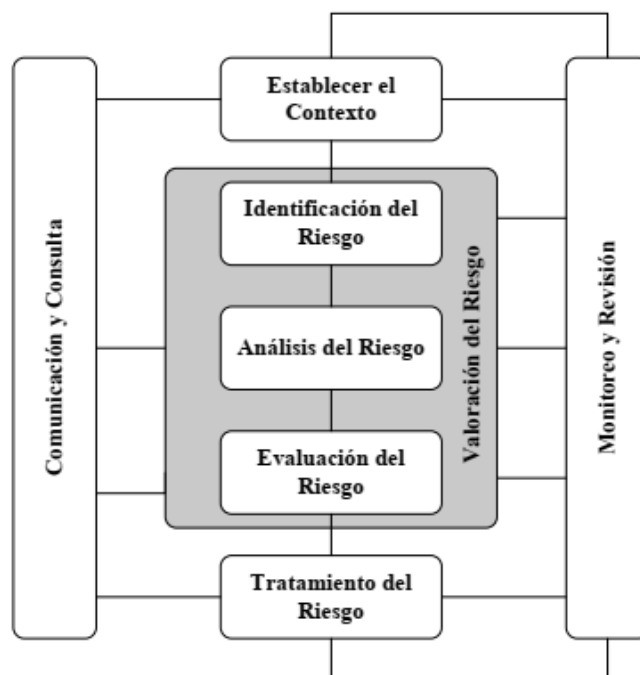


Diagrama 4.4: Proceso de gestión de riesgo según norma ISO 31.000.

Fuente: ISO 31.000: Estableciendo un nuevo estándar para la gestión de riesgo [13].

Existen tres elementos del proceso que son transversales:

- a) Comunicación y consulta con “stakeholders” internos y externos, para ser tomados en cuenta al establecer los criterios de riesgo.
- b) Monitoreo y revisión, para cuando aparezcan o desaparezcan riesgos, tomar acciones correctas y oportunas.
- c) Un marco de referencia para gestionar el riesgo, integrándola y considerándola en la toma de decisiones de la organización.

Cada organización necesita diseñar o revisar los componentes de gestión de riesgo en su sistema de gestión, para acomodarlo a su proceso de negocios, estructura, y políticas organizacionales.

4.3 Selección de herramientas de evaluación de riesgo según norma ISO 31.010

La norma ISO 31.010 [14] se centra en la valoración del riesgo, entregando herramientas y procedimientos para su implementación y esta es diseñada para ser complementaria al uso de la norma ISO 31.000.

Dicha norma señala que la evaluación de riesgos puede realizarse en diferentes grados de profundidad y detalle, utilizando una o más herramientas. Muchos métodos van desde lo simple a lo complejo. La forma de evaluación y su resultado deberían ser consistentes con los criterios de riesgo desarrollados como parte del establecimiento del contexto. Dentro de lo cual se debe respetar el siguiente criterio de aplicación:

- debe ser justificable y apropiado a la situación de la organización.
- debe proporcionar resultados en una forma que mejore la comprensión de la naturaleza del riesgo y cómo se puede tratar.
- debe ser capaz de usarse de una manera que sea rastreable, repetible y verificable.

Se tiene que dichas herramientas pueden desde, solo identificar los riesgos, hasta la realización de una evaluación de riesgos con criterios que permiten su cuantificación y posterior priorización. Los factores principales que influyen en la selección son los siguientes:

- Complejidad del problema y los métodos necesarios para analizarlo.
- La naturaleza o el grado de incertidumbre asociado a la gestión de riesgo, la cantidad de información disponible y la requerida para satisfacer los objetivos asociados.
- La extensión de recursos requeridos en términos de nivel de capacidades, datos o costo monetario.
- Si el método puede proveer un resultado cuantitativo.

Las herramientas de valoración de riesgos expuestas a continuación, se ordenan en base a la cantidad de información que pueden entregar como resultado.

4.3.1 Lluvia de ideas (Brainstorming)

La lluvia de ideas, en base a lo planteado por la norma [14] este un método que se basa en la estimulación y en alentar a la conversación fluida entre personas con conocimientos para identificar posibles modos de falla con sus respectivos riesgos asociados, criterios de decisión y opiniones de tratamiento. El término “lluvia de ideas” o “brainstorming” se utiliza generalmente para cualquier decisión grupal, sin embargo, su verdadera aplicación implica técnicas particulares para tratar de asegurar que se realiza una correcta estimulación de las personas para llegar a la generación de ideas.

La lluvia de ideas se puede utilizar en conjunto con otros métodos de evaluación de riesgos o puede estar solo como una técnica para fomentar el pensamiento imaginativo en cualquier etapa del proceso de gestión, en cualquier etapa de ciclo de vida de un sistema o activo, puede ser utilizado para discusiones de alto nivel para la identificación de problemas o para la revisión de estos.

El proceso formal de la lluvia de ideas conlleva los siguientes pasos:

- Un facilitador, el cual prepara las temáticas a abordar y estímulos apropiados para el contexto antes de iniciar la sesión.
- Los objetivos de la sesión están definidos y las reglas explicadas.
- El facilitador comienza abordando una temática, y todos los miembros presentes exploran ideas identificando la mayor cantidad de elementos posibles, no se debe presentar discusión sobre la asertividad de estas dado que eso puede entorpecer la fluidez del procedimiento, se deben aceptar todos los comentarios y avanzar rápidamente.
- El facilitador puede cambiar la dirección de la temática cuando la lluvia de ideas se agota, o la discusión se desvía demasiado, buscando recolectar tantas ideas como sea posible para su posterior análisis.

Los resultados dependen del nivel del proceso de gestión de riesgo y se presenta como fortaleza que fomenta la imaginación para facilitar la identificación de nuevos riesgos y soluciones novedosas, involucrando partes interesadas clave que facilitan la comunicación general en la organización, donde este método es rápido y fácil de configurar. Por otro lado,

está limitado por la habilidad y el conocimiento de los contribuyentes, el dinamismo y falta de estructura hace difícil de demostrar la integridad del proceso de identificación de riesgos, donde no se puede determinar si todos los riesgos fueron determinados, también puede existir dominancia de miembros del proceso de lluvia de ideas que no permitan la integración de ideas de otros miembros.

4.3.2 Índices de Riesgo

La valoración de riesgos mediante índices es una medición semicuantitativa que utiliza escalas ordinales [14], estos se pueden usar para calificar una serie de riesgos utilizando el mismo criterio para posteriormente realizar una comparación, dichas puntuaciones se aplican y ponderan a cada uno de los componentes de dicho riesgo. Según la norma ISO 31.010 [14], se considera un enfoque esencialmente cualitativo, donde la puntuación permite la manipulación de estos, por lo cual su aplicación depende principalmente de la definición de los criterios de evaluación, el uso principal de esta herramienta es para determinar qué riesgos necesitan más información o evaluación profunda.

Para una correcta aplicación se requiere un análisis del sistema, donde se debe tener una buena comprensión de todas las fuentes de riesgo por lo cual, el uso de herramientas como análisis de árbol de fallas o árbol de eventos pueden servir de apoyo. Un aspecto que cabe destacar es que esta herramienta hace uso de escalas ordinales, las cuales tienen un elevado grado de arbitrariedad y por lo mismo, se necesitan datos válidos para el cálculo del índice de riesgo.

Con respecto al proceso, el primer paso es comprender y describir el sistema, para luego desarrollar los puntajes para cada componente de tal manera que se pueda proporcionar un índice compuesto, los puntajes individuales se combinan de acuerdo al contexto del sistema, estas se pueden sumar, restar dividir o multiplicar de acuerdo con el modelo a utilizar, la incertidumbre asociada a la combinación de las puntuaciones se puede abordar mediante análisis de sensibilidad y puntajes variables para averiguar cuales parámetros son más sensibles.

El resultado del uso de esta herramienta es la generación de índices que permiten la comparación de distintas fuentes de riesgos, en donde las principales fortalezas están en la facilidad para generar comparación entre riesgos, y en como estos se pueden incorporar numéricamente dentro de una sola valoración (índice). Mientras que sus desventajas principales son las siguientes:

- Requiere un alto grado de validación por parte de la organización, ya que, si no la tiene, los resultados pueden ser sin sentido.
- Su puntuación numérica puede darse para malas interpretaciones o uso incorrecto en análisis costo/beneficio.
- No hay un modelo fundamental para definir si las escalas individuales son lineales, logarítmicas o de alguna forma específica, en donde ningún modelo define la combinación de los factores, en estos casos la calificación puede ser poco confiable, y la validación de datos reales es altamente importante.

4.3.3 Análisis de modos de falla y efectos (FMEA)

El autor [15] señala que FMEA es una técnica metódica de análisis que permite determinar los potenciales problemas de un equipo y sus componentes asociados, su principio analítico es inductivo donde se hace reconocimiento de los efectos que tienen los fallos sobre la instalación y las posibles acciones para eliminarlos o controlarlos. Se puede utilizar para el desarrollo de un nuevo producto o proceso identificando los puntos débiles del sistema, es utilizado también en actividades cuyo fin es mejorar la calidad.

En la aplicación del mantenimiento, el proceso se inicia con la descripción del contexto operativo y con la identificación de todos los subsistemas y componentes, en donde deben valorizar todas las condiciones normales de proceso. Uno de sus pasos incluye la categorización de los fallos y sus efectos, lo que permite identificar los puntos con mayor potencial de peligro por lo cual es considerada una técnica de análisis “base cero” dado que no tiene en cuenta solamente los fallos que se han manifestado alguna vez, si no que procura estudiar los fallos que, aun no habiendo ocurrido, tienen cierta probabilidad de hacerlo. Por último, estudia las consecuencias de los fallos y evalúa aquellas que pueden derivar en un accidente. Dicha metodología cuenta con los siguientes pasos detallados en el **Diagrama 4.5:**

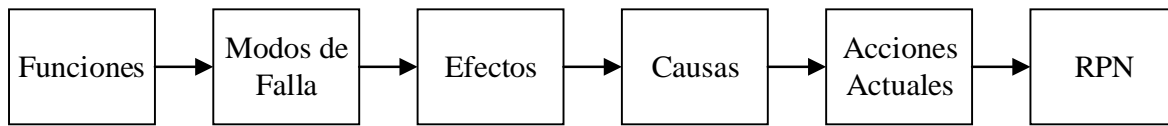


Diagrama 4.5: Pasos para la realización del análisis de modos de falla y efectos FMEA.

Fuente: Elaboración propia, basado en el modelo planteado por [15].

A continuación, se listan los pasos básicos para un análisis por FMEA:

- 1. Funciones:** Describir el proceso y enumerar las funciones. Es necesario hacer una descripción cualitativa y cuantitativa del proceso bajo análisis. Se recomienda la construcción de diagramas de bloque para identificar la funcionalidad entre las partes, así como sus relaciones lógicas. Es común indicar en el diagrama la prestación deseada para los equipos, el régimen de marcha y la capacidad de diseño, las redundancias, los sistemas de protección, etc.
- 2. Modos de falla:** Identificar los modos de falla potenciales. Se identifican los modos de falla potenciales para cada una de las funciones, es importante destacar que la metodología FMEA llama modos de falla a las condiciones que no permiten satisfacer las especificaciones declaradas en las funciones y que no necesariamente son la causa raíz de la falla. Cabe destacar que el modo de falla se diferencia de la causa raíz de falla que es capaz de originarlo.
- 3. Efectos:** Describir los efectos como consecuencia de la manifestación de los modos de falla. Cada modo de falla tiene un efecto (síntoma) cuya descripción debe ser correctamente declarada. Si el sistema es muy complejo, se utiliza la aplicación de un diagrama “causa-efecto” o esquema de Ishikawa. La metodología establece además, una graduación numérica (1 al 10) para cuantificar la severidad del efecto. Se considera 1 si el efecto es prácticamente imperceptible por el personal de operación y 10 para los casos en que el fallo tiene consecuencias sobre la seguridad o las reglamentaciones vigentes.
- 4. Causas:** Establecer la causa raíz. Se deben describir todas las causas potenciales de cada modo de falla y estas deben redactarse de forma concisa. Como herramienta alternativa de análisis se aconseja el uso de un “árbol de fallos”, se aplica también

una ponderación numérica (1 al 10) para determinar la probabilidad de ocurrencia de la causa raíz. Cuando la probabilidad es muy escasa o remota, el valor adoptado es 1; se reserva el valor de 10 para los casos en que el fallo se producirá seguramente. Para las situaciones intermedias puede proponerse una escala ascendente de a dos unidades.

5. **Acciones actuales:** Identificar lo que en la actualidad se está haciendo para evitar la causa de los modos de falla. Es importante describir las medidas que al momento del análisis se realizan para controlar los efectos. Determinar la probabilidad de no detección. Las técnicas de monitoreo, prevención o detección de fallas nunca son 100% confiables. Por razones técnicas o humanas cada una de las medidas adoptadas para controlar los efectos de los fallos (tanto la causa como sus consecuencias) tienen cierta probabilidad de éxito.
6. **RPN:** Se debe calcular el RPN, este es un número adimensional que se obtiene como el producto de la Severidad (S), la probabilidad de ocurrencia (O) y la probabilidad de la detección (D).

$$RPN = S \cdot O \cdot D$$

Ecuación 1: Cálculo de número de prioridad de riesgo para determinar causas de fallo críticos.

Fuente: Manual de mantenimiento: ingeniería, gestión y organización [15].

Dicha valoración se calcula para todas las causas de fallo y permite dar prioridad a aquellas que tienen mayores consecuencias. Generalmente, los valores por debajo de 100 no requieren acción inmediata (luego de evaluar la relación costo-beneficio).

Posterior a los pasos empleados para la realización del análisis FMEA, el autor [15] plantea que se debe realizar lo siguiente:

1. Recomendar acciones con mejor relación costo beneficio para combatir las causas raíz y sus potenciales consecuencias, comenzando por aquellas de mayor número RPN. Se recomienda, tener siempre en cuenta los efectos cuyo índice de severidad sea mayor o igual a 8, aunque la valoración del RPN haya dado menor a 100 o al valor aceptado como límite.

2. Elaborar un plan de mantenimiento con las acciones determinadas en a la metodología identificando fecha de ejecución y responsable.
3. Revisar periódicamente los análisis FMEA y el plan de mantenimiento propuesto, dado que puede haber variaciones en el contexto operativo relevantes para los equipos. El proceso de análisis por FMEA es obligatorio revisarlo periódicamente, aun habiendo implementado las medidas correctivas para asegurar que se haya alcanzado valores RPN bajo el límite establecido. Es posible que las acciones sugeridas en un principio no hayan generado los RPN deseados, por lo que se recomienda una iteración permanente del proceso.

Esta herramienta según lo planteado por [14] es una lista de los modos de fallo, la causa y efectos por cada componente o paso de sistema o proceso, también se proporciona información sobre las causas del fracaso y las consecuencias al sistema en su conjunto. Dicho resultado incluye una calificación de criticidad la cual entrega un criterio cuantitativo para la gestión de riesgo.

Las fortalezas de la implementación de esta herramienta son las siguientes:

- Es ampliamente aplicable a los modos de falla humano, de equipos y sistemas o procedimientos.
- Identifica claramente modos de falla, causas y efectos presentándolos de una forma fácil de entender.
- Evita la necesidad de modificaciones costosas de equipos en servicio detectando problemas en el proceso temprano de diseño, entregando información importante para el desarrollo de programas de monitoreo de activos o procesos.

Mientras que sus limitaciones incluyen que no se puede identificar modos de falla múltiples, estos estudios pueden llevar mucho tiempo y ser costosos, los cuales pueden ser difíciles de aplicar o tediosos para sistemas complejos de múltiples capas.

4.3.4 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

El mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM en base a lo planteado por la norma [14] es un método para identificar las políticas que podrían ser implementadas para gestionar averías de forma eficiente y efectiva considerando la seguridad, factibilidad técnica y económica para todos los tipos de activos, esta metodología es probada y aceptada, y usada en un amplio rango de industrias.

RCM provee un proceso de decisión para identificar los requerimientos de mantenimiento preventivo de los activos acorde a las consecuencias en seguridad, operaciones, y costos de los modos de falla identificados, con sus respectivos mecanismos de degradación de sus componentes asociados. Dicha metodología hace una definición de tareas de mantenimiento basado en condición, restauración y sustitución cíclica, tareas de búsqueda de falla o no realización de mantenimiento preventivo, en conjunto con otro tipo de acciones de rediseño. Esta metodología es abordada en mayor detalle en la sección 4.9.

4.4 Cultura Organizacional

Dentro de los requisitos de la metodología de [1] que se aborda en los posteriores capítulos, es abordar los aspectos de la cultura organizacional dentro del contexto interno de la organización. El autor [16] plantea que la cultura organizacional es un sistema de significado compartido por los miembros, el cual distingue a una organización de las demás. Siendo un conjunto de características claves que la organización valora, las cuales se definen en los siguientes puntos:

1. **Innovación y aceptación del riesgo:** Grado en que se estimula a los empleados para que sean innovadores y corran riesgos.
2. **Atención al detalle:** Grado en que se espera que los empleados muestren precisión, análisis y atención por los detalles.
3. **Orientación a los resultados:** Grado en que la administración se centra en los resultados o eventos, en lugar de las técnicas y procesos usados para lograrlos.
4. **Orientación a las personas:** Grado en que las decisiones de la dirección toman en cuenta el efecto de los resultados sobre las personas de la organización.
5. **Orientación a los equipos:** Grado en que las actividades del trabajo están organizadas por equipos en lugar de individuos.
6. **Agresividad:** Grado en que las personas son agresivas y competitivas en lugar de buscar lo fácil.
7. **Estabilidad:** Grado en que las actividades organizacionales hacen énfasis en mantener el *estatus quo* en contraste con el crecimiento.

El autor [16] señala que cada una de las características existe en un continuo de menor a mayor. Entonces la evaluación de la organización con respecto de estas características da un panorama completo de la cultura de la organización, generando una perspectiva base de los sentimientos de entendimiento compartido por sus miembros.

4.5 Obtención de mediciones de calidad mediante norma ISO 14.224

La norma ISO 14.224 [2] tiene la finalidad de entregar una base de datos y lineamientos para el manejo y recolección de datos para mantenimiento en industrias petrolíferas y de gas, las cuales deben contar con altos estándares de gestión, entregando procedimientos y consideraciones para la toma de datos, medir la calidad de estos, y para procesar la información. A continuación, se aborda los aspectos de calidad de mediciones señalados en dicha norma.

4.5.1 Definición de calidad de datos

La confianza en la data de mantenimiento recogida, y por lo tanto todo análisis, es fuertemente dependiente de la calidad de esta, los datos de alta calidad tienen las siguientes características:

- a) La integridad de los datos en relación con la especificación.
- b) Conformidad con las definiciones de parámetros de confiabilidad, data, tipos y formatos.
- c) Entrada precisa, transferencia, manejo y almacenamiento de datos (manual o electrónica).
- d) Suficiente población y un adecuado periodo de observación para obtener confianza estadística.
- e) Relevancia de la data para las necesidades del usuario.

4.5.2 Medidas de planificación

La norma [2] señala que se debe enfatizar las siguientes medidas antes que comience el proceso de recolección de datos:

- Defina el objetivo para recopilar los datos con el fin de obtener datos relevantes para el uso previsto.
- Investigar fuentes de data para asegurarse que hay disponible información de alta calidad. Las fuentes deben cubrir inventario, información técnica de equipos, datos de eventos de mantenimiento e impacto asociado a la organización.
- Definir la información taxonómica que debe estar incluida en la base de datos de cada unidad de equipo.

- Identificar la fecha de la instalación, la población y los periodos de operación de los equipos para los cuales la data puede ser recogida.
- Aplicar una definición uniforme de falla y de métodos para clasificarlas.
- Aplicar definiciones uniformes de actividades de mantenimiento y de clasificación de mantenimientos.
- Definir los controles utilizados para la verificación de calidad de los datos:
 1. El origen de la data es documentado y trazable.
 2. La data es originada de equipos similares, tecnología y condiciones de operación.
 3. La data es relevante para el propósito (no es obsoleta).
 4. La data cumple con las definiciones y reglas de interpretación (ej: definición de falla).
 5. Las fallas registradas están dentro del límite definido del equipo y el periodo de vigilancia.
 6. La información es consistente (consistencia entre modos de falla e impacto a la organización).
 7. La data es registrada en el formato correcto.
 8. La data es suficiente para una confianza estadística aceptable.
 9. El personal de operación y mantenimiento fue consultado para validar la data.
- Definir el nivel de prioridad de la integridad de los datos mediante un método adecuado. Un método es el que pondera la importancia de las diferentes datas registradas mediante la clasificación acorde a las siguientes 3 clases:

ALTA: Información obligatoria (Cobertura del 100%).

MEDIA: datos altamente deseables (Cobertura 85%>)

BAJA: Información deseable (Cobertura 50%>)

- Definir el nivel de detalle de la data de mantenimiento reportada y registrada y vincularlos estrechamente con la producción.
- Preparar un plan para el proceso de recolección de datos.
- Planificar como los datos van a ser encajados y reportados, e idear un método de transferencia de datos desde la fuente hasta la base de datos de mantenimiento.
- Entrenar, motivar y organizar al personal de recolección de datos.

- Generar un plan de aseguramiento de calidad del proceso de recolección de datos y sus entregables. Como mínimo debe incluir procedimientos de control de calidad de datos, registro y corrección.
- Se recomienda hacer un análisis de costo-beneficio de la recopilación de datos ejecutando un piloto.
- Revisar las medidas de planificación antes del periodo de uso del sistema.

4.5.3 Verificación de calidad

Durante y después del ejercicio de recolección de datos, se debe analizar la data para verificar su consistencia, distribuciones razonables, códigos propios y correcta interpretación en concordancia con las medidas de planificación. Este proceso de verificación de calidad debe ser documentado y este puede variar si es para una planta o involucra a varias instalaciones de compañías e industrias. La evaluación de calidad de los datos que se recopilan debe ser realizada tan pronto como sea posible en el proceso de recopilación de datos según las medidas de planificación. Un procedimiento adecuado es una evaluación por parte del recolector de datos, el cual recibirá las directrices sobre las medidas de calidad en las cuales debería centrarse en conformidad con la las medidas de planificación. El objetivo principal de la evaluación temprana es observar todos los problemas que deben ser inmediatamente revisados en las medidas de planificación para evitar recolectar datos inaceptables.

El personal que no está involucrado directamente con la toma de mediciones también debe verificar individualmente la calidad del registro y el patrón de confiabilidad global reflejado en los eventos individuales de medición, de acuerdo con las medidas de planificación.

4.5.4 Limitaciones y problemas

Se muestran a continuación algunos de los problemas de los cuales se debe estar consciente cuando se quiere obtener datos de calidad:

- **Fuentes:** La fuente de datos puede carecer de la información requerida y la información de la fuente puede extenderse a varios sistemas diferentes (ordenadores, archivos, libros, dibujos). Se recomienda evaluar cuidadosamente este aspecto en las medidas de planificación para evaluar la calidad de los datos, método de recolección y costo.
- **Interpretación:** Comúnmente los datos son compilados de fuentes en un formato estandarizado (base de datos), en esos procesos, la fuente de datos puede ser interpretada de diferentes formas. Las correctas definiciones, entrenamiento y chequeos de calidad pueden reducir este problema.
- **Formato de datos:** El uso de campos de códigos es fundamental para asegurarse que la recolección de datos es eficiente y consistente con la información ingresada.
- **Recolección de datos:** La mayoría de los datos necesarios hoy se almacenan en sistemas computarizados, mediante uso de algoritmos y software, es posible transferir datos desde diferentes bases de datos de una manera semi automatizada, ahorrando costos.
- **Competencia y motivación:** La recolección de datos realizada manualmente, lo cual comúnmente puede volverse repetitivo y tedioso, por lo tanto, se deben tomar cuidados de emplear gente con el conocimiento suficiente de cómo realizar la labor, considerando que personal con baja competencia y/o experiencia puede repercutir en la calidad de recolección de datos, se deben tomar medidas para estimular al personal de recolección de datos de mantenimiento.

4.6 Conceptos de calidad de mediciones

El autor [17] señala que es frecuente que al realizar una medición de cierta variable se esté tentado a creer ciegamente en los números generados, sin detenerse a cuestionar su calidad, y sin preguntarse el error que trae consigo. En esta sección se abarcan los conceptos necesarios para reconocer dicho error. En conjunto con la descripción de una breve herramienta para la obtención de errores de repetibilidad y reproducibilidad.

4.6.1 Aspectos básicos de calidad en un sistema de medición

En particular, las fuentes principales que contribuyen al error del proceso de medición son el equipo de medición, los operadores (reproducibilidad) y la variación dentro de la muestra. Las variaciones dentro de un equipo de medición son las siguientes:

- **Calibración:** La exactitud y linealidad del instrumento.
- **Estabilidad:** El cambio del instrumento con el transcurso del tiempo.
- **Repetibilidad:** La variación observada cuando un operador mide de manera repetida la misma pieza con el mismo instrumento.
- **Linealidad:** La exactitud a lo largo del rango de operación de un instrumento.

Mientras que las variaciones dentro de una muestra, se atribuyen a variaciones propias del objeto a medir, esta contribuye a la variación de producto, como al error del proceso de medición.

El autor [17] señala que los conceptos comentados se manifiestan en los aspectos básicos de calidad de un sistema de medición, como se plantea en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Conceptos básicos de la calidad de mediciones.

Fuente: Control de calidad y seis sigma. [17].

El sistema de medición debería ser:	Problemas típicos:
Preciso y exacto: El sistema genera mediciones individuales, así como el promedio de estas que es muy parecido al valor verdadero.	Inexacto e impreciso: Tanto las mediciones individuales como su promedio se alejan del valor verdadero.
Repetible: Mediciones repetidas realizadas por una persona sobre el mismo mensurando resultan muy parecidas.	No repetible: Las mediciones repetidas de un operador sobre el mismo espécimen muestran exceso de variabilidad.
Reproducibile: Dos o más personas que miden el mismo objeto obtienen en promedio resultados muy similares.	No reproducible: Dos o más personas que miden las mismas piezas obtienen en promedio resultados sensiblemente diferentes.
Estable en el tiempo: El sistema de medición no cambia a través del tiempo.	Inestable en el tiempo: El sistema de medición cambia a través del tiempo.

Para evaluar el nivel de calidad de un proceso de medición, el autor [17] propone la realización de estudios R&R (repetibilidad y reproducibilidad) en donde se evalúa de modo experimental que parte de la variabilidad total observada en los datos es atribuible al error de medición; además permite cuantificar si este error es mucho o poco en comparación con la variabilidad del producto y con las tolerancias de la característica que se mide.

Las fuentes de variabilidad que se pueden evaluar en un estudio de repetibilidad y reproducibilidad son: la variabilidad del objeto, del instrumento y de los operadores.

Sean σ_{Total}^2 la variabilidad total observada; σ_{obj}^2 la varianza atribuible al objeto, σ_{instr}^2 la variabilidad o error del instrumento de medición y σ_{op}^2 la variabilidad o error debido a operadores, entonces se cumple la siguiente relación:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{obj}^2 + \sigma_{op}^2 + \sigma_{instr}^2$$

En donde:

$$\sigma_{instr}^2 = \sigma_{repetibilidad}^2 \quad y \quad \sigma_{op}^2 = \sigma_{reproducibilidad}^2$$

Por lo tanto, el error o variabilidad de las mediciones debido a repetibilidad y reproducibilidad se obtiene la **Ecuación 2**:

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{repetibilidad}^2 + \sigma_{reproducibilidad}^2$$

Ecuación 2: Error de repetibilidad y reproducibilidad en un proceso de medición.

Fuente: Control de calidad y seis sigma. [17].

4.6.2 Estudio R&R corto

Un estudio de repetibilidad y reproducibilidad corto permite estimar de una manera rápida la variabilidad con la que contribuye el proceso de medición; sin embargo, con este estudio no es posible separar la repetibilidad (instrumento) de la reproducibilidad (operadores), sino que vienen de manera mezclada. Los pasos a seguir en un estudio corto se sintetizan y se explican a continuación:

1. Seleccionar dos o más operadores para conducir el estudio sobre un instrumento de medición dado.
2. Seleccionar un conjunto de cinco a 10 piezas o unidades que serán medidas por cada uno de los operarios. Las piezas no tienen que ser homogéneas; pueden seleccionarse aleatoriamente o elegirse de manera que cubran todo el rango en que opera el equipo, Cada pieza se medirá solo una vez por cada operador (recordemos que en el estudio largo cada operador mide varias veces la misma pieza).
3. Etiquetar o identificar cada pieza y aleatorizar el orden en el cual son dadas a cada uno de los operadores para que sean medidas.
4. Identificar la zona a punto en la parte donde la medición será tomada y el método o técnica que se debe aplicar.
5. Hacer el análisis estadístico de los datos, emitir un juicio acerca de la calidad del proceso de medición y decidir acciones futuras sobre el mismo.
6. Hacer el análisis estadístico de los datos, emitir un juicio acerca de la calidad del proceso de medición y decidir acciones futuras sobre el mismo.

El autor [17] señala que realizar una medición única hace que sea rápido, y que sirve para aquellas circunstancias donde no se puede hacer un estudio R&R más detallado.

4.7 Etapas evolutivas del mantenimiento

El autor [18] señala que existen etapas evolutivas de la gestión de mantenimiento en las organizaciones, donde estas van pasando secuencialmente teniendo distintos enfoques al momento de realizar acciones de mantenimiento. Dentro de este tópico el autor propone que existen 6 etapas del mantenimiento:

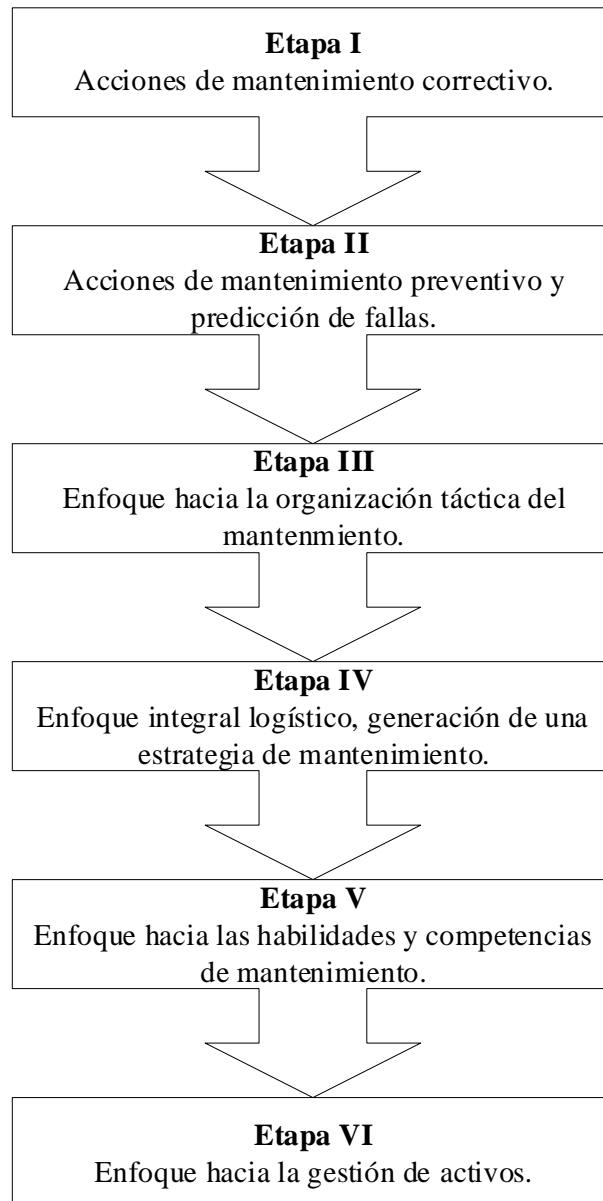


Diagrama 4.6: Etapas evolutivas de los enfoques de mantenimiento en la industria.

Fuente: Elaboración propia, basado la descripción entregada por [18].

El alcance de este trabajo de título y el nivel evolutivo de FabLab no superan la etapa III, por lo cual por motivos de síntesis se describen las primeras 3 etapas de la evolución de la gestión de mantenimiento en las organizaciones.

4.7.1 Etapa I: Acciones de mantenimiento correctivo

En esta etapa [18] señala que aparecen los instrumentos de mantenimiento. En ese momento se contrata o se entrena el personal de mecánica, electricidad, mecatrónica, neumática, electrónica, etc., con el fin de capacitarlo para llevar a cabo las primeras acciones de mantenimiento, que son de índole correctiva y que procuran corregir la falla o parada imprevista en forma prioritaria.

En esta fase aparecen los elementos iniciales requeridos para sostener los equipos: órdenes de trabajo, herramientas, utensilios, almacenes de repuestos e insumos de mantenimiento. Surgen las primeras informaciones que luego se constituyen en las bases de datos y luego en el sistema de información. Se desarrollan las técnicas y las tecnologías propias de la organización en particular. En general, se dan las bases para que el mantenimiento funcione; en la Etapa I la prioridad del área de producción es elaborar productos o generar servicios.

Las fallas imprevistas se convierten en el mayor problema de la división de fabricación, pues impiden el desarrollo normal de su actividad.

4.7.2 Etapa II: Acciones de mantenimiento preventivas y predicción de fallas

Como consecuencia de las fallas imprevistas que son el principal problema para la división de fabricación, [18] señala que el objetivo principal de esta etapa es solucionar las paradas repentinas de los equipos. Por esto el mantenimiento empieza a desarrollar acciones de prevención o predicción de fallas.

En esta fase empiezan a utilizarse técnicas y metodologías propias de las acciones planeadas de mantenimiento, y la organización adquiere el conocimiento y la destreza para diferenciar las acciones propias de mantenimiento, antes y después de la falla. Se inicia la utilización de técnicas y tecnologías propias de la prevención y predicción, tales como rutinas de inspecciones, planes preventivos, mediciones técnicas, valoración de condición de estado de los equipos. Ensayos no destructivos, registro de datos técnicos, monitoreo de equipos, reposición de elementos antes de que entren en estado de falla. Control de la vida útil de los

elementos, medición de la funcionalidad de los dispositivos, análisis de vibraciones, tribología, ajustes de función antes de la falla, etc. Y nace el control operativo de equipos y de sus elementos.

La Etapa II permite distinguir entre las acciones correctivas, modificativas, preventivas, y predictivas. Las dos primeras son posteriores a la falla y las últimas son previas al estado de no funcionalidad del equipo. En esta etapa sólo se practica el mantenimiento correctivo o reparativo. Las piezas y equipos se llevan al límite de su vida útil, hasta la falla y la recuperación de la función inicial, que consiste en reemplazar la pieza que no funciona sin aplicar un mayor análisis sobre la causa raíz del problema. En esta etapa II se identifican los equipos, se determinan las tareas para las intervenciones planeadas o programadas (instrucción de mantenimiento). Se definen las recomendaciones de seguridad, se establecen los planes de mantenimiento (programa maestro). Se delimitan y se generan las OT programadas (planeadas) y no programadas (no planeadas). Se decide y se implementan los mecanismos de manejo y recolección de datos de una forma sencilla, completa y eficiente, que posteriormente se convierten en el sistema de información. Se relacionan los equipos con los respectivos repuestos específicos y genéricos, a la vez que se concretan los parámetros de subcontratación y administración de proveedores. En la Etapa II también se evalúa la conveniencia de implementar las técnicas de predicción por análisis de síntomas y por evaluación estadística, de acuerdo con la importancia y las características de cada equipo en el proceso. Para cada equipo fundamental de proceso se definen las acciones de mantenimiento más adecuadas y prioritarias. Se preparan las rutas para recolectar datos (o mediciones). Se identifican las máquinas a las que se les toman datos (con software propio o comercial). Se fundamenta el sistema de gestión para recibir estas informaciones y generar las OT apropiadas al proceso productivo.

4.7.3 Etapa III: Enfoque hacia la organización táctica del mantenimiento

Una vez las empresas alcanzan la madurez para el manejo real y conceptual de las acciones posibles de mantenimiento, empiezan a adoptar una estructura para el desarrollo secuencial, lógico y organizado del conjunto de acciones de mantenimiento que aplican. Con el fin de gestar y operar el mantenimiento bajo un sistema organizado, en esta Etapa III se adopta una táctica de mantenimiento, el autor [18] destaca las siguientes:

- **TPM:** Mantenimiento productivo total.
- **RCM:** Mantenimiento centrado en la confiabilidad.
- **PMO:** Optimización del mantenimiento planeado.

