

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE IMPRESORAS 3D FDM UTILIZANDO OCTOPRINT

Pablo Alejandro Ruz Donoso

**Profesor Guía:
Pablo Alvarado M.**

**Trabajo de titulación presentado en
conformidad de los requisitos para
obtener el título de Ingeniero Civil
en Mecánica**

**SANTIAGO – CHILE
2020**

© Pablo Alejandro Ruz Donoso

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

A Santiago Ruz y Alejandra Donoso

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi infinito agradecimiento y gratitud a mi familia, padres, hermanos y amigos. Gracias a su apoyo incondicional durante todos estos años, y a pesar de la distancia, estas palabras pudieron ser escritas.

Al profesor Pablo Alvarado, por su disposición a colaborar como profesor guía de este trabajo, su respaldo y la confianza ofrecida en el desarrollo de la tesis.

Por la posibilidad de desarrollar mi tesis en su emprendimiento y practicar el aprendizaje colaborativo en las disciplinas del diseño y la impresión 3D, mi gratitud Javier Oliva de 3Dlux.

También, mi profundo agradecimiento a los compañeros y compañeras de Educazul Pudahuel quienes, desde el comienzo de este trabajo, estuvieron dando el aguante sin condiciones.

Un trabajo creativo siempre es colectivo, fruto de conversaciones, relecturas y correcciones. En este sentido, agradezco a Pamela Navarro por su disposición desde un comienzo a colaborar con esta tesis y su apoyo en los momentos más complejos. También, a Macarena Hernandez, por su ayuda en las correcciones finales, y a todos aquellos quienes se dieron el tiempo de leer y comentar este trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el desarrollo de una aplicación web para la gestión de la producción y el mantenimiento de impresoras 3D utilizando el software Octoprint, aplicado en la empresa de fabricación digital 3Dlux. Para la ejecución del proyecto, se realiza un levantamiento de información correspondiente al historial de fallas para cada máquina dispuesta en el taller. La realización del plan de mantenimiento se basa en los resultados obtenidos aplicando la teoría de la confiabilidad, criticidad de los equipos, la delimitación del contexto operacional y funciones, diagrama de sistemas y confección de los árboles de falla. Posteriormente, el análisis de modos y efectos de falla permite dar una estructura del análisis, así también los diagramas de decisión para las acciones de mantenimiento a realizar. Para la determinación de los parámetros de forma y escala, se efectúa un análisis de Weibull para cada impresora en cuestión. Seguidamente, la aplicación de la metodología de Design Thinking posibilita un desarrollo centrado en el usuario operador, considerando la situación actual, la investigación de referentes y herramientas de desarrollo. El resultado consiste en una aplicación web para el registro y control de mantenimientos autónomos, proactivos y preventivos, registro de mantenimientos correctivos y no planificados, y el monitoreo de la condición a partir del estado en vivo de la máquina e indicadores de confiabilidad.

Palabras Claves: Impresión 3D; Mantenimiento; Confiabilidad; Aplicación Web; Design Thinking

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	xiii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes y motivación	3
1.2. Objetivos y alcance del proyecto	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.2.3. Alcances	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Fabricación aditiva	6
2.2. Impresión 3D	8
2.2.1. Historia de la impresión 3D	9
2.2.2. Tecnologías de impresión 3D	14
2.2.3. Impresoras 3D de Modelado por Deposición Fundida	15
2.2.4. Tipologías de impresión 3D de Modelado por Deposición Fundida	18
2.3. Mantenimiento	21
2.3.1. Historia y evolución del mantenimiento	22
2.3.2. Mantenimiento correctivo	26

ÍNDICE DE CONTENIDOS

v

2.3.3. Mantenimiento preventivo	28
2.3.4. Mantenimiento centrado en la condición	30
2.3.5. Mantenimiento centrado en la confiabilidad	34
2.3.6. Confiabilidad	40
2.4. Metodologías ágiles	45
2.4.1. Design Thinking	46
2.4.2. Fases del Design Thinking	48
2.5. Herramientas de software	51
2.5.1. Lenguajes de programación orientada a objetos	51
2.5.2. Lenguajes de hojas de estilo	53
2.5.3. Bases de datos	53
2.5.4. Arquitectura Cliente-Servidor	55
2.5.5. Interfaz de Programación de Aplicaciones	57
2.5.6. Ordenadores de placa reducida	60
3. Estado del Arte	63
3.1. Gestión de la producción en la fabricación aditiva	63
3.2. Gestión del mantenimiento basado en la teoría de la confiabilidad	73
3.3. Tecnologías innovadoras que utilicen Gestión del mantenimiento Asistido por Computadora.	77
4. Desarrollo del proyecto	81
4.1. Antecedentes de la empresa	81
4.1.1. Descripción de la empresa	81
4.2. Descripción del Problema	82
4.3. Aplicación de mantenimiento basado en la teoría de la confiabilidad	83
4.3.1. Selección del equipo	83
4.3.2. Descripción del equipo	90

4.3.3. Contexto Operacional	97
4.3.4. Delimitación de funciones	99
4.3.5. Determinación de fallas	100
4.3.6. Análisis de Modos y Efectos de Falla	105
4.3.7. Análisis de confiabilidad método de Weibull	122
4.4. Plan de Mantenimiento	130
4.5. Aplicación de metodología Design Thinking para el desarrollo de Aplicación Web	131
4.5.1. Situación actual	132
4.5.2. Planificación del marco de trabajo	134
4.5.3. Empatizar	135
4.5.4. Definir	141
4.5.5. Investigar	143
4.5.6. Idear	160
4.5.7. Prototipar	162
4.5.8. Implementar y testear	170
Conclusiones	179
Apéndices	187
Apéndice	188
4.6. Registro y levantamiento de información	188
4.7. Análisis de Weibull	189

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.	Tamaño del mercado y pronóstico de la impresión 3D [11].	13
2.2.	Hype Cycle o Ciclo de sobreexpectación de Gartner de la tecnología de impresión 3D al año 2019 [12].	14
2.3.	Proceso de impresión 3D FDM [15]	16
2.4.	Esquema de funcionamiento de impresión 3D FDM [15].	16
2.5.	Esquema de impresora 3D cartesiana [16].	19
2.6.	Esquema de impresora 3D Delta [16].	19
2.7.	Esquema de impresora 3D polar [17]	20
2.8.	Esquema de impresora 3D SCARA [18]	20
2.9.	Esquema conceptual de niveles [40]	55
2.10.	Modelo Cliente/Servidor [41].	56
2.11.	Raspberry Pi 3 modelo B+ [45]	62
3.1.	Número de publicaciones por año y según temática [46]	65
3.2.	Marco de trabajo para la programación de la producción [46]	71
3.3.	Diagrama de Pareto por número de fallas para Plegadora [47]	75
3.4.	Curva de confiabilidad para la sección de plegado [47]	76
3.5.	Indicadores de mantenimiento para la sección de plegado [47]	76
3.6.	Diagrama UML que describe la relación de los registros entre máquinas, fallas, causas y acciones de mantenimiento [48]	78

3.7. Sistema de Realidad Aumentada integrado con CMMS. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: (a) operador utiliza el sistema utilizando teclado inalámbrico; (b) funcionalidad del sistema; (c) operación de diagnóstico basado en el historial de fallas; (d) guía del sistema al operador a través de instrucciones de texto y video [48].	79
4.1. Diagrama de Pareto para impresora X350.	86
4.2. Diagrama de Pareto para impresora X400.	86
4.3. Diagrama de Pareto para impresora Prusa MK3.	87
4.4. Layout y simbología del taller de impresión 3D.	98
4.5. Diagrama funcional de bloques para la máquina de impresión 3D.	100
4.6. Árbol de fallas de impresora 3D.	102
4.7. Continuación del árbol de fallas de impresora 3D.	103
4.8. Continuación del árbol de fallas de impresora 3D.	103
4.9. Continuación del árbol de fallas de impresora 3D.	104
4.10. Árbol de fallas de impresora 3D.	104
4.11. Diagrama de decisión para impresora 3D.	107
4.12. Hoja de información RCM para subsistema de extrusión de impresora X350.	109
4.13. Continuación de hoja de información RCM para subsistema de extrusión de impresora X350.	110
4.14. Continuación de hoja de información RCM para subsistema de extrusión de impresora X350.	111
4.15. Hoja de decisión RCM para subsistema de extrusión de impresora X350	112
4.16. Continuación de hoja de decisión RCM para subsistema de extrusión de impresora X350	113

4.17. Continuación de hoja de decisión RCM para subsistema de extrusión de impresora X350	113
4.18. Hoja de información RCM para subsistema de movimiento de impresora X350.	114
4.19. Continuación de hoja de información RCM para subsistema de movimiento de impresora X350.	115
4.20. Continuación de hoja de información RCM para subsistema de movimiento de impresora X350.	116
4.21. Hoja de decisión RCM para subsistema de movimiento de impresora X350	117
4.22. Continuación de hoja de decisión RCM para subsistema de movimiento de impresora X350	118
4.23. Hoja de información RCM para subsistema de control de impresora X350	118
4.24. Hoja de decisión RCM para subsistema de control de impresora X350	119
4.25. Hoja de información RCM para subsistema de alimentación de impresora X350	119
4.26. Hoja de decisión RCM para subsistema de alimentación de impresora X350	120
4.27. Hoja de información RCM para subsistema de construcción de impresora X350	121
4.28. Continuación de hoja de información RCM para subsistema de construcción de impresora X350	121
4.29. Hoja de decisión RCM para subsistema de construcción de impresora X350	122
4.30. Gráfica de dispersión con ajuste lineal para máquina X350	123
4.31. Parámetros de Weibull para máquina X350	124

4.32. Gráfico de confiabilidad para máquina X350	125
4.33. Parámetros de Weibull para máquina X400	126
4.34. Parámetros de Weibull para máquina X400	126
4.35. Gráfico de confiabilidad para máquina X400	127
4.36. Parámetros de Weibull para máquina Prusa MK3	128
4.37. Parámetros de Weibull para máquina Prusa MK3	128
4.38. Gráfico de confiabilidad para máquina Prusa MK3	129
4.39. Diagrama de flujos para el proceso de recepción, producción y entrega de piezas y productos.	132
4.40. Diagrama de flujo del proceso de impresión 3D.	133
4.41. Mapa de Stakeholders del proyecto.	136
4.42. Primera etapa del mapa de experiencia.	139
4.43. Segunda etapa del mapa de experiencia.	139
4.44. Tercera etapa del mapa de experiencia.	140
4.45. Captura de interfaz utilizada por <i>3Dtrust</i> para el monitoreo de la condición.	145
4.46. Captura de interfaz utilizada por <i>3Dtrust</i> para el monitoreo de la condición.	145
4.47. Captura de interfaz utilizada por <i>3Dtrust</i> para el control de la producción.	146
4.48. Captura de interfaz utilizada por <i>AMFG</i> para el control de la producción	147
4.49. Captura de interfaz utilizada por <i>AMFG</i> para el control de la producción.	147
4.50. Captura de interfaz utilizada por <i>FRACCTAL</i> para el control de indicadores.	148
4.51. Captura de interfaz utilizada por <i>FRACCTAL</i> para el control del mantenimiento.	148

4.52.Captura de interfaz utilizada por la aplicación <i>FRACCTAL</i> para la gestión de tareas.	149
4.53.Interfaz del estado actual de una impresora 3D en Octoprint (Recuperado https://www.octoprint.org)	152
4.54.Interfaz del mando a distancia de una impresora 3D en Octoprint (Recuperado https://www.octoprint.org)	152
4.55.Visualización de datos en grafana [55].	157
4.56.Nodos utilizados en la programación por flujos En Node-Red.	158
4.57.Dashboard de Node-red para acceso remoto por navegador.	158
4.58.Interfaz de bases de datos MySQL en PHPMyAdmin	159
4.59.Esquema de la arquitectura propuesta para la aplicación	163
4.60.Esquema de las bases de datos propuestas para la aplicación	164
4.61.Base de datos creada para series de tiempo en Influxdb	165
4.62.Mediciones en base de datos de series de tiempo.	165
4.63.Tabla de base de datos con el registro de los mantenimientos correctivos realizados.	166
4.64.Tabla de base de datos con el registro de las inspecciones previas realizadas.	166
4.65.Tabla de base de datos con el registro de las actividades no planificadas a realizar.	166
4.66.Tabla de base de datos con el registro de las impresiones terminadas.166	
4.67.Archivo csv obtenido de la base de datos.	167
4.68.Dashboard Inicial del programa de gestión del mantenimiento	171
4.69.Página de registro y control de mantenimientos correctivos.	172
4.70.Página de registro y control de acciones no planificadas.	173
4.71.Panel de control de Octoprint.	174
4.72.Dashboard de indicadores y monitoreo de la condición.	175

4.73. Segunda iteración para dashboard Inicial del programa de gestión del mantenimiento.	177
4.74. Segunda iteración para ingreso de datos de impresoras en mante- nimiento correctivo.	178
4.75. Segunda iteración para ingreso de datos de mantenimiento correctivo.	178
4.76. Registro de fallas en taller de impresión 3D.	188
4.77. Continuación de registros de fallas en taller de impresión 3D. . . .	189
4.78. Tiempo entre fallas, rango medio y linealización de función para análisis de Weibull para impresora X350.	189
4.79. Tiempo entre fallas, rango medio y linealización de función para análisis de Weibull para impresora X400.	190
4.80. Tiempo entre fallas, rango medio y linealización de función para análisis de Weibull para impresora Prusa MK2.	190
4.81. Pauta de preguntas para entrevista personal.	191
4.82. Continuación de pauta de preguntas para entrevista personal . . .	192
4.83. Respuestas de entrevista personal	193
4.84. Continuación de respuestas de entrevista personal.	194

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Principales materiales utilizados en impresión 3D FDM [15].	18
2.2. Principales diferencias entre Metodologías ágiles y tradicionales [33].	46
2.3. Tabla de preguntas y resultados con la técnica de las cinco W [35] .	49
2.4. Diferencias entre ficheros y bases de datos [40]	54
2.5. Funciones principales utilizadas en API [43]	58
3.1. Atributos y descripción para programación de la producción en máquinas de fabricación aditiva [46].	71
4.1. Fallas y frecuencia de ocurrencia para impresora X350.	85
4.2. Fallas y frecuencia de ocurrencia para impresora X400.	85
4.3. Fallas y frecuencia de ocurrencia para impresora Prusa MK2.	85
4.4. Ponderaciones para el ítem de frecuencia de fallas	89
4.5. Ponderaciones para el ítem de costo de reparación	89
4.6. Ponderaciones para el ítem de Impacto a la seguridad	89
4.7. Ponderaciones para el ítem de impacto operacional	89
4.8. Análisis de criticidad para determinar el activo más crítico.	90
4.9. Ficha Técnica de la máquina X350 German RepRap [50].	91
4.10. Impresora X350 desde izquierda a derecha, arriba a abajo: (a) frente; (b) inferior; (c) lateral; (d) superior; (e) trasera; (f) primer plano extrusor.	92
4.11. Tabla de componentes para impresora X350.	96