Es importante aclarar que las organizaciones no necesariamente pueden optar por una de ellas, pueden escoger la que mejor se adapte a sus necesidades o una combinación de las características que encuentren más apropiadas y crear su táctica propia.

4.8 Políticas de mantenimiento

Los activos de una organización tienen vida útil, la cual está determinada por el contexto operacional en el cual se desenvuelven y cómo estos son mantenidos en el transcurso de esta, y por lo mismo están sujetos al deterioro por utilización y a la vida útil de sus componentes, se tiene que variados autores de mantenimiento hablan sobre problemas de operaciones debido a paradas de emergencia de sus activos, y cómo se pueden prevenir o enfrentar dichos eventos.

Se pueden establecer diferentes clasificaciones de mantenimiento, acorde a la tarea realizada en el activo a analizar, en donde [19] hace la distinción de dos tipos de mantenimientos principales, correctivo, el cual ocurre después de una avería, y proactivo, que se definen como el conjunto de acciones de mantenimiento que se pueden realizar para prevenir la falla funcional de un activo, este tipo de mantenimiento a su vez se separa en acciones preventivas y predictivas.

Cabe destacar que basado en el análisis de [19] se tiene que cada una de las políticas de mantenimiento tienen requisitos de factibilidad técnica que cumplir para su implementación.

4.8.1 Mantenimiento Correctivo

El autor [20] define esta política de mantenimiento como el conjunto de acciones en las cuales se intervienen los equipos cuando el fallo ya se ha producido. Se trata por tanto, de una actitud pasiva frente a la evaluación del estado de los equipos en donde se espera la avería o fallo.

Generalmente se emplea en los modos de falla en donde existe un bajo costo de los componentes afectados, y donde los equipos son de naturaleza auxiliar y no están directamente relacionados con la producción, en donde el fallo del equipo no supone una

interrupción de la producción, o no afecta a la capacidad productiva de forma instantánea, por lo cual las reparaciones pueden llevarse a cabo sin perjuicio de esta, adicionalmente [19] menciona que se puede escoger este tipo de mantenimiento cuando el fallo no tiene repercusiones para la salud-medio ambiente.

El autor [20] señala que este tipo de mantenimiento no requiere ninguna planificación sistemática, por cuanto no se trata de una planificación organizada de tareas. En el mejor de los casos puede conjugarse con un mantenimiento rutinario básico y con una previsión de repuestos, especialmente aquellos que sistemáticamente deben ser sustituidos. El mantenimiento correctivo tiene las siguientes desventajas:

- La falla funcional es imprevista, lo cual puede impactar negativamente en la producción, en donde pueden ser ligeras pérdidas de producción por tiempos y cortos de reparación, o grandes pérdidas mientras no se repare o sustituya el equipo averiado.
- Al ser imprevistas, las averías suelen detectarse cuando son fallas funcionales en el activo, lo cual puede tener como consecuencia un alto costo de reparación.
- Dada la naturaleza inoportuna de las averías tratadas con mantenimiento correctivo, se tiene que las reparaciones pueden llevar más tiempo de lo previsto, por falta de preparación, por ausencia del personal necesario para la reparación, o por falta de repuestos necesarios.
- Pueden tener consecuencias altamente negativas para la seguridad del personal o el medio ambiente.

4.8.2 Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo busca evitar o disminuir las consecuencias de las fallas funcionales de los equipos, en donde mediante rutinas de inspecciones periódicas [20] o predicción de vida útil [19] se procede al desmontaje total o parcial del activo, se revisa el estado de sus elementos, remplazando aquellos que se estime oportuno mediante el examen realizado. Estas según lo planteado por [15] deben incluir lapsos determinados, diseñando y analizando detenidamente los aspectos técnicos a verificar, las condiciones prácticas de aplicación y seguridad del personal involucrado.

Según lo planteado por [20] el éxito de este tipo de mantenimiento depende de la planificación realizada, donde se debe elegir apropiadamente el periodo de inspección, un periodo de inspección demasiado largo conlleva el peligro de la aparición de fallos indeseados entre dos inspecciones consecutivas y un periodo demasiado corto aumenta los costos de mantenimiento.

El inconveniente que se presenta en este tipo de mantenimiento es el coste de las inspecciones, debido a la acción de desmontar una máquina que está funcionando correctamente o por el remplazo de un componente que se encuentra en buen estado.

El autor [15] reconoce las acciones rutinarias de mantenimiento como un tipo de mantenimiento preventivo mientras que [19] en la metodología RCM solo reconoce las actividades de sustitución cíclica de componentes o reacondicionamiento cíclico del activo, en donde respectivamente:

Sustitución cíclica de componentes: Consiste en descartar un elemento o componentes antes, o en el límite de la edad definida independiente de su condición en ese momento, en donde la factibilidad técnica de dicha actividad está ligada a la necesidad de que la mayoría de los elementos de dicho activo deben sobrevivir hasta la vida útil de este componente, dado que si demasiados elementos fallan antes de llegar a esta edad, aumentarán el número de fallas imprevistas, y esto a su vez trastorna el proceso de planificación.

Reacondicionamiento cíclico: Consiste en reacondicionar la capacidad de un elemento o componente antes o en el límite de edad definida, independiente de su condición en ese momento, en donde la factibilidad técnica de esta actividad está ligada a las mismas condiciones de la sustitución cíclica, con la única diferencia que adicionalmente el reacondicionamiento cíclico debe restaurar la resistencia original del elemento a la falla.

Y por último, para que ambas actividades de mantenimiento preventivo sean efectivas, se debe tener conocimiento de data histórica que permita identificar la vida útil del componente en donde la data debe concentrarse en torno a un valor en el cual se tenga la falla esperada:

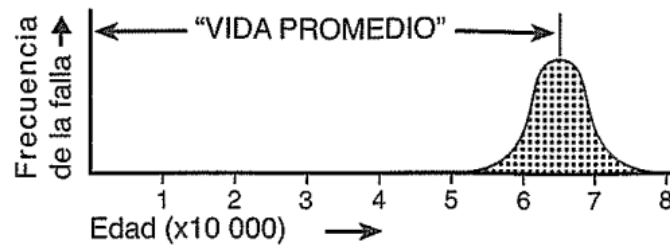


Figura 4.12: Comportamiento de frecuencia de fallo en el tiempo de componente con una vida promedio estimable para la realización de mantenimiento preventivo.

Fuente: Mantenimiento centrado en la confiabilidad [19].

Ya habiéndose encontrado la vida promedio, se puede estimar la probabilidad condicional de falla del activo, en donde la vida útil de este, se considera como el lapso de tiempo en el cual el activo tiene probabilidad condicional de falla nula.

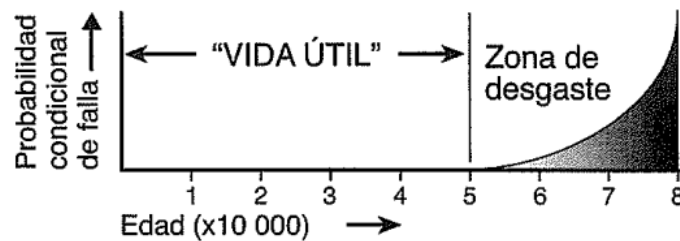


Figura 4.13: Comportamiento de probabilidad condicional de falla de componente con estimación de vida útil determinada mediante probabilidad de falla nula.

Fuente: Mantenimiento centrado en la confiabilidad [19].

Este tipo de averías son tratables con mantenimiento preventivo, adicionalmente para averías de equipos que pueden generar daños serios para la salud o medio ambiente, se puede estimar de forma conservadora el límite de vida segura el cual es un límite previo al de vida útil:

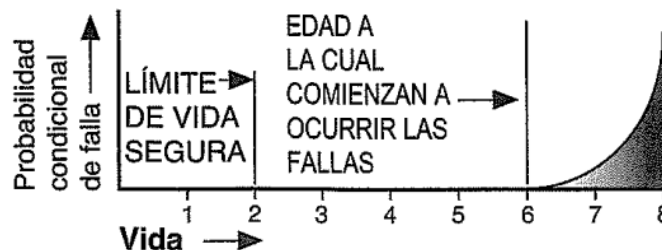


Figura 4.14: Fijación de límite de vida segura mediante gráfico de probabilidad condicional de falla.

Fuente: Mantenimiento centrado en la confiabilidad [19].

El autor [19] destaca que en la práctica sólo a algunos sistemas o componentes simples se les puede determinar la vida promedio y la vida útil, esto es producto de los avances tecnológicos, donde los sistemas más complejos no permiten el uso efectivo de las actividades de mantenimiento preventivo mencionadas, a dichos sistemas se les recomienda realizar análisis de factibilidad técnica de aplicación de mantenimiento predictivo.

4.8.3 Mantenimiento predictivo

Uno de los desarrollos más desafiantes de la administración del mantenimiento moderno ha sido el descubrimiento de que en realidad muy pocos modos de falla se ajustan a alguno de los patrones de falla que hagan técnicamente factible el mantenimiento preventivo [19] lo cual se debe principalmente a lo siguiente:

- **Esfuerzos variables:** El contexto operacional normal de una organización hace que el esfuerzo aplicado sobre los activos sea variable, sea por operación incorrecta, montaje incorrecto, o alguna manifestación externa que genere daños. Lo cual puede acelerar una falla y generar condiciones de aleatoriedad en el comportamiento de esta.
- **Avance tecnológico:** La necesidad de aumento de seguridad y desempeño de los activos hace que los sistemas se vuelvan más complejos, con una mayor cantidad de relaciones entre ellos y con un mayor número de componentes. Lo cual genera mayor número y variedad de fallas, reduciendo a su vez el deterioro admisible de cada componente antes de que ocurra la avería.

Estos dos argumentos según [19] sugieren que es más probable que sufran fallas al azar, en vez de un comportamiento de edad promedio estimable. Considerando la frecuente existencia de fallas no relacionadas con la edad de los componentes se gesta el mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo, también conocido como mantenimiento según estado o condición, se basa en conocer el estado de falla potencial definido como un estado identificable del componente que indica que una falla funcional está a punto o en el proceso de ocurrir, dicho punto está identificado en el siguiente gráfico:

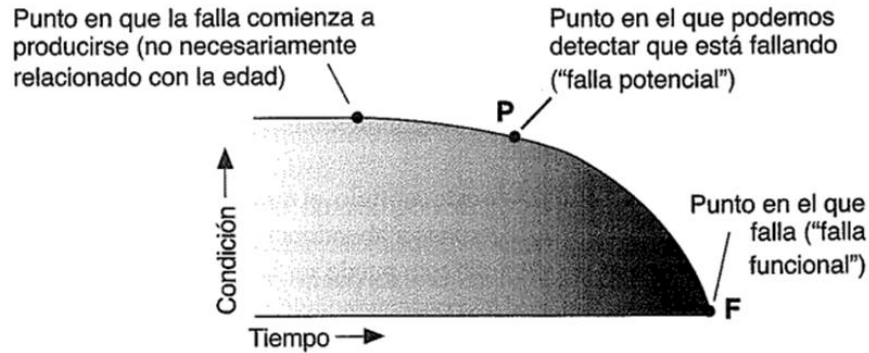


Figura 4.15: Curva P-F donde se muestra el estado de un componente en función de tiempo y los puntos característicos para detección mediante actividad predictiva de mantenimiento.

Fuente: Mantenimiento centrado en confiabilidad [19].

El autor [19] señala que además de la falla potencial en sí misma, se necesita conocer la cantidad de tiempo (o ciclos de esfuerzo) que transcurren entre el punto de falla potencial (P) y el punto en el cual se declara la falla funcional (F), dado que esto determina el tiempo disponible en el cual se puede realizar la acción de mantenimiento. Este método permite reducir o evitar las consecuencias de la avería de las siguientes formas:

- **Tiempo de parada:** Puede planificarse acciones de mantenimiento para un momento que no afecte las operaciones, en donde dada su naturaleza planificada puede realizarse más rápidamente.
- **Costos de reparación:** Dado que se conoce la falla potencial, se puede eliminar el daño causado asociado a la falla funcional del activo. Lo cual reduce el tiempo de reparación de la falla y los costos de reparación asociados a esta.
- **Seguridad:** La advertencia de la falla permite quitar de operación los activos antes de que estos generen una situación peligrosa para el personal.

En donde la factibilidad técnica de las tareas a condición está determinada por lo siguiente:

- Es posible definir la condición de falla potencial.
- El intervalo P-F es razonablemente consistente.
- El intervalo P-F neto es mayor al tiempo requerido para realizar alguna acción que evite o reduzca las consecuencias de la falla.

Para determinar la curva P-F necesaria en la aplicación de esta política de mantenimiento, existen variadas técnicas a condición. El autor [19] señala cuatro categorías principales:

- **Monitoreo a condición:** Uso de algún equipo especializado para monitorear el estado de los activos. En donde pueden analizar efectos dinámicos, físicos, químicos, de temperatura, eléctricos, entre otros. Buscando alteraciones en alguna condición que debe estar asociada a una falla potencial.
- **Variación de calidad del producto:** Uso de la función calidad donde la aparición de algún defecto en un artículo producido por una máquina se relaciona directamente con el modo de falla del activo. Utilizando el control estadístico de procesos y evaluación de datos para detectar fallas potenciales.
- **Monitoreo de los efectos primarios:** Se caracteriza por utilizar los indicadores existentes y el monitoreo de procesos, en donde se analiza el comportamiento de efectos primarios tales como velocidad, caudal, presión, temperatura, potencia, corriente entre otros, utilizando algún instrumento de medición para luego registrar datos y analizar desviaciones de comportamiento. La persona debe conocer los rangos normales de la medición, las mediciones deben ser tomadas a intervalos menores que el P-F y el instrumento de medición debe ser mantenido para que sea exacto y preciso. Este instrumento se puede simplificar mediante gestión visual.
- **Sentidos humanos:** Se utilizan los sentidos humanos (mirar, oír, tocar y oler). En donde se presenta como principales ventajas que es un método versátil donde se pueden detectar una amplia variedad de condiciones de falla, a diferencia de las otras técnicas que pueden monitorear un tipo de falla potencial en específico, y esta puede ser buena en términos de relación costo-beneficio si lo realizan operarios, a diferencia de las otras técnicas, el ser humano puede juzgar la gravedad de la falla potencial y tomar acciones apropiadas. No obstante, el proceso es subjetivo dificultando el desarrollo de criterios de inspección, sumándose a que generalmente las fallas potenciales solo son detectadas cuando el deterioro es avanzado, lo cual genera intervalos P-F cortos. Considerando esto, la frecuencia de inspección debe ser alta, con respuesta rápida por parte de mantenimiento.

Para realizar una selección correcta de la técnica a condición, el autor [19] señala que se deben considerar todas las advertencias que tienen posibilidad de preceder al modo de falla analizado, verificando todas las tareas a condición que se podrían utilizar para la detección de esas advertencias, y realizar un análisis costo-beneficio para anticipar el modo de falla en

análisis, en donde se debe tener especial cuidado en considerar el contexto operacional en el cual funciona el activo físico.

4.8.4 Tareas de búsquedas de fallas

Las tareas de búsquedas de fallas son actividades que están diseñadas para realizar chequeos funcionales de manera exclusiva a fallas ocultas o no reveladas, las cuales según el autor [19] solo aplica a dispositivos de protección, este también señala que las fallas múltiples pueden ser reducidas aumentando la disponibilidad de los dispositivos de protección asociados al sistema que se busca mitigar las consecuencias de la falla de la función protegida.

El objetivo de esta actividad es generar certeza de que un dispositivo de seguridad proveerá la protección requerida si fuese necesario, en otras palabras, se está verificando si dicho dispositivo funciona correctamente, sus aspectos principales según [19] son los siguientes:

- Se deben abarcar todos los modos de falla posibles del dispositivo de seguridad, esto se puede llevar a cabo mediante la simulación de las condiciones a las cuales el elemento de protección debería responder.
- No se debe perturbar, lo cual implica que no se deben realizar desarmes o cambios en las condiciones de operación del componente, ya que se corre el riesgo de armarlo de manera incorrecta y generar un estado de falla el cual no se podrá determinar hasta la siguiente inspección, por lo cual se debe evitar dicha perturbación al menos que sea estrictamente necesario y reconociendo el riesgo mencionado.
- El chequeo de función debe ser físicamente posible, hay dispositivos de protección a los cuales no se les puede realizar una tarea de búsqueda de fallas dado que es imposible tener acceso a dicho sistema (generalmente atribuido a problemas de diseño) o porque la función del dispositivo no puede ser revisada sin destruirlo, por lo cual se deben encontrar opciones de manejo de riesgo asociado a la no posible inspección, o abandonar el proceso en el cual participa dicho elemento de seguridad.
- Se debe minimizar el riesgo asociado a la tarea, si debe desconectarse el dispositivo de seguridad para llevar a cabo la tarea de búsqueda de falla, o si este es revisado y se encuentra en estado de falla, debe proveerse de una protección alternativa o desactivarse la función protegida hasta que se restituya la protección original, a pesar

de que se requiera, la búsqueda de fallas no se recomienda en sistemas altamente peligrosos.

- La frecuencia de inspección debe ser práctica.

4.8.4.1 Intervalo de búsqueda de fallas (FFI)

En el último punto de los aspectos principales de la tarea de búsqueda de falla se establece la necesidad de determinar el intervalo de búsqueda de fallas y evaluar si es práctica su realización. Para lo cual primero se debe tener conocimiento mediante una base de datos, de los parámetros de falla de la función protegida y del tiempo medio entre fallas de la función oculta, en caso de no contarse con dicha información se puede considerar los fabricantes de equipo, bancos de datos comerciales u otros usuarios de equipos similares que puedan brindar una estimación de dichos parámetros. Posteriormente a esto el autor [19] menciona que se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Determinar qué probabilidad de falla múltiple, que podría ocurrir si la función oculta está en estado de falla, es tolerable por la organización.
2. La probabilidad de falla de la función protegida en el lapso de tiempo considerado.
3. Determinar la disponibilidad requerida de la función protectora para reducir el nivel de falla múltiple por debajo del máximo determinado.

Con lo cual queda la siguiente ecuación:

$$\text{Disponibilidad requerida} = 1 - \frac{\text{Probabilidad de falla múltiple}}{\text{Probabilidad de falla función protegida}}$$

Ecuación 3: Disponibilidad requerida determinada mediante la probabilidad máxima de falla múltiple admisible y la estimación de la probabilidad de falla de la función protegida.

Fuente: Elaboración propia, basada en ejemplo entregado por [19].

Para casos donde las fallas múltiples no afectan la seguridad o el medio ambiente, o también a fallas múltiples donde el dispositivo de protección es inherentemente muy confiable y la amenaza de la seguridad es marginal, se toma como meta contar con una disponibilidad del 95%.

Ya habiéndose determinado los parámetros MTBF y disponibilidad requerida en base a alguno de los dos métodos, se puede estimar el intervalo de búsqueda de falla mediante la siguiente tabla propuesta por [19] :

Tabla 4.2: Método simplificado para cálculo de intervalo de búsqueda de fallas.

Fuente: Mantenimiento centrado en la confiabilidad [19].

Disponibilidad requerida para la función oculta.	99.99%	99.95%	99.9%	99.5%	99%	98%	95%
Intervalo de búsqueda de falla (como % del MTBF)	0.02%	0.1%	0.2%	1%	2%	4%	10%

Para la generación de este método se realizaron las siguientes consideraciones:

- Se tiene una relación lineal entre la no disponibilidad y la confiabilidad del dispositivo de seguridad, lo cual es válido para faltas de disponibilidad no superiores al 5%.
- El dispositivo de seguridad debe responder a una distribución exponencial de supervivencia (patrón de falla aleatorio, la probabilidad de falla es constante).
- Los tiempos medios de reparación (MTTR) de los dispositivos de protección son despreciables en comparación con el tiempo de análisis.

Ya teniendo en consideración esto, el tiempo entre inspección puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$FFI = F_{bf} \cdot MTBF$$

Ecuación 4: Cálculo de intervalo de búsqueda de fallas donde T_i es el tiempo necesario entre inspección, F_{bf} es el factor de búsqueda de falla calculado mediante la **Tabla 4.2**, y $MTBF$ es el tiempo medio entre fallas.

Fuente: Elaboración propia, basado en el uso de la **Tabla 4.2**.

En base a lo planteado por [19] la primera fuente de información a considerar deben ser las personas involucradas directamente en el contexto de operación del equipo (personal de producción y mantenimiento) en caso de hacer uso de fuentes externas se debe observar cómo se compara el contexto operacional con el de la fuente de datos usada.

Ya habiéndose establecido la manera de calcular el intervalo de búsqueda de falla, este puede ser muy corto o muy largo. Sobre los intervalos cortos se debe analizar lo siguiente:

- El intervalo puede ser demasiado corto para ser práctico, en donde pueden requerir la necesidad de detenciones programadas de una línea de producción cada dos días.
- La tarea podría causar acostumbamiento y pierde su efectividad el dispositivo de seguridad.

Por otra parte, se pueden dar intervalos muy extensos en donde cabe destacar:

- Se pueden dar intervalos muy largos del orden de los 100 años o más, en donde directamente el cálculo sugiere que no es necesaria una tarea de búsqueda de fallas, en donde debe enunciarse: “el perfil de riesgo/confiabilidad es tal que se considera innecesaria la búsqueda de falla”.

Luego de realizar esa consideración, la factibilidad técnica queda resumida y determinada por los siguientes puntos:

- Es posible realizar la tarea, en términos económicos y de seguridad.
- La tarea no incrementa el riesgo de generar una falla múltiple.
- Es práctico realizar la tarea al intervalo requerido.

4.8.5 Rediseño

El autor [19] señala que el rediseño queda definido en un sentido amplio como el cambio en la especificación de cualquier componente de un equipo, o el agregado de un elemento nuevo a este, en términos de proceso como la sustitución de una máquina entera por un proveedor diferente o cambiar la máquina de posición, también puede significar cualquier otro cambio grande en un proceso o procedimiento que afecte la operación de la planta.

4.9 Aplicación de Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) mediante la norma SAE JA 1011

La norma SAE JA 1011 [3] es utilizada para gestionar todas las actividades asociadas a la aplicación de la metodología RCM, tales como la gestión de los modos de falla que causan la falla funcional en todos los activos físicos definidos en el contexto operativo, y la selección de políticas de mantenimiento.

El proceso RCM según [3] debe responder de forma sistemática, secuencial y satisfactoria, las siguientes preguntas:

1. ¿Considerando el contexto operacional, cuáles son las funciones asociadas a los estándares deseados de desempeño de los activos?
2. ¿De qué manera dichos activos pueden dejar de cumplir su función (fallas funcionales)?
3. ¿Qué causas generan la falla funcional (modos de falla)?
4. ¿Qué pasa si la falla ocurre (efectos de la falla)?
5. ¿Cuánto importa cada una de las fallas (consecuencias)?
6. ¿Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas e intervalos de tareas)?
7. ¿Qué se debe hacer si no se puede encontrar alguna tarea proactiva adecuada?

4.9.1 Pasos del Análisis RCM

Para responder satisfactoriamente cada una de las preguntas de la metodología RCM, se debe recopilar información que sustente las decisiones que serán tomadas en la selección de políticas de mantenimiento, toda la información y decisiones deben ser documentadas, en donde esta debe ser altamente disponible y aceptada por parte de la organización. En donde se deben realizar las siguientes definiciones:

Funciones: Se debe definir el contexto operacional del activo o sistema en análisis, las funciones deben ser definidas, tanto las primarias como las secundarias y todos los sistemas de protección del activo, las funciones deben contener un verbo, un objeto y un estándar de desempeño definido dentro de lo posible de manera cuantitativa, este debe estar incorporado en la función y debe reflejar su desempeño esperado por parte de la organización.

Fallas funcionales: Se deben definir las fallas funcionales como los estados de no cumplimiento del desempeño declarado para cada una de las funciones.

Modos de falla: Se debe realizar una definición razonable de los modos de falla que podrían causar cada una de las fallas funcionales identificadas, el método utilizado para decidir que constituye de manera razonable un modo de falla, debe ser aceptado por la organización y deben tener un nivel de causalidad que posteriormente permita identificar una política de mantenimiento apropiada, se deben incluir los que han ocurrido, los que actualmente están siendo prevenidos por la organización, y los modos de falla que no han ocurrido, pero que podrían ocurrir tomando en consideración el contexto de operación. Esta lista de modos de falla debe ser comunicada en conjunto con cualquier evento que podría ocasionarlo, sean errores de diseño, de operación o de mantenimiento, al menos que estos ya estén siendo abordados por procesos aparte al de la aplicación de la metodología RCM.

Efectos del fallo: Estos corresponden a lo que pasaría si el modo de falla ocurre sin realizar ninguna acción para prevenirlo, mitigarlo o corregirlo, su descripción debe incluir la información necesaria para soportar la evaluación de las consecuencias de los fallos tales como:

- Cualquier evidencia sintomática de que el modo de falla a ocurrido (en el caso de los fallos ocultos, que es lo que ocurriría en el caso de una falla múltiple).
- Qué es lo que ocurre que genera algún daño a la salud, muerte o efecto adverso sobre el medio ambiente. (en caso de que ocurra)
- Qué es lo que ocurre que genera algún efecto adverso sobre la producción u operaciones. (en caso de que ocurra)
- Qué daño físico se puede producir producto de la falla. (en caso de que ocurra)
- Qué es lo que se debe hacer para restaurar la función del sistema al estado anterior a la falla. (en caso de que se pueda).

Categorización de consecuencias: Las consecuencias de cada modo de falla deben ser categorizadas de la siguiente forma:

- Deben separar modos de falla ocultos de modos de falla evidentes.

- Debe distinguir claramente entre modos de falla y falla múltiples, se debe mencionar si tienen alguna consecuencia para salud-medio ambiente, económicas y/o a las operaciones.

4.9.2 Selección de política de mantenimiento

Previamente a la selección de una política de mantenimiento, se debe establecer a nivel estratégico que acción se realizará, lo cual debe contemplar el comportamiento de la probabilidad condicional de falla, donde se tiene que esta puede aumentar, reducirse o no depender de la edad. Si dos o más estrategias propuestas para el manejo de fallas son aplicables y efectivas, se debe registrar el criterio de decisión tomado.

Las tareas que se aplicarán serán efectivas en base a los criterios que se plantean a continuación, estas deben ser consideradas como si no se llevara a cabo ninguna acción para anticipar, prevenir o detectar la falla:

El autor [19] y la norma [3] señalan que para realizar una tarea proactiva que sea técnicamente factible, esta debe estar regida por las consecuencias de la falla de la siguiente manera:

- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que reduzca el riesgo de una falla que podría afectar a la seguridad o medio ambiente, a un nivel tolerablemente bajo, obligatoriamente se debe rediseñar el componente o cambiar el proceso.
- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que reduzca el riesgo de la falla asociada a la función oculta con un nivel tolerablemente bajo, entonces debe realizarse periódicamente una tarea de búsqueda de falla. Si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de falla apropiada, se debe evaluar el rediseño.
- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que cueste menos, en un periodo de tiempo, que una falla que tiene consecuencias operacionales, la decisión inicial es no realizar mantenimiento programado. En caso de que las consecuencias operacionales sean inaceptables, se debe evaluar rediseño.
- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que cueste menos en un período de tiempo, que una falla que tiene consecuencias no operacionales, la decisión inicial es no realizar mantenimiento programado. En caso de que los costos de reparación son demasiado altos, la decisión secundaria es el rediseño.

Los criterios expuestos son desarrollados y categorizados en la norma SAE JA 1012 [21] en el algoritmo de decisión RCM, el cual considerando el tipo de consecuencia producida como elemento de entrada, se realiza un análisis mediante preguntas sucesivas que deben ser respondidas hasta encontrar una política de mantenimiento apropiada, dicho algoritmo es expuesto en **Diagrama D.1** del Anexo D.

4.1 Gestión Visual

El autor [22] da una contextualización señalando que en el año 1977 se publica el primer documento científico que menciona la gestión visual en el sistema de producción de Toyota, donde se explican algunos aspectos de dicho modelo de gestión como el sistema de control de producción Kanban, posteriormente se publican variados documentos y libros que explican el sistema de producción de Toyota y las prácticas de gestión japonesas, inspirado por su desarrollo económico y ventajas competitivas, en ese momento se traduce el método de gestión visual del japonés al inglés. Este método de gestión consiste en un sistema que intenta mejorar el desempeño organizacional mediante el alineamiento y conexión de la visión, valores, habilidades y cultura organizacional con los sistemas de gestión, procesos, elementos de trabajo y stakeholders mediante medios que estimulen los 5 sentidos humanos (visión, audición, tacto, gusto y olfato), señala que este medio debe comunicar y entregar información de calidad (necesaria, relevante, correcta, inmediata, fácil de entender y estimulante), lo cual debe ayudar a entender el contexto organizacional solo con una leve necesidad de atención por parte del usuario. Se considera como un enfoque de gestión que utiliza dispositivos visuales para comunicarse de forma efectiva buscando que dichos dispositivos sean auto explicativos, se puedan auto regular y mejorar a sí mismos.

El autor [22] menciona que la gestión visual se puede diseñar para cumplir una o más de las funciones que se describen en la siguiente tabla.

Tabla 4.3: Funciones de la gestión visual en base a los síntomas organizacionales.

Fuente: The functions of visual management [22].

Función	Definición	Síntomas organizacionales
Transparencia	La habilidad del proceso de comunicarse con las personas.	Información contenida en la mente de las personas y en los estantes.
Disciplina	Generar el hábito de mantener la aplicación correcta de los procedimientos.	Presencia recurrente de advertencias, castigos, regaños, amenazas de despidos en la operación.
Mejoramiento continuo	Un proceso centrado en toda la organización y una innovación incremental sostenida.	Organizaciones estáticas o que la mejora necesita inversiones altamente considerables.
Facilidad laboral	Intento consciente de aliviar mentalmente los esfuerzos en la rutina, tareas ya conocidas se vinculan con ayudas visuales.	Presencia de tareas que generalmente requieren operarios con experiencia presentes.
Capacitación práctica	Aprendiendo de la experiencia o la integración del aprendizaje con el trabajo.	Presencia de solo prácticas convencionales de capacitación o la ausencia de estas.
Identificación de propiedad	Generar sentimiento de posesividad he identificación con un objeto.	Necesidad de cambiar esfuerzos, generar visión y cultura organizacional.
Gestión basada en hechos	Uso de hechos y datos basados en estadísticas.	Realización de gestión subjetiva o con juicio basado en vagos argumentos.
Simplificación	Esfuerzo constante en monitoreo, procesamiento, sistema de visualización y amplia distribución de información para miembros de la organización .	Se realizan sistemas complejos de procesamiento de información, los cuales son difíciles de controlar o llevar a cabo por los miembros de la organización.
Unificación	Eliminación parcial de los límites jerárquicos y geográficos del proceso, buscando la generación de empatía y efectivo intercambio de información.	Fragmentación organizacional, donde se tiene la presencia de poco trabajo en equipo, con presencia de paradigma “este no es mi trabajo”.

4.2 Costos de mantenimiento

El autor [15] señala que los costos de mantenimiento se agrupan de acuerdo al tipo de costo y por la relación con el volumen de la actividad que los activos realizan con lo cual, la primera categorización los clasifica de la siguiente forma:

- **Mano de obra:** Costo calculado en base a la dotación estable de personal de la organización.
- **Materiales:** Costo calculado en base a todos los elementos consumidos en una operación de mantenimiento, es decir, repuestos, materiales, consumibles, entre otros.
- **Terceros:** Costo calculado por los servicios especializados, mano de obra subcontratada, consultoría, entre otros.
- **Financieros:** Mantenimiento de inventarios, amortización de equipamientos etc.
- **Consecuencia de los fallos:** Calculado en base a las consecuencias de la indisponibilidad del activo, volumen de producto no fabricado, facturación, averías, daños a terceros entre otros.

El segundo criterio es en base a lo siguiente:

- **Costos fijos:** Son independientes del volumen de la actividad realizada, estos pueden ser las remuneraciones del personal estable, gastos administrativos del área técnica, repuestos de tareas preventivas con frecuencia calendaria, servicios contratados periódicamente, amortizaciones de equipos de inspección, costo anual de repuestos inmovilizados, etc.
- **Costos variables:** Tienen relación con el volumen de la actividad de mantenimiento o con el régimen de funcionamiento de los equipos tales como las horas extra de la mano de obra, repuestos dependientes del régimen de marcha de los equipos o del volumen de la producción. Por lo cual involucra gastos de materiales u horas extras surgidas de mantenimientos predictivos, al igual que los asociados a intervenciones correctivas para solucionar fallos imprevistos que requieran la realización de horas extra, incluyendo las consecuencias económicas que estos provocan.

5. Situación actual de FabLab

En este capítulo se detalla la situación actual de la organización mediante su contexto operacional el cual es descrito mediante los lineamientos de la norma ISO 31.000 [1], aspectos internos tales como la misión y visión de FabLab con la finalidad de reconocer los elementos estratégicos relevantes para el presente trabajo, realizándose posteriormente un reconocimiento de su organigrama, procesos, y capacidades en términos de personas y equipos, en conjunto con los sistemas de información que sustentan las operaciones, para luego abordar la situación externa de la organización haciendo un análisis de interesados y del ambiente competitivo.

Posterior al conocimiento del contexto operacional, se describe el perfil de mantenimiento de FabLab. Concluyendo este capítulo analizando la calidad de datos de entrada para el análisis de criticidad mediante los lineamientos de verificación de calidad de la norma ISO 14.224 [2] y conceptos de calidad de [17].

5.1 Aspectos generales

La organización cuenta con máquinas herramientas para operaciones de manufactura mecánica y electrónica, con la finalidad de entregar la mayor cantidad de herramientas a los estudiantes y profesores de la Universidad Técnica Federico Santa María Campus San Joaquín, este se inaugura el mes de Julio del año 2013 con una superficie total de 5 m², hasta contar actualmente con 173 m² y con diversos activos para la realización de sus procesos.

Dichos activos se componen principalmente por cinco impresoras 3D, tres máquinas Router CNC, un torno, dos cortadoras laser, una impresora de circuito y un conjunto con herramientas e insumos. Los cuales se distribuyen en el laboratorio de fabricación tal como se muestra en el siguiente Layout.

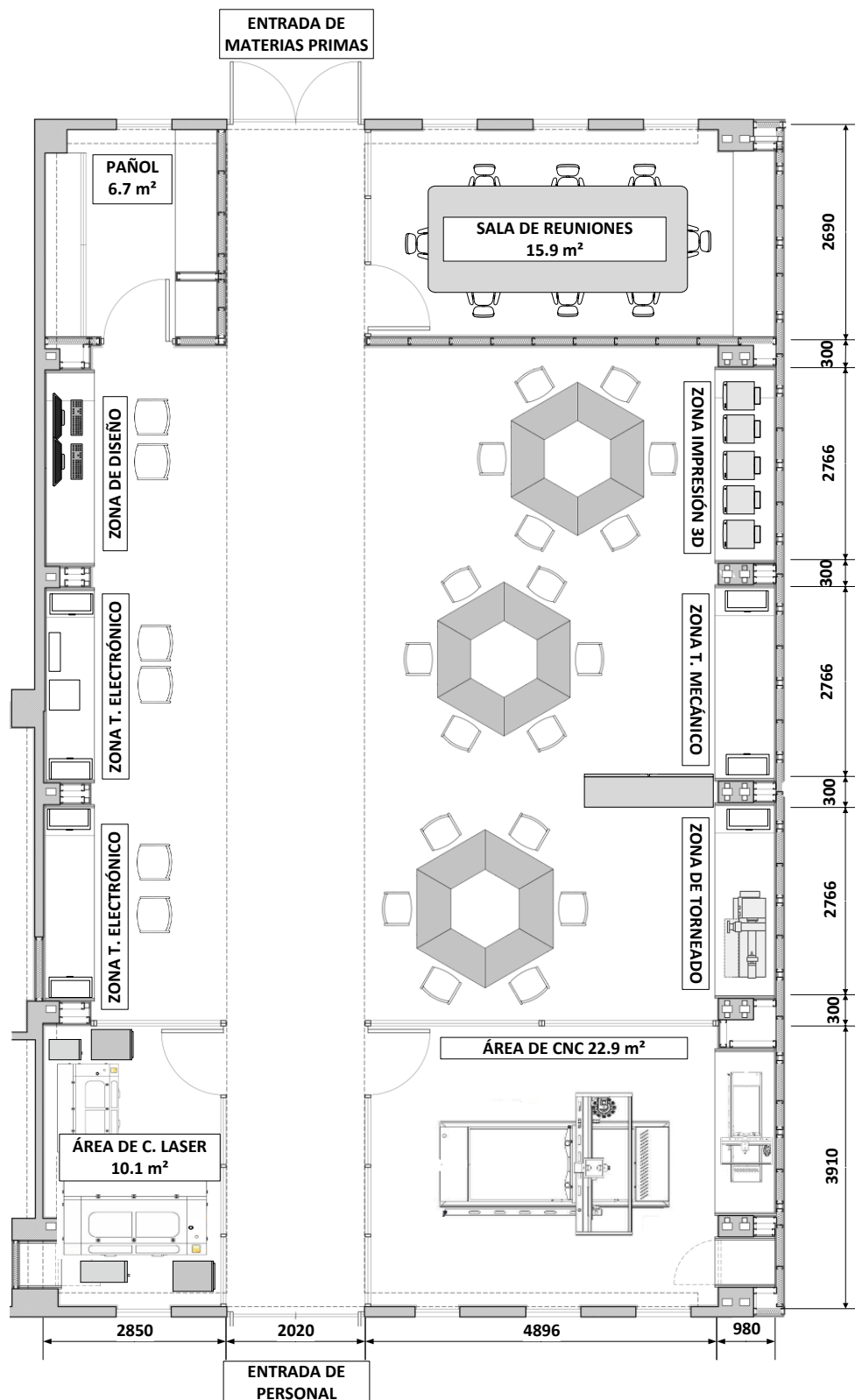


Figura 5.1: Layout de Fablab basado en modelo del departamento de arquitectura UTFSM.