4.12.Tabla de problemas frecuentes entregados por el fabricante.	97
4.13.Símbolos y significados del árbol de fallas [51]	101
4.14.Estructura propuesta para hoja de Información RCM.	105
4.15.Estructura propuesta para hoja de Decisión RCM.	108
4.16.Parámetros de forma y escala obtenidos a través de la librería de python <i>scypi</i> para impresora X350.	124
4.17.Resultados de test de Shapiro para máquina X350.	125
4.18.Parámetros de forma y escala obtenidos a través de la librería de python <i>scypi</i> para impresora X400.	127
4.19.Resultados de test de Shapiro para máquina X400.	127
4.20.Parámetros de forma y escala obtenidos a través de la librería de python <i>scypi</i> para impresora Prusa MK3.	129
4.21.Resultados de test de Shapiro para máquina Prusa MK3	129
4.22.Tabla resumen del marco de trabajo y sus características.	135
4.23.Resumen de respuestas dadas por el operario de mantenimiento en entrevista.	137
4.24.Resultados de la técnica de las cinco W.	142
4.25.Tabla resumen del análisis de referentes según los criterios propuestos.	150
4.26.Ejemplo de una consulta GET a la API de <i>Octoprint</i>	153
4.27.Ejemplo de una respuesta en formato .json de la API de <i>Octoprint</i> ante la consulta GET.	154
4.28.Ejemplo de una consulta POST a la API de <i>Octoprint</i>	154
4.29.Ejemplo de respuesta exitosa de la API de <i>Octoprint</i> ante la consulta POST.	154
4.30.Principales operaciones permitidas por la API de <i>Octoprint</i>	155
4.31.Código en Node-red para la obtención del tiempo medio entre fallas. 167	

4.32.Código en Node-red para la obtención del tiempo medio para reparar	168
4.33.Código en Node-red para la obtención de la confiabilidad.	168
4.34.Query Mysql para la obtención de filamento impreso.	169
4.35.Query Mysql para la obtención del tiempo total de impresión. . . .	169
4.36.Query Mysql para la obtención de la cantidad total de piezas canceladas.	169
4.37.Query Mysql para la obtención de la cantidad total de piezas terminadas.	169

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Si bien las tecnologías aditivas y procesos de impresión 3D datan de la década de los ochenta, el advenimiento de un nuevo tipo de industria basada en la interconexión de los procesos, han hecho de esta tecnología un eslabón importante en el cambio de paradigma hacia la industria 4.0. Estos nuevos sistemas de procesos, con mayores niveles de automatización, conectividad y acceso a la información digital, han transformado tanto la manera en que los clientes acceden a los procesos productivos, como la forma en que los mismos trabajadores interactúan con las unidades de producción. En este sentido, uno de los aspectos más importantes es que el modelo de fabricación masiva basado en la automatización en serie pasa a ser de personalización en masas, presentando desafíos asociados al estudio de la demanda con un cliente hiperconectado, y el verdadero potencial que pueden tener los productos y servicios ofrecidos. En la medida en que una empresa es capaz de conocer las nuevas necesidades del cliente, puede adaptar sus aspectos tecnológicos, productivos y logísticos hacia una fabricación flexible, donde son importantes la personalización, modularización y estandarización de los procesos. En estas nuevas economías unitarias, las tecnologías aditivas como la impresión 3D permite llevar a la realidad el paradigma del lote unitario, puesto que otorga funcionalidad tanto en el diseño de los productos y su prototipado rápido, como en los procesos de fabricación orientado a la flexibilidad. En este sentido, determinar, medir, obtener, y discriminar la información relevante para la fabricación es esencial para interconectar y crear

redes de producción eficientes y flexibles. Actualmente, y en relación a la impresión 3D FDM, parte de la información es recogida por los principales softwares de Manufactura Asistida por Computadora, mas no es utilizada o aprovechada de forma idónea. Por otra parte, existen herramientas como el software *Octoprint*, el cual cumple la función de controlar una impresora 3D desde un servidor, lo que implica una gran ventaja en comparación con la acción manual, permitiendo el control remoto desde cualquier parte con acceso a Internet; no obstante, la aplicación solo opera en una sola impresora, limitando su funcionalidad. Asimismo, el servidor solo realiza actividades de monitoreo y control de la máquina, dejando de lado acciones relativas a la producción misma de piezas o el mantenimiento de las máquinas.

El presente trabajo consiste en el desarrollo de una aplicación web a través de una Interfaz de Aplicación de Programación (API por sus siglas en inglés) para la gestión de la producción y el mantenimiento de impresoras 3D FDM, por medio de la utilización del servidor e interfaz web *Octoprint*, utilizando el ordenador de placa reducida *Raspberry Pi*. En primer lugar, se determina el objeto de estudio y el planteamiento del problema a solucionar, seguido de los objetivos generales y específicos de este trabajo. Seguidamente, a modo de marco teórico se presenta la historia, métodos, tipologías y componentes de las impresoras 3D; historia, tipos de mantenimiento, modelos basados en confiabilidad, normativas asociadas a la gestión de activos y el mantenimiento; metodologías ágiles de diseño como Design Thinking; herramientas y lenguajes de programación relativas al desarrollo de aplicaciones web. A continuación, se presenta el estado del arte respecto a trabajos o proyectos similares a esta memoria, como lo son softwares GMAO y gestión de la fabricación aditiva. El desarrollo del proyecto se enfoca en la descripción de la empresa donde se desenvuelve este trabajo, los métodos utilizados para la generación de la aplicación, y los resultados de la aplicación de

la metodología de Design Thinking para el desarrollo de esta memoria. Luego, se muestran los resultados respecto a las pruebas realizadas, la definición de indicadores relevantes para el proceso, la toma de métricas y elaboración de documentación para instalación y uso de la aplicación web. Finalmente, se presentan las conclusiones y observaciones relativas a la realización de este trabajo, y la bibliografía utilizada.

1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

El desarrollo de este trabajo responde a la participación del autor por más de dos años en empresas enfocadas al diseño 3D y la fabricación digital a través de la impresión 3D FDM. Dentro de las motivaciones para la realización de este trabajo, y basada en la experiencia práctica, se identifican:

1. Plantear una solución tecnológica y eficiente para el control remoto de impresoras 3D con la menor cantidad de recursos posibles.
2. Utilizar la información entregada por un software existente para ampliar las funciones que un operario pueda realizar.
3. Incorporar conocimientos de programación y control de versiones relativos a la disciplina de la Ingeniería Mecánica y el Diseño.
4. Conocer y utilizar metodologías innovadoras para la gestión de activos y el mantenimiento.
5. Desarrollar una aplicación web que interactúe con máquinas de impresión 3D y sea capaz de emitir, recibir, editar y borrar información.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo general

Diseñar una aplicación de gestión de la producción y el mantenimiento correctivo y preventivo para la optimización de procesos de impresión 3D FDM.

1.2.2 Objetivos específicos

Para la consecución del objetivo general, se plantean las siguientes metas intermedias:

1. Identificar las variables implicadas en el proceso de impresión 3D que permitan obtener indicadores relacionados al mantenimiento.
2. Investigar compatibilidad entre hardware, software, protocolos de comunicación, y códigos de programación a utilizar.
3. Identificar registros y fichas técnicas de impresoras 3D.
4. Determinar relaciones matemáticas que permitan entregar indicadores relevantes para la producción y mantenimiento.
5. Diseñar funciones que permitan gestionar los datos de hardware y software para determinación de indicadores.
6. Diseñar interfaz de aplicación orientada al usuario.

1.2.3 Alcances

Se pretende desarrollar una Interfaz Programable de Aplicación utilizando como base el software Octoprint, de esta forma, se puede controlar y monitorizar en tiempo real el funcionamiento de las impresoras 3D, entregando indicadores para gestionar la producción y el mantenimiento de las máquinas. Para esto, se toman en cuenta los siguientes alcances:

1. Emplear metodologías ágiles para el diseño.
2. Utilizar softwares y herramientas de código abierto.
3. Trabajar en una plataforma cliente/servidor.
4. Diseñar un sistema enfocado en el usuario.
5. Tomar las entradas de impresoras, lista de piezas, tiempos de producción, peso de filamento y tiempo de actividad.
6. Configurar planificación y frecuencia de mantenimientos autónomos y preventivos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 FABRICACIÓN ADITIVA

El Estándar Internacional ISO/ASTM 52900 del año 2015 establece y define los términos usados en la tecnología de manufactura aditiva, relativos a la impresión 3D [1]:

- **Manufactura aditiva:** proceso de unión de material para producir piezas desde la data de un modelo 3D, usualmente capa sobre capa, que se opone a las metodologías de manufactura sustractiva y formativa.
- **Máquina de manufactura aditiva:** sección de un sistema de manufactura aditiva. Incluye hardware, software de control de la máquina, requiere de un software de configuración y accesorios periféricos para completar el ciclo de construcción para producir piezas.
- **Usuario de sistema de manufactura aditiva:** Operador o entidad que utiliza por entero un sistema de manufactura aditiva, o cualquier componente del sistema aditivo.
- **Extrusión de material:** Proceso de manufactura aditiva en el cual el material es dispensado selectivamente a través de un orificio de una boquilla.
- **Impresora 3D:** Fabricación de objetos a través de la deposición de material usando un cabezal de impresión, boquilla u otra tecnología de impresión.

- **Ciclo de construcción:** Proceso de ciclo simple en el cual uno o más componentes son construidos por capas en la cámara de procesos de un sistema de manufactura aditiva.
- **Plataforma de construcción:** (de una máquina) base que provee una superficie sobre la cual son construidas las piezas, desde el inicio y a través de todo el proceso de construcción.
- **Capas:** material dispuesto o extendido para crear una superficie.
- **Envoltura de construcción:** dimensiones máximas externas de los ejes-x, -y , y eje-z dentro del espacio de construcción donde las piezas pueden ser fabricadas.
- **Espacio de construcción:** lugar donde es posible fabricar las piezas, típicamente dentro de la cámara de construcción o sobre la plataforma de construcción.
- **Volumen de construcción:** volumen utilizable total, disponible en la máquina para construir piezas.
- **Origen, punto cero, (0,0,0):** punto universal de referencia designado, donde los tres ejes de coordenadas primarios se intersectan.
- **Parámetros del proceso:** configuración de los parámetros de operación y ajustes del sistema utilizados durante el ciclo de construcción.

2.2 IMPRESIÓN 3D

A diferencia de las técnicas principales que se emplean desde hace décadas en la fabricación de objetos, que se encargan de sustraer, combinar, o deformar paulatina y controladamente materia hasta llegar a una pieza final, la impresión 3D funciona de un modo completamente distinto. La pieza se crea en un solo paso, capa por capa, a un ritmo medio de uno a dos centímetros de altura por hora; el objeto creado puede constar de mecanismos internos (como rodamientos de bolas), formas tejidas y entrelazadas, o incluso huecos y curvas [2]. Pues bien, todas las impresoras 3D, están basadas sobre el mismo principio: un modelo digital es transformado a un objeto físico de 3 dimensiones por adición de material en capas. Esto se conoce alternativamente como *Manufactura Aditiva* [3]. Este tipo de fabricación también se puede englobar dentro de lo que se denomina *Fabricación digital*, cuyo principio básico es la transformación de la información desde el mundo físico al digital. Según [4], la fabricación digital incluye los siguientes sistemas y tecnologías:

1. Sistemas integrados: Es un *hardware* electrónico diseñado específicamente para llevar a cabo una o pocas tareas definidas. Las impresoras llevan un sistema electrónico integrado que utilizan para controlar los motores paso a paso que alimentan el papel, recibir información de los sensores de temperatura y finales de carrera, o que mandan al cabezal de impresión.
2. Sistemas CNC (*Computer Numeric Control* - control numérico computarizado): Es el control numérico de un sistema de automatización que se utiliza para controlar diferentes máquinas herramienta. Este sistema ha revolucionado la industria gracias a la simplificación del *software* de diseño en con-

junto con los lenguajes de programación como el *.gcode*. Esencialmente, un sistema CNC es cualquier sistema que utiliza un ordenador para controlar los movimientos de una máquina.

3. Software CAD (*Computer Aided Design* - diseño asistido por computador): es, en esencia, un programa que sirve para la creación, edición, análisis y visualización de modelos tridimensionales.

En la misma línea, y dependiendo de la profundidad técnica que el proceso de fabricación necesite, se agregan los sistemas [5]:

1. Software CAE (*Computer Aided Engineering* - Ingeniería Asistida por computador): Son los programas mayoritariamente usados para las tareas de análisis de ingeniería. Estos *softwares*, a través de métodos numéricos como el método de elementos finitos o dinámica de fluidos computacional, se utilizan para, por ejemplo, analizar la robustez y el funcionamiento de ensambles de piezas.
2. Software CAM (*Computer Aided Manufacturing* - Manufactura Asistida por computador): Corresponde a programas que controlan las herramientas de máquinas de control numérico relacionadas con el proceso de manufactura a realizar, generando un código específico para el producto a fabricar.

2.2.1 Historia de la impresión 3D

La primera vez que se hizo pública la conceptualización de algo que pudiese parecerse a una impresora 3D, se remonta al año 1964, cuando el científico y escritor británico Arthur C. Clarke realiza la descripción de una máquina ficticia llamada *El Replicador*. En teoría, este artefacto -que en palabras del

autor es *la invención que va a poner fin todas las invenciones*- sería capaz de crear una copia exacta de una cosa, reorganizando partículas subatómicas, y luego ensamblar esas moléculas para ser transformadas en un objeto real [6]. No obstante, el comienzo de la generación del concepto técnico de impresión 3D puede ser rastreado al año 1976, a partir de la creación de la primera impresora a tinta por inyección [7]. La utilización de la inyección de tinta abrió la pregunta respecto a qué tipo de materias primas podían ser utilizadas con esta tecnología, y cómo los mecanismos presentes en la época podían ser adaptados para abrir la posibilidad de ocupar otras materias primas. En Mayo de 1981, el Dr. Hideo Kodama del Instituto de Investigación Industrial del Municipio de Nagoya publicó detalles relativos a la técnica de prototipado rápido [7]. Esta investigación se considera como la primera publicación que describe la técnica de fabricación capa a capa propia de los procesos de impresión 3D; no obstante, los desarrollos de Kodama no llegaron a ser materializados debido a problemas encontrados en el proceso de fundido de material. [8]. Paralelamente, la idea de *máquinas de prototipado rápido* continuó su desarrollo en Francia, por Jean-Claude André, Oliver de Witte y Alain Le Méhauté. En la primera mitad de la década de los 80, Le Méhauté investigaba en la empresa Alcatel sobre partes y piezas generadas a partir de la geometría fractal, y la manera en que éstas podrían ser fabricadas dada su complejidad de forma. De Witte, quien era también investigador de Alcatel en el área de luz láser, propuso a le Méhauté que algunos líquidos compuestos por ciertos monómeros podían ser curados y transformados en sólidos tras la aplicación de luz láser, convirtiéndose en el primer paso para la construcción efectiva de máquinas de prototipado rápido a través del proceso de Estereolitografía.

Con solo tres semanas de diferencia respecto a los investigadores franceses, Charles Hull, ingeniero graduado de la Universidad de Colorado, solicita

la patente del proceso de Esterolitografía con nuevos avances, como la utilización del formato STL (Standard Triangle Language) y la laminación digital de objetos. A diferencia de la Esterolitografía francesa, el método de Hull utiliza luz ultravioleta para el curado de fotopolímeros.

Un año después de la presentación de la SLA-1, Carl Deckard de la Universidad de Texas patentó la tecnología de Sinterizado Selectivo por Láser (SLS). En lugar de utilizar luz ultravioleta, SLS hace uso de un láser para trazar y solidificar las capas de un polvo de polímeros [8]. Así, la máquina de Deckard se convirtió en la primera impresora 3D en utilizar la tecnología SLS. En 1993, el MIT desarrolla una técnica de impresión 3D basada en las impresoras de inyección de tinta. Adaptando ésta a un movimiento en un nuevo eje, se crea la Z Corp Z402. El primer modelo utilizaba polvos basados en yeso como base y un aglutinante basado en agua. La segunda mitad de los años noventa vio la diversificación de las tecnologías para la técnica de fabricación aditiva, ampliando la gama de materias primas a utilizar y los procesos de transformación de materiales. En 1997, se crea la impresora 3D de metales, la cual utiliza el proceso de fundición por haz de electrones (EBM) y el perfeccionamiento del Polyjet. Así, este desarrollo trajo consigo mayores oportunidades comerciales para estas máquinas abriendose, entre otras, a la industria médica con la bioimpresión de partes adaptables al cuerpo humano tales como piezas dentales o prótesis[8]. Los avances de las investigaciones y la búsqueda de la competitividad en la utilización de la impresión 3D como manufactura aditiva trajo consigo durante los años posteriores el comienzo de la democratización de esta tecnología. Como se ha mostrado en esta sección, la impresión 3D es una tecnología que nace en los años ochenta, por lo cual es factible preguntar cómo y por qué estas máquinas son tan conocidas y valoradas en la actualidad, y de qué manera comienzan a gestar una de las mayores revoluciones tecnológicas del siglo XXI. El proyecto *RepRap* nace el año

2005 a través de un blog impulsado por el doctor Adrian Bowyer, profesor de ingeniería mecánica de la Universidad de Bath del Reino Unido. En él, Bowyer comienza a modelar el primer boceto de una impresora 3D FDM con el objetivo de crear una máquina autoreplicante, capaz de imprimir nuevos componentes en 3D para ser útil en el desarrollo del prototipado rápido, y al mismo tiempo fabricar nuevas piezas para nuevas máquinas. Así, cualquier persona al otro lado del mundo y con las instrucciones adecuadas podría llegar a construirla [9]. Según Torre (2013) a casi tres años del primer modelo, la *RepRap 0.1* ya había impreso casi la mitad de sus propios componentes; al año 2008, se estima que ya existían más de 100 copias construidas y funcionando en todo el mundo. RepRap es un diseño abierto, y toda la propiedad intelectual producida en este proyecto está sujeta a una licencia de software libre [10]. A partir de esta invención libre, y sumado al vencimiento de las patentes de las tecnologías SLA y FDM, se desata el desarrollo de nuevas impresoras como las de tipología Delta (no cartesiana), y la creación de empresas dedicadas a la fabricación de máquinas de bajo costo como MakerBot [8]. En la actualidad, se estima que el tamaño del mercado es de alrededor de 10 billones de dólares, y se espera que crezca alrededor de un 23,5 % anualmente, abarcando industrias como la automovilística, aeroespacial, médica, e inclusive el calzado deportivo[11].

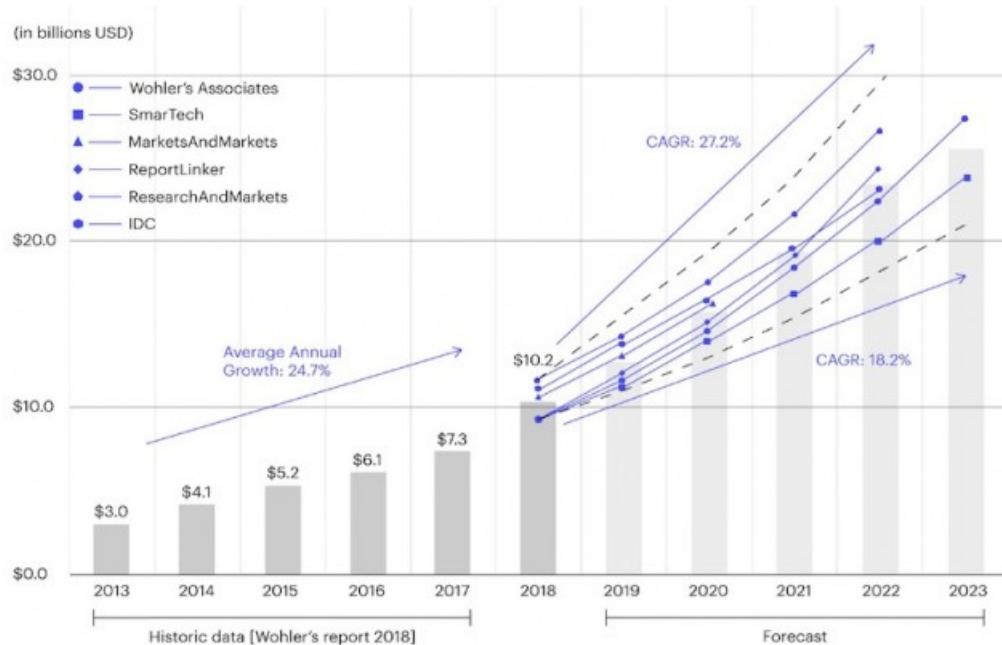


FIGURA 2.1: Tamaño del mercado y pronóstico de la impresión 3D [11].

Respecto al Hype Cycle o ciclo de sobreexpectación de Gartner, el cual corresponde a una publicación anual que representa gráficamente la madurez, adopción y aplicación comercial de tecnologías disruptivas, el inicio del ciclo se caracteriza por usos técnicos especializados como la bioimpresión de órganos, impresión 3D a nanoscala o lo macro fabricación. El peak de expectativas se alcanza con la impresión 3D en el retail para luego decaer en usos pedagógicos o la cadena de suministros. La meseta de productividad se caracteriza por la creación de empresas dedicadas a la impresión 3D, nuevos materiales, la creación de software y servicios. Por otra parte, las predicciones para el año 2019 se centran en el comienzo de la impresión 4D, el auge del sector médico y la impresión 3D de nuevas aleaciones de metal [12].

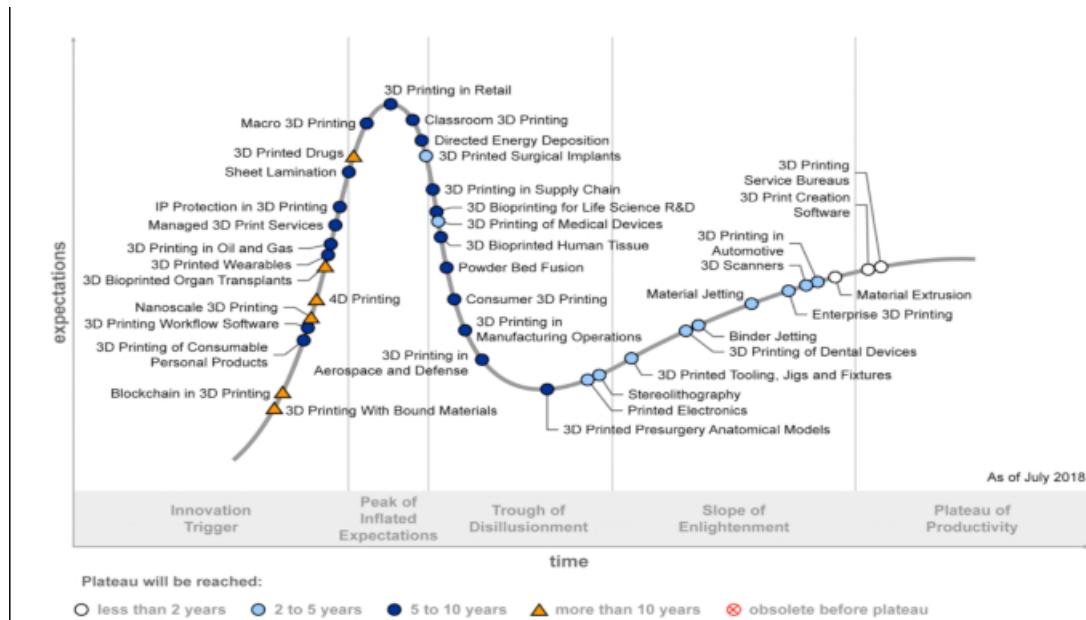


FIGURA 2.2: Hype Cycle o Ciclo de sobreexpectación de Gartner de la tecnología de impresión 3D al año 2019 [12].

2.2.2 Tecnologías de impresión 3D

Según la norma ASTM F2792-12a del año 2013 que define el estándar de terminologías para tecnologías de manufactura aditiva, establece las siguientes categorías [13]:

- **Chorro de aglutinante:** proceso de manufactura aditiva en la cual un agente líquido de unión es depositado selectivamente para unir polvo de materiales.
- **Deposición de energía directa:** proceso de manufactura aditiva en el cual se emplea energía térmica, que es usada para fundir materiales soldándose a medida que se depositan (láser, flujo de electrones, o arco de plasma).
- **Extrusión de material:** proceso de manufactura aditiva en el cual un material es depositado selectivamente a través del orificio de una boquilla.

- **Chorro de material:** proceso de manufactura aditiva en el cual gotas del material de construcción son depositadas selectivamente (ejemplo de materiales incluyen fotopolímeros y ceras).
- **Fusión de lecho de polvos:** proceso de manufactura aditiva en el cual energía térmica funde selectivamente fusiona regiones del lecho de polvos.
- **Laminación:** proceso de manufactura aditiva en el cual láminas de material son depositadas para formar un objeto.
- **Fotopolimerización:** proceso de manufactura aditiva en el cual un fotopolímero líquido dentro de un recipiente es curado selectivamente por polimerización de luz activa.

2.2.3 Impresoras 3D de Modelado por Deposición Fundida

Según la norma ASTM F2792-12a, el método de modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés), se define como un proceso de extrusión de material usado para hacer piezas de termoplásticos a través de la extrusión en caliente y la deposición de material capa a capa. Este término denota a las máquinas construidas por la compañía Stratasys [13]. De una forma más amplia, el proceso físico del modelo de fabricación corresponde a un filamento que pasa a través de un elemento calentador, el cual lo convierte en un material fundido o semi-fundido. El filamento ya licuado, es alimentado por una boquilla y depositado sobre la pieza parcialmente construida. El nuevo material añadido se une con el material adyacente ya depositado. El cabezal de extrusión se mueve en el plano X-Y, y vierte controladamente el material acorde a la geometría de las capas ya impresas. Luego de terminar una capa, la plataforma de construcción

realiza un movimiento relativo en el eje Z, para comenzar a depositar una nueva capa en la parte superior de la capa anterior. Luego de un tiempo que depende del volumen de la pieza impresa, el cabezal de extrusión habrá realizado una representación física completa del archivo CAD [14].

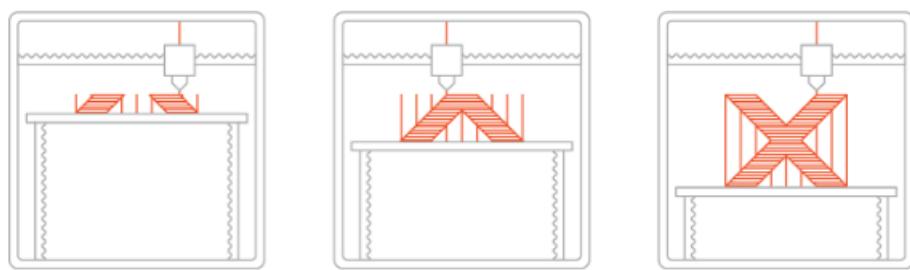


FIGURA 2.3: Proceso de impresión 3D FDM [15]

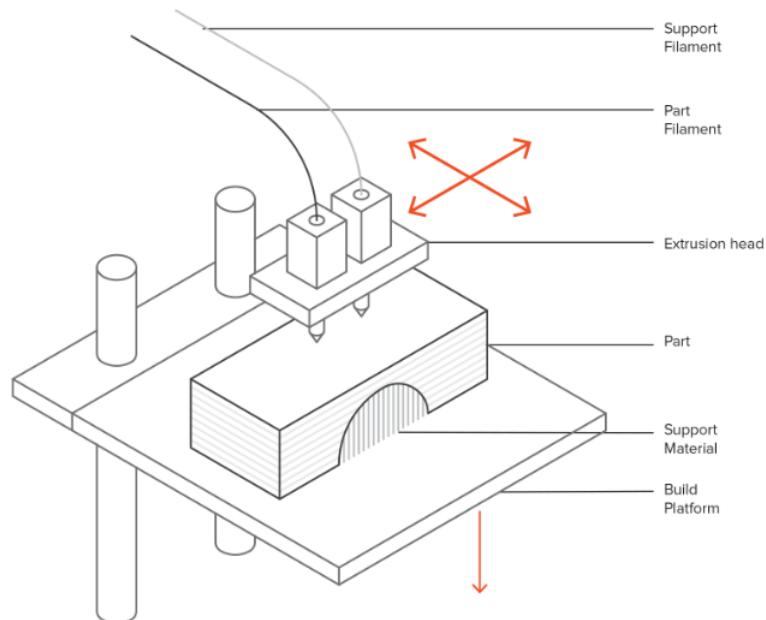


FIGURA 2.4: Esquema de funcionamiento de impresión 3D FDM [15].