Fuente: Elaboración propia, simplificación del modelo original.

5.2 Contexto operacional de Fablab

Es fundamental conocer la situación actual de la organización para sustentar la aplicación de las metodologías del presente trabajo, lo cual se genera mediante el entendimiento de contexto en el cual se desempeña la organización, reconociendo tanto los elementos internos como relaciones externas, la norma ISO 31.000 [1] separa el contexto de operación en contexto interno y contexto externo, los cuales se describen a continuación.

5.2.1 Contexto interno

En este punto se detalla la estructura y ambiente organizacional interno, haciendo una descripción transversal de la organización, partiendo desde el nivel estratégico detallando la misión y visión y objetivos de largo plazo, hasta el nivel operativo donde se detallan procesos, capacidades y sistemas de información.

5.2.1.1 Misión, visión y planificación estratégica

Para un apropiado entendimiento de las actividades de la organización, se debe considerar la misión y la visión organizacional:

Misión:

“Nuestra misión es entregar las herramientas, conocimiento y medios de financiamiento a toda persona que se quiera educar, innovar e inventar usando tecnologías de fabricación digital, permitiéndoles que desarrollen prácticamente cualquier proyecto que puedan imaginar; dándoles la oportunidad de mejorar las vidas de las comunidades tanto de forma local como global.”

Visión:

“Buscamos posicionar a la UTFSM como la universidad de vanguardia en el desarrollo de tecnología digital; para esto buscamos entregarle a los alumnos un espacio de primer nivel, en el cual no existan limitantes para la creación. Buscamos que este sea un espacio abierto, en donde puedan converger las visiones creativas tanto de sanos como personas de todo el mundo, y el alto grado de conocimientos técnicos de los estudiantes, generando un espacio que apoye el desarrollo de tecnología global.”

Para el cumplimiento de la misión y visión, FabLab hace un cronograma con plazos definidos de los objetivos estratégicos que busca cumplir para el año 2020:

- **Profesionalización de la gestión y el capital humano:** Conformar un equipo administrativo capacitado, desarrollar una plataforma computacional, implementar un software de gestión de tareas y pasantías de capacitación.
- **Mejorar su capacidad de respuesta:** Aumentar la diversidad de activos mediante la adquisición de máquinas, insumos, herramientas y capacitación de operadores.
- **Mejorar la infraestructura:** Aumentar la capacidad de las redes eléctricas, he implementar un sistema de cañerías de agua.
- **Mejorar imagen corporativa:** Diseñar he implementar material gráfico que permita acercar a la comunidad a la organización.
- **Generación de stakeholders:** Aumentar el índice de publicación y desarrollo de talleres, en conjunto con actividades de capacitación y adquisición de licencias de una organización mundial de FabLab.

5.2.1.2 Estructura organizacional

Para poder cumplir la misión, visión de Fablab, este cuenta con la siguiente estructura organizacional:

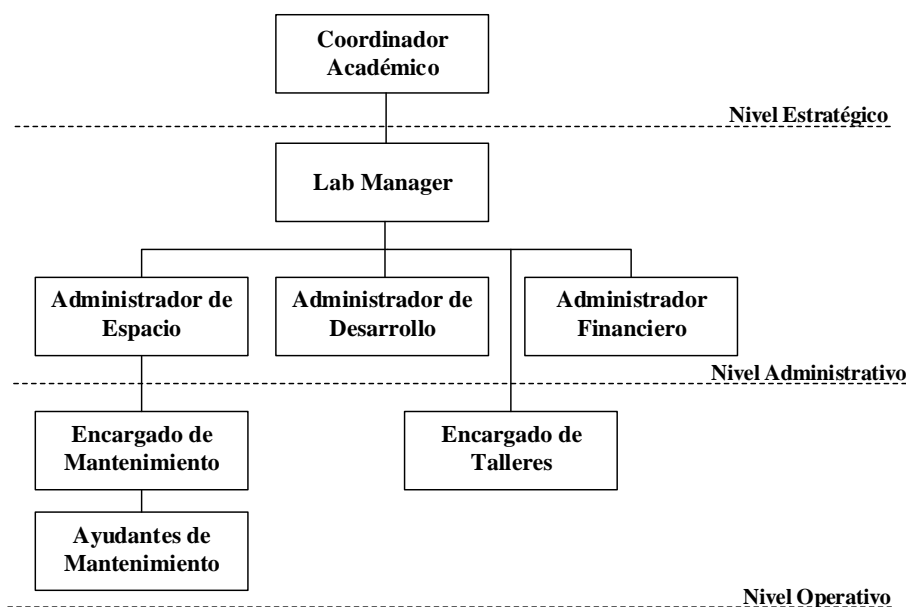


Diagrama 5.1: Organigrama de FabLab con separación de distintos niveles jerárquicos.

Fuente: Elaboración propia, validado mediante consultas con la organización.

Teniendo conocimiento de la estructura organizacional, a continuación se describen cada uno de los roles de FabLab:

Coordinador Académico: Responsable de planificar y coordinar FabLab a nivel estratégico, toma las decisiones más importantes de la organización, considerando horizontes de mediano y largo plazo. Es el encargado de representar a la organización frente a los Stakeholders externos más importantes tales como vicerrectoría académica. Lidera el grupo de evaluación de actividades y proyectos.

Lab Manager: Responsable de planificar y coordinar FabLab a nivel táctico, toma decisiones a corto plazo sobre el funcionamiento de la organización, encargado de delegar y coordinar a los responsables administrativos de las tres áreas de FabLab, entrega balances al Coordinador Académico sobre el funcionamiento de la organización, se encarga de coordinar capacitaciones en conjunto con el Administrador de Espacio.

Administrador de Espacio: Responsable de supervisar y coordinar el uso de equipamientos de FabLab, para la realización de los proyectos. Lleva a cabo la planificación de mantenimiento.

Administrador Financiero: Responsable de administrar la información financiera tratando temas tales como evaluación de presupuesto, compras y valoración de costo de activos de FabLab, utilización y costos de mantenimiento.

Encargado de Mantenimiento: Responsable de supervisar, delegar y llevar a cabo los mantenimientos de los activos de FabLab, programándolos en coordinación con el Administrador de Espacio.

Ayudantes de Mantenimiento: Responsables de llevar a cabo los mantenimientos en conjunto al Encargado de Mantenimiento.

Encargado de Talleres: Coordinar y supervisar la realización de talleres en Fablab, los cuales pueden ser para alumnos y externos.

Existe un rol que deben cumplir cada uno de los miembros de FabLab del nivel administrativo y operativo, al cual se le denomina “Encargado de Turno”, este es responsable de entregar

apoyo a los alumnos y externos en la realización de sus proyectos, asesorando y enseñando el uso de sus activos. Su remuneración se lleva a cabo en forma de beca de ayudantía, en la cual existen diferencias en base a la carga interna en la organización y valoración del trabajo por experiencia.

5.2.1.3 Cultura organizacional de FabLab

Uno de los requerimientos para establecer el contexto interno es reconocer la cultura organizacional, para lo cual durante el transcurso de esta etapa se busca establecer rasgos característicos de los participantes de la organización, donde en terreno se observó e interactuó con los distintos miembros de FabLab consultándoles sobre sus proyectos y su motivación para realizarlos, esto en conjunto con la retroalimentación y posterior validación de los miembros de mayor experiencia de la organización, se obtiene el siguiente análisis basado en lo planteado por el autor [16] haciendo una descripción de 7 puntos clave:

- 1. Innovación y aceptación del riesgo:** Los miembros de FabLab tienen una alta aceptación del riesgo y la innovación, esto es propio de la naturaleza de este tipo de organizaciones, ya que muchos de sus miembros son afines con el emprendimiento y la innovación tecnológica.
- 2. Atención al detalle:** No presentan un alto grado de atención al detalle, esto es producto de que sus miembros son en su mayoría estudiantes ingeniería con conocimientos en desarrollo. En la actualidad dicha atención se encuentra en aumento producto de la consulta con otros FabLab, el apoyo de profesionales externos, de profesores, y de estudiantes de último año de la universidad.
- 3. Orientación a los resultados:** Dada la naturaleza estudiantil de la organización, dentro de las exigencias que tienen es centrarse en los procedimientos, donde este es un paradigma organizacional, lo cual es debido a que así se tiene un mayor control de los accidentes y a que es una organización sin fines de lucro.
- 4. Orientación a la gente:** Dado a que es una organización estudiantil sujeta a los periodos extracurriculares de sus miembros, el elemento principal de FabLab es que está altamente centrado en sus miembros, ya que estos no tienen la necesidad de participar de ella.
- 5. Orientación a los equipos:** FabLab se encuentra centrado en equipos de trabajo, esto es debido a que los sistemas de gestión de FabLab reciben contribución de todos, con una

alta integración de todos los elementos administrativos de la organización, en términos empresariales se describe como alta integración interdepartamental.

6. **Agresividad:** Dada que es una organización sin fines de lucro con actividades y responsabilidades altamente delimitadas, no hay competencia y agresividad entre miembros de la organización.
7. **Estabilidad:** FabLab presenta alta presencia de gestión de cambio producto de los deseos del nivel estratégico de la organización de formalizar y mejorar el nivel de detalle de los procesos de gestión de la organización, por lo cual presenta una alta modificación de su *Status quo*.

5.2.1.4 Descripción de proceso, capacidades en recursos y conocimiento

La Administración de FabLab se lleva a cabo por estudiantes de diferentes disciplinas, donde ellos aportan directamente con los conocimientos de su área siendo estas, Ingeniería Civil Industrial, Mecánica, Eléctrica e Informática. Realizando labores en la organización en base a sus conocimientos, estos cumplen un rol de facilitadores para estudiantes y externos que quieren desarrollar sus proyectos, entregándoles herramientas y capacitación. A su vez ellos se autocapacitan y comparten conocimiento con FabLabs de Chile y del extranjero.

Con respecto a los procesos de FabLab, estos pueden ser definidos en base a la naturaleza de los proyectos que se realizan, los cuales son evaluados mediante una comisión compuesta por el Coordinador Académico, el Lab Manager, el Administrador de Espacio y el Administrador de Desarrollo, dichos proyectos son priorizados mediante los siguientes criterios:

- **Valor agregado a FabLab:** Se evalúa el beneficio para FabLab en conocimiento, refiriéndose a la adquisición de capacidades y nuevas técnicas de manufactura. A su vez se cuantifican los beneficios económicos potenciales que podría generar para la organización.
- **Naturaleza de proyecto:** Se evalúa si el proyecto es afín con la misión y visión de FabLab, es decir, si este tiene relación con el desarrollo e innovación tecnológica.

Ya priorizando los proyectos en base a los criterios mencionados, FabLab autoriza y realiza una capacitación previa en los procesos de manufactura y uso de sus activos.

Dichos procesos se realizan mediante tecnologías de manufactura por adición (impresión 3D), torneado, taladrado, fresado, y cortado laser, entregando una disponibilidad de 10 horas diarias de lunes a viernes, donde se tiene estandarizado que un miembro de FabLab capacitado en el uso de todos los activos de la organización siempre esté presente en sus horarios de servicio. Las condiciones operacionales de los activos son definidas como variables, dado que los materiales, tiempo y personas que participan en la manufactura son altamente variables. A continuación, se describe mediante la herramienta SIPOC el proceso diario de operación:

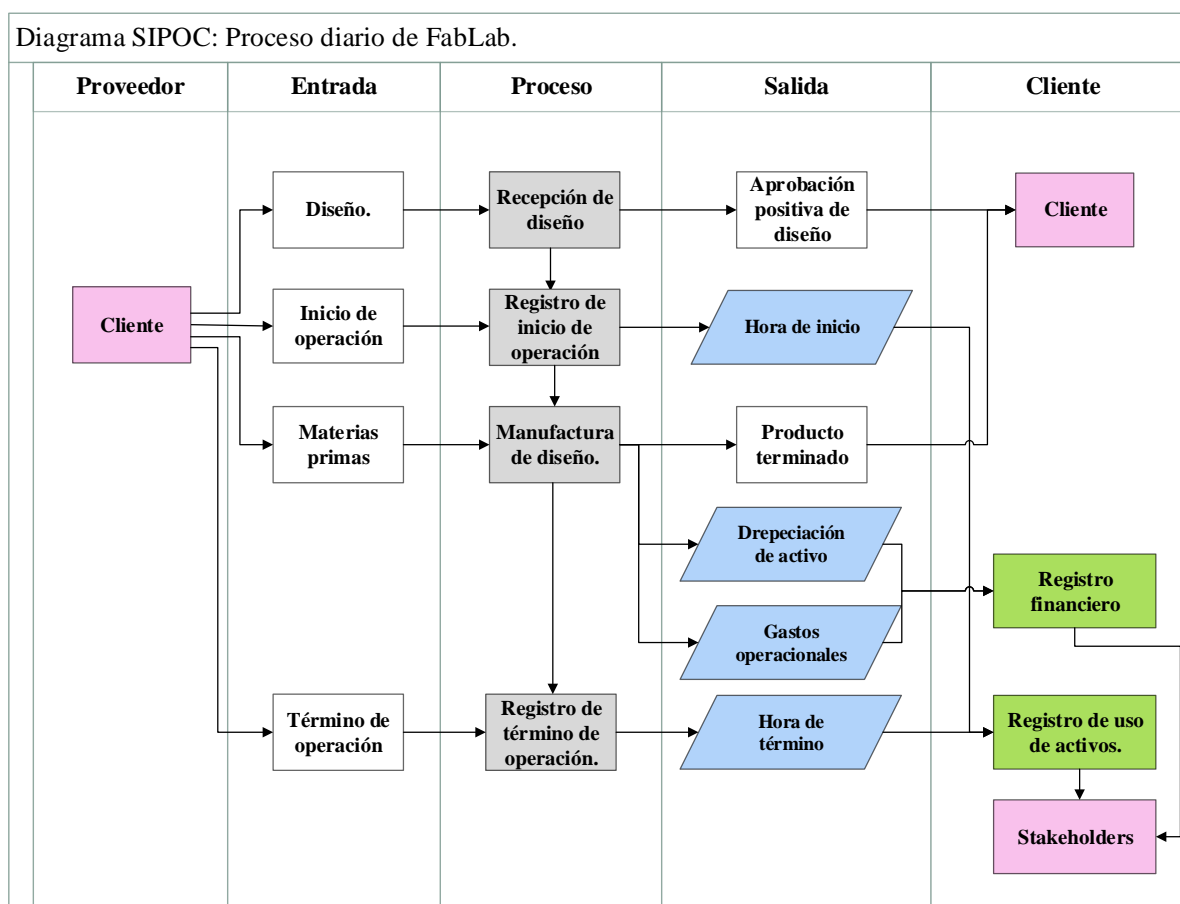


Diagrama 5.2: Proceso diario de operación de activos principales de FabLab descritos mediante la herramienta SIPOC.

Fuente: Elaboración propia, mediante consulta y validación de FabLab.

Del análisis realizado se desprende lo siguiente:

- Existen dos clientes externos (rosado), en donde uno de ellos es el que realiza el proyecto de manufactura, y los stakeholders, a los cuales le interesa conocer el estado financiero y de operaciones de FabLab, lo cual se denota en su relación directa con los registros del proceso (verde).
- Se tienen 4 flujos de información (celeste) de los cuales son relevantes para el presente trabajo el inicio y el término de la operación, los cuales son analizados en la sección 5.4.

Para las operaciones diarias de manufactura, FabLab cuenta con la siguiente capacidad en términos de activos.

- 5 máquinas de impresión 3D de 24[mm³/s]
- 1 torno de 0.55[kW]
- 1 cortadora Láser de 80[W]
- 1 cortadora Láser de 150[w]
- 1 router CNC de 1.7[kW]
- 2 router CNC de 0.5[kW]
- 1 impresora de circuito. Precisión:10 [μm]

Se debe tomar en consideración que FabLab no solo cuenta con dichas máquinas, sino que también con los siguientes equipos e insumos para desarrollar sus proyectos:

- 1 osciloscopio digital
- 1 fuente de poder de prueba
- 1 creador de señal.
- Redes eléctricas.
- Pañol de herramientas, repuestos e insumos.

Todos los equipos de Fablab son adquiridos mediante recursos universitarios, entregados por vicerrectoría académica en base a las necesidades de la organización.

5.2.1.5 Sistemas de datos, flujo de información y data

Del proceso diario de operación de FabLab se identifican los flujos de información, en donde estos principalmente son de carácter operacional y financiero:

Control de operaciones y finanzas: Se cuenta desde el mes de mayo 2019, con registro del uso de los activos principales de FabLab, donde se denota información tal como la categoría de activo utilizada (impresora 3D, Torno, Cortadora Laser, Router CNC, Cirqoid), la persona o cliente que hace uso, materias primas, hora de inicio y término de operación, de dicho registro posteriormente se desglosa la depreciación y los gastos operacionales que después pasan a ser parte del registro financiero.

Mantenimiento: Existe un registro de mantenimientos correctivos el cual se realiza desde el inicio de operación de los activos principales (marzo 2018), el cual es llevado por el Lab Manager, este registro no está estandarizado, y se estima por miembros de la organización, que tiene sobre el 60% como mínimo de las acciones correctivas de mantenimiento, pero que no se puede asegurar una cobertura mayor a dicho porcentaje. A continuación, se expone una muestra de dicho registro:

Tabla 5.1: Muestra del registro del historial de FabLab desde el primer semestre 2018, se puede identificar máquina, categoría, modo de falla y fecha.

Fuente: Registro de mantenimientos correctivos, FabLab.UTFSM.

Equipo	Tipo de Máquina	Modo de falla	Fecha
Cortadora Laser GCC X500II	Corte Laser	Descalibración por operación.	22/04/2018
Cortadora Laser GCC X252	Corte Laser	Rotura de lente.	22/04/2018
Ultimaker 3-3	Impresora 3D	Rotura de cable de control de cabezal.	09/06/2018
Shopbot Desktop 1	CNC Router	Controlador quemado.	24/06/2018
Shopbot Desktop 2	CNC Router	Controlador quemado.	24/06/2018
Cortadora Laser GCC X500II	Corte Laser	Rotura de lente.	21/08/2018
Ultimaker 3-2	Impresora 3D	Falla de calentador por desgaste.	28/08/2018
Ultimaker 3-3	Impresora 3D	Soporte horizontal en falla.	28/08/2018
Shopbot Desktop 1	CNC Router	Controlador quemado.	20/10/2018
Cortadora Laser GCC X500II	Corte Laser	Obstrucción de primera etapa.	07/12/2018
Cortadora Laser GCC X252	Corte Laser	Obstrucción general de filtros.	07/12/2018

Para el presente trabajo, existe la necesidad de determinar el impacto en las operaciones producto de la no disponibilidad de los activos, para lo cual se genera el indicador propuesto “uso medio unitario mensual de equipos”, en donde se establece el promedio de uso de un activo de cada una de las categorías presentes en la organización mediante la siguiente ecuación:

$$Uso_{categoría} = \frac{\Sigma \text{Horas de uso de la categoría}}{n^{\circ} \text{ de equipos de la categoría}}$$

Ecuación 5: Uso medio unitario mensual de equipos, considera el total de horas mensuales de utilización de los equipos, y se divide por el total de activos con una disponibilidad mayor al 50% en la categoría.

Fuente: Elaboración propia.

Para el uso correcto de esta ecuación, es necesario contar con la información suficiente para poder analizar la representatividad de la información entregada por el indicador, para lo cual la organización entrega información del uso de sus activos principales durante los meses de mayo, junio y julio 2019, obteniendo lo siguiente:

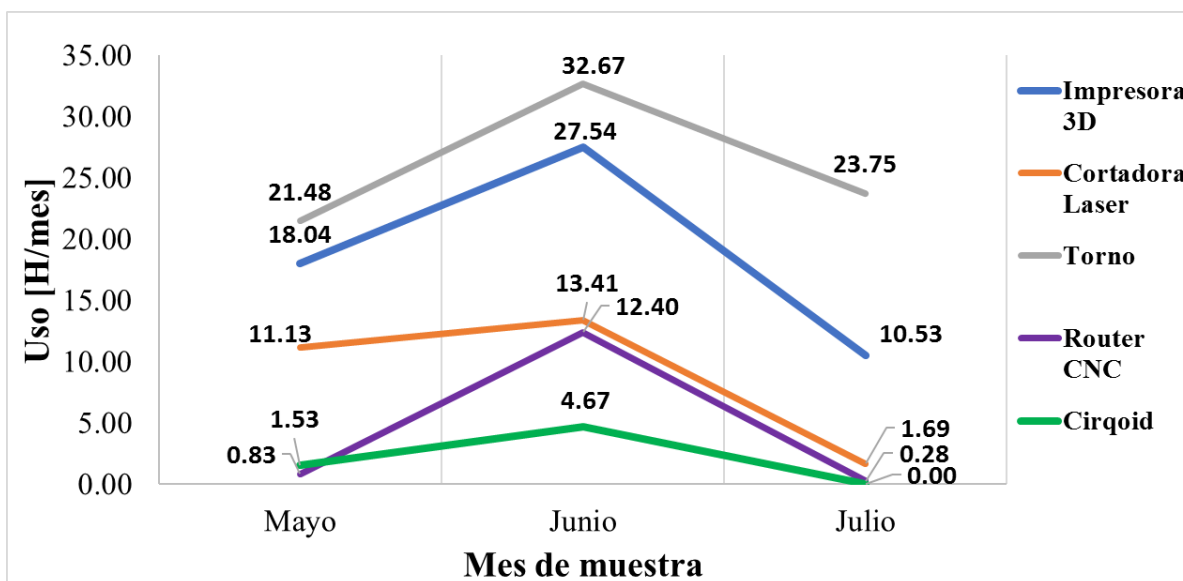


Figura 5.2: Gráfico de uso medio unitario mensual de activos de FabLab, con tabla de medias y desviaciones estándar de cada categoría.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que los equipos presentan comportamientos de uso medio similares variando principalmente en su magnitud, con una presencia de alta variabilidad la cual es esperada dado el contexto operacional variable (véase sección 5.2.1.4), se tiene que las curvas no se cruzan, excepto en los meses de mayo y julio para las categorías “Cirquid” y “Router CNC”.

Por lo cual, de manera cualitativa se presenta el siguiente comportamiento general del indicador:

Tabla 5.2: Ranking de uso medio unitario mensual para las categorías principales de activos.

Fuente: Elaboración propia.

Ranking.	Categoría.	Media. [Horas]	Desviación Estándar. [Horas]
1°	Torno	25,97	5,91
2°	Impresora 3D	18,70	8,52
3°	Cortadora Laser	8,64	6,21
4°	Router CNC	4,51	6,84
5	Cirqoid	2,07	2,38

5.2.2 Contexto externo

En esta sección se realiza una descripción del ambiente externo asociado a las operaciones de la organización, donde se analiza la relación con sus stakeholders externos y el ambiente competitivo en el cual se encuentra inserta.

Dentro del contexto externo es necesario identificar las principales organizaciones afectadas por el éxito o fracaso en el cumplimiento de los objetivos de FabLab, en donde se tienen 4 relaciones principales:

- **Vicerrectoría Académica:** Los directivos de la Universidad esperan que FabLab desarrolle y fomente la capacidad de innovación tecnológica en la comunidad, por lo cual dentro de las principales preocupaciones del Coordinador Académico es poder tener registros operativos y financieros confiables que le permitan justificar el uso de espacio y recursos de la Universidad.
- **Unidades Académicas:** Existen unidades académicas de la Universidad que son identificadas como stakeholders externos, ya que estas asesoran y patrocinan iniciativas estudiantiles teniendo participación activa en la organización, en la cual destaca el Departamento de Ingeniería de Diseño de Productos.
- **Departamento de Vinculación con el Medio:** El Departamento de Vinculación con el Medio, el cual tiene como objetivo favorecer el impacto positivo de la Universidad en la sociedad, entrega actividades y talleres de innovación tecnológica para colegios, concursos y eventos de puertas abiertas.
- **Prevención de Riesgo:** El Departamento de Prevención de Riesgo de la Universidad da directrices y apoyo en la generación de un ambiente seguro de trabajo mediante su

prevencionista de riesgo, el cual analiza y entrega conocimiento de los riesgos presentes en sus operaciones, con lo cual posteriormente FabLab elabora sus capacitaciones y señaléticas para dar conocimiento de dichos riesgos y procedimientos seguros de trabajo.

El último aspecto que se debe considerar es la competencia y cooperación de FabLab con otras organizaciones, en donde actualmente se encuentra construyendo una relación de colaboración con FabLab de la Universidad de Chile, compartiendo conocimientos y procedimientos administrativos. Ambas organizaciones son miembros de la *Fab Foundation*, la cual permite la participación en eventos a nivel internacional, facilitando la colaboración en investigación y desarrollo tecnológico, donde su mecanismo principal de intercambio de información es a través de video conferencias y visitas organizacionales, por lo cual su ambiente competitivo se puede definir como “competencia colaborativa”.

5.3 Perfil de Mantenimiento

Actualmente FabLab cuenta con actividades de mantenimiento rutinarias basadas principalmente en limpieza y lubricación para prevenir el desgaste prematuro de componentes sujetos a fricción, estas son ejecutadas a frecuencia constante por los ayudantes de mantenimiento.

El autor [15] señala que los requisitos de un plan de mantenimiento es tener actividades definidas, responsables de ejecutarlas, y llevar un registro de ello considerando esto se tiene lo siguiente:

- FabLab cuenta con actividades de mantenimiento basadas principalmente en recomendaciones del fabricante, las cuales son de limpieza y lubricación para prevenir el desgaste prematuro de componentes.
- Se están definiendo responsables de mantenimiento, pero hay una alta incertidumbre entorno de la constancia que se deja de la labor realizada, dado que no existe registro de mantenimientos preventivos.
- No hay soporte informático para los planes de mantenimiento.
- Las actividades de mantenimiento externalizadas corresponden a mantenimientos correctivos de alto riesgo o dificultad, o que tienen restricciones de garantía.

FabLab tiene un registro de mantenimientos correctivos, pero no se encuentra estandarizado (véase sección 5.2.1.5), no hay definición de modos de falla de sus activos,

Considerando lo planteado por [18], FabLab cuenta con algunas actividades de mantenimiento preventivas y un registro de acciones correctivas de mantenimiento, con lo cual se obtiene que FabLab se encuentra en la Etapa I de las etapas evolutivas de la gestión de mantenimiento.

Para obtener el perfil de mantenimiento de la organización, se establece un estimado con la organización considerando las siguientes clasificaciones de mantenimientos.

- **Correctivas:** Todas las acciones de mantenimiento que ocurren después de la falla funcional.
- **Preventivas:** Actividades de sustitución cíclica y reacondicionamiento, y mantenimientos rutinarios.
- **Predictivas:** Acciones de mantenimiento realizadas producto de la detección de una falla potencial.

Dichas actividades se obtienen en un 15% de actividades correctivas, 75% de actividades preventivas, y 5% de actividades predictivas.

Ya habiéndose establecido el contexto organizacional y el perfil de mantenimiento, el último aspecto para determinar la situación actual, es establecer el estado de calidad del sistema de medición, lo cual se hace mediante la norma ISO 14.224 [2], en donde se expresa también la necesidad de determinar si el indicador de gestión propuesto (véase sección 5.2.1.5), es repetible y reproducible en base a lo planteado por [17].

5.4 Verificación de calidad de sistemas de medición mediante norma ISO 14.224

En esta sección se hace uso de las medidas de planificación para obtener datos de calidad de sistemas de medición expuestas en [2] como elemento de verificación para reconocer los aspectos que pueden generar incertidumbres y disminuir la calidad de datos entregados por la organización. Siguiendo los puntos expuestos en la sección 4.5.2 se tiene lo siguiente:

- Se establece la necesidad de tener el objetivo de recopilación de datos bien definidos, en donde Fablab plantea como objetivo recopilar información de las operaciones de los activos, para posteriormente calcular gastos operacionales e indicadores de utilización, siendo estos expuestos a stakeholders internos y externos. No cuenta con un objetivo definido para el registro de actividades de mantenimiento.
- Las fuentes de datos utilizadas abarcan información técnica de equipos, datos de eventos de mantenimiento los cuales se están registrando desde marzo del año 2018, y el registro de uso de equipos que abarca los meses de mayo, junio y julio del año 2019.
- La taxonomía utilizada es en base al tipo de activo, donde se agrupan en categorías identificándolos individualmente mediante número o modelo, no hay una definición taxonómica uniforme para todos los activos.
- Todos los equipos presentes en la toma de mediciones son adquiridos en marzo del año 2018, considerando una operación mensual la cual varía en base a la demanda de proyectos contando con una disponibilidad esperada de equipos de 10 horas diarias de lunes a viernes, siendo este el horario de normal operación de FabLab, en el cual se toman los datos (véase sección 5.2.1.4).
- La organización no cuenta en la actualidad con definiciones uniformes de falla, ni métodos para clasificarlas, en la elaboración del plan de mantenimiento debe plasmarse una metodología de obtención.
- Los tipos de mantenimiento no están bien definidos, lo cual se trata en la elaboración del sistema de administración del trabajo, donde en un sistema de orden de trabajo se permite dicha clasificación [15].
- A continuación, se analizan los 9 puntos que deben ser tomados en consideración al momento de controlar y verificar la calidad de los datos:

1. Existe una ficha técnica de utilización de equipos la cual debe ser llenada por el encargado de FabLab de turno, y estas son almacenadas en caso de que se requiera realizar trazabilidad del evento de uso de equipo, por otra parte, en mantenimiento no hay registro estandarizado que permita su trazabilidad.
 2. La información es originada de equipos similares en tecnología y condiciones de operación, en donde netamente se distinguen por las horas de uso la cual es variable en base a los proyectos que se trabajan en FabLab.
 3. La data es relevante para el propósito, ya que no han cambiado el contexto operacional o en comportamiento a la falla de los activos.
 4. Desde mayo 2019 el registro de uso de equipos permite la identificación de categoría, tiempo de uso y fecha, por lo cual cumplen con su definición de registro necesaria para ser utilizada he interpretada. Todos los modos de falla fueron registrados debido a su capacidad de dejar sin operación el activo, o por disminuir su capacidad de operación, por lo cual cumplen con definición he interpretación.
 5. El periodo de vigilancia de los datos solicitados para el trabajo de título es desde marzo 2018 hasta la fecha, ambos registros se encuentran dentro del periodo de tiempo designado para el estudio y el periodo definido del equipo.
 6. El registro de mantenimientos correctivos da la información suficiente sobre los modos de falla para su identificación clara del evento de avería del activo, pero no está definido su impacto para la organización, lo cual es valorado en el capítulo 6.
 7. Los datos de registro de uso de equipos cuentan con la información suficiente, pero se tiene presencia de campos en blanco asociados a elementos de manufactura utilizados, lo cual no es relevante para el estudio.
 8. Dentro de lo recopilado, se tiene que no es posible determinar confianza estadística, producto de que los datos son insuficientes, dado que la utilización está sujeta a los proyectos, no se puede tener una condición experimental constante que permita aleatoriedad para determinar posteriormente distribuciones y niveles de confianza.
 9. Se realizan reuniones periódicas con miembros de la organización para validar los análisis y mediciones obtenidas.
- Para el análisis de criticidad, la organización estima que se tiene por lo menos el 60% del total de fallos de sus activos registrados en el historial de fallas de mantenimiento,

mientras que la cobertura del registro de uso de equipos a utilizar corresponde a 3 meses, lo cual corresponde al 50% del periodo de un semestre, en ambos registros la cantidad de datos es considerada como deseable. Se debe tener en consideración que según la norma ISO 14.224, se está trabajando con una cantidad baja de información, por lo cual los resultados obtenidos de la criticidad deben ser validados por la organización antes de elaborar el propuesto de plan de mantenimiento.

- Para la data de mantenimiento reportada y registrada, es importante saber el modo de falla, el repuesto, flexibilidad, e impacto operacional involucrado, dado que esto entrega la información suficiente para evaluar la consecuencia y posteriormente la criticidad asociada. No existe ninguna vinculación relevante con las operaciones, la cual es analizada en el capítulo 7.
- Se tiene que el proceso de recolección de datos está bien definido y es parte del proceso diario operación de FabLab (véase Diagrama 5.2).
- Todos los datos obtenidos mensualmente y registrados físicamente son digitalizados mensualmente por un miembro de FabLab, estos son posteriormente son encajados y reportados en reuniones por el Lab Manager, para posterior uso del Coordinador Académico.
- Con respecto a la motivación, tal como fue abordado en el capítulo 5 (véase sección 5.2.1.3), la cultura organizacional de FabLab permite cambios en sus sistemas de gestión, mientras estos estén bien fundamentados en beneficios para la organización, actualmente se está mejorando el registro de uso de equipos, mientras que la base de datos de mantenimiento, se tiene registro que no se lleva a cabo de manera estandarizada, lo cual es debe ser abordado en un sistema de administración del trabajo.
- La norma establece que se debe elaborar un plan de aseguramiento de calidad, se tiene que no hay un plan de aseguramiento de calidad para los datos, lo cual debe ser abordado en recomendaciones. Una evaluación de trazabilidad permite revisar la integridad de los datos, y puede servir como punto de partida para generar un plan de aseguramiento de calidad de datos, donde se pueden anexar criterios de cumplimiento de definición, formato y consistencia.
- Analizando la relación costo/beneficio de sistema de medición se tiene que la realización de mediciones de uso de equipos y de mantenimiento genera el siguiente costo:

- Costo en tiempo para capacitar personal de mantenimiento en entendimiento de modos de falla y efectos.
- Costo en tiempo para capacitar personal de turno para entendimiento general de cálculo y concepto de uso de equipos.
- Mientras que genera el siguiente beneficio:
 - **Justificación de inversiones en mantenimiento:** tener los datos necesarios para analizar criticidad conlleva a beneficios en justificar posteriores inversiones en mantenimiento.
 - **Justificación y control de funcionamiento:** FabLab debe responder frente a sus stakeholders, por lo cual, teniendo un adecuado control de utilización, se justifica su existencia, dado que se verifica el nivel de actividad del espacio.
 - **Justificación de inversiones en nuevos activos:** Mediante conocimiento de la demanda, la organización puede justificar aumentar su capacidad de respuesta a proyectos mediante la adquisición de nuevos activos.