Dentro de las características principales de este proceso de fabricación se encuentran [15]:

Parámetros de impresión: la mayoría de los sistemas FDM permiten el ajuste de parámetros del proceso, dentro de los que se incluyen la temperatura de la boquilla y de la plataforma de construcción, velocidad de construcción, altura de capa y velocidad de ventilador de enfriamiento.

Adhesión de capa: Cuando el termoplástico fundido es extruído a través de la boquilla, ejerce una presión sobre la capa previa. La alta temperatura y la presión re-funde la superficie y posibilita la unión con la capa previa. Esto significa que el proceso FDM es inherentemente anisotrópico: el esfuerzo en el eje-Z es siempre menor que en el plano X-Y.

Estructura de Soporte: Un termoplástico fundido no puede ser depositado en el aire. Por esta razón, algunas geometrías requieren una estructura de soporte, generalmente con una calidad menor que el resto de la pieza.

Relleno y ancho de pared: Usualmente, las piezas impresas en FDM no son sólidas, con el objetivo de reducir el tiempo de impresión y material. Así, los perímetro exteriores son trazados realizando varias pasadas denominadas ancho de pared, mientras que el interior es fabricado con una estructura de baja densidad, llamada relleno.

Por otro lado, los materiales mayoritariamente utilizados por esta tecnología y sus características son:

Material	Características
ABS	Alta resistencia mecánica, alta resistencia a la temperatura, susceptibilidad a la separación de capas
PLA	Excelente calidad visual, fácil de imprimir, baja resistencia al impacto
Nylon (PA)	Alta resistencia, Excelente resistencia química, baja resistencia a la humedad
PETG	Seguro para alimentos, buena resistencia, fácil de imprimir
TPU	Muy Flexible, difícil de imprimir
PEI	Excelente resistencia al peso, ignífugo, Excelente resistencia química, alto costo

TABLA 2.1: Principales materiales utilizados en impresión 3D FDM [15].

2.2.4 Tipologías de impresión 3D de Modelado por Deposición Fundida

Si bien el principio de funcionamiento para las impresoras 3D FDM es el mismo, existen diferentes tipologías o modelos de clasificación de éstas. En este caso, se presenta una clasificación según el sistema de coordenadas que utiliza para construir las piezas, donde se distinguen cuatro tipos [16]:

Cartesiana: Estas impresoras siguen el patrón de coordenadas X, Y y Z para posicionar el cabezal de impresión en el lugar correcto. Existen dos posibilidades de movimiento tanto del cabezal como de la plataforma de construcción: (a) Cabezal móvil en el plano X-Z y plataforma en el eje-Y; (b) Cabezal móvil en el plano X-Y y plataforma en el eje-Z.

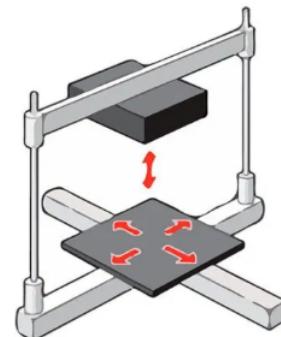


FIGURA 2.5: Esquema de impresora 3D cartesiana [16].

Delta: Las impresoras tipo delta incluyen una plataforma de construcción circular y un cabezal unido a tres puntos triangulares fijos. Cada uno de esos tres puntos pueden mover hacia arriba y abajo el cabezal dentro del cilindro de impresión.

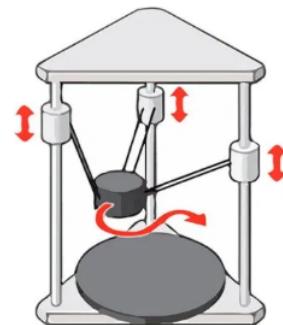


FIGURA 2.6: Esquema de impresora 3D Delta [16].

Polar: Esta impresora utiliza un sistema de coordenadas polares, donde cada punto de impresión está determinado por su posición comparada con un punto central en el medio de la plataforma de fabricación.

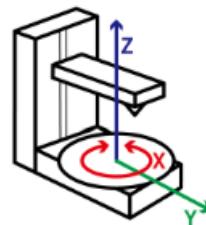


FIGURA 2.7: Esquema de impresora 3D polar [17]

SCARA: una impresora SCARA (acrónimo de las siglas en inglés Selective Compilant Assembly Robot Arm) maniobra en los ejes X, Y, y Z dentro de un límite de 180 grados. El cabezal de esta máquina se sitúa en un extremo del brazo robot, el cual consta de dos articulaciones giratorias con ejes verticales.

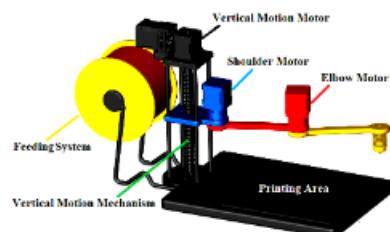


FIGURA 2.8: Esquema de impresora 3D SCARA [18]

2.3 MANTENIMIENTO

Según la norma ISO-14224:2016, el mantenimiento se define como una combinación de todas las técnicas y acciones de gestión destinadas a mantener un ítem o restablecerlo, a un estado en el cual su desempeño es requerido [19]. De una manera más amplia, el concepto de mantenimiento puede establecerse según distintas formas dado el enfoque que se dé en cada caso. Un punto de partida, es mantener el correcto estado funcional de los equipos e instalaciones, sin embargo, las consecuencias que el desarrollo de este principio elemental puede tener sobrepasan ampliamente el objetivo inicial [20]. En este sentido, y buscando una definición global, se puede decir que el mantenimiento corresponde al conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento [21]. Teniendo en cuenta factores como el tipo de industria y su tamaño, la política de la empresa, las características de la producción, el campo de acción de las actividades de un departamento de ingeniería de mantenimiento puede incluir las siguientes responsabilidades[20]:

- Mantener los equipos e instalaciones en condiciones operativas, eficaces y seguras.
- Efectuar un control del estado de los equipos, así como de su disponibilidad.
- Realizar los estudios necesarios para reducir el número de averías imprevistas.
- En función de los datos históricos disponibles, efectuar una previsión de los repuestos de almacén necesarios.

- Intervenir en los proyectos de modificación del diseño de equipos e instalaciones.
- Llevar a cabo aquellas tareas que implican la modificación o reparación de los equipos e instalaciones.
- Instalación de nuevo equipo.
- Asesorar a los mandos de producción.
- Velar por el correcto suministro y distribución de energía.
- Tareas de vigilancia.

2.3.1 Historia y evolución del mantenimiento

Si bien no existe precisión histórica o documentación para establecer los orígenes del mantenimiento ya sea, por ejemplo, en la diferencia entre la evolución de las distintas industrias, la literatura sí genera distintos consensos en lo que respecta a ciertos hitos que pueden dar luces a este contexto histórico. En este sentido, las principales referencias que existen en diversas fuentes bibliográficas sobre los tipos de mantenimiento llevados a cabo han concluido, de común acuerdo entre muchos autores, en establecer durante el siglo XX tres grandes etapas que, aunque no tienen una frontera clara desde el punto de vista temporal, si pueden dar una clara idea de cómo ha sido la evolución de las técnicas y organizaciones que se han implementado durante dicho siglo. Se ha convenido entonces, que la evolución del mantenimiento ha tenido tres etapas, a las cuales se les denomina *primera, segunda y tercera generación* [22]. Así, el comienzo del siglo XX marca efectivamente el inicio de las actividades de

mantenimiento reparativo y la creación de los primeros talleres que originan la *Primera Generación* del mantenimiento, que se extiende hasta mediados del siglo y tiene como características relevantes [23]:

- Equipos robustos, sobredimensionados y simples.
- Volúmenes de producción bajos.
- Las actividades demandaban poca destreza.
- No existía la alta mecanización industrial
- Poca importancia a los tiempos de parada de los equipos.
- La prevención de fallas en los equipos no era prioridad.
- El mantenimiento era mantenimiento reactivo o de reparación.
- No había necesidad de un mantenimiento sistemático.

Esta etapa, la más larga desde la revolución industrial hasta después de la Segunda Guerra Mundial, se caracteriza esencialmente por la corrección de averías, reengrases, lubricaciones y limpiezas [22].

En tiempos posteriores a la guerra se vio la necesidad de implantar técnicas con el fin de prevenir las fallas de los equipos en combate y disminuir los costos de reparación, por lo que vino a tomar importancia relevante la disponibilidad y duración de vida útil de la maquinaria [23]. El descubrimiento de relación entre edad de equipos y probabilidad de fallos, junto a la enorme competencia industrial, además de la incorporación de los fabricantes orientales al mundo competitivo occidental, es uno de los desencadenantes de una continua búsqueda de mejores resultados. En esta etapa denominada *segunda generación*, se ponen en marcha sistemas de mantenimiento preventivo basados en revisiones

cíclicas de equipos, instalaciones y medios en general [22]. Dentro de las características principales de este periodo se señalan [23]:

- Importancia de la productividad
- Incremento de la mecanización en las industrias
- Aumento de la complejidad de los equipos
- Mayor interés a los tiempos de parada de los equipos
- Inicio del mantenimiento preventivo
- Altos niveles de inventario de repuestos
- Crecimiento de los costos de mantenimiento
- Sistemas de planificación y control de mantenimiento
- Aumento de la vida útil de los equipos y sistemas
- Inicio de la sistematización del Mantenimiento

La optimización de este mantenimiento de segunda generación, basado por tanto en mantenimientos preventivos rutinarios y mantenimiento correctivo, se fundamenta en avanzados sistemas de planificación de actividades y de control de trabajos realizados; entendiendo por control tanto el lanzamiento de órdenes de trabajo como la retroalimentación y verificación de los datos habidos en esas órdenes de trabajo [22].

Se debe decir que, durante el periodo posterior a 1980, se han visto los peores accidentes en la historia de la industria mundial. Las filtraciones de baterías en Bhopal, India, o la amenaza a la supervivencia de la humanidad causada por el accidente nuclear de Chernobyl, solo han hecho que la industria

realce la importancia del mantenimiento [24]. Este punto de inflexión, sumado a las preocupaciones que ya existían de ciertos postulados en relación a la máxima calidad, seguridad y protección del medio ambiente, dio origen a la tercera generación del mantenimiento, que se extendió hasta el final del siglo [23]. Cabe destacar que en el mantenimiento de tercera generación, la observancia de normativa adquiere una importancia primordial. Son muchas las administraciones estatales, autonómicas y locales que abordan reglamentaciones específicas del mantenimiento; así pues, aparecen reglamentos para aparatos a presión, equipos de manutención y transporte, ascensores y escaleras mecánicas, etc. Este aspecto toma también relevancia y define lo que se ha convenido en llamar, dentro de los mantenimientos preventivos, mantenimientos legales o reglamentarios [22]. Dentro de los parámetros más importantes involucrados en esta generación del mantenimiento se encuentran [25]:

- Disponibilidad y confiabilidad de los equipos
- Mayor seguridad
- Eliminar el daño al Medio Ambiente
- Mejor calidad de producción
- Mayor vida útil de los equipos
- Efectividad en los costos.

Asimismo, las técnicas asociadas a este periodo de tiempo son [25]:

- Monitoreo de la condición
- Diseños para la mantenibilidad y confiabilidad

- Computadores pequeños y rápidos
- Análisis de modos y efectos de falla

La añadidura tanto de nuevos desafíos y de las técnicas que hacen frente a éstos, revelan que las tres generaciones anteriormente mencionadas plantean la necesidad de coexistir en un mantenimiento equilibrado y acondicionado a la realidad de la industria. De esto se obtiene que la primera generación define las acciones del mantenimiento reactivo, la segunda plantea la estrategia de revisiones cíclicas, y la tercera generación la estrategia basada en la condición [26]. Así, la cuarta generación del mantenimiento es también el entendimiento que tanto el mantenimiento preventivo, como el correctivo o el predictivo juega un rol en la optimización de la disponibilidad, confiabilidad y el costo de los activos industriales. En este caso, son importantes las técnicas avanzadas como la recolección de data a través de sensores o la analítica de softwares [27]. En tanto a los procesos, la tecnología de la información, el uso y la disponibilidad del internet, la obtención de información en cualquier parte del mundo y el entendimiento de estos son reconocidos como los conductores hacia la nueva comprensión del mantenimiento.

2.3.2 Mantenimiento correctivo

El estándar ISO-14224-2016 define el mantenimiento correctivo como el mantenimiento realizado después de la detección de fallas, con objeto de efectuar su restauración [19]. Este tipo de mantenimiento, también llamado mantenimiento a rotura, sólo se interviene en los equipos cuando el fallo ya se ha producido. Se trata, por tanto, de una actitud pasiva, frente a la evolución del estado de los equipos, a la espera de la avería o fallo [20]. De la misma forma, el mantenimiento correctivo es el conjunto de tareas destinadas a corregir los

defectos que se van presentando en los distintos equipos y que son comunicados al departamento de mantenimiento por los usuarios de los mismos [21]. Adoptar esta forma de mantenimiento supone asumir algunos inconvenientes respecto a las máquinas y equipos afectados, entre los que pueden citarse [20]:

- Las averías se producen generalmente de forma imprevista, lo que puede ocasionar trastornos en la producción, que pueden ir desde ligeras pérdidas de tiempo, por reposición de equipo o cambio de tarea, hasta la parada de la producción, en tanto no se repare o sustituya el equipo averiado.
- Las averías, al ser imprevistas, suelen ser graves para el equipo, por lo que su reparación puede ser costosa.
- Las averías son siempre -en mayor o menor medida- inoportunas, por lo que la reparación de los equipos averiados puede llevar más tiempo del previsto, ya sea por ausencia del personal necesario para su reparación, o ya sea por la falta de los repuestos necesarios.
- Por tratarse de averías inesperadas, el fallo podría venir acompañado de algún siniestro, lo que obviamente puede tener consecuencias muy negativas para la seguridad del personal y las instalaciones.

De aquellas empresas donde el 100 % del mantenimiento es correctivo, se podría considerar que, en promedio, en más del 70 % del tiempo total dedicado a mantener sus activos se utiliza para la solución de fallas no programadas; por tanto, gestionar con eficacia el mantenimiento correctivo significa [21]:

- Realizar intervenciones con rapidez, que permitan la puesta en marcha del equipo en el menor tiempo posible (MTTR o tiempo medio para reparar bajo).

- Realizar intervenciones fiables, y adoptar medidas para que no se vuelvan a producir estas en un periodo de tiempo suficientemente largo (MTBF o tiempo medio entre fallos grande).
- Consumir la menor cantidad posible de recursos (tanto mano de obra como materiales).