5.5 Limitaciones y problemas a considerar en la aplicación de un sistema de datos

La norma [2] menciona limitaciones y problemas que se deben considerar en fuentes de datos (internas o bases de datos comerciales), en donde en caso de FabLab, trabaja solo con fuentes internas de información, las cuales son generadas en base al sistema de medición analizados en la sección 5.2.1.5, en donde se analizan las siguientes limitaciones y problemas:

- **Fuentes:** Actualmente el registro de uso de equipos se realiza mediante planillas, estas después se traspasan a una base de datos digital, tanto en la generación de la planilla como en la base de datos se puede perder información la cual puede ser relevante para el proceso. Para la información de mantenimiento, actualmente solo se dispone de una base de datos digital, la cual no tiene un respaldo físico trazable.

Interpretación: La información de la base de datos debe ser estandarizada, y las definiciones deben ser manejadas y conocidas por todos los miembros de la organización que trabajen con dichos datos, en el caso de los registros de uso de equipos pueden ver anomalías en los registros producto del desconocimiento de estas definiciones y en los balances mensuales. En mantenimiento no existe un estándar de

definiciones de mantenimiento, lo cual se debe establecer y comunicar a todos los miembros de la organización participantes de dicha área.

- **Formato de datos:** Existen campos de información bien definidos, los cuales posteriormente deben ser codificados para tener un trato eficiente y consistente de información, ya que de lo contrario se pueden presentar anomalías al rellenar los campos de información, donde se pueden dar dos o más definiciones para referirse a un mismo objeto de dicha base de datos.
- **Competencia y motivación:** Los procesos de medición tal como lo menciona [2] pueden ser repetitivos y tediosos, y en los registros se puede dar la falta de competencia y motivación producto de la inserción del sistema de medición en la cultura organizacional, por lo cual se debe tener en consideración la competencia y experiencia en cualquier proceso de medición de operaciones o mantenimiento puede influir en la recolección de datos, por lo cual se deben tomar medidas de estimulación con los miembros de la organización para la realización de dicha labor.

Los análisis realizados se utilizan para generar el siguiente diagrama Ishikawa:

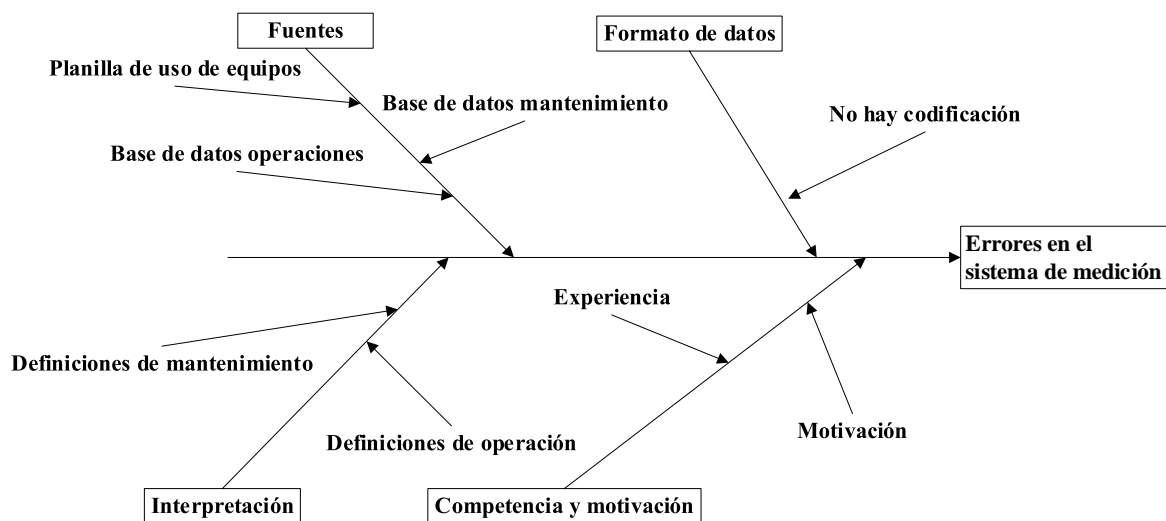


Diagrama 5.3: Diagrama de Ishikawa que expone las fuentes de limitaciones o problemas que se deben considerar al momento de generar una fuente de datos según la norma ISO 14.224.

Fuente: Elaboración propia.

5.6 Estudio R&R de indicador de gestión y Trazabilidad de datos

Ya habiéndose analizado el sistema de medición de FabLab y todas las fuentes de incertidumbre asociadas a su aplicación, se analiza y verifica la repetibilidad y reproducibilidad del indicador de gestión propuesto, lo cual se hace mediante un estudio R&R corto según lo planteado por [17] y se añade una breve evaluación de trazabilidad como aspecto de calidad requerido por la norma ISO 14.224, también se dan observaciones y correcciones producto de la aplicación del estudio.

5.6.1 Estudio R&R (Corto) para propuesto de indicador de uso medio

En la sección 5.2.1.5 se realiza un propuesto de indicador para medir el uso medio de cada uno de los activos que son sujetos de análisis en este trabajo, donde se tiene que validar si este procedimiento es apropiado y se puede integrar a los procesos de gestión de la organización, por lo cual este debe contar con dos aspectos fundamentales, ser repetible y reproducible, con lo cual el autor [17] diseña un estudio R&R corto siendo este aplicado para evaluar el indicador propuesto, donde se debe tener las siguientes consideraciones:

- El estudio está diseñado para mediciones directas con instrumentos de medición, en este caso se aplica a un procedimiento de gestión.
- La aleatoriedad en al cual se muestran los meses y categorías se descarta, dado que el procedimiento es completamente independiente del orden de las muestras.
- Se abarca todo el espectro de uso de indicador considerando las 5 categorías, con los 3 meses de datos (mayo, junio, julio).

En caso de presentarse alguna anomalía en los resultados o en la aplicación del experimento, se debe determinar la causa y corregir el procedimiento de obtención del indicador y establecer observaciones para su correcta aplicación.

Dos encargados de turno (escogidos debido a su interacción directa con el sistema), deben realizar 5 cálculos del uso medio unitario mensual para las 5 categorías de activos de FabLab, donde al considerar que es una medición indirecta, se espera que ambos encargados de turno obtengan los mismos resultados, en caso de presentarse rangos distintos de cero se genera un error de medición distinto de 0, lo cual debe ser analizado en busca de correcciones. El test

R&R en conjunto con el estudio de trazabilidad se exponen en las **Figura A.1** y **Figura A.2** del Anexo A.

A continuación, se presentan los rangos obtenidos en el experimento:

Tabla 5.3: Resultados de rangos entre los cálculos de uso medio unitario mensual por parte de dos encargados de turno de FabLab.

Fuente: Elaboración propia.

Número de mediciones	Categoría	Mes	Encargado A [horas/equipo]	Encargado B [horas/equipo]	Rango
1	Torno	Mayo	21,483	21,483	0,00
2	Impresora 3D	Junio	27,540	27,540	0,00
3	Router CNC	Julio	0,283	0,189	0,09
4	Cirqoid	Mayo	1,533	1,533	0,00
5	Cortadora Laser	Julio	1,692	1,692	0,00

5.6.1.1 Análisis del estudio R&R

Como punto inicial del análisis se describe cualitativamente lo observado en la aplicación del test:

Capacidades del personal: Se tiene que el encargado **B** presenta mayor manejo del software *Microsoft Office Excel*, que el encargado **A**, en donde uno de ellos requirió ayuda directa para el cálculo del indicador lo cual era esperable, dado que los estudiantes que realizan labores de encargados de turno tienen afinidad mayor con la operación y fabricación de máquinas, más que con el uso de herramientas de gestión.

Entendimiento de la definición del indicador: Ambos miembros de la organización no presentaron ningún problema al momento de entender el cálculo necesario según lo presentado al inicio del experimento, lo cual es esperable debido a lo planteado en el contexto operacional, donde estudiantes universitarios de Ingeniería administran FabLab.

Definición del indicador: Se tiene que se presentaron anomalías durante el cálculo del indicador de gestión, en donde el encargado **A**, al momento de calcular el indicador para la categoría “Router CNC” consideró dos equipos de los 3 presentes, dado que uno de ellos no se encuentra en operación desde hace más de 6 meses, mientras que el encargado **B** si lo consideró debido a que físicamente está presente, y consideró que no era representativo el

indicador al ignorarlo, por lo cual se tiene no reproducibilidad debido a que no está definido que equipos considerar en la categoría si uno o más de ellos presentan indisponibilidades no despreciables.

Ya teniendo en consideración esto, se calcula la desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad en conjunto con el error con respecto al proceso utilizando lo planteado por [17] en donde el desarrollo se realiza utilizando una adaptación de la plantilla realizada por este mismo autor (véase **Figura A.3** de Anexo A):

Tabla 5.4: Desviación estándar y error de proceso sobre tolerancia, se puede apreciar que este es menor al 30% de la tolerancia, lo cual en base al criterio del autor [17], es aceptable.

Fuente: Elaboración propia, cálculos basados en la metodología de [17].

Desviación estándar R&R	Error de proceso sobre tolerancia
$\sigma_{R\&R} = 0,077$ [horas]	$P/T = 7,79\%$

El límite inferior y superior del proceso se define estableciendo que la organización no quiere que el indicador tenga más de 30 minutos de incertidumbre, con lo cual se realiza el cálculo y se tiene un comportamiento del proceso sobre la tolerancia con un error inferior al 30%, considerando que se realiza el estudio en todo el espectro de trabajo de este, la repetibilidad y reproducibilidad asociada al uso del indicador es bueno, por otro lado, no se debe ignorar el error distinto de 0 obtenido, el cual es debido a la confusión entre encargados de turno al no saber si considerar el activo con problemas de disponibilidad, por lo cual se debe establecer un criterio claro en este aspecto, o se pueden generar desviaciones inaceptables de repetibilidad y reproducibilidad.

5.6.1.2 Conclusión del estudio R&R

Se analizaron cualitativa y cuantitativamente todos los aspectos del Test R&R de lo cual se establece que dada la cultura organizacional de FabLab, es necesario enfatizar en la capacitación en *Microsoft Office Excel* para el cálculo del indicador, o de lo contrario facilitarlo mediante programación de forma tal que sea repetible entre los encargados de turno de FabLab.

Se tiene que en términos generales el proceso establecido para el indicador de gestión es bueno si se utiliza el criterio del 30% establecido para mediciones de calidad por [17], pero

considerando lo expuesto en la sección 5.6.1.1 se debe mejorar la definición del indicador para que sea repetible y reproducible, con lo cual se tiene lo siguiente:

- Si el activo no está disponible por más del 50% de los días de operación mensuales, este debe ser retirado del cálculo de uso medio unitario mensual.

Estandarizando este criterio, se resuelve la fuente de error de repetibilidad y reproducibilidad, dicho criterio debe ser comunicado y parte de un entrenamiento del personal que trabaje con él, según lo planteado por [2].

5.6.2 Estudio de trazabilidad

FabLab, tal como fue establecido en el contexto operacional (véase sección 5.2.1.5) hace registro del uso de sus equipos, esto es realizado mediante el documento “*registro de uso de máquinas*”, dichos registros están presentes en las distintas estaciones de trabajo, en donde es llenado por los usuarios de los equipos hasta que se acaban los casillas disponibles, y luego son subidos a la base de datos de FabLab mediante un encargado de turno asignado como responsable de dicha labor, y luego son guardados en un libro de registros.

Teniendo en consideración esto, se busca cuantificar y caracterizar la trazabilidad, en donde se establece un puntaje de aprobación y se caracteriza mediante observaciones cualitativas sobre dicho proceso, por cada uno de los encargados que fueron partícipes del estudio R&R se evalúan 3 mediciones aleatorias de la base de datos de FabLab, en donde se le asigna un puntaje numérico (uno o cero) para cuantificar la aprobación de la trazabilidad de dicha medición, esto se establece en base a los siguientes criterios:

- El evento registrado en la base de datos se encuentra en el registro físico.
- La información del evento de la base de datos, es consistente con la del registro físico.

Considerando esto, se obtiene el siguiente resultado en el estudio, cabe destacar que las primeras 3 mediciones las llevan a cabo el encargado **A** y las 3 últimas el encargado **B**:

Tabla 5.5: Tabla resultado de puntaje de trazabilidad de mediciones aleatorias del registro de uso de equipos de FabLab.

Fuente: Elaboración propia.

N° de medición aleatoria	Marca temporal	Presencia en el registro
1	5-7-2019 17:59:52	1
2	14-06-2019 18:09	1
3	23-07-2019 19:02	0
4	6-5-2019 15:50:48	0
5	18-06-2019 12:35	0
6	23-05-2019 18:54	1
Suma neta de puntaje		3

5.6.2.1 Análisis de estudio de trazabilidad

En la realización del test con el encargado **A**, 2 de 3 mediciones aleatorias fueron trazables, en donde se establece que la causa de rechazo de uno de los datos fue producto de la no presencia en el registro físico, mientras que con el encargado **B** solo una de las mediciones fue trazable, teniendo dos mediciones que no tenían presencia en el registro físico. Según el criterio establecido, se tiene que las mediciones no aprueban el test de trazabilidad, por lo cual se debe considerar este aspecto en las incertidumbres del análisis de criticidad. Como segundo aspecto se tiene que se presentó una alta dificultad al momento de querer trazar los datos, esto es debido a que no hay un distintivo claro para distinguir las planillas por tipos de máquinas, ni momento de registro.

5.6.2.2 Conclusión del estudio de trazabilidad

Considerando lo mencionado en el análisis, se tiene que el registro de uso de equipos de la organización no aprueba el test de trazabilidad. Dado que es un sistema de gestión nuevo, se requiere adquisición de experiencia y motivación, lo cual fue analizado en las limitaciones y problemas del sistema de medición, en donde la importancia del registro tanto para las operaciones como mantenimiento debe ser enfatizada en un entrenamiento y chequeo periódico de calidad para mejorar el desempeño del sistema y así la trazabilidad de su información.

Para disminuir la dificultad de trazabilidad, mejorar la eficiencia del registro y digitalización de datos, se establece una mejora en el documento estandarizando la cantidad de eventos que se deben incluir por planilla (correspondientes a una semana del mes), y utilizar codificaciones para la toma de datos, dando numeraciones que se deben colocar en base a la información que se quiere comunicar, y estandarizando la taxonomía en la identificación de los activos (véase documento original y propuesta de mejora en **Figura A.4** y **Figura A.5** de Anexo A).

6. Evaluación de criticidad mediante norma ISO 31.000

Para gestionar los recursos de mantenimiento tanto [18] como [23] plantean que la organización debe tener conocimiento de cuáles son sus activos más críticos, por lo cual es necesario jerarquizar activos y reconocer su grado de impacto en la organización, dicho impacto debe afectar al cumplimiento de la misión, visión y objetivos estratégicos de FabLab (véase sección 5.2.1.1). Por lo cual, ya habiéndose establecido el contexto de la organización, y determinado la calidad de los datos recopilados, se realiza la valoración de riesgo en base a lo planteado por la norma ISO 31.000 [1].

6.1 Definición de alcance, contexto y criterio de riesgo

Como paso previo a la valoración de riesgo (análisis de criticidad), se debe realizar la definición de alcance, contexto y criterio de riesgo de aplicación de la metodología de la norma [1] usando como elementos de entrada los elementos detallados en la situación actual de FabLab.

6.1.1 Definición de alcance

El proceso de gestión de riesgo puede ser llevado a nivel estratégico, táctico u operativo, diseñado para un proyecto, o para una actividad individual, por lo cual es necesario establecer el alcance del proceso de gestión de riesgo que se lleva a cabo en la organización, para lo cual se requiere que dicho alcance esté a nivel administrativo, ya que el Administrador de Espacio es el responsable de definir los planes de mantenimiento de FabLab, en donde se debe definir el objetivo de la gestión de riesgo en el presente trabajo, el cual es determinar la categoría de activos críticos de FabLab para posteriormente realizar una propuesta de plan de mantenimiento buscando mejorar su disponibilidad. Para esto la norma [1] señala la necesidad de tener conocimiento de las decisiones que deben ser tomadas, las cuales están orientadas a la selección de herramientas asociadas a la evaluación de riesgo, y cómo posteriormente se tratará dicho riesgo en la categoría de activos críticos, y los insumos y dispositivos necesarios para su realización.

La norma establece la necesidad de identificar el beneficio esperado del cumplimiento del objetivo de la gestión de riesgo, en donde se espera el siguiente resultado para la organización:

- Mediante la obtención de la criticidad, poder justificar gastos y presupuestos de mantenimiento frente a vicerrectoría académica.
- Permitir reconocer la categoría de activos con mayor puntaje acumulado de criticidad.
- Repartir recursos de mantenimiento en base a la criticidad de los activos.
- Permitir una perspectiva general de las consecuencias de la falla de los activos, facilitando la toma de decisiones selectivas para el tratamiento de su riesgo asociado.

Para conseguir estos resultados, se requiere el uso de los registros de uso de equipos de las 5 categorías de activos principales de FabLab, en conjunto con su registro de mantenimientos correctivos.

Ya habiéndose definido los aspectos generales del alcance, la norma requiere la selección de técnicas y herramientas de evaluación de riesgo, lo cual se realiza mediante la sección 6.2 de la norma ISO 31.010 [14]. Para lo cual es necesario tener en consideración lo que plantea [23] y la norma [14] señalando que las herramientas para el proceso de valoración de riesgo van desde una identificación de riesgo en base a criterios cualitativos, hasta herramientas que identifican y analizan el riesgo basados en data, estimaciones de probabilidad y criterios cuantitativos. A continuación, se hace uso de los criterios de selección de herramientas de valoración de riesgo expuestos por [14]:

- La organización no cuenta con sistemas complejos de activos que restrinjan el problema al uso de complejas herramientas de análisis cuantitativo, por lo cual se pueden considerar herramientas como Brainstorming hasta RCM en el espectro de selección.
- La cantidad de información disponible, en términos de documentación técnica, experiencia de miembros, y bases de datos, no permiten análisis cuantitativos estadísticos, pero sí permiten enfoques semi-cuantitativos, utilizando los recursos disponibles.

- Los recursos requeridos de la herramienta deben sustentarse en los recursos de gestión disponibles en la organización, tanto en capacidades de los miembros, como el costo en tiempo de ser utilizado, donde la realización de análisis muy profundos puede suponer una carga que no sea admisible para FabLab.
- Dado que el resultado esperado es entregar una metodología que permita principalmente comparar niveles de riesgo entre activos, y justificar inversiones de mantenimiento, se requieren resultados cuantitativos de riesgo.

Considerando el análisis de los factores de selección de ISO 31.010, se establece la siguiente matriz de decisión:

Tabla 6.1: Matriz de decisión de criterios absolutos basado en los lineamientos de selección de la norma ISO 31.010 [14].

Fuente: Elaboración propia, basada en la matriz de riesgo expuesta en el trabajo de título de [24].

Factor Herramienta	Cuantifica Riesgo	Información disponible	Recursos Disponibles
Índices de Riesgo	✓	✓	✓
FMECA	✓	✓	✗
RCM	✓	✓	✗
Brainstorming	✗	✓	✓

Conforme al resultado de la matriz de decisión, se utiliza la herramienta basada en índices para la valoración de riesgo.

Ya habiéndose realizado la selección de herramienta, la norma [1] requiere que se establezcan los recursos necesarios, responsables y los registros que deben mantenerse para su funcionamiento, los cuales son los siguientes:

- Un Encargado de Mantenimiento con conocimiento de Excel, que pueda jerarquizar horas de usos de activos, determinar riesgos de salud y medio ambiente, costos de mantenimiento y flexibilidad de repuestos.
- Registros de uso de equipos que posteriormente sustenten la jerarquización operacional, y registros de fallos de mantenimiento, estos deben mantenerse y evaluar constantemente su integridad para el funcionamiento de la metodología de gestión de riesgo.

La presente metodología se integra con el proceso de control financiero de FabLab para determinar los presupuestos de mantenimiento de los activos.

6.1.2 Definición de contexto

La gestión de riesgo elaborada en el presente trabajo está inmersa en el contexto operacional de FabLab (véase Capítulo 5), alineándose con los objetivos estratégicos de FabLab para el año 2020, donde este busca aumentar su capacidad de respuesta, mejorar sus capacidades en términos de conocimiento y de gestión, lo cual es reflejado en la cultura organizacional integrando personas de distintas carreras que aporten con sus conocimientos a la organización, y en los diversos focos de mejora en sus procesos de información, financieros, apoyándose en consultorías externas.

Dado que [1] define el riesgo como “La incertidumbre que puede afectar al cumplimiento de los objetivos de la organización”, se tiene que las incertidumbres que pueden afectar a FabLab, son la falta de un sistema de control del estado de sus activos, la falta de reconocimiento y estandarización de todos sus modos de falla, y la falta de una base de datos estadística que permita predecir el comportamiento de los equipos, estas en su conjunto se definen como incertidumbres y fuentes de riesgo para el área de mantenimiento. Por lo cual el alcance y el propósito de la gestión de riesgo elaborada en el presente trabajo, es identificar, cuantificar y generar acciones para el tratamiento a los riesgos asociados a la falla de sus activos.

6.1.3 Definición de criterio de riesgo

En esta sección se define la naturaleza de los riesgos que pueden afectar al cumplimiento de los objetivos de FabLab que serán tomados en consideración para el análisis de criticidad, en conjunto con el criterio de evaluación de riesgo que dará soporte para el proceso de toma de decisiones.

La identificación de riesgo según la norma [1] se puede realizar identificando que consecuencias asociadas a los activos que afectan al cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización, en donde resalta su búsqueda de aumento de capacidad de respuesta, lo cual se evidencia en su misión y visión, en conjunto con su planificación estratégica para el año 2020 (véase sección 5.2.1.1). Dado que existen activos que pueden causar daño a la salud o al medio ambiente debido a la emisión de gases , y riesgos inherentes a su operación, en donde la OSHA [25] menciona tales como atrapamiento, amputación, y el MIT [26] destaca el riesgo de incendio en equipos de cortado laser. Se debe considerar la consecuencia que podría tener los modos de falla en la salud y medio ambiente, de la misma forma que el repuesto asociado, puede ser un gasto de alto impacto para los objetivos de la organización, y puede ser difícil de conseguir, donde este puede estar dentro o fuera del país, lo cual puede aumentar el tiempo fuera de operación de sus activos.

Para determinar las consecuencias y en consistencia con el alcance (véase sección 6.1.1), se establece que la organización puede sostener análisis semicuantitativos de riesgos mediante la herramienta de índice de riesgo, con lo cual la norma ISO 31.000 exige determinar la forma en la cual se evaluarán dichas consecuencias después de haber determinado las fuentes de riesgo que son tomadas en consideración, con lo cual [23] propone un método que combina la información disponible con factores o criterios de importancia en función de las necesidades de la organización, definiendo el riesgo como la multiplicación de frecuencia por consecuencia, donde la consecuencia debe combinar los múltiples riesgos que afectan al cumplimiento de los objetivos de la organización, siendo estos, impacto operacional, consecuencias económicas, de salud - medio ambiente, y flexibilidad, tal como se plantea en la siguiente ecuación:

$$Criticidad_{MF} = Frecuencia_{MF} \cdot Consecuencia_{MF}$$

Ecuación 6: Valoración semicuantitativa de criticidad para cada modo de falla.

Fuente: Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo [23].

En donde:

$$Consecuencia = (I_o \cdot flexibilidad) \cdot 0.35 + I_{CM} \cdot 0.30 + (I_{S-MA}) \cdot 0.35$$

Ecuación 7: Evaluación semicuantitativa de riesgo utilizando una combinación de factores de impacto operacional, costo de mantenimiento, flexibilidad de respuesta e impacto a la salud y medio ambiente. [23] utilizando ponderaciones basadas en la metodología de [18] .

Fuente: Elaboración propia, basada en las metodologías de [23] y [18].

La forma de reflejar la importancia de dichos criterios se hace en base a lo que plantea [18] con lo cual se le agrega una ponderación de los factores de riesgo para la organización, estableciéndose en 35% el impacto operacional, 30% los costos de mantenimiento y 35% el impacto a la salud- medio ambiente. Estos criterios reflejan un balance, en donde cabe destacar que el impacto operacional es ligeramente mas elevado debido a su relación directa con el impacto en la capacidad de respuesta, y el impacto a la salud-medio ambiente debido al contexto externo de la organización, el cual demanda seguridad en sus instalaciones y procedimientos de trabajo. A continuación se definen los siguientes criterios:

Impacto operacional: Este criterio se define considerando el ranking de horas medias de uso que se le da a los activos de cada categoría (véase sección 5.2.1.5), en donde esté refleja la demanda media de los usuarios, y se utiliza para determinar el impacto operacional que puede generar la no disponibilidad del activo, con lo cual se tiene lo siguiente:

Tabla 6.1: Criterio para valoración de factor de impacto operacional, donde se da uso del ranking generado por el indicador propuesto “uso medio unitario mensual”.

Fuente: Elaboración propia.

Impacto Operacional	
Primer quintil en ranking de horas medias de uso.	0
Segundo quintil en ranking de horas medias de uso.	1
Tercer quintil en ranking de horas medias de uso.	2
Cuarto quintil en ranking de horas medias de uso.	3
Quinto quintil en ranking de horas medias de uso.	4

Flexibilidad: FabLab al momento de realizar alguna reparación, cuenta con repuestos en stock, repuestos que puede intercambiar con otro de sus activos para poder completar algunas de sus operaciones, y por último, repuestos que debe pedir a las casas matriz de sus proveedores, la cual puede estar dentro o fuera del país, considerando esto, se establece el siguiente criterio para la valoración del factor de flexibilidad:

Tabla 6.2: Criterio para la valoración del factor de flexibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Flexibilidad	
Repuesto disponible en stock.	1
Repuesto no disponible, pero intercambiable con otro activo.	2
No hay repuesto disponible, se puede comprar dentro de la región.	3
No hay repuesto disponible, se debe importar desde el país de origen del activo.	4

Costos de mantenimiento: Para este criterio, las categorías fueron estructuradas consultando los miembros de mayor rango y experiencia de FabLab, para ordenar las categorías en base a la dificultad que a ellos les presenta conseguir dichos recursos, con lo cual se establece:

Tabla 6.3: Criterio para la valoración de los costos de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia, mediante consulta directa con miembros de FabLab.

Costo de mantenimiento	
Entre 100 y 1.000 CLP	0
Entre 1.000 y 10.000 CLP	1
Entre 10.000 y 25.000 CLP	2
Entre 25.000 y 100.000 CLP	3
Mayor a 100.000 CLP	4

Salud y medio ambiente: Para este criterio directamente se genera en base a lo planteado por el I.S.P.Ch [27] el cual en su guía presenta el siguiente criterio de severidad con respecto a salud, el cual es complementado con el criterio de medio ambiente de [18], estableciendo el siguiente criterio combinado:

Tabla 6.4: Criterio de valoración de factor de daño a la salud o medio ambiente.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de lo señalado por la guía de [27], agregando la categorización de daño al medio ambiente de [18].

Seguridad-Medio Ambiente	
No dañino, no hay riesgo para la salud y/o medio ambiente.	0
Ligeramente dañino, riesgo de daños superficiales en trabajadores, como cortes, magulladuras pequeñas e irritaciones a los ojos y/o Efecto controlado al medio ambiente.	1
Dañino, riesgo de laceraciones, quemaduras, conmociones, torceduras importantes y fracturas menores. y/o Afecta la disponibilidad de recursos sociales y ecosistema de forma reversible en menos de 1 año.	2
Extremadamente dañino, riesgo de incapacidad permanente, amputaciones, fracturas mayores, intoxicaciones, lesiones múltiples y lesiones fatales. y/o Afecta la disponibilidad de recursos sociales y ecosistema de forma reversible en menos de 3 años.	3
Importante, no se debe comenzar ni continuar el trabajo hasta que se haya reducido el riesgo, (puede que se precisen recursos considerables para controlar el riesgo) y/o Afecta la disponibilidad de recursos sociales y ecosistema de forma reversible en más de 3 años o irreversible.	4

Los índices de criticidad obtenidos para cada uno de los modos de falla presentes en el registro de mantenimientos correctivos de FabLab, se suman por cada una de las categorías y se determina la categoría de activos con mayor índice de criticidad acumulada. Dichos

índices son posteriormente presentados como una matriz de riesgo, en donde se realiza una estratificación mediante percentiles, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.5: Propuesto de criterio de evaluación de criticidad mediante percentil estadístico.

Fuente: Elaboración propia.

Criterio de criticidad	
Baja	Hasta percentil 33.
Media	Desde percentil 33 hasta percentil 66.
Alta	Desde percentil 66 hasta percentil 100.

La capacidad de la organización para efectuar dicha valoración es analizada por sus miembros, en donde se valida que las capacidades de la organización permiten su implementación.

6.2 Valoración del riesgo

La valoración del riesgo es el proceso de identificación, análisis y de evaluación del riesgo. Esta etapa es la más importante de la norma ISO 31.000 debido a que es donde se determina la criticidad de los activos para posteriormente tomar acciones de tratamiento de riesgo.

6.2.1 Identificación del riesgo

En la sección 6.1.3 se define como es valorado el riesgo y los criterios que se utilizan para determinar la criticidad de los activos, en esta sección se define qué técnicas o mecanismos se utilizan para identificar los riesgos, en donde la información debe ser relevante y actualizada para ello. Se debe tener en consideración que los factores de riesgo a analizar están directamente ligados a los modos de fallas detectados y comunicados por FabLab para determinar la matriz de riesgo.

6.2.1.1 Identificación de los Factores de Riesgo

Las fuentes de riesgo en base a lo planteado por la norma [1] deben entenderse en base a su naturaleza tangible e intangible, considerando cuales son las causas de su presencia y los eventos en los que se presentan, seleccionando una o más herramientas para su identificación. El presente trabajo aborda amenazas tangibles, debido a su relación directa con fallos de los activos de FabLab, los cuales tienen consecuencias cuantificables. Mientras que la realización de este, busca mitigar las fuentes de riesgo intangibles asociadas a errores

humanos de planificación por desconocer o no tener conocimiento del impacto real de los activos en sus operaciones, con lo cual se tiene lo siguiente:

Salud o medio ambiente: Se tiene que estos riesgos están presentes en la operación de los activos de manufactura, en donde en el caso de FabLab, existen procedimientos establecidos de trabajo, los cuales manifiestan a sus clientes mediante capacitaciones y supervisión mientras estos se familiarizan con la operación de los activos, al momento de ocurrir la manifestación de un riesgo a la salud o medio ambiente, lo hace mediante eventos tangibles, los cuales pueden generar daño al ecosistema o a la salud del operario, sus causas principales son errores operacionales, modos de fallas de componentes específicos y dispositivos de seguridad.

La herramienta a utilizar para su identificación es la “*guía para evaluación de riesgos y seguridad*” de [27] donde es necesario identificar factores de riesgo, riesgo asociado y consecuencia, en donde se debe tener una forma de cuantificar la probabilidad y consecuencia asociada a dicho proceso, para efectos del presente trabajo no se cuantifica la probabilidad, ya que el factor de riesgo se cuantifica mediante la metodología expuesta en la sección 6.1.3. En el procedimiento que estipula [27] se debe realizar una pauta que permita reconocer aquellos factores de riesgos existentes en el lugar o puesto de trabajo analizado independiente de su nivel de incidencia. Dicha pauta se ha realizado considerando las categorías propuestas por [27], la experiencia de los miembros de FabLab, y la documentación técnica de los equipos, donde estas exponen advertencias de seguridad.

Se deben considerar los cuatro bloques que se pueden agrupar como fuentes de riesgo, las cuales son: agentes materiales, características personales, entorno ambiental y organización. Considerando esto, se construye la siguiente matriz con los aspectos que pueden desencadenar riesgos para salud y/o medio ambiente:

Tabla 6.6: Factores de riesgo para la salud o medio ambiente presentes en FabLab.

Fuente: Elaboración propia, basado en lo presentado en el trabajo de [24] y los criterios de [27].

Factores de riesgo para la Salud-Medio ambiente			
Agentes materiales	Personal	Ambiental	Organización
Máquinas de trabajo	Conocimiento del proceso	Iluminación	Disposición física de equipos
Metal caliente	Actitud de trabajo	Ruido	Supervisión directa
Carga suspendida	Aptitud para trabajo	Gases y/o polvo metálico	Procesos realizados
Elementos incandescentes	-	-	-

Posteriormente en el análisis de riesgo para la salud y medio ambiente, se elabora una ficha basada en el anexo N°1 de [27], para evaluar los riesgos asociados a los modos de falla reales obtenidos.

Impacto operacional: Considerando las relaciones expuestas en el diagrama SIPOC (véase **Diagrama 5.2**) el impacto operacional se traduce en no poder responder a las necesidades del cliente en la realización de su proyecto y en el prestigio con los stakeholders, este factor de riesgo no es directamente cuantificable con la información actual, pero si se puede generar un criterio secundario que permita cuantificar el impacto operacional reconociendo el uso de sus activos y con esto generar una priorización en base a las horas de realización de proyectos que potencialmente se podrían estar perdiendo por no disponibilidad de los activos, donde se propone su realización mediante el “uso medio unitario mensual” (véase sección 5.2.1.5), lo cual permite tener la percepción del impacto en las operaciones utilizando una jerarquización por horas de operación. Las causas principales de no disponibilidad de FabLab, están asociadas a falta de repuestos, y externalización de mantenimientos.

Flexibilidad: Ligado directamente al remplazo de componentes en mantenimientos correctivos, se tiene que esta fuente de riesgo tangible es percibida cuando ocurren averías en los activos y no se tienen repuestos en stock para su remplazo, lo cual aumenta los tiempos de no disponibilidad considerablemente cuando la adquisición de dicho repuesto es mediante importación, la causa de este problema es debido a la no planificación de acciones

preventivas de mantenimiento para anteponerse a las fallas funcionales que requieren replazos de componentes con baja flexibilidad, dada su definición, no requiere una herramienta específica para determinarla, pero sí conocimiento de la respuesta de los proveedores para eventuales necesidades de componentes.

Costo de mantenimiento: Los costos de mantenimiento son una fuente tangible de riesgo que se percibe directamente en la disminución del capital de la organización producto de tener que asumir los costos de la reparación del activo, las causas directas de altos costos de mantenimiento es la no planificación de ellos y el desconocimiento de los activos que requiere tercerizar el mantenimiento, estos son calculados mediante la identificación de costos de mantenimiento de [15] siendo estos los siguientes:

- **Mano de obra:** se realiza el cálculo en base al registro de ayudantía entregado por la organización, con una valorización de \$ 2.500/hora de costo asociado a los ayudantes de mantenimiento.
- **Materiales:** Incluyen componentes e insumos utilizados, consultados directamente con la organización.
- **Terceros:** Costos de terceros asociados al registro de mantenimientos correctivos de la organización.

Todas las fuentes de riesgo mencionadas en esta sección, tienen impacto directo en el objetivo estratégico asociado al aumento de la capacidad de repuesta de la organización, en donde para realizar la aplicación de dichas herramientas de identificación de riesgos se tienen las siguientes fortalezas:

- Buena disposición por parte de los miembros de la organización, debido al conocimiento de parte del nivel estratégico del beneficio de esta metodología.
- Un ambiente propicio a cambios en los sistemas de gestión, dada la condición actual de la organización (véase sección 5.2.1.3)

No obstante, se presentan las siguientes debilidades:

- Falta de experiencia y conocimiento de gestión de miembros tentativos para el uso del cargo de encargado de mantenimiento.

- Una cultura organizacional afín a la tecnología y a las habilidades técnicas por sobre la gestión, lo cual es propio de ambientes asociados a la innovación tecnológica y el desarrollo de la creatividad.

Por lo cual, tal como fue mencionado en la sección 5.5, se requiere estimular a los miembros de la organización para el uso de estas herramientas para la identificación y posterior análisis de riesgo, las bases de datos tales como el registro de uso de equipos y registro de mantenimientos correctivos deben considerar los aspectos planteados en las secciones 5.4 y 5.5 para entregar información confiable que sustente el uso de estas herramientas.

6.2.2 Análisis de riesgo

El propósito del análisis de riesgo es entender la naturaleza y características del riesgo, en conjunto con su respectivo nivel admisible, en donde el análisis tiene que considerar fuentes de riesgo, incertidumbres y consecuencias; un evento puede tener múltiples causas y consecuencias, y pueden afectar múltiples objetivos. Una vez realizado el proceso de identificación de los riesgos asociados a cada factor de análisis, es necesario determinar sus causas y efectos de ellos.