2.3.3 Mantenimiento preventivo

El estándar ISO-14224-2016 presenta el mantenimiento preventivo planificado como el mantenimiento realizado de acuerdo a una planificación específica [19]. En este sentido, este tipo de mantenimiento pretende evitar la reparación mediante una rutina de inspecciones periódicas y la renovación de los elementos deteriorados. En estas inspecciones, se procede al desmontaje total o parcial de la máquina con el fin de revisar el estado de sus elementos, reemplazando aquellos que se estime oportuno a la vista del examen realizado. Otros elementos son sustituidos sistemáticamente en cada inspección, tomando como referencia el número de operaciones realizadas o un determinado periodo de tiempo de funcionamiento [20]. Dicho esto, existen autores que plantean modelos donde estos tipos de mantenimiento estén involucrados y comparten otras actividades, con el fin de hacer más rentable las acciones determinadas. Uno de estos modelos es el mantenimiento preventivo sistemático, el cual incluye un conjunto de tareas que se realizarán sin importar la condición del equipo. Es importante señalar que un equipo sujeto a un modelo de mantenimiento sistemático no tiene por qué tener todas sus tareas con su periodicidad fija. El mantenimiento preventivo sistemático contempla [21]:

- Inspecciones visuales.

- Lubricación.
- Mantenimiento preventivo planificado.
- Mantenimiento condicional.
- Reparación de averías.

Dentro de las principales ventajas de este tipo de mantenimiento están [28]:

- Conocimiento del estado de funcionamiento de las instalaciones.
- Mejora de las condiciones de seguridad laborales.
- Aumento de la vida útil de las instalaciones.
- Mayor rendimiento de trabajadores y máquinas debido a la eliminación de tiempos muertos.
- Disminución en los costes de reparación de averías.

Según Jimenez (2015), los principales inconvenientes son:

- Los elementos son cambiados antes de que estos lleguen a su vida útil completa.
- Si no se realiza una buena programación de operaciones y con una frecuencia óptima, con este tipo de mantenimiento se pueden aumentar los costes, así como la disminución del rendimiento de las máquinas o instalaciones.

Para que un mantenimiento preventivo sea efectivo, deberá seguir los siguientes pasos [28]:

1. Saber los objetivos del trabajo.
2. Conocer el programa de mantenimiento preventivo y predictivo.
3. Seleccionar los equipos para realizar el mantenimiento.
4. Recoger información de los equipos susceptibles de mantenimiento.
5. Estudio de la información obtenida.
6. Estudio de los métodos de trabajo así de cómo las desviaciones de las operaciones de mantenimiento.
7. Análisis y conclusiones de las operaciones de mantenimiento realizadas.
8. Presentación de las propuestas de mejora.
9. Estudio de propuestas de mejora y posibilidad de nueva frecuencia del mantenimiento preventivo.
10. Estudio y análisis de los resultados.
11. Actualización del programa de mantenimiento.

2.3.4 Mantenimiento centrado en la condición

Respecto al mantenimiento centrado en la condición de equipos y las normas que definen su marco de trabajo, se encuentra la norma ISO 13372:2012 la cual se refiere al vocabulario relacionado al monitoreo de la condición y su diagnóstico, y el estándar ISO 17359-2018 que presenta las guías generales para el proceso anteriormente mencionado. Las perspectivas del proceso de monitoreo de la condición se presentan a través de un diagrama que detalla los pasos

necesarios para dirigir las actividades de monitoreo para identificar y evitar modos de falla [29]. Al mismo tiempo, el estándar propone una diversidad de análisis a tener en cuenta para el monitoreo de la condición, entre los que se encuentran [29]:

Análisis costo beneficio: un análisis inicial de factibilidad y costo beneficio ayuda a establecer indicadores de desempeño precisos y referencias para medir la efectividad de cualquier programa de monitoreo de la condición. Los ítem a considerar incluyen:

- Ciclo de costo de vida.
- Costo de la producción perdida.
- Daño consecuente.
- Garantías y seguros.

Identificación del equipo: Se establece un esquema genérico de una máquina y sus distintos componentes y procesos para considerar la gestión del monitoreo de la condición. Entre ellos se encuentran: estructura; tuberías; lubricación; sistemas de control; configuración y rangos; entradas y salidas; personal; medio ambiente; sistemas de protección; data; técnicas de monitoreo de la condición; posición y accesibilidad; máquinas adyacentes.

Identificación de la función del equipo: Se busca identificar la siguiente información: (a) qué debe realizar el sistema, máquina o equipamiento; (b) cuáles son las condiciones de operación de la máquina o sistema, o el rango de condiciones de operación.

Equipos críticos: se recomienda una evaluación crítica de todas las máquinas, para crear una lista de prioridades y ser incluidas (o no) en el programa

de monitoreo de la condición. Puede ser un sistema simple de calificación basado en los siguientes factores:

- Costo de máquina fuera de servicio o pérdida de costos de producción.
- Rango de falla y tiempo medio para reparar.
- Redundancia.
- daño secundario.
- Costo de reemplazo de la máquina.
- Costo del mantenimiento.
- Costo del ciclo de vida.
- Costo del sistema de monitoreo.
- Seguridad e impacto medioambiental.

Técnicas de medición: Para la medición particular de los parámetros considerados, pueden ser apropiadas una o más mediciones. Los parámetros de éstas pueden ser simples mediciones de valores generales, o valores promediados en el tiempo. Para ciertos parámetros como voltaje, corriente o vibraciones, puede que este tipo de mediciones no sean suficientes para mostrar la ocurrencia de una falla.

Exactitud de los parámetros de monitoreo: En la mayoría de los casos, la exactitud de los parámetros requeridos para ser usado en el monitoreo y diagnóstico de la condición de la máquina no es necesariamente tan absoluto como la precisión que se podría requerir para otras mediciones, como pruebas de rendimiento.

Condiciones de operación durante el monitoreo: Si es posible, el monitoreo debe ser llevado a cabo cuando la máquina ya ha alcanzado una

configuración predeterminada de las operaciones de condición. Mediciones de diferentes parámetros deben ser tomados siempre que sea posible y al mismo tiempo bajo las mismas condiciones de operación.

Intervalos de monitoreo: Se debe considerar el intervalo entre mediciones, y si se requiere un muestreo continuo o periódico. El intervalo primario del monitoreo depende del tipo de falta, su rango de progresión y el rango de cambio de los parámetros relevantes. El tiempo transcurrido entre la detección de la falta y la falla actual es conocido como tiempo de espera para fallar (LTF).

Registro de parámetros de monitoreo: el registro de parámetros de monitoreo debe incluir, como mínimo, la siguiente información:

- Data esencial que describe la máquina.
- Data esencial que describe la condición de operación.
- Posición de medición.
- Unidades y procesamiento de medición.
- Información sobre fecha y hora.

Criterio de alerta inicial: el criterio de alerta inicial debe ser configurado como el más temprano indicador posible de la ocurrencia de una falta. Las alarmas deben ser valores unitarios o de niveles múltiples, donde ambos incrementan y/o decrecen.

Data Base o referencia: Esta data es medida u observada cuando la operación del equipo se conoce como aceptable o estable.

Diagnóstico y pronóstico: el proceso de diagnóstico es generalmente provocado por una detección anormal. Esta detección es llevada a cabo realizando

una comparación entre los descriptores presentes de la máquina, o comparando con una máquina similar.

Determinar acciones de mantenimiento: la acción más simple que puede ser tomada en ciertas circunstancias es decidir el llevar a cabo una acción no inmediata, y continuar el monitoreo a intervalos normales. en caso de ocurrencia de una falta, las decisiones incluyen lo siguiente:

- Sin acción, continuar con el monitoreo de rutina.
- Reducir el intervalo a la siguiente medición requerida.
- cambiar la carga o velocidad de la máquina.
- Apagar la máquina.
- Inspeccionar la máquina o adelantar mantenimiento de rutina planificado.
- Llevar a cabo mantenimiento correctivo.

2.3.5 Mantenimiento centrado en la confiabilidad

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) corresponde a un procedimiento basado en el sentido común con un diagrama de decisión para la creación de estrategias de mantenimiento para proteger las funciones de los activos. RCM se define como un proceso para determinar qué debe hacerse para mantener los activos físicos funcionando de acuerdo a lo que sus operadores quieren que éstos hagan en su contexto operacional actual [30]. El estándar internacional ISO 14224-2016 reúne los criterios para la colección e intercambio de data de mantenimiento y confiabilidad para los equipos. Por otra parte, los criterios que todo proceso debe cumplir para ser llamado RCM son establecidos

en la norma SAE JA1011, publicada en 1999. respecto a la primera, se plantean las siguientes definiciones [19]:

Ciclo medio de Falla (MCTF): número de ciclos esperado antes de que el ítem falle.

Número medio de ciclos: número esperado de ciclos por unidad de tiempo.

Tiempo medio de reparación activa (MART): tiempo esperado para reparación activa.

Tiempo medio transcurrido entre fallas (METBF): tiempo medio transcurrido esperado entre fallas sucesivas de un ítem reparable.

Tiempo medio de reparación general: tiempo esperado para lograr las siguientes acciones: tiempo gastado antes de comenzar la reparación y; tiempo anterior en que el ítem esté disponible para volver a operación

Tiempo medio para falla (MTTF):: tiempo esperado antes de que un ítem falle.

Tiempo medio para reparar (MTTR): tiempo esperado para lograr la reparación un ítem fallado.

Por otra parte, la norma SAE JA1011 establece siete pasos descritos a continuación:

- Delimitar el contexto operativo, las funciones y los estándares de desempeño asociados al activo (contexto operacional y funciones).
- Determinar cómo un activo puede fallar en el cumplimiento de sus funciones (fallas funcionales).

- Definir las causas de cada falla funcional (modos de falla).
- Describir qué sucede cuando ocurre cada falla (efectos de falla).
- Clasificar los efectos de las fallas (consecuencias de la falla).
- Determinar qué se debe realizar para predecir o prevenir cada falla (tareas e intervalos de tareas).
- Decidir si otras estrategias de gestión de fallas pueden ser más efectivas (cambios de una sola vez).

Para el cumplimiento de los pasos anteriores, la norma determina una serie de definiciones dentro de las cuales se encuentran [31]:

Función: lo que un usuario espera que realice un activo físico o sistema.

Falla Evidente: Modo de falla cuyos efectos se vuelven evidentes para los operarios bajo circunstancias normales si el modo de falla ocurre por sí mismo o aislado.

Función Evidente: Función cuya falla sobre sí mismo se vuelven aparentes para los operarios bajo circunstancias normales.

Fallas Funcionales: Estado en el cual un activo físico o sistema no es capaz de ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado.

Modos de falla: Evento único, que provoca una falla funcional.

Efectos de falla: Lo que ocurre cuando se produce un modo de falla.

Consecuencias de la falla: las formas en las cuales importan los modos de falla o múltiples fallas.

Falla oculta: Modo de falla cuyos efectos no son evidentes para los operarios bajo circunstancias normales si el modo de falla ocurre por sí mismo.

Falla múltiple: Evento que ocurre si la función protegida falla mientras un sistema se encuentra en estado de falla.

Probabilidad condicional de una falla: La probabilidad de que una falla ocurra en un periodo específico, siempre que el ítem en cuestión haya sobrevivido desde el principio de ese periodo.

Respecto al establecimiento de los modos de falla, la norma en cuestión recomienda cierta profundidad en el nivel de causalidad de los modos de falla. Cuando éstos se enumeren, se debe considerar [31]:

- Identificar todos los modos de falla razonablemente propensos a causar cada falla funcional.
- El método utilizado para decidir qué constituye un modo de falla.
- El nivel de causalidad para los modos de falla debe ser suficientemente exhaustivo, para que se puedan asignar políticas de gestión de fallos.
- Los modos de falla enumerados en el análisis deben considerar los eventos que han ocurrido antes, los modos de falla que se previenen en las tareas programadas existentes y otros eventos que es probable que se produzcan en el contexto operacional real, pero que nunca ha ocurrido.
- Los errores humanos y de diseño que causan un evento de falla deben incluirse en la lista de modos de falla, a menos que estén siendo abordados por otros métodos de análisis.

En torno a los efectos de falla, se recomienda describir lo que ocurre cuando se produce el modo de falla, teniendo en cuenta lo siguiente [31]:

- ¿Hay alguna evidencia de que ha ocurrido una falla?
- ¿Cuál es el impacto potencial que tiene la falla en la seguridad del personal?
- ¿Cuál es el impacto potencial que tiene la falla en el medio ambiente?
- ¿Cómo se ve afectada la producción o las operaciones?
- ¿Hay algún daño físico causado por la falla?
- ¿Hay algo que deba hacerse para restaurar la función del sistema después de la falla?

Los efectos de fallas se deben clasificar en categorías basadas en la evidencia que se tiene de éstas, impactos en la seguridad, medio ambiente, capacidad operacional y costos. Se debe elegir una categoría para cada efecto de modo de falla, haciendo énfasis en la que sea más grave [30].

La norma SAE JA1011 reconoce cinco posibles estrategias de mantenimiento que deben ser aplicadas para mitigar las consecuencias de las fallas[30]:

Mantenimiento Basado en la Condición: Estas tareas están destinadas a detectar fallas potenciales. Tal detección debe ocurrir con suficiente antelación para que la acción correctiva se pueda tomar antes de un paro operacional. Una tarea de monitoreo de condición es aplicada a intervalos fijos para predecir la tendencia de un paro operacional antes de que ocurra una falla funcional.

Tareas de reparaciones programadas: Las tareas de reparación basadas en el tiempo deben ser realizadas en función de la vida útil del activo. Es decir, el momento en que la tasa de falla del equipo deja de ser constante. En teoría, al final de la vida útil, la tasa de falla del activo aumenta más allá de lo que podemos tolerar. Además de la vida útil, el costo de la reparación preventiva también necesita ser evaluado. Esto es, una comparación del costo del trabajo de reparación contra el de las consecuencias de la falla funcional debe confirmar la viabilidad económica de la tarea.

Tareas de reemplazo programado: Las tareas programadas de descarte y reemplazo se consideran cuando se demuestra que es más rentable reemplazar que reparar el activo. Se recomienda aplicar dicha sustitución al final de la llamada vida “útil” del mismo.

Tareas de búsqueda de fallas: Estas tareas están destinadas a detectar fallas ocultas asociadas, la mayoría de las veces, con dispositivos de protección o componentes redundantes. Debemos asegurarnos de que es físicamente posible realizar la tarea de búsqueda recomendada y que la frecuencia sugerida es aceptable para el propietario del activo.

Tareas de búsqueda de rediseño: Los cambios en la configuración física de los activos, los procedimientos de operación o mantenimiento, el adiestramiento del operador / mantenedor y la alteración del contexto operacional son todas las formas posibles de cambios de una sola vez o rediseño potencialmente necesario para la mitigación de fallas.

2.3.6 Confiabilidad

La confiabilidad puede ser definida como la confianza que se tiene de que un componente, equipo o sistema desempeñe su función básica, durante un periodo de tiempo preestablecido, bajo condiciones estándares de operación; otra definición es la probabilidad de que un ítem pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo establecido y bajo condiciones de uso definidas [32]. Existen diversos modelos matemáticos que pueden describir el comportamiento de una variable a través del tiempo, los cuales se enuncian a continuación:

Función densidad de probabilidad

La función densidad de probabilidad puede describir la distribución de la probabilidad de una variable aleatoria continua X . Así, una función de densidad de probabilidad es una función tal que:

$$\begin{aligned} f(x) &\geq 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx &= 1 \\ P(a \leq X \leq b) &= \int_a^b f(x)dx = \text{área bajo } f(x) \text{ de } a \text{ a } b, \text{ para cualquier } a \text{ y } b. \end{aligned}$$

Esta función proporciona una descripción simple de las probabilidades asociadas a una variable aleatoria.

Media y varianza de una variable continua

Si se tiene que X es una variable aleatoria continua con función de densidad de probabilidad $f(x)$, se define la Media de X como:

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (2.1)$$

Asimismo, la Varianza de X :

$$\sigma^2 = V(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x)dx - \mu^2 \quad (2.2)$$

La Desviación Estandar:

$$\sigma = \sqrt{V(X)} \quad (2.3)$$

Distribución normal

Variables aleatorias con medias y varianzas diferentes pueden modelarse por medio de funciones de densidad de probabilidad normal, con la elección adecuada del centro y anchura de la curva. La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < \infty \quad (2.4)$$

tiene una distribución normal con parámetros μ , donde $-\infty < \mu < \infty$, y $\sigma > 0$.

Además,

$$E(X) = \mu, V(x) = \sigma^2 \quad (2.5)$$

Distribución exponencial

La distribución exponencial debe su nombre a la función exponencial de la función de densidad de probabilidad. Así, la variable aleatoria X (que es igual a la distancia entre conteos sucesivos de un proceso de Poisson con media $\lambda > 0$) tiene una distribución exponencial con parámetro λ :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, 0 < x < \infty \quad (2.6)$$

Si la variable tiene una distribución exponencial con parámetro λ :

$$E(x) = \frac{1}{\lambda}, V(X) = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.7)$$

Distribución de Weibull

La distribución de Weibull se utiliza con frecuencia para modelar el tiempo hasta que ocurre una falla en algún sistema. La función de densidad de probabilidad para la distribución está definida como:

$$f(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\theta^\beta} \cdot \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \quad t \geq 0, \theta > 0, b > 0 \quad (2.8)$$

Donde β y θ son los parámetros forma y escala, respectivamente; por otra parte, t corresponde a la variable aleatoria que, en el caso de la confiabilidad, responde al tiempo entre fallas.

La función confiabilidad de Weibull se determina como:

$$R(t) = \int_s^\infty f(s)ds = \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \quad (2.9)$$

Por otro lado, la función de distribución acumulativa está dada por la ecuación

$$R(t) = 1 - F(t) \quad R(t) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \quad (2.10)$$

Utilizando el método de mínimos cuadrados para obtener los parámetros de forma y escala, aplicado a la función de distribución acumulativa:

$$F(t) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \quad (2.11)$$

$$\rightarrow \frac{1}{\exp \left[\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right]} = 1 - F(t) \quad (2.12)$$

$$\rightarrow \frac{1}{1 - F(t)} = \exp \left[\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \quad (2.13)$$

Aplicando logaritmo natural:

$$\rightarrow \ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) = \ln \left[\exp \left[\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \right] \quad (2.14)$$

$$\rightarrow \ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) = \left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \quad (2.15)$$

Calculando nuevamente el logaritmo natural para la expresión anterior:

$$\rightarrow \ln \left[\ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right] = \beta \cdot \ln \left(\frac{t}{\theta} \right) \quad (2.16)$$

$$\rightarrow \ln \left[\ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\theta) \quad (2.17)$$

Luego, se obtiene una ecuación lineal de la forma $y = ax - b$. Se debe notar que β corresponde a la pendiente de la ecuación. Este se define como el factor de forma, donde surgen las siguientes consideraciones:

Cuando $\beta < 1$ existen desgastes en que la tasa de fallos disminuye en función del tiempo, luego de un incremento repentino. Si $\beta \rightarrow 0$, se asocia a ciclos de desgaste bajo; por otra parte, cuando $\beta \rightarrow 1$, existen ciclos de desgaste altos. Asimismo, un valor de β menor a uno indica fallos infantiles.

Cuando $\beta > 1$, se trata de desgaste debido a la disminución constante de la resistencia antes de su puesta en servicio.

2.4 METODOLOGÍAS ÁGILES

El término *ágil* nace en febrero de 2001, tras una reunión celebrada en Utah-EEUU donde participan un grupo de 17 expertos de la industria del software, incluyendo algunos creadores o impulsores de distintas metodologías de softwares. Su objetivo fue esbozar los valores y principios que deberían permitir a los equipos desarrollar software rápidamente y respondiendo a los cambios que puedan surgir a lo largo del proyecto [33]. Así, surge el *Manifiesto ágil*, cuyo objetivos es englobar aquellos principios y valores que hacen diferente un proyecto de desarrollo de software ágil de uno en su forma tradicional. Según el manifiesto, se valora [33]:

Al individuo y las interacciones del equipo de desarrollo sobre el proceso

y las herramientas. La gente es el principal factor de éxito de un modelo de software. Es más importante construir un buen equipo que construir el entorno. Muchas veces se comete el error de construir primero el entorno y esperar que el equipo se adapte automáticamente. Es mejor crear el equipo y que éste configure su propio entorno de desarrollo en base a sus necesidades.

Desarrollar Software que funciona más que conseguir una buena documentación.

La regla a seguir es "no producir documentos a menos que sean necesarios de forma inmediata para tomar una decisión importante". Estos documentos deben ser cortos y centrarse en lo fundamental.

La colaboración con el cliente más que la negociación de un contrato.

Se propone que exista una interacción constante entre el cliente y el equipo de desarrollo. Esta colaboración entre ambos será la que marque la marcha del proyecto y asegure su éxito.

Responder a los cambios más que seguir estrictamente un plan. La habilidad de responder a los cambios que puedan surgir a lo largo del proyecto (cambios en los requisitos, en la tecnología, en el equipo, etc.) determina también el éxito o fracaso del mismo. Por lo tanto, la planificación no debe ser estricta sino flexible y abierta.

Las principales diferencias entre las metodologías ágiles con respecto a las tradicionales, se pueden comparar en la siguiente tabla:

Metodologías Ágiles	Metodologías Tradicionales
Basadas en heurísticas provenientes de prácticas de producción de código	Basadas en normas provenientes de estándares seguidos por el entorno de desarrollo
Especialmente preparados para cambios durante el proyecto	Cierta resistencia a los cambios
Impuestas internamente (por el equipo)	Impuestas externamente
Proceso menos controlado, con pocos principios	Proceso mucho más controlado, con numerosas políticas y normas
No existe contrato tradicional o al menos es bastante flexible	Existe un contrato prefijado
El cliente es parte del desarrollo	El cliente interactúa con el equipo de desarrollo mediante reuniones

TABLA 2.2: Principales diferencias entre Metodologías ágiles y tradicionales [33].

2.4.1 Design Thinking

Design Thinking es una innovación comprensiva orientada al cliente , que se enfoca en desarrollar ideas o modelos de negocio creativas. Esencialmente, plantea diversas aproximaciones para los diseñadores de proyectos y métodos en los procesos de negocio. El enfoque es aplicable a todo tipo de ideas de negocio, productos o servicios [34]. Como el diseño es un proceso que transforma

requerimientos en un producto final, el proceso de Design Thinking puede ser comprimido en siete fases escenarios: Definir, investigar, idear, prototipar, seleccionar, implementar y testear [35]. Las características del Design Thinking se pueden enumerar de la siguiente manera [34]:

Aproximación integrativa: Esto significa que, para el problema a resolver, su proceso debe estar sujeto a las condiciones del marco de trabajo. El análisis del problema y el desarrollo de su solución deben ser consideradas sistemática y holísticamente en la formación del proceso.

Foco en la orientación temprana del cliente: el Design Thinking comienza con las personas y no con la tecnología o las metas del negocio. En último lugar, el cliente debe tener una influencia decisiva en las decisiones de seguir o parar el proceso. No es suficiente preguntar a los clientes con los instrumentos de investigación del mercado tradicional.

Empatía: EL elemento centrar es ponerse uno mismo en la posición del cliente o usuario, y tener en cuenta los detalles desde su observación. La empatía puede crear una distancia entre la persona que innova y, al mismo tiempo, proximidad con las necesidades cliente.

Esfuerzo en crear ideas tempranas: Los prototipos deben ser creados tan rápido como sea posible. Esto no significa tener un producto perfecto y casi terminado, sino todo lo contrario: funciones o características individuales que ofrece el producto para ser probadas por los clientes.

Consistencia en la frecuencia de ciclos de iteración entre las fases de desarrollo: el retorno a una fase previa no es un error, pero muestra un logro en el proceso de aprendizaje. Las fallas son parte integral desde este enfoque y deben ser tolerados y aceptadas por todos los participantes.

Combinar fases analíticas y fases sintéticas: En la primera parte, el problema es analizado en detalle (recolección, organización, evaluación y posibles soluciones). En segundo lugar se plantean soluciones concretas que son desarrolladas y testeadas.

2.4.2 Fases del Design Thinking

Como se dijo anteriormente, el Design Thinking puede separarse en siete fases, que se muestran a continuación [35]:

Definir: la mayoría de las veces, esta primera parte involucra la generación o recepción de los requisitos de diseño. Estos pueden ser verbales o escritos, simples o complejos. Los clientes o usuarios tienen una variedad de experiencias en servicios relacionados al diseño, es por esta razón que suelen ser muy diversos. En este sentido, si estos requerimientos no son lo suficientemente robustos, posiblemente sea necesario reescribirlos y trabajarlos nuevamente junto al cliente. Una vez obtenidos los requisitos, son transformados en objetivos con el fin de especificar al equipo de diseño qué es lo que se pretende lograr, y plantear el marco para el desarrollo. Para esto, existe la técnica de las *cinco W*, referida a cinco palabras en inglés que comienzan con "W", que permiten obtener respuestas objetivas mediante preguntas para definir el trabajo de diseño. Estas son: who (quién), what (qué), when (cuándo), where (dónde) y why (por qué).

Pregunta	Resultados
¿Quién es el cliente y el público objetivo?	Tamaño, naturaleza, características
¿En qué solución de diseño piensa el cliente?	Impresión, web, video
¿Cuándo y por cuánto tiempo será necesitado el diseño?	escalas de tiempo
¿Dónde sera utilizado el diseño?	Media, territorio, país
¿Por qué el cliente piensa que se necesita una solución de diseño?	[-]
¿Cómo será implementada la solución?	Presupuesto, distribución, campaña

TABLA 2.3: Tabla de preguntas y resultados con la técnica de las cinco W [35]

Investigar: una vez se han definido y acordado los acuerdos, el diseñador comienza a realizar una búsqueda de información. Ésta puede ser cuantitativa, con una estadística dura respecto al tamaño y la composición de los grupos objetivo de usuarios, o cualitativa, con información acerca de qué grupos consumen o compran este tipo de productos. La investigación se separa en dos tipos: **primaria**, corresponde a la retroalimentación generada durante la fase de aprendizaje de proyectos previamente acometidos con el cliente; **secundaria**, cuando la información es obtenida por fuentes secundarias como reportes o investigaciones en el mercado de consumidores. Para esto, se plantea una lista de ítem a responder:

- ¿Se tiene una retroalimentación de proyectos previos?
- ¿Se tiene una composición estadística del conjunto de usuarios?
- ¿Se comprende el mercado objetivo?
- ¿Cuál es el nivel educativo de ese grupo?
- ¿Cuál es el estilo de vida típico de ese grupo?
- ¿Cuáles son las aspiraciones de ese grupo de usuarios?

Idear: Durante la fase de idear, el equipo de diseño esboza la información obtenida y las restricciones establecidas durante la etapa de definición. Esta información es usada para crear ideas usando como entrada los requerimientos de diseño. Para esto, existen distintos métodos para idear, entre los que se encuentran:

- Lluvia de ideas: Los participantes son libres para hacer propuestas en un ambiente no crítico. Estas propuestas pueden ser puestas en tarjetas sobre una pizarra para facilitar el proceso o registrar las ideas generadas.
- Esquematización de ideas: En esta instancia, el diseñador puede esbozar una representación de quien es el público objetivo. Este esbozo puede usarse para producir un diseño o concepto inicial, refinar elementos o resolver detalles.

Prototipar: la fase anterior genera una variedad de soluciones potenciales para los requisitos del diseño. Por esto, el prototipo puede ser utilizado para testear la fiabilidad técnica del diseño. Un prototipo entrega al equipo de diseño y a los clientes la capacidad de visualizar y manejar el concepto del diseño, o para tener una idea física o real sobre éste. Como el objetivo del prototipo es probar aspectos particulares de la solución de diseño, este puede hacer que alguno de los aspectos presentados puedan ser efectivamente evaluados; también, no necesita estar hecho con los materiales o funcionalidades finales. Dentro de los distintos tipos de prototipos se encuentran:

- Bosquejo: idea básica visual de diferentes elementos del diseño.
- Modelo: una réplica del diseño que los clientes pueden ver en

tres dimensiones. Puede tener distintos grados de funcionalidad y componentes de trabajo.

- Maqueta: réplica a escala del diseño, que los clientes pueden observar según su configuración en el terreno.

Seleccionar: la etapa de selección es un punto en el cual uno de las soluciones de diseño propuestas son elegidas para el desarrollo. El criterio de decisión se ajusta para un propósito: ¿está el diseño interpretando las necesidades y objetivos de los requerimientos? No obstante, pueden existir otros factores como el costo, tiempo o el presupuesto disponible.

Implementar y testear: durante esta fase, la solución de diseño debe ser implementada o producida. Corresponde a la etapa final del proceso de diseño, e involucra la puesta en marcha física del proyecto en el ambiente donde se encuentran los objetivos, funciones y restricciones obtenidas de los requerimientos del cliente.