Para determinar el impacto operacional, se define en el contexto operacional un indicador propuesto mediante la **Ecuación 5** de lo cual se obtiene la jerarquización de la **Tabla 5.2**. en donde se propone una jerarquización por las horas medias de uso de los activos presentes en dicha categoría. Utilizando el criterio de riesgo expuesto en la **Tabla 6.1**, se obtiene lo siguiente:

Tabla 6.7: Jerarquización de categorías de activos principales de FabLab mediante el indicador propuesto, uso medio unitario mensual.

Fuente: Elaboración propia,

Ranking	Categoría	Factor de impacto operacional
1°	Torno	4
2°	Impresora 3D	3
3°	Cortadora Laser	2
4°	Router CNC	1
5°	Cirqoid	0

Es necesario destacar que cuantitativamente las desviaciones estándar son elevadas, pero cualitativamente se analiza en la sección 5.2.1.5 que el comportamiento de la jerarquización empleada es constante en los 3 meses de estudio, con variaciones mínimas en las 2 categorías inferiores para los meses de mayo y julio.

Analizando el comportamiento en el tiempo de dicha valoración, se tiene que el ranking de activos puede variar de un mes a otro, lo cual es propio del contexto operacional variable analizado en el Capítulo 5. Considerando esto, la evaluación propuesta de impacto operacional debe ser frecuentemente monitoreada debido a los constantes cambios en los tiempos de operación.

Para el análisis de costos de mantenimiento se utilizan las definiciones de [15] las cuales incluyen gastos en mano de obra, materiales y terceros. Este se adjunta con la flexibilidad del repuesto, la cual se determina en base a la ubicación del proveedor del repuesto asociado al modo de falla.

Para los riesgos de salud y medio ambientales se utiliza una adaptación de la pauta entregada por [27] donde a cada modo de falla real obtenido se le asocia el factor de riesgo, riesgo, causa y consecuencia, en conjunto con el factor de severidad expuesto en la sección 6.1.3.

La valoración de riesgo asociados a los factores de salud-medio ambiente, costos de mantenimiento y flexibilidad son calculados y expuestos en anexos desde la **Tabla B.1** a **Tabla B.4** del Anexo B.

Posterior a la cuantificación de todos los riesgos asociados a los modos de falla presentes en el registro de mantenimientos correctivos de FabLab, se valoran las consecuencias mediante la **Ecuación 7** y se exponen en la **Tabla B.5** del anexo B.

La norma establece que se debe tener en consideración que el análisis de riesgo puede ser influenciado por divergencias de opiniones, sesgos de información, y juicios sobre la percepción de riesgo, en donde la norma ISO 31.1010 [14] establece que para la evaluación de riesgo mediante índices de riesgo se tiene la desventaja que se pueden generar malas interpretaciones que pueden llevar a resultados inconsistentes, por lo cual estos deben ser validados por la organización.

6.2.3 Evaluación de riesgo

En la evaluación de riesgo se debe comparar los niveles de criticidad obtenidos para las distintas categorías de activos presentes en el proceso de valoración de riesgo con el criterio de clasificación expuesto en la **Tabla 6.5**.

Se establece en la sección 6.1.3, en la definición de criterio de riesgo que para generar la evaluación de riesgo se estratifica mediante percentiles, para realizar dicha estratificación se utiliza la función del software *Microsoft Excel*, RANGO.PERCENTIL.EXC(), y se compara con el criterio para la evaluación de criticidad obteniendo lo siguiente:

Tabla 6.8: Evaluación de índices de criticidad mediante percentiles.

Fuente: Elaboración propia, percentil obtenido mediante software *Microsoft Excel*.

Maquina	Tipo de falla	Criticidad	Percentil	Evaluación
Cortadora Laser	Rotura de lente	10.10	85.70%	ALTA
Cortadora Laser	Primera etapa obstruida.	5.40	57.10%	MEDIA
Cortadora Laser	Obstrucción general de filtros.	4.80	42.80%	MEDIA
Cortadora laser	Generación de haz descalibrada	3.45	28.50%	BAJA
Cortadora laser	Rotura de serpentín por desgaste.	1.35	0.00%	BAJA
CNC Router	Controlador quemado.	10.20	100.00%	ALTA
Impresora 3D	Falla de calentador de cabezal por desgaste	2.95	14.20%	BAJA
Impresora 3D	Rotura de cable de control de cabezal.	5.90	71.40%	ALTA

Posterior a la evaluación de criticidad, el autor [23] jerarquiza los activos en base a su criticidad sumando todos los impactos en la organización, con lo cual se obtienen las siguientes criticidades acumuladas:

Tabla 6.9: Jerarquización de activos en base a la criticidad acumulada de modos de falla.

Fuente: Elaboración propia.

Ranking	Categoría	Criticidad
1°	Cortadora Laser.	25.1
2°	CNC Router.	10.2
3°	Impresora 3D.	8.85
4°	Torno.	0
5°	Cirqoid.	0

Ya habiéndose realizado la jerarquización de los activos, [23] propone organizar los modos de fallas mediante una matriz de riesgo:

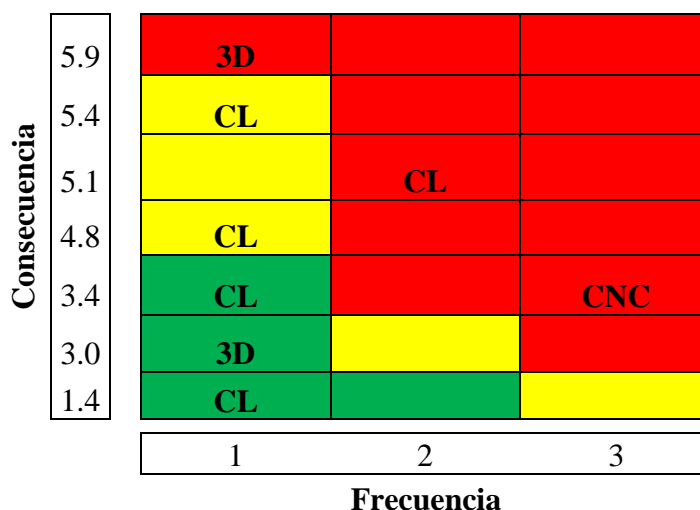


Figura 6.1: Matriz de riesgo de modos de falla reales de activos de FabLab.

Fuente: Elaboración propia.

Los controles existentes de la organización realizan prevención de riesgos asociados a la salud y medio ambiente, por lo cual ese control se debe mantener, mientras que en la actualidad no cuenta con ningún mecanismo de control para las consecuencias asociadas al impacto operacional y los costos de mantenimiento, por lo cual se propone el uso de los elementos de control de riesgos utilizados en el presente trabajo.

6.3 Tratamiento del riesgo

Ya establecida la valoración de riesgo en base a los requerimientos de la norma ISO 31.000, el siguiente procedimiento es realizar el tratamiento de riesgo, el cual consiste en acciones para mitigar las consecuencias de los efectos asociados a los índices de criticidad obtenidos en la valoración de riesgo, en donde se tiene lo siguiente:

La categoría de activos “Router CNC” presenta una criticidad elevada para el modo de falla “controlador quemado”, por lo cual dentro de las recomendaciones se establece la revisión de las condiciones operacionales del activo y de los procedimientos de mantenimiento, de la misma forma que la “Rotura de lente” presente como modo de falla en los sistemas de cortado laser.

La categoría “Impresora 3D” presenta una elevada criticidad en el modo de falla, “rotura de cable de control de cabezal” debido a que los repuestos del activo se deben adquirir fuera del país, por lo cual se incluye en las recomendaciones del trabajo de título la evaluación de adquisición de componentes de bajo costo de dicha máquina de forma preventiva para mitigar el efecto de la baja flexibilidad de sus repuestos.

Los índices de criticidad valorados como “Media” y “Baja” se recomienda revisar acciones, posterior a la mitigación de los riesgos asociados a las criticidades con valoración “Alta”.

Ya habiéndose definido las acciones recomendadas de tratamiento de riesgo y el puntaje acumulado de cada activo, se establece la categoría “Cortadora Laser” como activo crítico para la elaboración del propuesto de plan de mantenimiento.

7. Análisis RCM de sistemas de cortado laser y actividades de mantenimiento de FabLab

En el Capítulo 6 se lleva a cabo la evaluación de criticidad de los activos de FabLab con la finalidad de determinar la categoría de activos con mayor criticidad acumulada, con lo cual se escoge la categoría de “Cortadora Laser”. Dicha categoría involucra a 2 sistemas, en donde cada uno de ellos cuenta con una cortadora laser, un extractor, un compresor y un equipo enfriador, difiriendo ambos sistemas en la potencia de corte, capacidad de la mesa de corte, y del enfriador necesario para su funcionamiento.

En el presente capítulo se utilizan métodos para analizar los modos de fallas reales y potenciales asociados a los activos, y se detalla el plan de mantenimiento que actualmente realiza la organización con la finalidad de determinar las necesidades para el propuesto de plan de mantenimiento. Considerando el análisis del estado de mantenimiento, en el cual no se cuenta con suficiente información para determinar qué política de mantenimiento es más apropiada, se evalúa su selección mediante el método de decisión RCM expuesto por [19] y detallado en la norma SAE JA 1011 [3], en donde inicialmente es necesario analizar las funciones, fallas funcionales, modos de fallas y efectos, para luego realizar una valoración de riesgo mediante índices NPR usando la metodología de [15], con lo cual se genera una selección de modos de falla críticos, en donde los modos de falla con valoración NPR mayor a 100, o severidad mayor a 8 se analizan en conjunto con el plan de mantenimiento actual y se determinan necesidades de mantenimiento. A continuación se detalla dicho procedimiento:

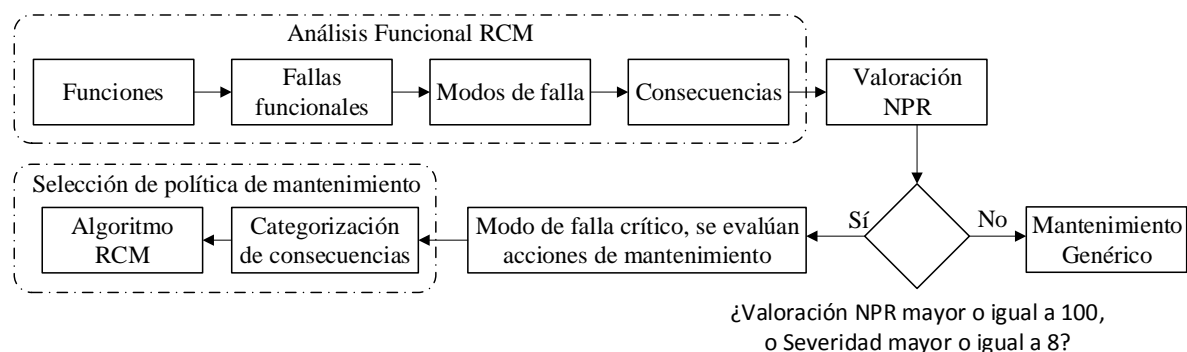


Diagrama 7.1: Análisis RCM para obtener modos de falla críticos y posteriormente seleccionar políticas de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia, basado en la metodología de la norma [3], en conjunto con el método de numeración de prioridad de riesgo propuesto por [15].

Cabe señalar lo detallado por la norma [3], en donde los análisis realizados deben ser validados por la organización y a su vez se considera lo detallado por [19] donde establece que la primera fuente a considerar son los miembros de la organización dado que ellos están ligados directamente al contexto operacional en el cual se desenvuelve el activo, dicha fuente de información es complementada con documentación técnica y consultas a proveedores.

7.1 Definición de contexto operacional

Antes de la realización de cualquier análisis de modos de falla, se debe tener entendimiento claro del contexto operacional del sistema o activo, dado que el análisis RCM debe involucrar todos los aspectos que pueden influir en el deterioro funcional del activo, en base a lo planteado por [19] se definen y cuantifican las variables operacionales influyentes en las operaciones de sistema de cortado laser:

Tabla 7.1: Contexto operacional de sistema de cortado laser.

Fuente: Elaboración propia.

Contexto operacional	
Materiales de trabajo:	MDF, Madera, Acrílico, Pino, Cartón Piedra.
Tiempo de operación [h/operación]	1,90
Desviación estándar [h/operación]	2,00
Redundancias en equipos.	Sin redundancia.
Estándares medio ambientales.	No emitir contaminación.
Cantidad de personas que mantienen:	2 personas.
Cantidad media de personas que utilizan activo mensualmente	5 personas.
Repuestos en stock.	No hay repuestos en stock.
Condiciones ambientales.	Controladas.

De las variables mencionadas en la **Tabla 7.1**, se desprenden las siguientes restricciones:

- **Materiales:** Existe una gran cantidad de materiales, en donde por cada uno varían los parámetros de potencia de corte, velocidad de corte, emisiones de gases y material particulado. Los cual afecta directamente en las frecuencias de sustitución de filtros de aire.
- **Tiempo medio de operación:** es de 1,9 [horas/operación], con una desviación estándar de 2 [horas/operación], lo cual se considera como altamente variable.

- **Condiciones ambientales:** Al tener condiciones ambientales controladas, se pueden descartar todos los modos de fallas asociados a cambios bruscos de temperatura, o de condiciones de intemperie.
- **Estándar medio ambiental:** FabLab busca no emitir contaminación al medio ambiente, por lo cual el extractor no puede quedar inhabilitado, y se debe ser conservador en las frecuencias de sustitución asociadas a este equipo.
- **Configuración:** Los sistemas en términos de bloques de confiabilidad son en serie, donde no se presenta ninguna redundancia y la inhabilitación de uno, inhabilita al sistema completo para funcionar.

Teniendo en cuenta estas restricciones se da inicio al análisis RCM.

7.2 Descripciones funcionales de los equipos

Ya teniendo definido el contexto operacional de los activos como requisito de [3] se establecen las funciones, para lo cual se utiliza lo propuesto por [15] haciendo uso de las estructuras técnicas de equipos detalladas desde el **Diagrama C.1** hasta el **Diagrama C.4** en el Anexo C, donde este se establece en base a lo planteado por [19], el cual señala que el nivel de análisis funcional se define considerando las capacidades organizacionales, definiendo el nivel de detalle hasta el reconocimiento del componente que falla, más que el de todos los modos de falla posibles del componente.

Ya teniendo reconocimiento de los diversos subsistemas y componentes de los activos en análisis, se realiza la declaración funcional de cada uno siguiendo la estructura de un verbo, objeto y estándar que mantener, en donde dependiendo de la información disponible se establece cuantitativamente.

7.3 Identificación de fallas funcionales

La norma [3] establece que la falla funcional se define como “condiciones que no permiten satisfacer la función declarada”, con lo cual se definen dichas condiciones para cada una de las funciones declaradas en la sección 7.2.

7.4 Identificación de Modos de falla

La norma [3] menciona la importancia de que estos modos de falla sean definidos acorde a la capacidad de estos de generar la falla funcional, en donde su definición debe ser reconocida por la organización, por lo cual se utiliza la consulta directa con los miembros de FabLab y la documentación técnica disponible, en donde por cada falla funcional se identifican los modos de falla potenciales que podrían afectar a los equipos presentes en el sistema, y estos deben tener la causalidad suficiente para poder escoger una política de mantenimiento apropiada, en la columna posterior a la descripción funcional de los subsistemas, se incluyen modos de falla reales, modos de falla que potencialmente podrían ocurrir, y modos de falla que podrían ser prevenidos mediante un plan de mantenimiento apropiado, donde por requerimiento de [3] estos deben dar la posibilidad de incluir el motivo de ocurrencia producto de, deterioro, defectos de diseño, o por fallos humanos de operación o atribuibles a mantenimiento.

7.5 Identificación de efectos

Entendiendo los efectos como la “manifestación de los modos de falla” [15] en donde la norma [3] señala que se deben definir como lo que pasaría si no se realiza ninguna acción para anticipar, prevenir o detectar la falla, se establecen mediante consultas con miembros de FabLab los cuales desde el año 2013 están trabajando con tecnologías similares a las utilizadas en los activos de análisis, y mediante consultas con manuales técnicos y de usuario asociados a los equipos que entregan información sobre los problemas más recurrentes con los equipos, se incluye información necesaria para determinar si este puede generar algún efecto adverso para el medio ambiente, para las operaciones, daño físico, y lo necesario para restaurar la funcionalidad del sistema, lo cual posteriormente determina el puntaje de severidad en la valoración NPR propuesta por [15].

Las primeras 5 columnas del análisis RCM exponen el procedimiento de trabajo empleado, encontrándose estos desde la **Tabla D.1** hasta la **Tabla D.16** del Anexo D.

7.6 Selección de modos de falla críticos mediante Valoración NPR

En esta sección se establece una valoración numérica de los modos de falla con la metodología del autor [15]. Para posteriormente establecer los modos de falla críticos que deben ser analizados en conjunto con el plan de mantenimiento actual de la organización.

Los modos de falla críticos que no presenten acciones para disminuir sus efectos, se consideran posteriormente como entrada en la elaboración del propuesto de plan de mantenimiento.

Se tiene que el autor [15] establece que se debe asignar una puntuación numérica del 1 al 10 para cuantificar la severidad de las consecuencias de los fallos, su probabilidad de ocurrencia, y la detección de dichos fallos antes de generar la falla funcional, pero no establece los criterios para su valoración, por lo cual se utiliza el ejemplo planteado por la norma IEC 60.812 [28], adaptado a las necesidades y contexto de FabLab.

Para la severidad de las consecuencias, se establece que las primeras 2 numeraciones planteadas no afectan la disponibilidad del equipo, cuantificando solo el efecto en el deterioro de la calidad del producto final, mientras que las siguientes 3 numeraciones involucran la no disponibilidad del activo, y dado el contexto universitario en el cual está inmerso la organización (analizado en el Capítulo 5) se establece con mayor severidad a cualquier modo de fallo que podría afectar a la salud o medio ambiente.

Tabla 7.2: Criterio para valoración de la severidad de las consecuencias de modos de falla de activos de FabLab.

Fuente: Elaboración propia, basado en ejemplo de la norma [28].

Severidad	Descripción
1	El equipo puede seguir operando, pero ve reducida la calidad del trabajo parcialmente.
2	El equipo puede seguir operando, pero ve reducida la calidad del trabajo significativamente.
4	El equipo no puede seguir operando, pero se cuenta con repuesto en stock.
6	El equipo no puede seguir operando, pero se puede comprar el repuesto localmente.
8	El equipo no puede seguir operando, y se debe comprar el repuesto fuera del país. / Se debe externalizar el mantenimiento.
10	El equipo no puede seguir operando, debido al riesgo a la salud o medio ambiente.

Es necesario asignar una probabilidad de ocurrencia, lo cual debe estar ligada al contexto operacional y al historial de fallos de los equipos de FabLab, en donde las primeras 3

valoraciones son para modos de falla potenciales, en donde con miembros más experimentados de FabLab se establece la ocurrencia esperada, mientras que las últimas 3 se utilizan para los modos de fallas reales detectados, en donde también se establece la ocurrencia esperada para la manifestación de estos:

Tabla 7.3: Criterio para valoración de la ocurrencia de los modos de falla de activos de FabLab.

Fuente: Elaboración propia, basado en ejemplo de la norma [28].

Ocurrencia	Descripción
1	El modo de falla no ha ocurrido. Pero se espera que ocurra cada 5 años.
2	El modo de falla no ha ocurrido, pero se espera que ocurra cada 2 años.
4	El modo de falla no ha ocurrido, pero se espera que ocurra cada 1 año.
6	El modo de falla ha ocurrido, y se manifiesta una vez al año.
8	El modo de falla ha ocurrido, y se manifiesta entre 2 a 3 veces en el año.
10	El modo de falla ha ocurrido y se manifiesta más de 3 veces en el año.

Se debe establecer una evaluación de los mecanismos de detección en base a la manifestación del efecto asociado al modo de falla y a las capacidades de la organización para poder detectarla, en donde se genera una escala numérica con un mínimo de 1 para los fallos detectables fácilmente con los sentidos, mientras que una graduación de 10 para los que son difícilmente detectables, incluso con instrumentos de detección:

Tabla 7.4: Criterio para valoración de la probabilidad de detección de las fallas funcionales de activos de FabLab.

Fuente: Elaboración propia, basado en ejemplo de la norma [28].

Detección	Descripción
1	La falla funcional puede ser descubierta sin inspección y normalmente antes de que las consecuencias se manifiesten.
2	La falla funcional es aparente, pero cuesta detectarlo sin una inspección.
4	Mediante una inspección la falla funcional es fácil de descubrir antes de que se genere el efecto.
6	Mediante una inspección la falla funcional se descubre normalmente antes de que se genere el efecto.
8	Mediante una inspección, la falla funcional es difícil de descubrir e inevitablemente se generará el efecto.
10	No se pueden inspeccionar apropiadamente los efectos y la falla funcional no puede ser detectada.

Considerando los criterios expuestos, se hace uso de la **Ecuación 1** y se adjuntan las valoraciones NPR a cada uno de los modos de falla de los activos en análisis, posteriormente se validan dichas valoraciones con la organización y se hace uso de los criterios recomendados por [15] para determinar los modos de falla críticos:

- Severidad de consecuencias de modos de falla mayor o igual a 8.
- Valoración NPR de modos de falla mayor o igual a 100.

Cumpléndose uno o más de estos criterios, se establecen los modos de falla críticos y estos se califican con una evaluación “No tolerable”. Todas las valoraciones NPR y evaluaciones se adjuntan en los análisis RCM desde la **Tabla D.1** hasta la **Tabla D.16** del Anexo D.

7.7 Análisis de modos de falla críticos

A continuación, se realiza un análisis de los modos de falla críticos obtenidos en la sección 7.6, donde se tienen las siguientes causas principales de criticidad:

- **Dispositivos de seguridad:** Todos los dispositivos de seguridad del activo “Enfriador” se evaluaron con severidad mayor o igual a 8 producto de que la organización no cuenta con los conocimientos para hacer reconocimiento y remplazo del componente, ni tampoco para detectar preventivamente su falla y así evitar el desarrollo de las consecuencias (detección igual a 10). Mientras que los dispositivos de seguridad de la cortadora laser tienen una severidad de 10, esto es producto a que una falla de cualquiera de ellos, hace propenso al sistema de generar daños a la salud-medio ambiente.
- **Componentes electrónicos:** Los componentes de las máquinas cortadoras laser no cuentan con una buena capacidad de respuesta por parte del proveedor, donde los componentes electrónicos posiblemente deben ser importados (severidad igual a 8) y no existen mecanismos de detección ni prevención de consecuencias (detección igual a 10). A su vez se debe considerar que la probabilidad de ocurrencia se considera baja, dado que no están en un ambiente con contaminantes que podrían acelerar su proceso de deterioro. Los componentes electrónicos del enfriador son más fáciles de conseguir para la organización debido a que son equipos con alta disponibilidad en el mercado, por lo cual no tienen criticidad elevada.

- **Componentes de difícil mantenibilidad:** Actualmente la organización no cuenta con los elementos para el desmontaje de rodamientos, ni el conocimiento para desmontar he inspeccionar el estado de devanado de estatores, por lo cual estos deben ser externalizados (severidad igual a 8), a su vez que no cuenta con medios de detección en caso de que se manifiesten las consecuencias de las fallas (detección igual a 10).
- **Componentes ligados a impactos de salud-medio ambiente:** Los filtros del extractor tienen a la finalidad de disminuir las emisiones de gases y contaminantes que pueden generar daños para la salud-medio ambiente, por lo cual el hecho de que desarrollen sus consecuencias, genera acumulación de partículas nocivas para la salud y medio ambiente, teniendo una valoración de severidad de 10. Al igual que los elementos de transmisión del activo, donde una falla funcional completa de ellos genera riesgos de incendio.

7.8 Análisis de actividades de mantenimiento de FabLab y modos de falla

En la actualidad FabLab tiene actividades de mantenimiento las cuales se realizan a frecuencia constante, y abarcan mantenimientos rutinarios y mantenimientos para evitar el deterioro acelerado de los componentes con mayor desgaste por fricción, en donde se tiene las siguientes actividades:

Tabla 7.5: Plan de mantenimiento actual de sistemas de cortado laser de FabLab.

Fuente: FabLab.UTFSM.

Maquina	Frecuencia	Tarea	Componente
Cortadora laser	Cada semana	Limpiar la mesa de trabajo	Mesa de trabajo
	Cada semana	Limpiar los rieles de los ejes XY	Rieles
	Cada semana	Lubricar los rieles de los ejes XY	Rieles
	Cada semana	Limpiar con mucho cuidado el pin de autofocus	Cabezal
	Cada dos semanas	Limpiar los husillos del eje Z	Tornillo sin fin
	Cada dos semanas	Lubricar los husillos del eje Z	Tornillo sin fin
	Cada dos semanas	Limpiar espejos	Espejos
	Cada dos semanas	Limpiar lente	Lente
Extractor de aire	Cada dos semanas	Cambio de 1ra etapa filtro (G3)	Etapas 1
	Cada dos meses	Cambio de 2da etapa filtro (F8)	Etapas 2
	Cada seis meses	Cambio de 3ra etapa filtro (H13)	Etapas 3
	Cada diez meses	Cambio de 4ta etapa filtro (carbón activado)	Etapas 4
Enfriador	Cada 6 meses	Revisar el nivel de agua	Estanque
	Cada 6 meses	Revisar el nivel de contaminación del agua	Estanque

No se cuenta con un registro formal de las actividades de mantenimiento preventivo que permitan asegurar la frecuencia de dichas actividades, llevándose a cabo en base a estimaciones aproximadas por la organización, por lo cual dentro de la propuesta de implementación se debe adjuntar un proceso de registro de actividades de mantenimiento preventivo.

Considerando los análisis de la sección 7.7, el plan de mantenimiento actual no considera actividades preventivas de dispositivos de seguridad, componentes electrónicos, y componentes de difícil mantenibilidad. Cubriendo solamente los filtros del extractor, donde las frecuencias de sustitución cíclicas fueron entregadas por el proveedor, pero no están adaptadas al contexto de operación debido a la falta de información sobre las operaciones, la cual en la actualidad se está recopilando y es suficiente para realizar cambios en dicha frecuencia.

8. Propuesta de plan de mantenimiento, y recursos necesarios

Teniendo conocimiento de los modos de falla críticos, habiéndose realizado un análisis de estos y de las acciones de mantenimiento que actualmente lleva a cabo la organización. Se establece la necesidad de generar acciones de mantenimiento que puedan disminuir las consecuencias de los modos de falla críticos y un sistema de administración del trabajo para un registro de ello.

En el presente capítulo se genera un propuesto de sistema de administración del trabajo que sustente la ejecución del plan de mantenimiento, para posteriormente continuar el desarrollo de la metodología RCM en los modos de falla críticos utilizando la estructura de la norma [3], en conjunto con el algoritmo de decisión RCM expuesto en la norma SAE JA 1012 [21].

Donde las selecciones de políticas de mantenimiento permiten la generación de acciones proactivas de mantenimiento y de tareas de búsquedas de fallas las cuales se convierten posteriormente en parte integral del propuesto de plan de mantenimiento.

8.1 Elaboración de sistema de administración del trabajo

El autor [18] plantea que en las etapas tempranas del mantenimiento el enfoque está centrado en las actividades de mantenimiento, en el transcurso del aprendizaje de la organización y el conocimiento de los equipos, surgen las bases de datos y el sistema de información de mantenimiento que se encargan de dar sustento a las siguientes etapas de mantenimiento. Actualmente FabLab cuenta con un sistema el cual fue analizado en el Capítulo 5, en donde no hay un registro estandarizado de mantenimiento, por lo cual la propuesta de plan de mantenimiento debe contar con un sistema de administración de trabajo estructurado que permita generar registros que lo sustenten. Los sistemas tradicionales de mantenimiento utilizan la orden de trabajo (OT) para llevar a cabo sus registros [15], la cual es una herramienta de documentación que contiene la información relevante acerca de las intervenciones que han sido realizadas en el activo físico. En esta **OT** se registra cualquier acción de mantenimiento realizada, donde se define un responsable del mantenimiento el cual supervisa la realización de la actividad, y un ítem de revisión adicional para el responsable de sustentar la base de datos de mantenimiento. Se utiliza como referencia el formato de **OT** expuesto por [15], el cual se ajusta a los requerimientos de FabLab, en donde

se han realizado modificaciones debido a lo específico de algunos ítems considerados por el autor. La orden de trabajo se expone en la **Figura E.1** del Anexo E.

8.1.1 Panel de mantenimiento y gestión visual

Dada la alta delegación de labores por parte de la organización, se tiene que existe un Encargado de Mantenimiento (véase sección 5.2.1.2) en donde este realiza la comunicación y realización de actividades de mantenimiento rutinarias de FabLab, en el presente trabajo de título se generan actividades adicionales y registros los cuales deben ser llenados para poder generar sustento a una base de datos de mantenimiento, la cual es necesaria para adecuar las frecuencias de las actividades [15], donde también se debe tener en consideración que dichos registros en la actualidad son difíciles de efectuar dado que no se tiene la presencia constante del Encargado de Mantenimiento en la organización, por lo cual surge la necesidad de abordar el problema de la planificación, comunicación y registro de las actividades de mantenimiento dentro del propuesto.

Para abordar este problema se hace uso de gestión visual la cual, debe facilitar el trabajo de comunicación y registro, en donde debe contar con información relevante para la organización y reflejar la cultura y valores organizacionales [22]. Teniendo en consideración dichos aspectos mencionados, se genera el propuesto de panel de mantenimiento.

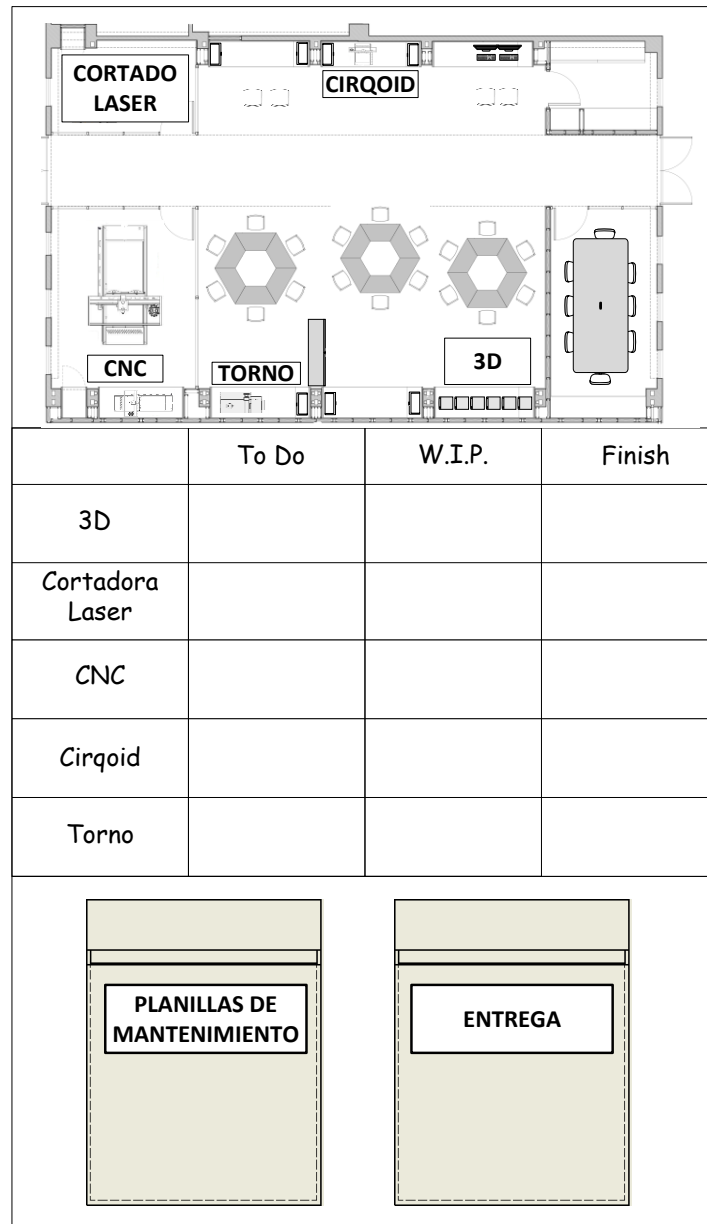


Figura 8.1: Propuesta de panel para registro y coordinación de actividades de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia, basada en el modelo planteado por [29].

En la parte superior se señala la criticidad de los equipos, el cual mediante el uso de colores semáforo (rojo, amarillo y verde), comunica la criticidad del periodo anterior con la finalidad de generar conciencia y cuidado entorno a los activos más críticos. Mientras que en la zona intermedia, se busca facilitar la coordinación del mantenimiento en donde el coordinador de mantenimiento, tendrá la función de comunicar la actividad o grupo de actividades de mantenimientos que se deben realizar mediante “post it”, este se coloca en la fila

correspondiente a la categoría a la cual se le hará mantenimiento, y dependiendo de la condición de la actividad, se coloca en alguna de las 3 columnas que se detallan a continuación:

- **To Do:** Actividades de mantenimiento en espera de ser recibidas por los ayudantes.
- **W.I.P.:** Actividades de mantenimiento que se están llevando a cabo por la organización, y que debido a su extensión se encuentran en proceso de ejecución.
- **Finish:** Actividades de mantenimiento terminadas, estos posteriormente los retira el Encargado de Mantenimiento.

Ya habiéndose generada la comunicación de la actividad de mantenimiento programada, se procede a hacer uso de la zona inferior de dicho panel, en donde se toma un registro de mantenimiento, y luego de terminarlo se cierra y deposita en la zona de entrega, lo cual busca facilitar el trabajo de llevar a cabo los registros de actividades de mantenimiento realizadas.

8.2 Generación de actividades de mantenimiento mediante proceso lógico de decisión RCM

Una vez abordados los pasos previos a un plan de mantenimiento preventivo, generando un sistema de administración de trabajo y dejando un registro de ello, el autor [18] plantea la elaboración de planes de inspección y/o mantenimiento de carácter preventivo para evitar pérdidas por averías inesperadas. Lo cual se inicia realizándose la categorización de consecuencias de los modos de falla críticos determinados en la sección 7.6, donde se debe reconocer lo siguiente:

- Tipo de falla funcional: Falla Evidente (FE), o Falla oculta (FO).
- Independencia: Modo de falla (MF) o Falla Múltiple (FM).
- Identificar si tiene consecuencias para el medio ambiente.
- Identificar si tiene consecuencias operacionales.

Reconociendo y caracterizando las consecuencias, se exponen los resultados de entrada para el algoritmo de decisión RCM desde la **Tabla D.17** hasta **Tabla D.25**.

Ya teniendo la información necesaria para seleccionar políticas de mantenimiento, el último paso previo que se debe abordar, es la investigación que permita tomar decisiones sobre factibilidad técnica de acciones proactivas de mantenimiento, donde para el caso del mantenimiento predictivo, existen una cantidad de técnicas a condición disponibles en el mercado, las cuales son expuestas en la **Tabla D.26** del Anexo D. En donde para un modo de falla se puede presentar más de una tarea a condición factible de realizar, en caso de escoger monitorear la condición de una variable (si es que es factible y vale la pena realizarlo), se establece la selección en base a su relación costo/beneficio [21].

En la aplicación del proceso de análisis RCM cabe destacar que la factibilidad técnica de mantenimientos preventivos se limita a los filtros del extractor, debido a que no hay información suficiente para generar una estimación de la vida promedio del resto de los componentes asociados a los modos de falla críticos, por lo cual los procesos lógicos de decisión separados para tareas a condición y reacondicionamiento/sustitución cíclicos, se juntan en uno solo de “tareas proactivas”, teniendo entendimiento de que la norma SAE JA 1012, da prioridad a las tareas a condición por sobre las de sustitución cíclica de componentes.

Considerando todos los aspectos mencionados, se tienen los siguientes procesos lógicos de decisión RCM, los cuales se exponen utilizando el formato del trabajo de título de [30].

8.2.1 Activo de Sistema crítico: Enfriador

En el Capítulo 7, se realiza el análisis funcional RCM en donde se obtiene un total de **7 fallas funcionales** con **19 modos de falla** susceptibles de ocurrir, de los cuales se determina de alto riesgo los siguientes:

1. Termostato descalibrado por desgaste.
2. Serpentin con fuga por desgaste
3. Falla de sensor de caudal por desgaste.
4. Falla de sensor de temperatura por desgaste.

Utilizando el algoritmo de decisión RCM del **Diagrama D.1** del Anexo D, se tiene lo siguiente:

Modo de Falla	Termostato descalibrado por desgaste.
Categoría	Oculto, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	No, no hay una variable a controlar, ni data para realizar sustitución cíclica.
¿Es factible de realizar una tarea de búsqueda de fallas?	Sí, se puede verificar la configuración por defecto, midiendo la temperatura del tanque con un termómetro y comprobando diferencias.

Modo de Falla	Serpentín en fuga por desgaste.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	No, no hay una variable a controlar, ni data para realizar sustitución cíclica, no se genera actividad programada.

Modo de Falla	Falla de sensor de caudal por desgaste.
Categoría	Oculto, consecuencias operacionales y medio ambiente.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	No, en caso de fallar no hay forma de saberlo hasta que se manifieste alguna falla múltiple.
¿Es factible de realizar una tarea de búsqueda de fallas?	Sí, el sensor en un interruptor por variación de campo magnético, se puede acercar un elemento metálico o imán y comprobar su funcionamiento en operación.

Modo de Falla	Falla de sensor de temperatura por desgaste.
Categoría	Oculto, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Sí, se puede determinar su falla anexando una termocupla en la manguera de salida del activo.
¿Es factible de realizar una tarea de búsqueda de fallas?	Sí, se puede verificar su funcionamiento realizando una medición del tanque con un termómetro y comparándola con la lectura del activo.

8.2.2 Activo de sistema crítico: Cortadora Laser

En el análisis RCM, se obtiene un total de **12 fallas funcionales** con **24 modos de falla** susceptibles de ocurrir, de los cuales se determina de alto riesgo los siguientes:

1. Desgaste de lente.
2. Desgaste de espejos.
3. Rotura de Tubo CO₂ por temperatura.
4. Fuente de poder quemada por desgaste.
5. Placa de potencia quemada por desgaste.
6. Transformador quemado por desgaste.
7. Placa de control quemada por desgaste.
8. Falla de elementos de transmisión por desgaste (Z).
9. Falla de elementos de transmisión por desgaste (XY).
10. Falla de motor DC por desgaste (Z).
11. Falla de motor DC por desgaste (XY).
12. Falla de contactos por desgaste.
13. Falla de parada de emergencia por desgaste.

Usando el algoritmo de decisión RCM se obtiene lo siguiente:

Los modos de falla 1 y 2 se agrupan en “Desgaste de lentes y espejos”.

Modo de Falla	Desgaste de lente y espejos.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Si, se puede monitorear mediante una prueba estandarizada comprobando el consumo de potencia y calidad de corte para determinar anomalías ópticas.

Modo de Falla	Rotura de tubo CO ₂ por temperatura.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Si, se puede utilizar una termocupla en el conducto de entrada de fluido refrigerante, señalando aumentos de temperatura por sobre los 37°C.

Dado que el nivel de análisis, las tareas a condición y las categorías de los modos de falla 4,5,6 y 7 se tratan de la misma manera, por síntesis se agrupan en “Falla de sistema eléctrico”.

Modo de Falla	Falla de sistema eléctrico.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	No, a pesar de que se pueden realizar tareas a condición factibles de realizar tales como termografía infra roja o el uso de un termómetro infra rojo para la detección de puntos calientes, no vale la pena realizarla en base a su relación costo/beneficio. No se realizan acciones de mantenimiento programadas.

Los modos de falla 8 y 9 se agrupan en “Falla de elementos de transmisión por desgaste”.

Modo de Falla	Falla de elementos de transmisión por desgaste.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales, salud medio ambiente.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Si, se puede controlar visualmente el estado de correas antes de la rotura, de dientes de poleas dentadas y de husillos, se verifica funcionamiento mediante tarea a condición de calidad de producto.

Los modos de falla 10 y 11 se agrupan en “Falla de motores DC por desgaste”.

Modo de Falla	Falla de motores DC por desgaste.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales, salud medio ambiente.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Sí, se presentan síntomas de desgaste antes de la falla, tales como golpeteos y sonidos anómalos, se pueden detectar síntomas antes de la falla mediante inspección visual.

Modo de Falla	Falla de contactos por desgaste.
Categoría	Oculto, consecuencias operacionales y de salud-medio ambiente.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	No, no hay una variable a controlar, ni data para realizar sustitución cíclica.
¿Es factible técnicamente de realizar una tarea de búsqueda de fallas?	Sí, se puede verificar su realizando una prueba en funcionamiento en operación.

Modo de Falla	Falla de parada de emergencia por desgaste.
Categoría	Oculto, consecuencias operacionales y de salud-medio ambiente.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	No, no hay una variable a controlar, ni data para realizar sustitución cíclica.
¿Es factible técnicamente de realizar una tarea de búsqueda de fallas?	Sí, se puede revisar su estado realizando una prueba en operación.

8.2.3 Activo de sistema crítico: Compresor

En el análisis RCM se obtiene un total de **3 fallas funcionales** con **8 modos de falla** susceptibles de ocurrir, de los cuales se determina de alto riesgo los siguientes:

1. Falla de cojinetes y rodamientos por desgaste.
2. Estator con devanado quemado por desgaste.

Modo de Falla	Falla de cojinetes y rodamientos por desgaste.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Sí, antes de la falla completa se puede monitorear condición mediante inspección de estado de giro de eje, o una inspección en funcionamiento mediante termómetro infrarrojo.

Modo de Falla	Estator con devanado quemado por desgaste.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Sí, el deterioro del devanado del estator produce aumentos de temperatura los cuales pueden ser medibles mediante inspección con termómetro infrarrojo.

8.2.4 Subsistema de sistema crítico: Extractor

En el análisis RCM se obtiene un total de **5 fallas funcionales** con **13 modos de falla** susceptibles de ocurrir, de los cuales se determina de alto riesgo los siguientes:

1. Falla de cojinetes y rodamientos por desgaste.
2. Estator con devanado quemado por desgaste.
3. Primera etapa (G3) obstruida por ciclos de operación
4. Segunda etapa (F8) obstruida por ciclos de operación
5. Tercera etapa (H13) obstruida por ciclos de operación
6. Cuarta etapa (C.A.) obstruida por ciclos de operación.

Modo de Falla	Falla de cojinetes y rodamientos por desgaste.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Sí, antes de la falla completa se puede monitorear condición mediante inspección de estado de giro de eje, o una inspección en funcionamiento mediante termómetro infrarrojo.

Modo de Falla	Estator con devanado quemado por desgaste.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Sí, el deterioro del devanado del estator produce aumentos de temperatura los cuales pueden ser medibles mediante inspección con termómetro infrarrojo.

Dado que el nivel de análisis, las tareas a condición y las categorías de los modos de falla 3,4,5 y 6 se tratan de la misma manera, por síntesis se agrupan en “filtro de aire obstruido”:

Modo de Falla	Filtro de aire obstruido.
Categoría	Evidente, consecuencias operacionales.
¿Es factible técnicamente programar alguna tarea proactiva de mantenimiento y vale la pena realizarla?	Sí, se puede realizar una actividad de sustitución cíclica, la frecuencia se determina en base a la información entregada por el proveedor y el mes de mayor uso registrado por la organización como referencia.

8.2.5 Diseño de tarea a condición de calidad de producto para Cortadora laser

Las máquinas cortadoras laser de la organización cuentan con transmisión de correas, las cuales se pueden destensar y generar pérdidas en las tolerancias de corte, de la misma forma que dichas tolerancias, en conjunto con el patrón de quemadura pueden mostrar daños o descalibración en el lente y espejos [31], considerando esto, se puede estandarizar un patrón de manufactura y generar una tarea a condición de calidad del producto [19], la cual mediante monitoreo periódico puede mostrar fallas potenciales antes de que se transformen en fallas funcionales. Considerando esto, se tienen las siguientes variables:

- **Desviaciones en las tolerancias de medición:** Falta de precisión en el carro XY, esto se asocia directamente a pérdida de paso por falta de tensión en algunas de las correas de transmisión, o difusión del láser producto de pérdida de rectificación de la superficie de trabajo.
- **Desviaciones en la potencia necesaria para generar el corte:** Asociado a desgaste de espejos, lente, o descalibración de algunos de estos componentes y la superficie de trabajo.
- **Aumento del patrón de quemadura:** Problemas con la capacidad de enfocar del cabezal.

Diseñando una tarea a condición que analice esos 3 parámetros, y debido a la complejidad de dicha tarea, se establece una frecuencia trimestral, la cual se debe ajustar considerando el comportamiento del activo en el transcurso del tiempo. La tarea a condición de calidad del producto es expuesta en la **Figura E.2** del Anexo E.

8.2.6 Frecuencia de tareas de sustitución cíclica

Del uso del algoritmo de decisión RCM para analizar la factibilidad técnica de emplear acciones proactivas de mantenimiento en el modo de falla “Filtro de aire obstruido.”, se desprende que es técnicamente factible la aplicación de sustitución cíclica de filtros, donde el contexto operacional altamente variable, no permite estimar su vida útil. No obstante, el proveedor entrega un estimado de vida máxima y mínima de dichos filtros para una jornada operativa de 40 horas semanales, entregando dicha información considerando la incertidumbre asociada al desempeño de la máquina, material empleado y dureza.

Se tiene que el mayor tiempo de uso mensual de uno de los sistemas de la categoría es 27 horas, el autor [19] establece que se debe ser conservador al momento de establecer sustitución cíclica con modos de falla asociados a consecuencias en la seguridad y medio ambiente, por lo cual se usa una estimación de 30 horas mensuales, y la mínima vida útil entregada por el proveedor, con lo cual se tiene lo siguiente:

Tabla 8.1: Cálculo de frecuencia de sustitución cíclica de filtros del Extractor, en donde los ciclos mensuales permitidos se redondean hacia un número inferior conveniente para la planificación de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Sustitución cíclica de filtros			
Filtro	Vida mínima [Horas]	Ciclos mensuales permitidos	Frecuencia de sustitución
Primera etapa: G3	96	3.2	3 meses
Segunda etapa: F3	192	6.4	6 meses
Tercera etapa: H13	768	25.6	2 años
Cuarta etapa: Carbón activo	1152	38.4	3 años

8.2.7 Frecuencia de tareas de búsqueda de fallas

La norma SAE JA 1012 [21], establece que para determinar la frecuencia de tareas de búsquedas de falla lo primero que se debe hacer, es determinar la disponibilidad requerida de funcionamiento del dispositivo de seguridad, existen 2 métodos de cálculo, en donde se debe considerar que FabLab no ha tenido ninguna falla en los dispositivos de seguridad de sus activos, ni estos están inmersos en un contexto operacional productivo (40 horas semanales), por lo cual no están sometidos a un desgaste elevado y se asumen “altamente confiables”, y la disponibilidad requerida se establece en un 95% mediante el método informal.

Con lo cual, recopilando información con miembros de la organización, los cuales interactúan con proveedores y otros FabLab, se puede dar un estimado de tiempo medio entre fallas pesimista equivalente a una falla por año en sus dispositivos de seguridad, con lo cual, bajo el supuesto de que sus probabilidades de falla son de distribución aleatoria utilizando la **Tabla 4.2** y la **Ecuación 4**, se tiene lo siguiente:

$$FFI = (0,1) \cdot 12[mes] = 1,2 [mes] = 36 [dias] \approx 1[mes]$$

Redondeando de forma conservadora a una frecuencia de tareas de búsqueda de falla práctica, se establece que los dispositivos de seguridad deben ser revisados al inicio de cada mes.

8.3 Mantenimientos Rutinarios

En la actualidad FabLab cuenta con mantenimientos rutinarios para mitigar los efectos del roce entre componentes propio de la operación de sus equipos (véase sección 5.3), en donde al realizar el análisis RCM he identificar los modos de falla de los componentes, y mediante la revisión de documentación técnica, se obtienen los siguientes mantenimientos adicionales:

- **Limpieza de placas de circuitos y ventiladores:** En base a lo planteado por [32], se tiene que la acumulación de polvo puede dañar permanentemente las placas de circuito, las cuales pueden ser limpiadas con alcohol isopropílico o aire comprimido, el ventilador asociado a la placa también debe ser limpiado para evitar alzas de temperatura.
- **Limpieza de ventiladores:** Se deben limpiar ventiladores de los motores eléctricos para evitar aumentos de temperatura dañinos y la entrada de agentes contaminantes en las zonas de contacto del rotor y el estator [33].
- **Cambio de sellos:** El documento técnico [11] establece que los compresores pierden presión y generan anomalías sonoras cuando hay desgaste avanzado de sellos, por lo cual se adquieren manómetros para monitorear el estado de los compresores.

8.4 Elaboración de plan de mantenimiento

A las actividades rutinarias de FabLab se deben sumar todas las determinadas en las secciones 8.2 y 8.3. Con lo cual se genera la siguiente propuesta de plan de mantenimiento estableciendo tarea, tipo de actividad, y frecuencia de realización en base a lo planteado por [15], adicionalmente se incluye una duración estimada la cual puede variar en base a la experiencia del Ayudante de Mantenimiento encargado de la actividad:

Tabla 8.2 : Propuesta de plan de inspección y mantenimiento para cortadora laser.

Fuente: Elaboración propia, en colaboración con actividades de mantenimiento de FabLab.

Ítem	Tarea de Mantenimiento	Actividad	Frecuencia	Duración Estimada
Sistema de movimiento	Limpiar la mesa de trabajo.	Rutinaria.	Semanal.	5 minutos.
	Limpiar y lubricar los rieles de los ejes XY.	Rutinaria.	Semanal.	5 minutos.
	Revisar estado de engranajes, poleas dentadas, husillos y correas.	Inspección.	Semanal.	5 minutos.
	Limpiar y lubricar husillos de eje Z.	Rutinaria.	2 semanas.	5 minutos.
	Revisar estado de correas y poleas dentadas.	Calibración.	A condición.	5 minutos.
	Revisar rectificado de mesa de trabajo.	Calibración.	A condición.	5 minutos.
Cabezal	Limpieza de pin de auto enfoque.	Rutinaria.	Semanal.	5 minutos.
	Limpiar lentes.	Rutinaria.	2 semanas.	10 minutos.
Generación de laser	Limpiar espejos.	Rutinaria.	2 semanas.	10 minutos.
Conexiones neumáticas	Revisión de conexiones neumáticas.	Inspección.	A condición.	10 minutos.
Placa de control de potencia	Realizar limpieza y verificación de carbonización de componentes.	Inspección.	Semestral.	15 minutos.
Placa de control numérico	Realizar limpieza y verificación de carbonización de componentes.	Inspección.	Semestral.	15 minutos.
Conexiones eléctricas de control y potencia	Inspección de deterioro de aislantes de conexiones eléctricas a motores DC y alimentación.	Inspección.	Semestral.	5 minutos.
Dispositivos de seguridad	Comprobar funcionamiento de parada de emergencia.	Búsqueda de fallas.	Mensual.	5 minutos.
	Comprobar funcionamiento de interruptor de contacto de puertas.	Búsqueda de fallas.	Mensual.	5 minutos.

Tabla 8.3: Propuesta de plan de inspección y mantenimiento para Extractor.

Fuente: Elaboración propia, en colaboración con actividades de mantenimiento de FabLab.

Sistema/ Componente	Tarea de Mantenimiento	Actividad	Frecuencia	Duración Estimada
Motor	Inspección de ventilador de motor eléctrico y limpieza.	Inspección.	Semestral.	15 minutos.
	Inspección de temperatura de carcasa.	Inspección.	Mensual.	5 minutos.
Turbina	Inspección auditiva y de tacto para vibraciones en extractor.	Inspección.	Semanal.	5 minutos.
	Inspección de sellos de válvulas, de cilindros y de pistones.	Inspección.	A condición.	1 hora.
Mangas y Sellos	Inspección de estado de sellos y mangas.	Inspección.	Semestral.	10 minutos.
Filtros	Reemplazo de primera etapa de filtro (G3).	Sustitución cíclica.	3 meses.	10 minutos.
	Reemplazo de segunda etapa filtro (F8).	Sustitución cíclica.	6 meses.	10 minutos.
	Reemplazo de tercera etapa de filtro (H13).	Sustitución cíclica.	2 años.	10 minutos.
	Reemplazo de cuarta etapa de filtro (C.A.).	Sustitución cíclica.	3 años.	10 minutos.

Tabla 8.4: Propuesta de plan de inspección y mantenimiento para compresor.

Fuente: Elaboración propia, en colaboración con actividades de mantenimiento de FabLab.

Sistema/ Componente	Tarea de inspección	Tipo	Frecuencia	Duración Estimada
Motor	Inspección de ventilador de motor eléctrico y limpieza.	Inspección.	Semestral.	25 minutos.
	Inspección de temperatura de carcasa.	Inspección.	Mensual.	10 minutos.
Sistema de vacío	Inspección de sellos de válvulas, de cilindros y de pistones.	Inspección.	A condición.	60 minutos.
Sistema eléctrico	Inspección de estado de cables de alimentación y de señal de encendido.	Inspección.	Semestral.	5 minutos.
	Inspección y limpieza de capacitor.	Inspección.	Semestral.	25 minutos.

Tabla 8.5: Propuesta de plan de inspección y mantenimiento para equipo de refrigeración.

Fuente: Elaboración propia, en colaboración con actividades de mantenimiento de FabLab.

Sistema/ Componente	Detalles	Tipo	Frecuencia	Duración Estimada
Ventilador	Inspección y limpieza de ventilador.	Inspección.	Semestral.	25 minutos.
	Inspección de conexiones eléctricas de ventilador.	Inspección.	Semestral.	10 minutos.
	Inspección de estado de guardapolvo.	Inspección.	Semestral.	5 minutos.
Sistema eléctrico	Inspección de estado de cable de alimentación	Inspección.	Semestral.	5 minutos.
	Inspección y limpieza de placas de control y potencia.	Inspección.	Semestral.	25 minutos.
Sistema de circulación	Inspección de estado de sellos y conexiones hidráulicas.	Inspección.	Mensual.	10 minutos.
	Inspección de nivel y contaminación de agua.	Inspección.	Semestral.	5 minutos.
Dispositivos de seguridad	Comprobar funcionamiento de sensor de caudal.	Búsqueda de fallas.	Mensual.	10 minutos.
	Medir temperatura y comprobar diferencias con lectura de enfriador.	Búsqueda de fallas.	Mensual.	10 minutos.

El responsable de la ejecución de estas actividades es el Encargado de mantenimiento, el cual debe delegar las funciones a los respectivos ayudantes para la realización de esta propuesta de plan de mantenimiento.

8.4.1 Inspecciones Rutinarias

Debido a la poca información de modos de falla disponible en la organización, se considera lo planteado por el autor [15] donde este recomienda como primer punto, establecer frecuencias conservadoras en la realización de las inspecciones y a su vez, establecer inspecciones rutinarias en búsqueda de necesidades de mantenimiento, estas son de alta frecuencia y por lo mismo, para facilitar su estandarización se llevan a cabo mediante rutinas de inspección [15], en donde el mismo autor propone el registro de ellas mediante una hoja de inspección la cual se aplica y adapta a las necesidades de la organización, las acciones proactivas de mantenimiento requieren el registro de datos para su realización, al igual que las tareas de búsqueda de fallas de dispositivos de seguridad [19]. Los registros de tarea a condición de calidad del producto, de tareas RCM y de inspección rutinaria se adjuntan desde la **Figura E.2 a Figura E.4** del Anexo E.

Las actividades principales de mantenimiento, las cuales tienen una frecuencia semanal, quincenal o mensual, pueden presentar dificultades para integrarse en la organización, para facilitar su ejecución se genera como parte de la propuesta una estandarización mediante gestión visual para facilitar la planificación de mantenimiento, la cual se expone en la **Figura 8.2**:



Figura 8.2: Estandarización de las actividades principales de mantenimiento mediante gestión visual.

Fuente: Elaboración propia.

8.5 Estimación de costos

Después de generado el propuesto de plan de mantenimiento en conjunto con los recursos necesarios para su funcionamiento en base a lo planteado por [15], el siguiente paso de este trabajo de titulación es la evaluación de costos, donde primero se tiene que estimar la inversión en dispositivos necesaria para la realización de mantenimiento predictivo, la cual contempla lo siguiente:

- El costo estimado debe ser en proporción al precio del componente al cual se quiere evaluar o proteger de una consecuencia completa del modo de falla.
- El grado de certeza que entrega la información disponible para determinar la efectividad del dispositivo en la aplicación de la acción proactiva de mantenimiento.

Con respecto a la selección de los dispositivos para la realización de tareas a condición expuestas en la sección 8.2, se establecen algunas restricciones operacionales:

- **Termómetro digital de contacto:** Este debe tener un largo de sonda superior a los 10 cm, dado que este se debe introducir por la entrada de fluido del tanque del equipo enfriador.
- **Termómetro digital con sonda:** El termómetro debe contar con una sonda que pueda cuantificar la temperatura a la entrada del flujo de agua de la cortadora laser, el cual debe contar con alarma sonora que se pueda configurar para temperaturas superiores a 32°C.
- **Manómetros:** Para la adquisición de manómetros, se tiene que la presión de trabajo del compresor es de 8[kPa], por lo cual el rango de trabajo para la selección debe permitir controlar variaciones mediante inspección visual.

Teniendo en consideración las restricciones económicas y operacionales para la adquisición de dispositivos, se tiene la siguiente estimación de inversión:

Tabla 8.6 : Estimación de inversión en dispositivos para mantenimiento predictivo y tareas de búsquedas de fallas.

Fuente: Elaboración propia.

Dispositivo	Cantidad	Precio unitario	Precio de conjunto
Termómetro digital de -50°C a 300°C	1	\$ 7.990,00	\$ 7.990,00
Medidor de Temperatura inalámbrico de pistola de -50°C a 350°C	1	\$ 15.990,00	\$ 15.990,00
Manómetro 1/4 de pulgada, rango 0-100 mbar.	2	\$ 14.590,00	\$ 29.180,00
Termómetro digital de -50°C a 70°C con alarma	2	\$ 73.000,00	\$ 146.000,00
Inversión inicial			\$ 199.160,00

Teniendo conocimiento de la inversión inicial necesaria para implementar el propuesto, se establece una estimación de los costos de mantenimiento mediante la metodología de [15], considerando todos los costos de materiales y mano de obra que se llevan a cabo en el periodo de un año mediante los siguientes procedimientos:

Costo de Materiales: Para la realización de la evaluación de costos en materiales, se deben considerar los componentes e insumos involucrados en las operaciones anuales de

mantenimiento [15]. Los componentes, para que sea una comparación válida, se calcula su inversión anual considerando el gasto en remplazo de componentes y el periodo de depreciación que estos tienen dentro del año. El cálculo de gastos de insumos se obtiene mediante una estimación realizada con la organización de la necesidad neta de insumos anual, y se calcula la cantidad mínima de productos que se deben comprar para suplir dicha necesidad. Estos cálculos tanto para el plan actual y propuesto son expuestos en las **Tabla F.1** y **Tabla F.2** del Anexo F.

Costo de Mano de Obra: En el cálculo de costo de mano de obra se utiliza lo planteado por [15], el cual señala que se debe realizar la estimación en base al valor por hora de trabajo, en donde se tienen dos aspectos a considerar:

- Los Ayudantes de Mantenimiento realizan las operaciones de mantenimiento rutinarias.
- El Administrador de Espacio realiza los mantenimientos de mayor complejidad dentro de la organización.

A su vez, se debe considerar las estimaciones realizadas en la propuesta de plan de mantenimiento, donde se separan las actividades por categorías y se obtiene la cantidad de horas necesarias para ejecutar los planes de mantenimiento actual y propuesto:

Tabla 8.7 : Estimación de horas necesarias para realizar los planes de mantenimiento actual, y la propuesta de plan de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de actividad	Plan actual de mantenimiento	Propuesta de plan de mantenimiento
Rutinaria.	22,0 horas.	22,0 horas.
Sustitución cíclica.	1,1 horas.	1,1 horas.
Inspección.	4,2 horas.	19,3 horas.
Búsqueda de fallas.	0,0 horas.	6,0 horas.
Calibración.	0,0 horas.	0,0 horas.
Suma de horas	27,3 horas.	48,5 horas.

Para llevar a cabo las tareas a condición y de inspección semestral, se espera la intervención del Administrador de Espacio por el lapso de una hora, lo cual se adiciona al cálculo de costos

de mano de obra. Estos cálculos tanto para el plan actual y propuesto son expuestos en la **Tabla F.3** del Anexo F.

Terceros: La tercerización solo se realiza para acciones correctivas de mantenimiento, y para las acciones de calibración, las cuales no se contemplan en el presupuesto de mantenimiento.

Ya habiéndose determinado los costos de materiales y mano de obra mediante la metodología de [15], se obtiene lo siguiente:

Tabla 8.8 : Comparación de plan de mantenimiento actual y del propuesto, con sus respectivas diferencias porcentuales en materiales, mano de obra y costo anual de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia, basado en la metodología de cálculo de costos de [15].

Costo de plan de mantenimiento				
Plan de mantenimiento	Materiales	Mano de obra	Terceros	Costo anual de mantenimiento
Actual	\$ 2.850.568,00	\$ 68.250,00	\$ -	\$ 2.918.818,00
Propuesto	\$ 895.109,67	\$ 196.850,00	\$ -	\$ 1.091.959,67
Diferencia porcentual	-68,60%	188,42%	-	-62,59%

Analizando las diferencias porcentuales, se tiene lo siguiente:

- **Costo de Materiales:** Se genera una diferencia negativa del 68,60%, lo cual es producto de la disminución de gastos en filtros del extractor del sistema de cortado laser. Esto es debido a que FabLab actualmente cuenta con registros suficientes para adaptar de manera conservadora la vida útil de estos repuestos al contexto operacional.
- **Costo de Mano de obra:** Debido a la inclusión de nuevas actividades, en conjunto con la necesidad de experiencia y capacidades del Administrador de Espacio, se tiene un aumento de 188,42% en el costo de mano de obra. A medida que se integra el propuesto, este gasto puede disminuir progresivamente al disminuir los tiempos en la ejecución de las actividades de mantenimiento.

Considerando estos aspectos, dichas diferencias porcentuales se concentran en una disminución en el costo anual de mantenimiento del 62,59% con el requerimiento de una inversión inicial para su implementación de \$199.160 CLP.

9. Conclusiones

En esta última sección de este trabajo se presentan los aspectos relevantes entregados por la metodología aplicada, donde se hace una verificación del cumplimiento de los objetivos, entregas adicionales que no son parte de los objetivos, y recomendaciones para futuras mejoras en los procesos de la organización.

9.1 Conclusiones Principales

Dentro de este trabajo de título se ha plasmado una metodología para evaluar la criticidad de los activos presentes en un FabLab universitario, para posteriormente generar una propuesta de plan de mantenimiento en los activos que presenten mayor riesgo para la organización, en donde se busca mejorar la disponibilidad de dichos activos mediante una propuesta de plan de mantenimiento. A continuación, se realizan conclusiones sobre cada uno de los objetivos específicos.

- **Identificar activos, perfil de mantenimiento y situación actual.**

Se logra identificar y describir los activos principales y procesos de manufactura mediante el uso de documentación técnica y la colaboración activa de miembros de la organización, en este punto se presenta la restricción de que algunos activos carecían de documentación técnica, los cuales se describieron mediante el uso de proveedores alternativos del mismo tipo de equipo, y autores que describen sus componentes principales.

Se logra identificar la situación actual de la organización, lo cual se obtiene mediante la descripción interna desde aspectos estratégicos tales como misión, visión y objetivos a largo plazo, hasta la identificación del proceso diario mediante la herramienta SIPOC, donde se reconoce el flujo de información, bases de datos y relación con sus clientes. También se describe la situación externa, de alta dependencia de vicerrectoría académica de la Universidad Técnica Federico Santa María, y la competencia colaborativa con Otros FabLabs.

No se logra identificar, pero sí estimar el perfil de mantenimiento mediante la documentación disponible y los miembros de FabLab con un 25% de mantenimientos correctivos y 75% preventivos.

Se logra determinar la situación actual de los sistemas de medición, estableciendo que la cantidad de información de entrada es baja y no cuenta con las condiciones de trazabilidad establecidas por la norma ISO 14.224, en consecuencia, se deben validar los resultados obtenidos del posterior análisis de criticidad con la organización, con la finalidad de minimizar mediante la experiencia de los miembros la obtención de inconsistencias que puedan afectar en la elección correcta de la categoría de activos críticos.

- **Realizar análisis de criticidad de activos.**

Posterior a determinar la situación actual de FabLab, y la incertidumbre asociada a la información recopilada, se logra escoger la herramienta que mejor se adapte a las necesidades de la organización mediante el criterio de selección de la norma ISO 31.010, con lo cual se aplica una metodología de valoración de riesgo semicuantitativa mediante índices de riesgo, estableciendo criterios asociados a riesgos de impacto operacional, salud-medio ambiente, y costos de mantenimiento. Se analizan las fuentes de riesgo que podrían afectar al cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización, obteniendo que los sistemas de cortado laser son los equipos más críticos. La organización valida dicha selección de activos críticos.

- **Realizar análisis de modos de falla y actividades de mantenimiento de FabLab.**

Se logra determinar los modos de falla reales y potenciales mediante la metodología RCM, donde se parte el análisis detallando el contexto operacional, de donde se desprenden las restricciones que posteriormente definen las funciones, fallas funcionales y modos de falla, siendo estos avalados por la organización y definidos en base a la causalidad que tienen de generar las fallas funcionales, al igual que los efectos que se podrían producir en caso de no realizar ninguna acción de mantenimiento. Dichos modos de falla se evalúan mediante el número de prioridad de riesgo y se obtienen los modos de falla críticos, se analizan en conjunto con las actividades de mantenimiento actuales, y se determina que estas no anticipan ni abarcan los modos de falla críticos.

- **Generar plan de mantenimiento en activos críticos.**

Se logra realizar un plan de mantenimiento abarcando gran parte de los modos de falla críticos, definiendo tareas predictivas basadas en la calidad del corte producido por la máquina cortadora laser, inspección con termómetro infra rojo, sustitución cíclica de filtros usando la información entregada por el proveedor adaptada al contexto operacional, y tareas de búsquedas de fallas para todos los dispositivos de seguridad. Se elaboran registros para las tareas RCM y rutinas de búsquedas de necesidades de mantenimiento para contribuir a la ejecución del plan, en conjunto con un sistema de administración del trabajo que sustente la propuesta.

- **Estimar y analizar costos de la propuesta de plan de mantenimiento.**

Se estiman los costos anuales de los planes de mantenimiento actual y propuesto, lo cual se realiza mediante reconocimiento de las necesidades anuales de insumos, componentes y tiempo de ejecución, identificando si requiere a alguien con experiencia o no en la realización de las actividades, con lo cual se obtuvo una disminución de 68,6% en el costo de materiales, un 188,42% de aumento en los costos de mano de obra, lo cual al realizar el cálculo global se traduce en una disminución esperada del 62,59% de los costos anuales de mantenimiento, en donde la disminución se debe a la optimización de la sustitución cíclica de los filtros del extractor.

9.2 Conclusiones Secundarias

En la aplicación de la metodología de trabajo, se generaron propuestos de mejoras y de sistemas que no estaban dentro de los objetivos, los cuales se mencionan a continuación.

- **Propuesto de mejoras en trazabilidad.**

Se realiza verificación de calidad del sistema de recolección de datos de FabLab mediante las medidas de planificación que deben estar presentes para obtener datos de calidad de la norma ISO 14.224, con lo cual se detalla que la organización debe mejorar la trazabilidad de su información, donde se genera un propuesto de ejercicio de trazabilidad y mejora en sus documentos de “*registro de uso de máquinas*” buscando mejorar el procedimiento de trazabilidad. A su vez, la metodología de evaluación de repetibilidad y reproducibilidad del indicador de uso medio unitario mensual, puede replicarse a otros procedimientos de FabLab, permitiendo evaluarlos y realizar correcciones para mejorar su desempeño.

- **Sistema de administración del trabajo.**

Para la efectividad de la propuesta de plan de mantenimiento, se genera un sistema de administración del trabajo, el cual consiste en el uso de ordenes de trabajo para el registro de todas las acciones de mantenimiento ejecutadas por la organización, y un panel de gestión visual para facilitar la planificación y coordinación de dichas actividades, en conjunto con la comunicación de los indicadores de criticidad.

9.3 Recomendaciones

En esta sección se abordan todos los aspectos que se desprenden de la aplicación del plan de trabajo realizado en esta memoria, los cuales no se abordaron por estar fuera del alcance de los objetivos, pero pueden contribuir en el desarrollo de la organización.

- **Definir y asegurar aspectos de calidad de sistemas y procesos.**

Al momento de evaluar la calidad del sistema de medición de FabLab, se encuentra la necesidad de codificar y evaluar la información que debe ser recolectada para que el nivel estratégico y táctico puedan tomar decisiones, donde la falta de codificación permite la posibilidad de dobles definiciones, la organización se encuentra estableciendo sus sistemas de recolección de datos por lo cual existen incertidumbres asociadas a las capacidades del personal de poder llevar a cabo dichas recolecciones de datos, de la misma forma que en su traspaso de una fuente física y una fuente digital, por lo cual se debe motivar y entrenar al personal, en conjunto con definir los aspectos de calidad de sus sistemas y procesos de información, generar planes de aseguramiento de calidad que permitan evaluar dichos aspectos, lo cual puede ser foco de un posterior trabajo de título.

- **Tratamiento del riesgo.**

En la sección 6.3 se establecen las acciones que se deben realizar para el tratamiento de los riesgos asociados al registro de fallas de sus activos, donde se recomienda evaluar los procedimientos de mantenimiento de lentes de Cortadoras Laser, de placas de control de Router CNC, y evaluar la compra o adquisición preventiva de componentes susceptibles a fallar, y que cuentan con una baja flexibilidad de repuestos presente en los activos de Impresión 3D.

- **Elaborar sistema de gestión de mantenimiento.**

Dentro del área de mantenimiento, el presente trabajo elabora un propuesto de plan de mantenimiento centrado en los activos críticos de la organización, y un sistema de administración de trabajo que lo sustente.

El paso siguiente es estandarizar los planes de mantenimiento de los otros activos de la organización, generar el plan matriz de mantenimiento y evaluar la implementación de alguna táctica de mantenimiento para llevar a cabo la ejecución de las actividades, lo cual sería la Etapa III de la evolución del mantenimiento y puede ser foco de un posterior trabajo de titulación.

Referencias

- [1] International Standard Organization. (2018). *ISO 31000:2018, Risk Management-Principles and Guidelines*. Geneva: I.S.O.
- [2] International Standard Organization. (2016). *ISO 14224:2016, Petroleum, petrochemical and natural gas industries —Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment* Geneva: I.S.O.
- [3] Society of Automotive Engineers (2009). *SAE JA 1011, Evaluation criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) processes*. Estados Unidos: S.A.E.
- [4] GERLING, Heinrich.(2002). *Alrededor de las máquinas-herramienta*. Barcelona, España: Editorial Reverté.
- [5] Shopboot Inc.(2018). *User manual Shopboot PRS Standard*. Durham, Estados Unidos: Shopboot Inc.
- [6] Ultimaker (2019). *Manual de usuario Ultimaker 3*. Recuperado de: <https://ultimaker.com/download/21901/Ultimaker%203%20manual%20%28ES%29.pdf>
- [7] CORREA, J. A. (2008) *Principios de Torneado*. Recuperado de: <http://www.epetrg.edu.ar/apuntes/principiosdetorneado.pdf>
- [8] GCC. (2018). *User manual Laser Cutting machine GCC x500III Taiwan, China: GCC*
- [9] S&A (2018), *CW-3000 Industrial Chiller User Manual*. Guanzhou, China: S&A.
- [10] ROTH, Miriam (2019). *Laboratorio de reconocimiento bomba centrífuga*. [Diapositiva] Santiago, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- [11] California Air Tools (2019). *Owner's Manual SP-9414*. San Diego, California, Estados Unidos: California Air Tools.
- [12] Cirquid (2019). *Cirquid machine User Manual*. Eimure,Letonia: Cirquid.
- [13] PURDY, Grant (2010). *ISO 31000: Setting a new standard for risk management*. North Mitcham, Australia: Society for risk analysis.
- [14] International Standard Organization. (2010). *ISO 31010:2010, Risk Assessment Techniques*. Geneva: I.S.O.
- [15] PISTARELLI, Alejandro.(2010) *Manual de mantenimiento: ingeniería, gestión y organización*. Buenos Aires, Argentina: Pistarelli.
- [16] ROBBINS, JUNDGE.(2009). *“Comportamiento Organizacional”*. Estados Unidos: Editorial Pearson.