2.5 HERRAMIENTAS DE SOFTWARE

2.5.1 Lenguajes de programación orientada a objetos

La programación orientada a objetos se define como un paradigma de la programación, es decir, una manera de programar específica donde se organiza un código en unidades denominadas clases, de las cuales se crean objetos que se relacionan entre sí para conseguir los objetivos de las aplicaciones [36]. SE diferencia de la programación estructurada puesto que los programas se deben escribir en términos de clases, objetos, propiedades y métodos. Un objeto no es

más que un conjunto de variables (o datos) y métodos (o funciones) relacionados entre sí. Los objetos se utilizan para modelar objetos o entidades del mundo real. Un objeto es, por tanto, la representación en un programa de un concepto, y contiene toda la información necesaria para abstraerlo [37]. Cuando las variables de un objeto se empaquetan o protegen rodeado con sus métodos, se denomina encapsulamiento. El hecho de realizar esta acción proporciona dos beneficios a los programadores [37]:

- **Capacidad de crear módulos:** el código fuente de un objeto puede escribirse y mantenerse independiente del código fuente del resto de los objetos. De esta forma, un objeto puede pasarse fácilmente de una parte a otra del programa.
- **Protección de la información:** Un objeto tendrá una interfaz pública perfectamente definida que otros objetos puedan mantener información privada y pueden cambiar el modo de operar de sus funciones miembros sin que esto afecte a otros objetos que usen estas funciones miembro. Es decir, no se necesita entender cómo funciona el mecanismo de cambio de marcha para hacer uso de él.

Las clases son declaraciones o abstracciones de objetos. Esto quiere decir que la definición de un objeto es la clase. Cuando se programa un objeto y se define sus características y funcionalidades, en realidad lo que se hace es programar una clase. Las propiedades o atributos son las características de los objetos; también se pueden entender como variables donde se almacenan datos relacionados con los objetos. Por otra parte, los métodos son las funcionalidades asociadas a los objetos. Un mensaje, es la acción de efectuar una llamada a un método; para mandar mensajes a los objetos se utiliza el operador punto, seguido del método que se desea invocar y los paréntesis, como en las llamadas a las

funciones [36]. Dentro de los lenguajes orientados a objetos se reconocen:

- C++
- Java
- Ruby
- Python

2.5.2 Lenguajes de hojas de estilo

Las hojas de estilo (*css* debido a las palabras en inglés *cascading style sheets*) corresponden a una norma que permite especificar y controlar de una forma muy cómoda y racional el aspecto del texto en los documentos HTML. Estas son constituidas por una recomendación del *W3 Consortium*, organismo internacional que publica las normas sobre la web [38]. Esta centralización de la información permite que se puedan trabajar por separado el contenido de una página web y su aspecto gráfico [39]. Las hojas de estilo consisten en instrucciones simples que pueden situarse dentro de documentos html (en la zona de encabezado o distribuidas en el cuerpo del documento) o como un fichero externo [38]

2.5.3 Bases de datos

Una base de datos de un sistema informático corresponde a la representación integrada de los conjuntos de entidades instancia correspondientes a diferentes entidades tipo del sistema, y de sus interrelaciones. Esta representación informática debe poder ser utilizada de forma compartida por muchos usuarios de

distintos tipos [40]. Según Camps (2005), se pueden enumerar de forma simplificada las principales diferencias entre ficheros tradicionales y las bases de datos según la siguiente tabla:

Item	Ficheros	Bases de datos
Entidades tipo	Tienen registros de una sola entidad tipo	Tienen datos de varias entidades tipo
Interrelaciones	El sistema no interrelaciona ficheros	El sistema tiene previstas herramientas para interrelacionar entidades
Redundancia	Se crean ficheros a la medida de cada aplicación, con todos los datos necesarios aunque algunos sean redundantes respecto de otros ficheros	Todas las aplicaciones trabajan con la misma BD y la integración de los datos es básica, de modo que se evita la redundancia
Usuarios	Sirven para un solo usuario o aplicación	Es compartida por muchos usuarios de distintos tipos

TABLA 2.4: Diferencias entre ficheros y bases de datos [40]

Respecto a la arquitectura de las bases de datos, y de acuerdo con el estándar ANSI/SPARC, existen tres niveles de esquemas [40]:

- **Nivel externo:** aquí se sitúan las diferentes visiones lógicas que los procesos usuarios (programas de aplicación y usuarios directos) tendrán de las partes de la BD que utilizarán.
- **Nivel Conceptual:** existe una sola descripción básica, única y global, que sirve de referencia para el resto de los esquemas.
- **Nivel Físico:** hay solo una descripción física, denominada esquema interno.

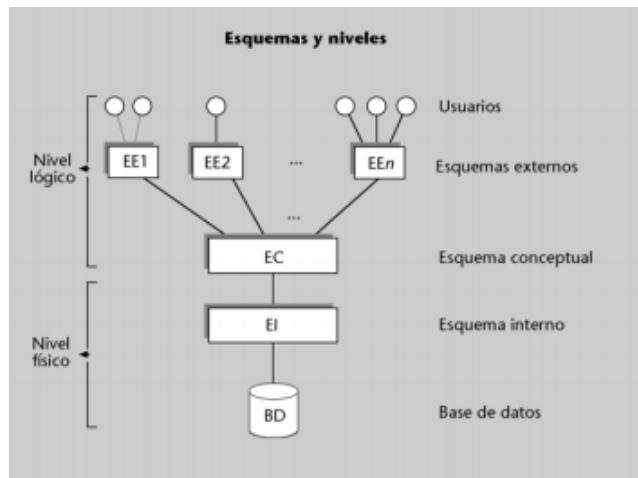


FIGURA 2.9: Esquema conceptual de niveles [40]

Con el fin de comunicarse con el sistema de gestión de base de datos, el usuario o aplicación debe valerse de un lenguaje específicos. En este sentido, el lenguaje SQL es más utilizado en las bases de datos, y tiene tres tipos de instrucciones diferentes [40]:

- **Verbos tipo DML:** por ejemplo *SELECT* para hacer consultas, e *INSERT*, *UPDATE*, y *DELETE* para hacer mantenimiento de los datos.
- **Verbos tipo DDL:** por ejemplo, *CREATE TABLE* para definir tablas, columnas y restricciones.
- **Verbos de control de entorno:** por ejemplo, *COMMIT* y *ROLLBACK* para delimitar transacciones.

2.5.4 Arquitectura Cliente-Servidor

El modelo Cliente/Servidor corresponde a una aplicación distribuida en el que las tareas se reparten entre los proveedores de recursos o servicios,

llamados servidores, y los demandantes, denominados clientes. Este modelo permite diversificar el trabajo que realiza cada aplicación, de forma que los clientes no se sobrecarguen. La arquitectura Cliente/Servidor tiene en consideración que la capacidad de proceso se encuentre repartida en ambos proveedores; asimismo, la centralización de la gestión de la información separada de las responsabilidades permite mayores ventajas desde el punto de vista organizativo. Tanto cliente como servidor son entidades abstractas que pueden residir en la misma máquina como en máquinas diferentes [41].

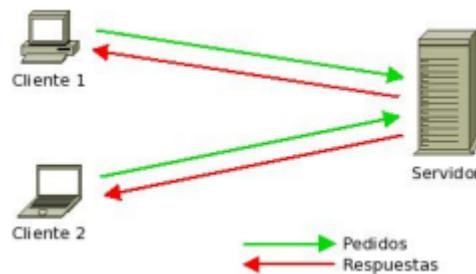


FIGURA 2.10: Modelo Cliente/Servidor [41].

El modelo de servicios corresponde a una vista abstracta, en la que se establece las definiciones, reglas y relaciones entre las estructuras vinculadas a la aplicación. Sirve de base para el intercambio de ideas durante el desarrollo lógico de la aplicación y determina su resultado. Dicho modelo establece tres conjuntos de funcionalidades, en los cuales se encuadran las distintas tareas en las que se ve involucrado cualquier tipo de desarrollo [41]:

- **Lógica de presentación:** Es la responsable del control de todos los aspectos relacionados con la interacción entre el usuario y la aplicación. La codificación de las tareas asociadas a esta lógica consiste en la llamada a procesos independientes situados en otras lógicas, cuya ejecución es totalmente transparente.

- **Lógica de negocios:** Es la que controla la secuencia de acciones y fuerza el cumplimiento de las reglas de negocio propias de cada empresa. Es flexible a la hora de decidir cómo y donde situar el código de esta lógica; tiene la habilidad de colocar distintas interfaces de usuario para un mismo conjunto estándar de reglas de negocio.
- **Lógica de datos:** En este conjunto entran los proceso encargados de la gestión de los datos propiamente dicha. Es decir, los proceso encargados del mantenimiento de los datos, de garantizar las reglas de integridad referencial establecidas, así como la gestión de las transacciones. Estas tareas son realizadas generalmente por un sistema de gestión de bases de datos.

2.5.5 Interfaz de Programación de Aplicaciones

Una Interfaz de Aplicación Programable o API (por las siglas en inglés de *Application Programming Interface*) corresponde a un conjunto de reglas que las aplicaciones pueden seguir para comunicarse entre ellas, sirviendo de interfaz entre programas diferentes de la misma manera en que la interfaz de usuario facilita la interacción entre el humano y el software [42]. Las API permiten hacer uso de funciones existentes en otro software, reutilizando así el código que se sabe que está probado y que funciona correctamente. Asimismo, un recurso es cualquier objeto de información que se pueda apuntar que no sea un literal asignado a una propiedad del recurso. Por otra parte, existe un conjunto de principios de arquitectura para la construcción de interfaces entre sistemas, denominado REST por el acrónimo inglés *Representational State Transfer*, y que tiene las siguientes características [43]:

- El uso de HTTP (Hypertext Transfer Protocol) como protocolo de comuni-

cación para obtener datos o indicar la ejecución de operaciones sobre los datos.

- La transferencia de los datos se realiza utilizando formatos como XML (Extensible Markup Language) o JSON (Javascript Object Notation)

El protocolo utilizado es del tipo cliente/servidor sin estado, esto quiere decir que no recuerda pasadas interacciones. Las funciones principales con las cuales el sistema interactúa con los datos y las gestiones propias de la conexión se muestran en la siguiente tabla [43]:

Función	Descripción
HEAD	Solicita la cabecera de la respuesta. Permite obtener los metadatos de las entidades sin solicitar la entidad propiamente
GET	Solicita el recurso especificado
POST	Envía un recurso. Esta petición suele usarse tanto para crear como para actualizar contenidos
PUT	Sube o carga un recurso especificado
DELETE	Solicita la eliminación del recurso especificado
OPTIONS	Solicita las opciones que el servidor soporta para un URL específico

TABLA 2.5: Funciones principales utilizadas en API [43]

Los errores HTTP de la API son fuente importante de información para

quien esté desarrollando. Las más relevantes respecto al estado de las peticiones son [43]:

2xx Peticiones correctas: Conjunto de respuestas para indicar recepción, compresión y aceptación de peticiones.

- **200 OK:** Respuesta correcta. Indica que el servidor ha recibido, entendido y aceptado la petición.
- **201 Created:** La petición ha sido aceptada y ha resultado en la creación de un nuevo recurso.
- **202 Accepted:** La petición ha sido aceptada para procesarse pero aun no se ha completado.
- **204:** El recurso ha sido borrado con éxito.

3xx Redirecciones: Esta categoría permite informar que la petición ha de concretarse en algun sentido o se atiende desde otra ubicación.

- **300 Multiple choices:** La petición corresponde a cualquier elemento de un conjunto y debe especificarse uno en concreto. La respuesta ha de incluir las posibilidades.
- **304 Not modified:** Especifica que el documento solicitado no ha variado con respecto al solicitado.

4xx Errores del cliente: Esta categoría permite informar de peticiones incorrectas por parte del cliente.

- **401 Unauthorized:** El recurso solicitado requiere autorización.
- **402 Forbidden:** Prohibido. La petición se ha entendido pero no hay autorización para atenderla.

- **404 Not Found:** El servidor no encuentra lo solicitado en la petición.

5xx Errores internos del servidor: Permite indicar cuando el servidor no responde satisfactoriamente las peticiones y es consciente de ello.

- **500 Internal Server Error:** El servidor encontró algo inesperado que le impidió resolver la petición.

2.5.6 Ordenadores de placa reducida

Los Ordenadores de Placa reducida o SBC por las siglas en inglés *Single Board Computer* son placas que contienen todos o la mayor parte de los componentes de un ordenador [44]. Las principales características de estas placas es su reducido tamaño en comparación con ordenadores disponibles en el mercado, su precio económico y una potencia relativamente baja. Algunos ejemplos de placas SBC son [44]:

- Raspberry Pi
- BeagleBone Black
- PcDuino
- Pandaboard.

Para este caso, se profundizará en torno a la SBC Raspberry Pi. En este sentido, la placa está compuesta por los siguientes componentes [45]:

1. **Sistema en chip:** Corresponde a un integrado con una cubierta metálica, compuesta por la unidad central de procesamiento (CPU), y la unidad gráfica de procesamiento.

2. **Memoria RAM:** del inglés *Random Access Memory*, almacena datos e instrucciones para que puedan ser accedidos por otros componentes, evitando que vuelvan a pasar por las unidades de procesamiento.
3. **Radio:** componente que permite a la placa comunicarse con otros aparatos sin cables.
4. **Controlador USB:** Responsable de correr el puerto Ethernet y los puertos USB.
5. **Puertos USB:** Permite conectar periféricos compatibles con USB.
6. **Puerto Ethernet:** puerto de red, que permite conectar el computador a la red.
7. **Puerto AV:** Posee un *jack* para conexión a parlantes y audífonos.
8. **CSI:** del inglés Camera Serial Interface, permite la conexión a una cámara diseñada especialmente para la placa.
9. **Puerto HDMI:** puerto para conexión de interfaz multimedia de alta definición.
10. **Puerto MicroUSB:** Utilizado para conectar la placa a una fuente de poder.
11. **Conector Display:** conector DSI diseñado para utilizar dispositivo touch.
12. **pines GPIO:** Del inglés General-purpose input/output, pines utilizados para agregar hardware adicional como botones y sensores.
13. **conector Tarjeta MicroSD:** conector para insertar tarjeta MicroSD con el sistema operativo, softwares y archivos guardados.



FIGURA 2.11: Raspberry Pi 3 modelo B+ [45]

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

El análisis del estado del arte realizado en esta tesis se agrupa en tres tipos: el primero corresponde a proyectos relacionados sobre la gestión de la producción con fabricación aditiva, el segundo sobre proyectos vinculados a la gestión del mantenimiento de equipos basados en la teoría de la confiabilidad, y el tercero en proyectos con tecnologías innovadoras que utilicen CMMS para la gestión del mantenimiento. Las palabras clave para el presente análisis son: *Impresión 3D, Fabricación aditiva, Gestión de la producción, gestión del mantenimiento, CMMS, Innovación y Confiabilidad (RCM)*.