- [17] GUTIERREZ, ROMÁN (2009). *Control estadístico de calidad y seis sigma*. D.F México: Mcgraw-hill.
- [18] MORA, Luis Alberto.(2009) *Mantenimiento-planeación, ejecución y control*. D.F., México: Alfaomega Grupo Editor.
- [19] MOUBRAY, John. (2004) *Mantenimiento centrado en la confiabilidad*. Deerfield, Estados Unidos: Aladon LLC.
- [20] GOMEZ, Félix (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- [21] Society of Automotive Engineers (2002). SAE JA 1012, *A guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*. Estados Unidos: S.A.E.
- [22] Tezel, et al (2009). *The functions of Visual Management*. Manchester, Reino Unido: University of Salford.
- [23] VIVEROS, Pablo, et al.(2013). *Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo*. Santiago, Chile: Ingeniare. Revista chilena de ingeniería.
- [24] GOMEZ, Fernando (2017). *Propuesta de sistema de gestión de mantenimiento para taller metalmecánico UTFSM, Campus San Joaquín*.(Memoria de titulación). Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.
- [25] Occupational and Safety Health Administration (2007). *Safeguarding Equipment and Protecting Employes from Amputations*. Estados Unidos. Recuperado de: <https://www.osha.gov/Publications/osha3170.pdf>
- [26] Massachusetts Institute of Technology (2019). *Laser cutter safety*. Recuperado de: <https://ehs.mit.edu/site/workplace-safety/laser-cutter-safety>
- [27] Instituto de Salud Pública de Chile (2013), *Guía para la identificación y evaluación de riesgos de seguridad en los ambientes de trabajo*. Santiago, Chile: I.N.S.P.CH.
- [28] International Electrothechnical Commission. (2018). IEC 60.812, *Failure mode and effect*. Europa: I.E.C.
- [29] GUT, Christian (2014). *Visual Management for Maintenance Operations*. Recuperado de: <http://leanguru.pro/visual-management-for-maintenance-operations/>

- [30] PEÑA, Sebastián (2013). *Aplicación de metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en planta de almacenamiento de combustible*. (Memoria de titulación). Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.
- [31] POWELL, John (1993). *CO₂ Laser Cutting*. Londres, Reino Unido: Editorial Springer.
- [32] Global Electronics Services Inc. *How to clean circuits board*. Recuperado de: <https://gesrepair.com/clean-circuit-board/>
- [33] Horner Industrial Group *Maintaining the Cleanliness of the Exterior of the Motor, the Fan and the Fan Cover Grill/Screen is Critical to Getting the Most Life Out of Your Motors*. Recuperado de: <https://www.hornerindustrial.com/maintaining-cleanliness-exterior-motor-fan-fan-cover-grillscreen-critical-getting-life-motors/>

A. Evaluación de calidad

ESTUDIO DE CAPACIDAD DE SISTEMAS DE MEDICIÓN (R&R CORTO)																											
Objetivo: Determinar la repetitividad y reproducibilidad del indicador de gestión utilizado para priorizar los equipos de FabLab, buscando encontrar anomalías o consideraciones para su implementación.																											
Instrucciones: Considerando la siguiente fórmula de uso medio unitario mensual de equipos: $Ejemplo: Uso_{cnc} = \frac{\Sigma \text{Horas de uso de la categoría}}{n^{\circ} \text{ de equipos de la categoría}}$ Calcule el indicador para las siguientes categorías: <table border="1" style="margin: 10px auto; width: 60%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th>Mes</th> <th>Suma de horas</th> <th>Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Torno</td> <td>Mayo</td> <td>21,4833</td> <td>21,483</td> </tr> <tr> <td>Impresora 3D</td> <td>Junio</td> <td>137,7000</td> <td>27,540</td> </tr> <tr> <td>Router CNC</td> <td>Julio</td> <td>0,5667</td> <td>0,283</td> </tr> <tr> <td>Cirqoid</td> <td>Mayo</td> <td>1,5333</td> <td>1,533</td> </tr> <tr> <td>Cortadora Laser</td> <td>Julio</td> <td>3,3833</td> <td>1,692</td> </tr> </tbody> </table>				Categoría	Mes	Suma de horas	Resultado	Torno	Mayo	21,4833	21,483	Impresora 3D	Junio	137,7000	27,540	Router CNC	Julio	0,5667	0,283	Cirqoid	Mayo	1,5333	1,533	Cortadora Laser	Julio	3,3833	1,692
Categoría	Mes	Suma de horas	Resultado																								
Torno	Mayo	21,4833	21,483																								
Impresora 3D	Junio	137,7000	27,540																								
Router CNC	Julio	0,5667	0,283																								
Cirqoid	Mayo	1,5333	1,533																								
Cortadora Laser	Julio	3,3833	1,692																								
Ayuda: Para sumar las horas totales, se pueden restringir con la funcion sumar.si.conjunto Ejemplo: Sumar.si.conjunto(Rango de datos ;Rango de mes;Obj. de mes; Rango de equipos; Obj de equipos)																											
ESTUDIO DE TRAZABILIDAD																											
Objetivo: Cuantificar la trazabilidad de los datos de uso de equipos de FabLab, según lo requerido por la norma ISO 14.224.																											
Instrucciones: Escoja un dato al azar por cada mes de la hoja de datos, y determine si el dato se encuentra en los registros físicos de uso de equipos de Fablab.																											
Número de partes	Marca temporal	Presencia en el registro	Marcar 0 si no se encuentra el registro Marcar 1 si se encuentra el registro																								
1	5-7-2019 17:59:52	1																									
2	14-06-2019 18:09	1																									
3	23-07-2019 19:02	0																									
Suma de presencia de registro :		2																									

Figura A.1: Evaluación de Repetibilidad y Reproducibilidad aplicada a indicador de uso medio unitario mensual utilizando la metodología de [17], para posterior evaluación de trazabilidad de sus registros. Resultados de encargado A.

Fuente: Elaboración propia, basado en metodología de [17].

ESTUDIO DE CAPACIDAD DE SISTEMAS DE MEDICIÓN (R&R CORTO)																											
Objetivo: <p>Determinar la repetitividad y reproducibilidad del indicador de gestión utilizado para priorizar los equipos de FabLab, buscando encontrar anomalías o consideraciones para su implementación.</p>																											
Instrucciones: <p>Considerando</p> $Ejemplo: Uso_{cnc} = \frac{\Sigma \text{Horas de uso de la categoría}}{n^{\circ} \text{ de equipos de la categoría}}$ <p>Calcule el indicador para las siguientes categorías:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">Categoría</th> <th style="padding: 5px;">Mes</th> <th style="padding: 5px;">Suma de horas</th> <th style="padding: 5px;">Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">Torno</td> <td style="padding: 5px;">Mayo</td> <td style="padding: 5px;">21,483</td> <td style="padding: 5px;">21,483</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Impresora 3D</td> <td style="padding: 5px;">Junio</td> <td style="padding: 5px;">137,700</td> <td style="padding: 5px;">27,540</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Router CNC</td> <td style="padding: 5px;">Julio</td> <td style="padding: 5px;">0,567</td> <td style="padding: 5px;">0,189</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Cirquid</td> <td style="padding: 5px;">Mayo</td> <td style="padding: 5px;">1,533</td> <td style="padding: 5px;">1,533</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Cortadora Laser</td> <td style="padding: 5px;">Julio</td> <td style="padding: 5px;">3,383</td> <td style="padding: 5px;">1,692</td> </tr> </tbody> </table>				Categoría	Mes	Suma de horas	Resultado	Torno	Mayo	21,483	21,483	Impresora 3D	Junio	137,700	27,540	Router CNC	Julio	0,567	0,189	Cirquid	Mayo	1,533	1,533	Cortadora Laser	Julio	3,383	1,692
Categoría	Mes	Suma de horas	Resultado																								
Torno	Mayo	21,483	21,483																								
Impresora 3D	Junio	137,700	27,540																								
Router CNC	Julio	0,567	0,189																								
Cirquid	Mayo	1,533	1,533																								
Cortadora Laser	Julio	3,383	1,692																								
<p>Ayuda: Para sumar las horas totales, se pueden restringir con la funcion sumar.si.conjunto</p> <p>Ejemplo:</p> <p>Sumar.si.conjunto(Rango de datos ;Rango de mes;Obj. de mes; Rango de equipos; Obj de equipos)</p>																											
ESTUDIO DE TRAZABILIDAD																											
Objetivo: Cuantificar la trazabilidad de los datos de uso de equipos de FabLab, según lo requerido por la norma ISO 14.224.																											
Instrucciones: <p>Escoja un dato al azar por cada mes de la hoja de datos, y determine si el dato se encuentra en los registros físicos de uso de equipos de Fablab.</p>																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">Número de partes</th> <th style="padding: 5px;">Marca temporal</th> <th style="padding: 5px;">Presencia en el registro</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">1</td> <td style="padding: 5px;">6-5-2019 15:50:48</td> <td style="padding: 5px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">2</td> <td style="padding: 5px;">18-06-2019 12:35</td> <td style="padding: 5px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">3</td> <td style="padding: 5px;">23-05-2019 18:54</td> <td style="padding: 5px;">1</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 5px;">Suma de presencia de registro :</td> <td style="padding: 5px;">1</td> </tr> </tbody> </table>	Número de partes	Marca temporal	Presencia en el registro	1	6-5-2019 15:50:48	0	2	18-06-2019 12:35	0	3	23-05-2019 18:54	1	Suma de presencia de registro :		1	<p>Marcar 0 si no se encuentra el registro</p> <p>Marcar 1 si se encuentra el registro</p>											
Número de partes	Marca temporal	Presencia en el registro																									
1	6-5-2019 15:50:48	0																									
2	18-06-2019 12:35	0																									
3	23-05-2019 18:54	1																									
Suma de presencia de registro :		1																									

Figura A.2: Evaluación de Repetibilidad y Reproducibilidad aplicada a indicador de uso medio unitario mensual utilizando la metodología de [17], para posterior evaluación de trazabilidad de sus registros. Resultados de encargado B.

Fuente: Elaboración propia, basado en metodología de [17]

ESTUDIO DE CAPACIDAD DE SISTEMAS DE MEDICIÓN (R&R CORTO)																											
<u>Moderador externo</u> Persona responsable				Fecha: <u>24/09/19</u> Estudio: <u>R&R Corto</u> Organización: <u>FabLab.UTFSM</u>																							
Nombre de equipo de medición: Encargados de turno.						Pasa <u>X</u>																					
Función: Evaluar el indicador de gestión y el sistema de registro de uso de equipos de FabLab.						No pasa <u> </u>																					
Especificaciones del proceso:		Limite inferior de especificación (EI) <u>0.5</u>		Limite superior de especificación (ES) <u>-0.5</u>		Tolerancia (ES-EI) <u>1</u>																					
Número de mediciones	Encargado A	Encargado B	Rango	k_2 = Constante para expandir a 5.15 desviaciones estandar																							
1	21,483	21,483	0,00	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 5px;">Numero de objetos</th> <th colspan="2" style="padding: 5px;">Numero de encargados</th> </tr> <tr> <th style="padding: 5px;"></th> <th style="padding: 5px;">1</th> <th style="padding: 5px;">2</th> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">1</td> <td style="padding: 5px;">3,65</td> <td style="padding: 5px;">2,70</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">2</td> <td style="padding: 5px;">4,02</td> <td style="padding: 5px;">2,85</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">3</td> <td style="padding: 5px;">4,19</td> <td style="padding: 5px;">2,91</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">4</td> <td style="padding: 5px;">4,26</td> <td style="padding: 5px;">2,94</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">5</td> <td style="padding: 5px;">4,33</td> <td style="padding: 5px;">2,98</td> </tr> </table>			Numero de objetos	Numero de encargados			1	2	1	3,65	2,70	2	4,02	2,85	3	4,19	2,91	4	4,26	2,94	5	4,33	2,98
Numero de objetos	Numero de encargados																										
	1	2																									
1	3,65	2,70																									
2	4,02	2,85																									
3	4,19	2,91																									
4	4,26	2,94																									
5	4,33	2,98																									
2	27,540	27,540	0,00																								
3	0,283	0,189	0,09																								
4	1,533	1,533	0,00																								
5	1,692	1,692	0,00																								
Total de rangos: $\sum_{i=1}^n R_i =$				0,09																							
Promedio de rangos: $\bar{R} = \sum_{i=1}^n R_i / n =$				0,018																							
Criterio de aceptación: abajo de 10% Excelente proceso. De 10% a 20% Bueno, Aceptable. De 20% a 30% Marginalmente aceptable. Arriba de 30% Inaceptable, debe ser corregido.				$EM = 5.15 \sigma_{R\&R} = k_2(\bar{R}) = 0,0536$ $\sigma_{R\&R} = \frac{EM}{5.15} = 0,0104$ EM como porcentaje de la tolerancia: $P/T = \frac{EM}{ES-EI} \cdot 100 = 5,364$																							
ESTUDIO DE TRAZABILIDAD																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 5px;">Nº de medición aleatoria</th> <th style="padding: 5px;">Encargado A</th> <th style="padding: 5px;">Encargado B</th> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">1</td> <td style="padding: 5px;">1</td> <td style="padding: 5px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">2</td> <td style="padding: 5px;">1</td> <td style="padding: 5px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">3</td> <td style="padding: 5px;">0</td> <td style="padding: 5px;">1</td> </tr> </table>				Nº de medición aleatoria	Encargado A	Encargado B	1	1	0	2	1	0	3	0	1	Marcar 0 si no se encuentra el registro Marcar 1 si se encuentra el registro											
Nº de medición aleatoria	Encargado A	Encargado B																									
1	1	0																									
2	1	0																									
3	0	1																									
Suma de presencia de registro : = <u>3</u>				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 5px;">Calificación</th> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Pasa <u> </u></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">No pasa <u>X</u></td> </tr> </table>			Calificación	Pasa <u> </u>	No pasa <u>X</u>																		
Calificación																											
Pasa <u> </u>																											
No pasa <u>X</u>																											
Criterio de aceptación: Puntaje mayor o igual a 5 Bueno, Aceptable Puntaje igual a 4 Marginalmente aceptable Puntaje menor o igual a 3 Se deben revisar los registros y realizar correcciones																											

Figura A.3: Obtención de evaluación de error de medición R&R y trazabilidad para cálculo y registros de indicador de uso medio unitario mensual de equipos.

Fuente: Elaboración propia, basado en metodología de [17].

(***) Registrado en sistema (lo llena el encargado de turno)

[illegible]

Figura A.4: Planilla de registro de uso de máquinas de FabLab.

Fuente: FabLab.UTFSM

Tipo de máquina: _____ Mes: _____ Semana: _____

Registro de Uso de Máquinas

(*) En caso de que el material usado sea de FabLab, especificar la cantidad usada (gramos de filamento, largo x ancho de una plancha, etc)

(**) Preguntar al encargado de turno

(***) Registrado en sistema (lo llena el encargado de turno)

[illegible]

Figura A.5: Planilla de registro de uso de máquinas de FabLab con mejoras en la toma de datos y trazabilidad.

Fuente: Elaboración propia, basada en documento entregado por FabLab.UTFSM.

B. Evaluación de Criticidad

Tabla B.1: Análisis de factor de riesgo de costos de mantenimiento y flexibilidad de repuestos para los modos de fallas del registro de mantenimientos correctivos de activos de FabLab (1).

Fuente: Elaboración propia, basado en la metodología de [15].

Equipo	Modo de falla	Fecha	Detalle de reparación	Costo Material	Costo Mano de obra	Costo Terceros	Costo total de reparación	CM	Flexibilidad
Ultimaker 3-2	Falla de calentador de cabezal.	28-08-2018	Reemplazo de componente.	\$ 189.000,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 191.500,00	4	1
Ultimaker 3-3	Rotura de cable de control de cabezal.	09-06-2018	Reemplazo de componente.	\$ 5.000,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 7.500,00	1	4
Cortadora Laser GCC X500II	Descalibración por operación.	22-04-2018	Calibración de garantía.	Garantía	\$ 2.500,00	Garantía	\$ 2.500,00	1	3
Cortadora Laser GCC X500II	Rotura de lente.	21-08-2018	Reemplazo de componente.	\$ 330.000,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 332.500,00	4	3
Cortadora Laser GCC X500II	Obstrucción de primera etapa	07-12-2018	Reemplazo de 4 etapas.	\$ 578.531,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 581.031,00	4	3

Tabla B.2: Análisis de factor de riesgo de costos de mantenimiento y flexibilidad de repuestos para los modos de fallas presente del registro de mantenimientos correctivos de activos de FabLab (2).

Fuente: Elaboración propia, basado en la metodología de [15].

Equipo	Modo de falla	Fecha	Detalle de reparación	Costo Material	Costo Mano de obra	Costo Terceros	Costo total de reparación	CM	Flexibilidad
Cortadora Laser GCC X252	Rotura de lente	22-04-2018	Reemplazo de componente.	\$ 330.000,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 332.500,00	4	3
Cortadora Laser GCC X252	Obstrucción general de filtros.	07-12-2018	Reemplazo de primera etapa.	\$ 9.281,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 11.781,00	2	3
Shopbot Desktop 1	Controlador quemado.	24-06-2018	Reemplazo de componente.	\$ 10.800,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 13.300,00	2	4
Shopbot Desktop 1	Controlador quemado.	20-10-2018	Reemplazo de componente.	\$ 10.800,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 13.300,00	2	4
Shopbot Desktop 2	Controlador quemado.	24-06-2018	Reemplazo de componente.	\$ 10.800,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 13.300,00	2	4
Enfriador	Rotura de serpentín por desgaste.	04-03-2019	Reparación de componente.	\$ 5.000,00	\$ 2.500,00	\$ -	\$ 7.500,00	1	1

Tabla B.3: Análisis de factor de riesgo de salud y medio ambiente para los modos de fallas del registro de mantenimientos correctivos de activos de FabLab (1).

Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Categoría	Modo de falla	Fecha	Factor de riesgo	Riesgo	Causa	Consecuencia	S-MA
Ultimaker 3-2	Impresora 3D	Falla de calentador de cabezal.	28-08-2018	Gases y/o polvo metálico	Riesgo de irritación para los ojos.	Acumulación de material en la zona del cabezal de impresora 3D	Exposición a materiales irritantes	1
Ultimaker 3-3	Impresora 3D	Rotura de cable de control de cabezal.	09-06-2018	No presenta riesgo	-	-	-	0
Cortadora Laser GCC X500II	Corte Laser	Descalibración por operación.	22-04-2018	No presenta riesgo	-	-	-	0
Cortadora Laser GCC X500II	Corte Laser	Rotura de lente.	21-08-2018	Inflamable	Quemaduras	Lente en mal estado puede causar un incendio de equipo	Quemaduras	2
Cortadora Laser GCC X500II	Corte Laser	Obstrucción de primera etapa.	07-12-2018	Gases y/o polvo metálico	Intoxicación por gas nocivo para la salud.	Se acumulan gases nocivos en zona de trabajo	Exposición a gases peligrosos	3

Tabla B.4: Análisis de factor de riesgo de salud y medio ambiente para los modos de fallas del registro de mantenimientos correctivos de activos de FabLab (2).

Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Categoría	Modo de falla	Fecha	Factor de riesgo	Riesgo	Causa	Consecuencia	S-MA
Cortadora Laser GCC X252	Corte Laser	Rotura de lente.	22-04-2018	Inflamable	Quemaduras	Lente en mal estado puede causar un incendio de equipo	Quemaduras	2
Cortadora Laser GCC X252	Corte Laser	Obstrucción general de filtros.	07-12-2018	Gases y/o polvo metálico	Intoxicación por gas nocivo para la salud.	Se acumulan gases nocivos en zona de trabajo	Exposición a gases peligrosos	3
Shopbot Desktop 1	CNC Router	Controlador quemado.	24-06-2018	No presenta riesgo	-	-	-	0
Shopbot Desktop 1	CNC Router	Controlador quemado.	20-10-2018	No presenta riesgo	-	-	-	0
Shopbot Desktop 2	CNC Router	Controlador quemado.	24-06-2018	No presenta riesgo	-	-	-	0
Chiller	Cortadora laser	Rotura de serpentín por desgaste.	04-03-2019	No presenta riesgo	-	-	-	0

Tabla B.5: Valoración de consecuencias de modos de falla presente en el registro de mantenimientos correctivos de FabLab.

Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Modo de falla	Fecha	IO	flexibilidad	CM	S-MA	Criticidad
Impresora 3D	Falla de calentador de cabezal.	28/08/2018	4	1	4	1	2.95
Impresora 3D	Rotura de cable de control de cabezal.	09/06/2018	4	4	1	0	5.9
Cortadora Laser	Descalibración por operación.	22/04/2018	3	3	1	0	3.45
Cortadora Laser	Rotura de lente.	21/08/2018	3	3	4	2	5.05
Cortadora Laser	Obstrucción general de filtros.	07/12/2018	3	3	4	3	5.4
Cortadora Laser	Rotura de lente.	22/04/2018	3	3	4	2	5.05
Cortadora Laser	Obstrucción de primera etapa.	07/12/2018	3	3	2	3	4.8
CNC Router	Controlador quemado.	24/06/2018	2	4	2	0	3.4
CNC Router	Controlador quemado.	20/10/2018	2	4	2	0	3.4
CNC Router	Controlador quemado.	24/06/2018	2	4	2	0	3.4
Corte laser	Serpentín de Enfriador con pérdida de agua	04/03/2019	3	1	1	0	1.35

C. Estructuras Técnicas de Equipos

Diagrama C.1: Estructura técnica de enfriador.

Fuente: Elaboración propia.

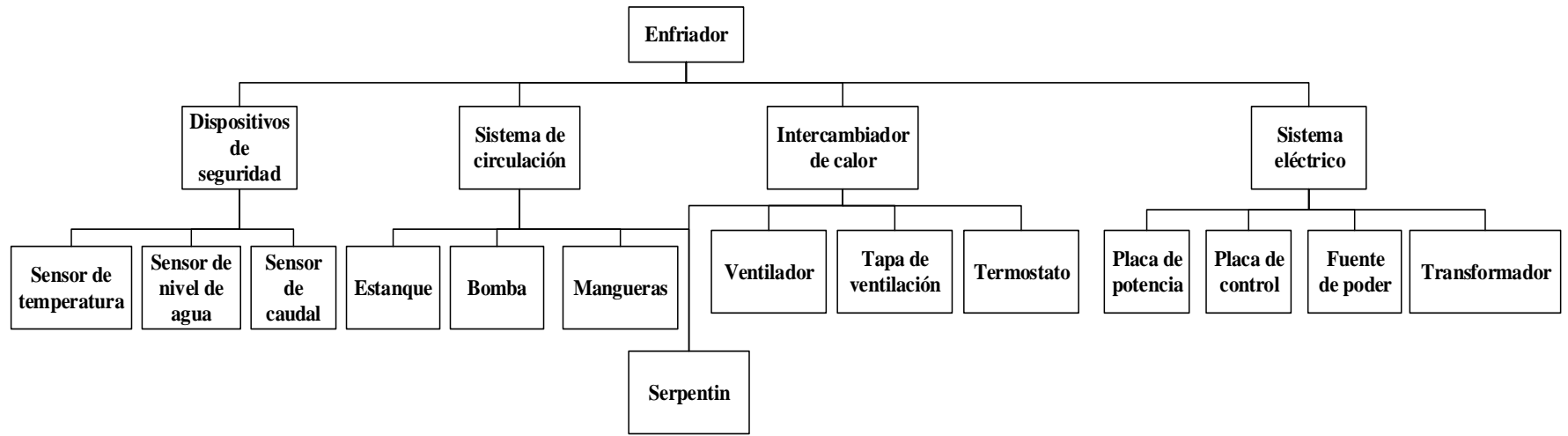


Diagrama C.2: Estructura técnica de equipo de cortado laser.

Fuente: Elaboración propia.

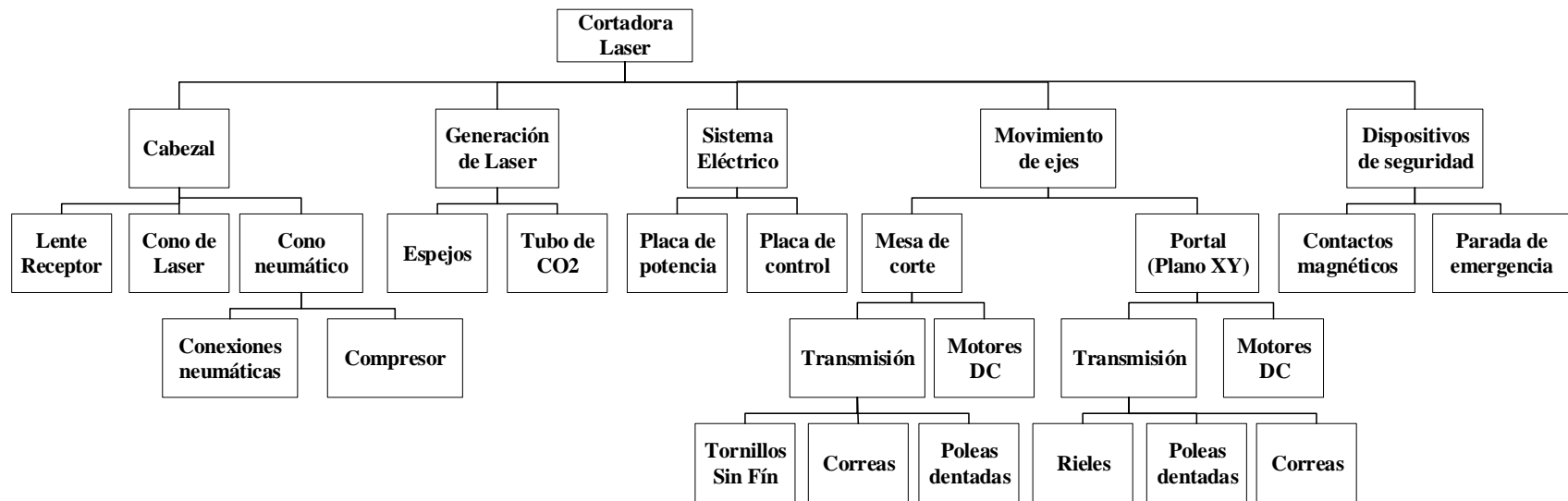


Diagrama C.3: Estructura técnica de equipo de compresor de pistón sin aceite.

Fuente: Elaboración propia.

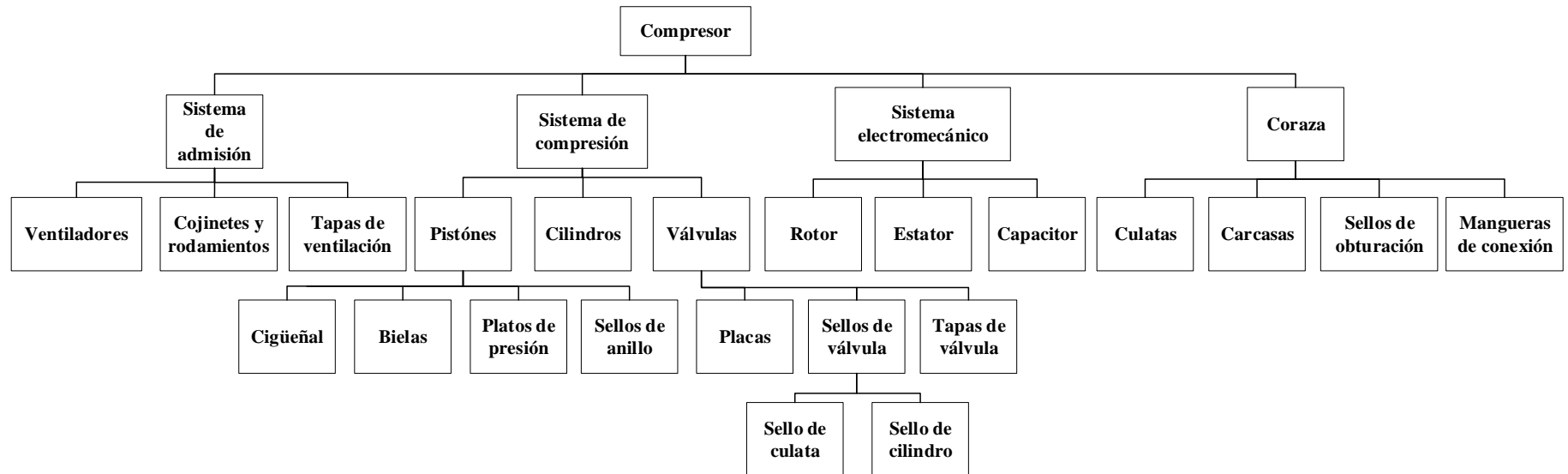
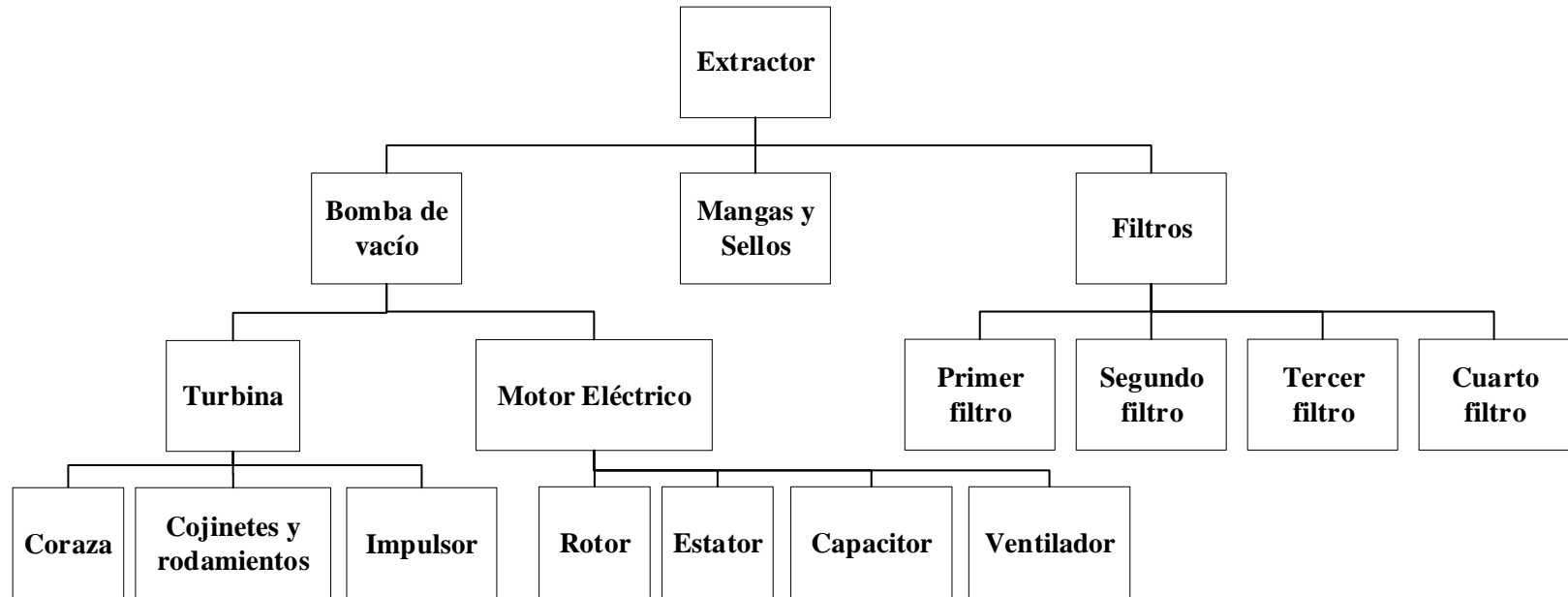


Diagrama C.4: Estructura técnica de extractor de sistema de cortado laser.

Fuente: Elaboración propia.



D. Análisis RCM

Acrónimos

FE : Falla Evidente.

FO : Falla Oculta.

MF : Modo de Falla.

FM : Falla Múltiple

Tabla D.1: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (1).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Enfriador.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Intercambiador de calor	Mantener el fluido entre 20°C y 30°C	Fluido por los sobre 30°C	Guardapolvo bloqueado por mala posición.	Se activa señal de alarma por temperatura de fluido superior a 30°C, mediante la corrección de posición del equipo se recupera la funcionalidad inmediatamente. (5 minutos)	1	2	1	2	Tolerable
			Termostato descalibrado por desgaste.	Al momento de producirse sobrecalentamiento, no se activa señal de alarma y no se detiene el funcionamiento del equipo, ocasionando rotura de tubo de Co2 (6-12 meses).	8	2	10	160	No Tolerable
			Ventilador obstruido por edad natural.	Enfriador en señal de alarma por temperatura de fluido superior a 60°C, impacto operacional leve, de corrección rápida. (5 minutos).	2	2	2	8	Tolerable
			Falta de tiempo de enfriado.		2	6	1	12	Tolerable
			Sobrecarga del equipo por mal procedimiento		1	1	1	1	Tolerable
			Ventilador en falla por desgaste.	Se genera recalentamiento, componente no funciona y requiere remplazo, compra de repuesto local. (1-5 días).	6	1	8	48	Tolerable

Tabla D.2: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (2).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Enfriador.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Sistema eléctrico	Entregar la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento del activo.	No se entrega la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento de activo.	Red de alimentación entrega bajo voltaje, funcionando con menos potencia.	Enfriador se sobrecalienta lo cual activa la alarma de sobrecalentamiento, impacto parcial en operaciones. Se normaliza funcionamiento en minutos. (5-10 minutos).	2	4	1	8	Tolerable
			Transformador en falla por desgaste.	Chiller desenergizado, se requiere remplazo y compra de repuesto local. (1-5 días).	6	1	8	48	Tolerable
			Fuente de poder en falla por desgaste.		6	1	8	48	Tolerable
		Potencia eléctrica mayor a la requerida.	Red de alimentación entrega alza de voltaje.	Alza de voltaje quema fusible, remplazo y compra de repuesto local. (1-5 días).	6	1	2	12	Tolerable

Tabla D.3: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (3).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR										
Activo: Enfriador.										
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación	
Sistema de circulación	Entregar caudal para refrigeración de equipo externo.	Circulación de caudal demasiado baja o nula.	Nivel de tanque bajo por ciclos de operación.	Señal de alarma de flujo activada al iniciar operación, se normaliza verificando y corrigiendo nivel de tanque. (5-10 minutos).	1	4	2	8	Tolerable	
			Serpentín obstruido por edad.	Al momento de encender, se activa la alarma de flujo (luz roja) luego al conectar la entrada y salida entre sí, el fenómeno persiste. Se debe revisar obstrucción de serpentín. Se debe adquirir elemento para destapar. (1-5 días).	2	2	4	16	Tolerable	
			Manguera obstruida por ciclos de operación.	Al momento de encender, se activa la alarma de flujo (luz roja) luego al conectar la entrada y salida entre sí, se desactiva la alarma. Se debe adquirir elemento para destapar. (1-3 días).	2	2	4	16	Tolerable	
			Bomba en falla por desgaste.	Al momento de encender el equipo, se activa la señal de alarma roja antes de empezar a funcionar, se debe realizar remplazo, compra de repuesto local. (1-5 días)	6	1	8	48	Tolerable	
			Serpentín con fuga por desgaste.		6	6	4	144	No Tolerable	
			Bomba con fuga por desgaste.		6	2	4	48	Tolerable	

Tabla D.4: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (4).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Enfriador.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Dispositivos de seguridad	Interrumpir funcionamiento para caudales inferiores a 1 lt/min.	Caudal no es interrumpido si se detecta bajo caudal.	Falla de sensor de caudal por desgaste.	Al momento de presentarse obstrucciones de flujo, la bomba sigue funcionando, dañando los sellos y elementos del sistema de circulación por presión, generando un ambiente de riesgo de electrocución. Se debe realizar remplazo, el repuesto se puede adquirir localmente. (1-5 días)	10	1	10	100	No Tolerable
	Interrumpir funcionamiento cuando la temperatura del fluido este sobre 30°C	No se interrumpe funcionamiento cuando la temperatura del fluido esta sobre los 30°C	Falla de sensor de temperatura por desgaste.	Al momento de presentarse alguna condición operacional que haga circular el flujo sobre 30°C, el equipo debe frenar la operación y generar una alarma sonora para cortar el funcionamiento del sistema de cortado laser, este no se activa y genera la rotura del tubo de CO ₂ . Se debe realizar reemplazo, el repuesto se puede adquirir localmente. (1-5 días)	8	1	10	80	No Tolerable

Tabla D.5: Análisis RCM con valoración NPR de enfriador (5).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Enfriador.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Dispositivos de seguridad	Interrumpir funcionamiento cuando se detecte nivel bajo de agua en el tanque	No se interrumpe funcionamiento cuando se detecta falta de agua en el tanque.	Falla por edad natural de sensor de altura de agua.	Al momento de no haber agua en circulación, producto de la evaporación propia del uso del sistema, se puede producir cavitación en la bomba, generando un desgaste acelerado de componentes, ruidos anómalos de funcionamiento y alzas de temperatura. Se debe realizar remplazo de componente, el cual se puede adquirir localmente. (1-5 días)	6	1	6	36	Tolerable

Tabla D.6: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (1).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Cortadora Laser.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Cabezal	Realizar el corte, con precisión a la potencia y velocidad de corte establecidas para el material, sin quemaduras.	Mayor consumo de potencia en la operación de corte y presencia de quemaduras en bordes de material.	Falla operacional en ajuste de enfoque de cabezal.	Producto final con sobre quemaduras en los bordes, se puede corregir inmediatamente verificando y modificando la distancia del cabezal a la mesa de corte. (5-10 minutos)	2	8	6	96	Tolerable
			Desgaste de lente.	Producto final con sobre quemaduras en los bordes, el lente debe ser remplazado, con repuesto disponible en zona. (2-3 semanas)	8	8	6	384	No Tolerable
	Limpiar la superficie de corte de residuos del proceso.	No se produce limpieza de corte.	Problema con conexión neumática por desgaste.	Anomalía sonora producto de fugas de aire, baja de presión en salida de cono, presencia de gases y cenizas alrededor del corte. Reemplazo con repuesto disponible en zona. (8 horas)	6	1	2	12	Tolerable
			Problema de compresor.	Disminución de presión de trabajo, se detalla en análisis RCM de compresor.	Ver Análisis RCM Compresor				

Tabla D.7: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (2).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Cortadora Laser									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Cabezal	Señalar el punto donde se iniciará la operación de corte.	Puntero laser apagado.	Falla de puntero laser por desgaste	El puntero laser está activado desde el panel de control, pero no funciona. Se pierde calidad parcial de operación, se debe remplazar, adquirible localmente. (1 a 5 días)	6	1	10	60	Tolerable
		Puntero laser fuera de foco.	Descalibración por operación.	Corte y punto de laser no se generan en la misma posición, disminuye parcialmente la calidad operación. Se debe calibrar. (1 hora)	1	4	1	4	Tolerable
Generación de laser	Producir haz de laser con el consumo de potencia requerido.	No se produce haz de láser.	Rotura de Tubo CO ₂ por temperatura.	Tubo de laser roto por temperatura, impacto elevado en las operaciones. (6-12 meses)	10	6	2	120	No Tolerable
			Anomalía eléctrica por desgaste de conexiones eléctricas.	Fuerte sonido de golpeteo eléctrico proveniente de Tubo CO ₂ , se debe remplazar aislantes de conexiones eléctricas. (2 horas)	6	1	10	60	Tolerable
		Mayor consumo de potencia en generación.	Desgaste de espejos.	Producto final con sobre quemaduras en los bordes, los espejos deben ser remplazados, con repuesto disponible en zona. (2- 3 semanas).	8	2	6	96	No Tolerable

Tabla D.8: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (3).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Cortadora Laser.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Portal	Generar movimiento en el plano XY de manera continua y precisa.	No se genera movimiento en el plano XY de manera continua y precisa.	Correas destensadas por desgaste operacional.	Se verifica problemas en las dimensiones de corte de los productos elaborados, se debe ajustar tensión de correa. (1-5 días)	6	2	8	96	Tolerable
			Poleas en falla por desgaste.	Alta pérdida en las tolerancias de los productos, se debe verificar estado de poleas y realizar remplazo, compra de producto dentro de la región. (1-5 días)	6	1	6	36	Tolerable
			Elementos de transmisión en falla completa por desgaste	Ruidos anómalos desde la transmisión sin generar movimiento, si se produce mediante operación de corte, hay riesgo de incendio, se debe remplazar. (1-5 días).	10	1	4	40	No Tolerable
			Falla de motor DC por desgaste	Equipo conectado y energizado inicialmente generando golpeteos hasta desarrollar una falla completa y deja de funcionar, en caso de ocurrir en medio de una operación de corte, hay riesgo de incendio. Repuesto disponible dentro de la zona. (2-4 semanas)	10	1	8	80	No Tolerable

Tabla D.9: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (4).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Cortadora Laser.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Mesa de corte.	Generar movimiento en el eje Z . de manera continua y precisa.	No se genera movimiento en el eje Z de manera continua y precisa.	Tornillo sin fin en falla	Al hacer funcionar el eje Z , se generan sonidos anómalos provenientes del tornillo sin fin. Se debe evaluar estado y generar remplazo, repuesto disponible localmente (1-5 días).	6	1	4	24	Tolerable
			Correas destensadas	Dificultad en el ajuste de distancia cabezal-mesa de trabajo. Se debe evaluar estado, se debe realizar ajuste de tensión, (1-5 días).	6	2	8	96	Tolerable
			Poleas en falla.	Se presenta dificultad en calibrar el eje Z antes de la operación de corte. Se debe evaluar estado y generar remplazo, repuesto disponible localmente (1-5 días).	6	1	4	24	Tolerable
			Elementos de transmisión en falla completa por desgaste	Ruidos anómalos desde la transmisión sin generar movimiento, si se produce mediante operación de corte, hay riesgo de incendio, se debe remplazar. (1-5 días).	10	1	4	40	No Tolerable
			Falla del motor DC por desgaste	En operación se generan golpeteos hasta desarrollar una falla completa y deja de funcionar, en caso de ocurrir en medio de una operación de corte, hay riesgo de incendio. Repuesto disponible dentro de la zona (2-4 semanas).	10	1	4	40	No Tolerable

Tabla D.10: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (5).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Cortadora Laser.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Dispositivos de seguridad	Interrumpir la operación en caso de abrirse alguna protección	No interrumpe la operación en caso de realizarse apertura de las protecciones superior o frontal	Falla de contactos por desgaste	Al momento de realizarse la operación, y abrir alguna de las puertas, no se realiza el corte de la operación, lo cual puede ocasionar accidentes o daños producto de la radiación UV del Haz de láser, se debe realizar remplazo del componente, mediante la ayuda de un externo.	10	2	6	120	No Tolerable
	Interrumpir la operación al activar el pulsador.	No interrumpe la operación al activar el pulsador	Falla de parada de emergencia por desgaste	Al momento de una emergencia no se detiene la operación, lo cual puede producir incendios, riesgo a la salud-medio ambiente. se debe realizar remplazo del componente, mediante la ayuda de un externo.	10	2	6	120	No Tolerable

Tabla D.11: Análisis RCM con valoración NPR de cortadora laser (6).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Cortadora Laser.									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Sistema Eléctrico	Entregar la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento del activo.	No se entrega la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento de activo	Fuente de poder quemada por desgaste.	El activo se encuentra conectado, pero no se genera funcionamiento normal, el panel de control se encuentra apagado o el activo funciona a golpes producto que no da la energía suficiente para generar el torque mínimo de funcionamiento para los motores DC. Se requiere la presencia de un externo para evaluar el componente en falla. (1-2 semanas).	8	1	10	80	No Tolerable
			Placa de potencia quemada por desgaste.		8	1	10	80	No Tolerable
			Transformador quemado por desgaste.		8	1	10	80	No Tolerable
	Entregar las señales de funcionamiento a los motores DC	No se entrega señales de funcionamiento a motores DC.	Placa de control quemada por desgaste.		8	1	10	80	No Tolerable

Tabla D.12: Análisis RCM con valoración NPR de compresor de pistón (1).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Compresor de pistón									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Sistema de compresión	Realizar la compresión de aire desde la presión atmosférica hasta 8 [Kpa].	No se realiza compresión hasta 8 [Kpa].	Desgaste de placas de válvula.	Se generan sonidos anómalos durante el funcionamiento del compresor, se debe desarmar y detectar la fuente de la anomalía, se pierden la mayoría de operaciones del sistema. Repuesto adquirible localmente. (1-5 días)	6	2	6	72	Tolerable
			Desgaste o rotura de sellos de pistón.		6	2	6	72	Tolerable
			Desgaste o rotura de sellos asociados a válvulas.		6	2	6	72	Tolerable
			Desgaste de cojinetes o rodamientos.		8	1	10	80	No Tolerable
Sistema de admisión	Entregar alimentación de aire a presión atmosférica.	No entrega la cantidad de flujo de aire nominal.	Suciedad en elementos de admisión por vida natural.	Disminución en la presión de trabajo y aumento de temperatura de funcionamiento, disminuye parcialmente la capacidad del activo, corregible rápidamente. (5-10 minutos)	2	7	4	56	Tolerable

Tabla D.13: Análisis RCM con valoración NPR de compresor de pistón (2).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Compresor de pistón									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Sistema Electromecánico	Generar la conversión de energía eléctrica a mecánica	No se genera la conversión de energía eléctrica a mecánica.	Red de alimentación entrega bajo voltaje durante un corto tiempo.	Compresor no parte o tiene un funcionamiento lento evidente, si continua la operación puede generar daños permanentes en el estator. Corregible deteniendo las funciones por un lapso corto de tiempo. (5-10 minutos)	1	1	2	2	Tolerable
			Capacitor de partida quemado por desgaste.	Compresor se detiene repentinamente y se evidencia un olor a quemado en la zona del capacitor. Se debe remplazar componente, adquirible localmente. (1-5 días)	6	1	8	48	Tolerable
			Estator con devanado quemado por desgaste.	Compresor se detiene repentinamente y no vuelve a encender, si no hay anomalías visibles, se requiere inspección de devanado, lo cual requiere un técnico externo. (1-2 semanas)	8	1	10	80	No Tolerable

Tabla D.14: Análisis RCM con valoración NPR de extractor (1).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Extractor									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Turbina	Generar presión de vacío de aire desde la presión atmosférica hasta la presión de trabajo.	No genera el vacío hasta la presión de trabajo.	Desgaste o rotura de sellos de voluta.	Se generan sonidos anómalos durante el funcionamiento de la bomba, se debe desarmar y detectar la fuente de la anomalía, se pierden la mayoría de operaciones del sistema. Repuesto adquirible localmente. (1-5 días)	6	2	6	72	Tolerable
			Desgaste o rotura de sellos de impulsor.		6	2	6	72	Tolerable
			Desgaste de cojinetes o rodamientos.		8	1	10	80	No Tolerable
Sistema de admisión	Entregar alimentación de aire a presión atmosférica	No entrega la cantidad de flujo de aire nominal.	Suciedad en elementos de admisión.	Disminución en la presión de trabajo y aumento de temperatura de funcionamiento, disminuye parcialmente la capacidad del activo, corregible rápidamente. (5-10 minutos)	2	7	4	56	Tolerable

Tabla D.15: Análisis RCM con valoración NPR de extractor (2).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Extractor									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Motor Eléctrico	Generar la conversión de energía eléctrica a mecánica	No se genera la conversión de energía eléctrica a mecánica.	Red de alimentación entrega bajo voltaje durante un corto tiempo	Bomba de vacío no parte o tiene un funcionamiento lento evidente, si continua la operación puede generar daños permanentes en el estator. Corregible deteniendo las funciones por un lapso corto de tiempo (5-10 minutos).	1	1	2	2	Tolerable
			Capacitor de partida quemado por desgaste	Bomba de vacío se detiene repentinamente y se evidencia un olor a quemado en la zona del capacitor. Se debe reemplazar componente, adquirible localmente (1-5 días).	6	1	8	48	Tolerable
			Estator con devanado quemado por desgaste	Bomba de vacío se detiene repentinamente y no vuelve a encender, si no hay anomalías visibles, se requiere inspección de devanado, lo cual requiere un técnico externo. (1-2 semanas).	8	1	10	80	No Tolerable

Tabla D.16: Análisis RCM con valoración NPR de extractor (3).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis RCM con valoración NPR									
Activo: Extractor									
Subsistema	Descripción de la función	Descripción de falla funcional	Descripción del modo de falla	Descripción del efecto	S	O	D	NPR	Evaluación
Mangas y sellos	Realizar extracción de partículas de polvo, cenizas y gases.	No realiza la extracción de partículas de polvo, cenizas y gases	Desgaste de sellos.	En funcionamiento, se acumula material particulado en la zona de operación generando fugas en la zona del elemento dañado. Se debe realizar remplazo de componente, estos pueden comprarse localmente. (1-5 días)	6	1	6	36	Tolerable
			Rotura de mangas por desgaste.		6	1	8	48	Tolerable
Filtros	Realizar el flujo y acumulación selectiva de polvo, cenizas y gases en base a su granulometría.	Se obstruye el flujo y la acumulación selectiva de polvo, cenizas y gases	Primera etapa (G3) obstruida por ciclo de operación.	Durante la operación, se acumula material particulado en zona de operación debido a la obstrucción de uno de los filtros, se debe realizar remplazo, estos pueden comprarse localmente. (1-5 días)	10	4	8	320	No Tolerable
			Segunda etapa (F8) obstruida por ciclo de operación.		10	2	8	160	No Tolerable
			Tercera etapa (H13) obstruida por ciclo de operación.		10	2	8	160	No Tolerable
			Cuarta etapa (C.A.) obstruida por ciclo de operación.		10	2	8	160	No Tolerable

Tabla D.17: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de enfriador (1).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Enfriador	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Modo de falla	Descripción del efecto	Tipo de falla	Condición	S-MA	Costo/op.	Categoría RCM
Intercambiador de calor.	Termostato descalibrado por desgaste.	Al momento de producirse sobrecalentamiento, no se activa señal de alarma y no se detiene el funcionamiento del equipo, ocasionando rotura de tubo de Co2 (6-12 meses).	FO	FM	No	Sí	Consecuencias operacionales ocultas.
Sistema de circulación.	Serpentín con fuga por desgaste.	Al momento de encender el equipo, se activa la señal de alarma roja antes de empezar a funcionar, se debe realizar remplazo, compra de repuesto local. (1-5 días)	FE	MF	No	No	Evidentes consecuencias operacionales
Dispositivos de seguridad.	Falla de sensor de caudal por desgaste.	Al momento de presentarse obstrucciones de flujo, la bomba seguirá funcionando, dañando los sellos y elementos del sistema de circulación por presión, generando un ambiente de riesgo de electrocución. Se debe realizar remplazo, el repuesto se puede adquirir localmente.	FO	MF	Sí	No	Consecuencias a la seguridad y medio ambiente ocultas.

Tabla D.18: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de enfriador (2).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Enfriador	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Modo de falla	Descripción del efecto	Tipo de falla	Condición	S-MA	Costo/op.	Categoría RCM
Dispositivos de seguridad	Falla de sensor de temperatura por desgaste.	Al momento de presentarse alguna condición operacional que haga circular el flujo sobre 30°C, el equipo debe frenar la operación y generar una alarma sonora para cortar el funcionamiento del sistema de cortado laser, este no se activa y genera la rotura del tubo de CO ₂ . Se debe realizar reemplazo, el repuesto se puede adquirir localmente. (1-5 días)	FO	MF	No	Sí	Consecuencias operacionales ocultas.

Tabla D.19: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de cortadora laser (1).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Cortadora Laser	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Causas	Descripción del efecto	Tipo de falla	Condición	S-MA	Costo/op.	Categoría RCM
Cabezal	Desgaste de lente.	Producto final con sobre quemaduras en los bordes, el lente debe ser remplazado, con repuesto disponible en zona. (2- 3 semanas).	FE	MF	No	Sí	Evidentes consecuencias operacionales.
Generación de Laser	Rotura de Tubo CO ₂ por temperatura.	Tubo de laser roto por temperatura, impacto elevado en las operaciones. (6-12 meses)	FE	FM	No	Sí	
	Desgaste de espejos.	Producto final con sobre quemaduras en los bordes, los espejos deben ser remplazado, con repuesto disponible en zona. (2- 3 semanas).	FE	MF	No	Sí	
Portal	Elementos de transmisión en falla completa por desgaste.	Ruidos anómalos desde la transmisión sin generar movimiento, si se produce mediante operación de corte, hay riesgo de incendio, se debe remplazar. (1-5 días).	FE	MF	Sí	No	Evidentes consecuencias para el medio ambiente.

Tabla D.20: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de cortadora laser (2).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Cortadora Laser	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Causas	Descripción del efecto	Tipo de falla	Condición	S- MA	Costo/op.	Categoría RCM
Portal	Falla de motores DC por desgaste.	Equipo conectado y energizado no genera operación, en caso de ocurrir en medio de una operación de corte, hay riesgo de incendio. Repuesto disponible dentro de la zona (2-4 semanas).	FE	MF	Sí	Sí	Evidentes consecuencias a la seguridad-medio ambiente.
Mesa de corte	Elementos de transmisión en falla completa por desgaste.	Ruidos anómalos desde la transmisión sin generar movimiento, si se produce mediante operación de corte, hay riesgo de incendio, se debe remplazar. (1-5 días).	FE	MF	Sí	Sí	
	Falla de motores DC por desgaste.	En operación se generan golpeteos hasta desarrollar una falla completa y deja de funcionar, en caso de ocurrir en medio de una operación de corte, hay riesgo de	FE	MF	Sí	Sí	

		incendio. Repuesto disponible dentro de la zona (2-4 semanas).				
--	--	--	--	--	--	--

Tabla D.21: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de cortadora laser (3).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Cortadora Laser	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Causas	Descripción del efecto	Tipo de falla	Condición	S-MA	Costo/op.	Categoría RCM
Dispositivos de seguridad	Falla de contactos por desgaste	Al momento de realizarse la operación, y abrir alguna de las puertas, no se realiza el corte de la operación, lo cual puede ocasionar accidentes o daños producto de la radiación UV del Haz de láser, se debe realizar remplazo del componente, mediante la ayuda de un externo.	FO	MF	Sí	No	Consecuencias ocultas a la seguridad- medio ambiente.
	Falla de parada de emergencia por desgaste	Al momento de una emergencia no se detiene la operación, lo cual puede producir incendios, riesgo a la salud-medio ambiente. se debe realizar remplazo del componente, mediante la ayuda de un externo.	FO	MF	Sí	Sí	

Tabla D.22: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de cortadora laser (4).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Cortadora Laser	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Causas	Descripción del efecto	Tipo de falla	Condición	S-MA	Costo/op.	Categoría RCM
Sistema Eléctrico	Fuente de poder quemada por desgaste.	El activo se encuentra conectado, pero no se genera funcionamiento normal, el panel de control se encuentra apagado o el activo funciona a golpes producto que no da la energía suficiente para generar el torque mínimo de funcionamiento para los motores DC. Se requiere la presencia de un externo para evaluar el componente en falla. (1-2 semanas).	FE	MF	No	Sí	Evidentes consecuencias operacionales.
	Placa de potencia quemada por desgaste.		FE	MF	No	Sí	
	Transformador quemado por desgaste.		FE	MF	No	Sí	
	Placa de control quemada por desgaste.		FE	MF	No	Sí	

Tabla D.23: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de compresor de pistón (1).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Compresor de pistón	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Modo de falla	Descripción del efecto	Tipo	Condición	S-MA	Costo/op	Categoría RCM
Sistema de compresión	Desgaste de cojinetes o rodamientos.	Se generan sonidos anómalos durante el funcionamiento del compresor, se debe desarmar y detectar la fuente de la anomalía, se pierden la mayoría de operaciones del sistema. Repuesto adquirible localmente. (1-5 días)	FE	MF	No	Sí	Evidentes consecuencias operacionales.
Sistema electromecánico	Estator con devanado quemado por desgaste.	Compresor se detiene repentinamente y no vuelve a encender, si no hay anomalías visibles, se requiere inspección de devanado, lo cual requiere un técnico externo. (1-2 semanas)	FE	MF	No	Sí	

Tabla D.24: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de extractor (1).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Extractor	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Modo de falla	Descripción del efecto	Tipo de falla	Condición	S-MA	Costo/op.	Categoría RCM
Turbina	Desgaste de cojinetes o rodamientos.	Se generan sonidos anómalos durante el funcionamiento de la bomba, se debe desarmar y detectar la fuente de la anomalía, se pierden la mayoría de operaciones del sistema. Repuesto adquirible localmente. (1-5 días)	FE	MF	No	Sí	Evidentes consecuencias operacionales.
Motor Eléctrico	Estator con devanado quemado por desgaste	Bomba de vacío se detiene repentinamente y no vuelve a encender, si no hay anomalías visibles, se requiere inspección de devanado, lo cual requiere un técnico externo. (1-2 semanas).	FE	MF	No	Sí	


Tabla D.25: Categorización de consecuencias y selección de algoritmo RCM para determinar actividades de mantenimiento de extractor (2).

Fuente: Elaboración propia.

Categorización RCM de consecuencias							
Activo: Extractor	Modos de falla críticos		Categoría de Falla		Categoría de Consecuencia		Selección de algoritmo
Subsistema	Modo de falla	Descripción del efecto	Tipo de falla	Condición	S-MA	Costo/op.	Categoría RCM
Filtros	Primera etapa (G3) obstruida por ciclo de operación.	Durante la operación, se acumula material particulado en zona de operación debido a la obstrucción de uno de los filtros, se debe realizar remplazo, estos pueden comprarse localmente. (1-5 días)	FE	MF	Sí	No	Evidentes consecuencias a la seguridad-medio ambiente.
	Segunda etapa (F8) obstruida por ciclo de operación.						
	Tercera etapa (H13) obstruida por ciclo de operación.						
	Cuarta etapa (C.A.) obstruida por ciclo de operación.						

Tabla D.26: Tecnologías basadas en condición disponibles en el mercado.

Fuente: Revista *MaintWorld*, 2013 [33].



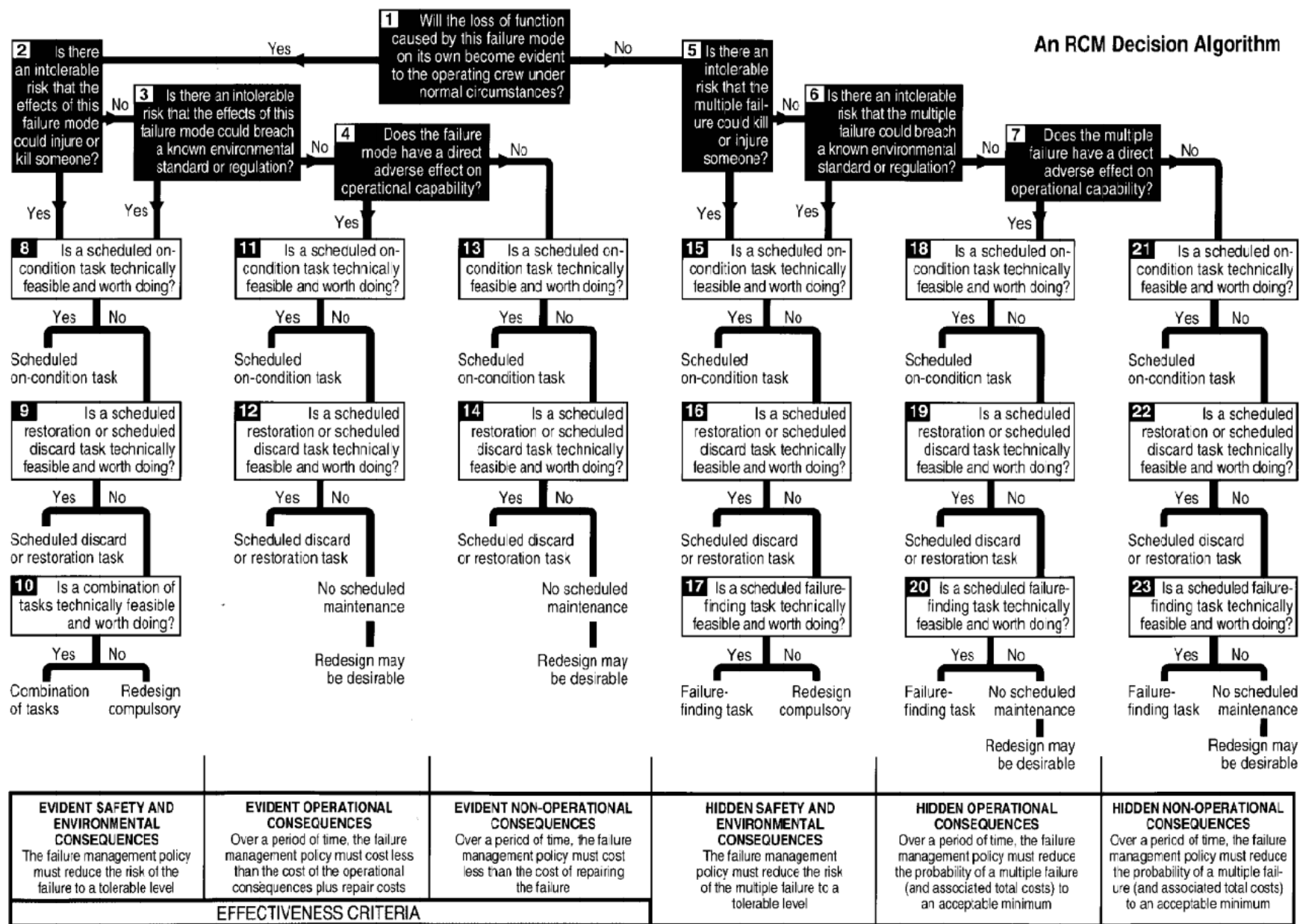
APPLICATIONS	Mechanical														Electrical					
	Eddy Current Thickness	Vibration Monitoring	Lubricant Analysis/Fluid Analysis	Wear Particle Analysis	Bearing Temperature Analysis	Leakage Detection	Performance Monitoring	Ultrasonic Monitoring (Bearings)	Ultrasonic Flow	Infrared Thermography	Precise Timing & Trending	Proximity Position	Visual Inspection	RF Monitoring	Insulation Resistance	Motor Current Signature Analysis	Motor Circuit Signature Analysis	Polarization Index/Dissipation Factor	Cable Condition Monitoring	Transformer Oil and Gas
Generators	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Turbines	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Pumps	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Electric Motors	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Diesel Generator Engines	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Condensers	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Conveyors	●	●	●	●								●	●	●	●	●	●			
Heavy Equipment/Cranes		●	●	●					●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Circuit Breakers								●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Valves					●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Heat Exchangers	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Electrical Systems									●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

©PdMA Corporation Used by Permission

Diagrama D.1: Algoritmo de decisión RCM

Fuente: Figura 16 de Norma SAE JA 1012, 2002 [14].

An RCM Decision Algorithm



E. Orden de trabajo y registros de actividades RCM


	Orden de trabajo		Versión: 1 Registro: 1 Fecha: 05-10-2019
Aprobado por:		Firma:	
Firma de digitalizador:			
Fecha de emisión:		Sección:	
Fecha de cierre:		N° de máquina:	
Marque con X el estado.		Tipo de mantenimiento Predictivo: <input type="checkbox"/> Preventivo: <input type="checkbox"/> Correctivo: <input type="checkbox"/>	
Tarea de mantenimiento realizada			
Descripción de tareas		Duración	
Lista de materiales			
N°	Descripción de materiales	Cantidad	
Lista de componentes			
N°	Descripción de componentes	Cantidad	

Figura E.1: Orden de trabajo para realizar actividades de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia, basado en la planilla de [15].

N° de Máquina	Control de calidad de corte Máquinas cortadoras laser	Versión:	1
		Registro:	3
		Fecha:	05-10-2019

Realizado por:	Firma:
Firma de digitalizador:	
Fecha:	Sección: Sistemas de cortado Laser.
Frecuencia: Trimestral.	

Tarea a condición de calidad del producto.				
Instrucciones: Utilizando el archivo estandarizado, realice los cortes en cada una de las esquinas de la mesa de trabajo, midiendo la lectura de corriente en la parte posterior del equipo mientras se realiza una de las operaciones de corte.				
Parámetros		<div style="text-align: center;">  </div> $Kerf = \frac{20 - Lado\ 1 - Lado\ 2}{2}$		
Velocidad de corte				
Potencia				
Material				
Espesor				
Medición	Lado 1	Lado 2	Lectura de corriente	Kerf
Superior izquierda				
Superior derecha				
Inferior izquierda				
Inferior derecha				
Actividades de mantenimiento a condición				
Kerf distintos y calidad de corte distinta	Se debe verificar la rectitud de mesa de trabajo.			
Buena calidad de corte, pero kerf alto	Se debe verificar el estado de la tensión de correas o anomalías en la transmisión.			
Mala calidad en todos los cortes realizados.	Se debe verificar enfoque y estado de lente.			
	Se debe verificar estado de espejos.			
Anomalías en calidad de corte y en lectura de corriente	Se debe verificar estado de placa de control de potencia y conexiones eléctricas a tubo de CO2.			

Figura E.2: Tareas a condición sujetas a test de calidad de corte para máquina cortadora laser.

Fuente: Elaboración propia.

N° de Máquina	Tareas RCM Sistemas de cortado Laser		Versión:	1
			Registro:	4
			Fecha:	05-10-2019
Realizado por:		Firma:		
Firma de digitalizador:				
Fecha:		Sección: Sistemas de cortado Laser.		
Frecuencia: Mensual.				
Tareas a condición bomba y compresor				
Instrucciones: Después de 5 minutos operando utilizando termómetro infrarojo, realice medición de temperatura de compresor y bomba de vacío.				
T° Compresor:		T° Bomba de vacío		
Tareas de búsqueda de fallas Sistema de cortado Laser				
Dispositivos de seguridad		Bien	Mal	Observaciones
Cortadora Laser.	Corta corriente de vidrio de cortadora laser operativo.			
	Parada de emergencia operativa.			
Enfriador	Sensor de caudal responde a proximidad de objeto metálico.			
	Temperatura de tanque medida con termometro es igual a la del termostato.			

Figura E.3: Tareas de búsqueda de fallas de dispositivos de seguridad y tareas a condición primaria para sistema de cortado laser.

Fuente: Elaboración propia.

N° de Máquina	Rutina de inspección Sistemas de cortado Laser.		Versión:	1
			Registro:	2
			Fecha:	05-10-2019

Aprobado por:	Firma:
Firma de digitalizador:	
Fecha:	Sección:
Frecuencia: Semanal.	
Marque con X el estado.	

Actividades de Inspección rutinarias.			
Sistema eléctrico	Bien	Mal	Observaciones
Los cables de alimentación se encuentran en buen estado.			
Pin de auto enfoque	Bien	Mal	Observaciones
Pin de auto enfoque en buen estado.			
Mesa de trabajo	Bien	Mal	Observaciones
Mesa de trabajo se encuentra en buen estado.			
Transmisión	Bien	Mal	Observaciones
Rieles de portal en buen estado.			
Husillos, correas, poleas y engranajes en buen estado.			
Manómetro de compresor	Bien	Mal	Observaciones
Presión [bar] :			
Bomba de vacío	Bien	Mal	Observaciones
Sin anomalías sonoras o vibraciones excesivas del sistema de extracción.			
Elementos de seguridad	Bien	Mal	Observaciones
Lentes de seguridad y mascarillas en zona de trabajo y en buen estado.			
Observaciones adicionales			

Figura E.4: Rutina de inspección semanal de equipos de cortado laser.

Fuente: Elaboración propia.

F. Estimación de costos anuales de plan de mantenimiento

Tabla F.1: Estimación de costo anual de componentes de plan de mantenimiento actual y de propuesto.

Fuente: Elaboración propia, basado en la metodología de [15].

Gasto de componentes plan de mantenimiento Actual						
Componente	Proveedor	Cantidad de producto [unidades,ml,gr]	Precio unitario	Consumo anual de unidades	Cantidad de sistemas	Gasto anual de componentes
Filtro G3	ProCad	1	\$ 9.281,00	24	2	\$ 445.488,00
Filtro F8	ProCad	1	\$ 111.365,00	6		\$ 1.336.380,00
Filtro H13	ProCad	1	\$ 136.125,00	2		\$ 544.500,00
Filtro C.A.	ProCad	1	\$ 185.125,00	1,2		\$ 444.300,00
				Costo anual		\$ 2.770.668,00
Gasto de componentes propuesto de plan de mantenimiento						
Componente	Proveedor	Cantidad de producto [unidades,ml,gr]	Precio unitario	Consumo anual de unidades	Cantidad de sistemas	Gasto anual de unidades
Filtro G3	ProCad	1	\$ 9.281,00	4,00	2	\$ 74.248,00
Filtro F8	ProCad	1	\$ 111.365,00	2,00		\$ 445.460,00
Filtro H13	ProCad	1	\$ 136.125,00	0,50		\$ 136.125,00
Filtro C.A.	ProCad	1	\$ 185.125,00	0,33		\$ 123.416,67
				Costo anual		\$ 779.249,67

Tabla F.2: Estimación de costo anual de insumos de plan de mantenimiento actual y de propuesto.

Fuente: Elaboración propia, basado en la metodología de [15].

Gasto de insumos plan de mantenimiento Actual					
Insumo	Marca	Cantidad de producto [ml,gr,cm,unidades]	Precio de producto	Consumo anual de unidades	Gasto anual de insumos
Cotones anti estáticos.	Pro-store	100	\$ 17.900,00	48	\$ 17.900,00
Paños de limpieza de microfibra	Selex	50	\$ 5.000,00	48	\$ 5.000,00
Líquido de limpieza para lentes	Uffen	37	\$ 5.000,00	9,6	\$ 5.000,00
Limpiador multipropósito	Maxitrol	1000	\$ 7.000,00	960	\$ 7.000,00
Paños de limpieza desechables	House solutions	100	\$ 4.300,00	192	\$ 8.600,00
Lubricante universal de metal	Griffon	100	\$ 2.600,00	28,8	\$ 2.600,00
Grasa para rodamientos	Vistony	453	\$ 1.800,00	240	\$ 1.800,00
Agua destilada	Auto drive	5000	\$ 8.000,00	20000,00	\$ 32.000,00
				Costo anual	\$ 79.900,00
Gasto de insumos propuesto de plan de mantenimiento					
Insumo	Marca	Cantidad [ml,gr,cm,unidades]	Precio de producto	Consumo anual de unidades	Gasto anual de insumos
Cotones anti estáticos.	Pro-store	100	\$ 17.900,00	48	\$ 17.900,00
Paños de limpieza de microfibra	Selex	50	\$ 5.000,00	48	\$ 5.000,00
Líquido de limpieza para lentes	Uffen	37	\$ 5.000,00	9,6	\$ 5.000,00
Limpiador multipropósito	Maxitrol	1000	\$ 7.000,00	960	\$ 7.000,00
Paños de limpieza desechables	House solutions	100	\$ 4.300,00	192	\$ 8.600,00
Lubricante universal de metal	Griffon	100	\$ 2.600,00	28,8	\$ 2.600,00
Grasa para rodamientos	Vistony	453	\$ 1.800,00	240	\$ 1.800,00
MDF	Sodimac	10000	\$ 4.000,00	9600	\$ 4.000,00
Agua destilada	Auto drive	5000	\$ 8.000,00	20000,00	\$ 32.000,00
Spray de aire comprimido	Falcon	300	\$ 7.990,00	1200,00	\$ 31.960,00
				Costo anual	\$ 115.860,00

Tabla F.3: Estimación de costo de mano de obra de plan de mantenimiento actual y de propuesto.

Fuente: Elaboración propia, basado en la metodología de [15].

Gasto anual en mano de obra plan de mantenimiento actual			
Cargo	Costo por hora	Horas anuales	Costo anual
Ayudante de mantenimiento	\$ 2.500,00	27,3	\$ 68.250,00
Encargado de espacio	\$ 6.300,00	0	\$ 0,00
		Gasto anual	\$ 68.250,00
Gasto anual en mano de obra propuesto de plan de mantenimiento.			
Cargo	Costo por hora	Horas anuales	Costo anual
Ayudante de mantenimiento	\$ 2.500,00	48,5	\$ 121.250,00
Encargado de espacio	\$ 6.300,00	12	\$ 75.600,00
		Gasto anual	\$ 196.850,00