3.1 GESTIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA FABRICACIÓN ADITIVA

Objetivos:

- Presentar revisión de la literatura de las principales facetas de la fabricación aditiva relacionada con el campo de la gestión de operaciones.
- Intentar definir un modelo que de cuenta de los costos de producción y la programación de la actividad de una máquina.

Resumen: La manufactura aditiva es una nueva forma de producir piezas, que en los últimos años ha tenido una significativa aplicación en los

ambientes tradicionales de producción, desde que ha demostrado su capacidad para producir piezas sin defectos particulares y con buenas propiedades mecánicas. Durante las dos últimas décadas, la fabricación aditiva fue primeramente usada para producir polímeros, y luego aplicada a metales; esta evolución hizo posible su entrada en los sectores industriales tradicionales, como la industria aeroespacial, mecánica y otros sectores relacionados. No obstante, la introducción de esta tecnología en el contexto mencionado anteriormente, pone en la mesa de los investigadores algunos cuestionamientos acerca de la gestión de esta tecnología en contextos más complejos, caracterizados por la integración con otras máquinas.

Resultados: Las palabras clave investigadas en relación a la gestión de las operaciones son [46]: (i) organización de la producción; (ii) equilibrio de la producción; (iii) calidad de la producción; (iv) ciclo de vida de la producción y; (v) sustentabilidad de la producción. Desde este punto de vista, la literatura analizada respecto a la gestión de operaciones utilizando manufactura aditiva no está bien cubierta aún desde el punto de vista de la investigación. Esto se puede observar en la figura 3.1, que muestra las publicaciones relacionadas a la gestión de operaciones en función del año de publicación, según la temática especificada.

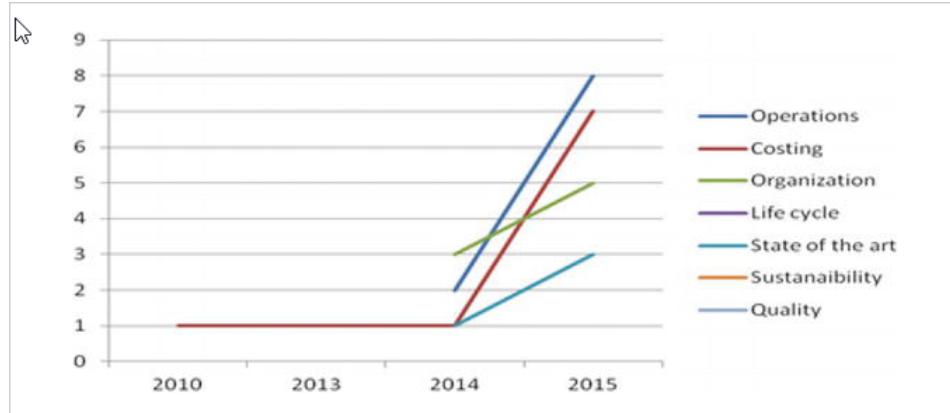


FIGURA 3.1: Número de publicaciones por año y según temática [46]

El primer punto de partida para ser desarrollado en el futuro está enfocado, principalmente, en la definición de modelos de la contabilidad de costo, y también en el modelo de programación para manufactura asistida. El costo total de fabricación para cada geometría es obtenido a través de la suma de costos por cada paso.

$$C_{tot}(G_i) = C_{prep}(G_i) + C_{buidjob}(G_i) + C_{setup}(G_i) + C_{build}(G_i) + C_{removal}(G_i)$$

Donde:

C_{tot} es el costo total de fabricación por cada parte con i-ésima geometría [\$/pieza]

G_i es la iésima geometría.

C_{prep} es el costo de preparación de los datos de la geometría (orientación, soportes, estructuras, etc.)[\$/pieza]

C_{build} es el costo de trabajo de ensamblaje y construcción [\$/pieza].

C_{setup} es el costo de seteo de la máquina [\$/pieza].

C_{build} es el costo de construcción de una pieza con una i-ésima geometría [\$/pieza].

$C_{removal}$ Costo de remoción de la pieza con i-ésima geometría desde la cámara de la máquina [\$/pieza].

EL primer paso del proceso presentado en este documento son los datos del diseño de la geometría, que incluye orientación y estructura de soporte generada. Una posible formulación para este costo considera el valor específico del costo referido al número de partes producidas, por cada geometría.

$$C_{prep}(G_i) = (C_{op.pre} + C_{PC}) \cdot \frac{T_{prep}(G_i)}{N_i}$$

Donde:

C_{prep} costo de preparación de los datos de geometría (orientación, estructuras de soporte, etc)[\$/pieza]

G_i es la i-ésima geometría. [-]

$C_{op.pre}$ Tarifa por hora del operador de pre-proceso [\$/hora]

C_{PC} Tarifa por hora del espacio de trabajo, incluido costos requeridos de software y herramientas [\$/hora].

T_{prep} Tiempo requerido para preparar los datos de CAD [h].

N_i Cantidad de piezas con i-ésima geometría [-]

Cuando las actividades previas, es decir, la preparación de la geometría y la fase de planificación, están completas, comienza la fase de producción. Este proceso incluye la importación de los datos y la configuración de la máquina. Durante esta fase, la máquina no debe estar en uso, es por esta

misma razón que se incluye el costo horario. También, en este caso, se usó el volumen de las piezas como un criterio de distribución en la formulación final. Así:

$$C_{setup}(G_i) = (C_{op.mach} + C_{mach}) \cdot (T_{setup} + (F_{mat.ch} \cdot T_{mat.ch}) \cdot F_{inertgas} \cdot \frac{V(G_i)}{\sum_{i=1}^n V(G_i) \cdot N_i})$$

Donde:

C_{setup} es el costo de configuración de la máquina [\$/pieza]

G_i i-ésima geometría [-]

$C_{op.mach}$ tarifa por hora del operario de la máquina [\$/hora]

C_{mach} costo por hora de máquina [\$/hora]

T_{setup} Tiempo requerido por la configuración de la máquina [h]

F_{mat-ch} Factor para modelar la frecuencia del cambio de material [-]

$T_{mat.ch}$ Tiempo requerido para el cambio de material [h]

$F_{inertgas}$ Factor para modelar el esfuerzo requerido por manipular en ambiente protector de gases.

V es el volumen de la geometría.

N_i Cantidad de piezas para cada i-ésima geometría [-].

En la fórmula anterior, es posible incluir el tiempo extra de trabajo debido al uso de gas protector ($F_{inertgas}$), el cual es un factor que puede ser 1 o 0. También, el cambio de material puede ser considerado a través de un factor que, al igual que el anterior, puede ser 1 o 0 ($F_{mat.ch}$). Además, si el costo está dividido en más trabajos, esta formulación puede ser utilizada como una fracción. El costo por hora de la máquina se obtiene dividiendo el costo de

compra de ésta por el periodo de depreciación de la máquina, y su tiempo de actividad por año.

$$C_{machine} = \frac{Cost_{machine}}{h \cdot upt}$$

Donde:

$C_{machine}$ es el costo por hora de la máquina [\$/h]

$Cost_{machine}$ es el costo de compra de la máquina [\$]

h es el periodo de depreciación de la máquina [Años]

upt es el tiempo de actividad de la máquina [horas/año]

A continuación, se muestra la fórmula para el cálculo de los pasos de construcción de las piezas. En esta fase, se considera la fabricación de todas las piezas en la cámara. El costo considera:

- Máquina
- Energía
- Material
- Gas

$$C_{build} = T_{build}(G_i) \cdot (C_{mach} + C_{inertgas} \cdot Gas_{cons} + C_{energy} * P_{cons} \cdot K_u) + M(G_i) \cdot (C_{material} \cdot W_f)$$

Donde:

C_{build} es el costo de construcción de una pieza con i-ésima geometría [\$/pieza]

G_i es la i-ésima geometría [-]

T_{build} es el tiempo total de construcción [horas]

$C_{machine}$ es el costo por hora de la máquina [\$/hora]

$C_{inertgas}$ es el costo del gas inerte [\$/m³]

Gas_{cons} es el consumo promedio de gas [m³/hora]

C_{energy} es el costo de energía [\$/KWh]

P_{cons} es la potencia consumida [kW]

M es la masa de la geometría [kg]

$C_{material}$ es el costo del material [\$/kg]

W_f es el factor de desecho para el polvo [-]

Cuando la operación de construcción concluye, es necesario remover las piezas fabricadas y el sustrato desde la cámara de la máquina. De la misma forma, en este caso se incluye el factor de modelo, esto es considerar el tiempo extra de esfuerzo por trabajar en un ambiente gas protector. El criterio de localización para este costo está basado en el volumen de las piezas.

$$C_{rem}(G_i) = T_{rem} \cdot (C_{op.mach} + C_{mach}) \cdot \frac{V(G_i)}{\sum_{i=1}^n V(G_i) \cdot N_i} \cdot F_{inertgas}$$

Donde:

C_{rem} es el costo de remoción de la pieza con i-ésima geometría desde la cámara [\$/pieza]

G_i i-ésima geometría[-]

T_{rem} Tiempo requerido para remover la pieza desde la cámara de la máquina [\$/hora]

$C_{op.mach}$ Tarifa horaria del operador de la máquina [\$/hora]

C_{mach} Costo por hora de la máquina [\$/hora]

$F_{intertgas}$ Factor para modelar el esfuerzo requerido por manipular en ambiente protector de gases.

V es el volumen de la geometría.

N_i Cantidad de piezas para cada i-ésima geometría [-].

El problema de la programación en la fabricación aditiva, diferente a la programación tradicional de máquinas, ha sido un desafío a resolver desde que esta tecnología comenzó a ser parte permanente dentro de los entornos de producción en diferentes empresas, especialmente en el campo de la defensa y la industria aeroespacial. La pregunta que se busca responder es común en todos los problemas vinculados a la programación de los procesos, es decir: *¿cuál es la programación que permite respetar las fechas de producción con el menor costo?*. Si bien la pregunta es la misma, el contexto de la fabricación aditiva es muy diferente al de producción tradicional, ya que la actividad se realiza durante toda la fase de diseño y transferencia de datos desde la estación de trabajo; además, se nota el hecho que con la manufactura aditiva es posible producir varios y complejos tipos de geometrías en la misma ejecución de la producción. Por esta razón, se debe introducir un modelo "multiobjetivo" para la programación. El marco de trabajo del desarrollo es parecido a los problemas tradicionales de la programación de la producción pero, en este caso, las órdenes de producción son entradas para la máquina de fabricación aditiva.

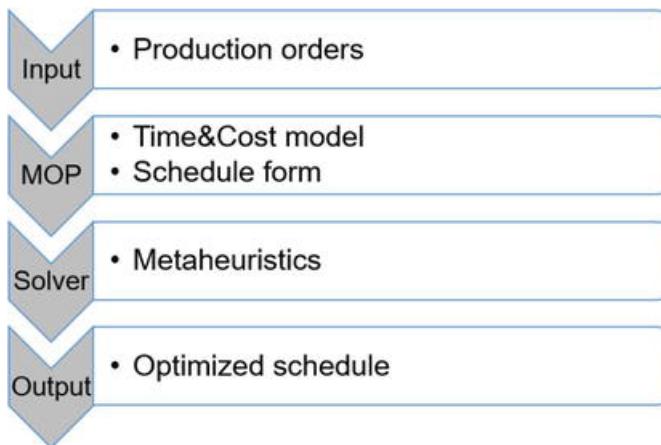


FIGURA 3.2: Marco de trabajo para la programación de la producción [46]

Además, cada orden es caracterizada según los siguientes atributos:

Atributo	Descripción	unidades
d_i	demanda de la i-ésima geometría	[pieza]
dd_i	fecha límite para la i-ésima geometría	[día]
V_i	Volumen de la i-ésima geometría	[cm^3]

TABLA 3.1: Atributos y descripción para programación de la producción en máquinas de fabricación aditiva [46].

Una vez que se listan los atributos para las órdenes de producción, se debe señalar que para este caso se aplicará un modelo de tiempo y costo. Particularmente, se debe considerar el tiempo total o tiempo para producir una unidad de la i-ésima geometría (CT) y el costo total de la pieza (TPC).

Conclusiones: Se pudo realizar el intento de analizar y categorizar los temas relacionados con los problemas de producción de la fabricación aditiva. Esta tecnología comenzó a transformarse en una solución industrial reciente y, entonces, fue reconocida como una interesante temática con la posibilidad de profundizar la investigación en el área, acaso estas tecnologías logran

un buen nivel de madurez en términos de la resistencia mecánica, y sus tolerancias. Después de este primer paso de análisis, el estado de las investigaciones acerca de la gestión de las operaciones en el campo fue analizada y estudiada. Del análisis de la literatura realizado, fue bastante claro que, desde la tecnología y de los niveles de calidad en la producción, es posible concluir que la fabricación aditiva está lo suficientemente lista como para ser llevada al contexto industrial, dándole algunos ajustes que aún siguen necesitando para evitar problemas en la porosidad, tolerancias en la concentricidad y circularidad de las piezas trabajadas. Sin embargo, las piezas en metal pueden ser fabricadas directamente utilizando la manufactura aditiva, teniendo un buen nivel de confiabilidad de éstas, cuando es sometida a esfuerzos de tensión. La fabricación aditiva está evolucionando, así también la necesidad de entender los problemas en la gestión de la producción. No obstante, es posible decir esto teniendo en cuenta que desde el punto de vista de las propiedades mecánicas y sus propiedades existe una variedad de trabajos; empero no se puede decir lo mismo desde el enfoque de la gestión. Así, este estado del arte puede identificarse como el primer punto de estudio en una importante problemática acerca de los métodos de medición y los procesos de coste cuando la manufactura aditiva es utilizada. Sumado a esto, la temática de la gestión se ve afectada desde una ausencia importante respecto a la información disponible. No obstante, una gran variedad autores han comenzado a estudiar la problemática de la gestión relacionada a sistemas generales, pero ninguno reconoce un límite principal en el nivel de conocimiento actual. Finalmente, en este documento fue presentado un modelo de asignación de costos que encaja con los requerimientos de esta nueva tecnología, así también formulaciones matemáticas para la programación de una máquina

única de fabricación aditiva.

3.2 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA TEORÍA DE LA CONFIABILIDAD

Objetivos: Diseñar una propuesta basada en RCM para la máquina flexoplegadora de cartón MARTIN 618 que mejore los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad, conforme a un plan para la gestión del activo desde el foco de mantenimiento.

Resumen: El uso de la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) contempla no solamente el estudio del equipo como tal sino de los subsistemas que lo conforman y la interacción con el entorno físico que lo rodea. En esta tesis primero se realizó la identificación de los subsistemas que tienen mayor incidencia en las fallas y en la prolongación de estas, aplicando un análisis de Pareto se reconocen aquellos subsistemas críticos para la producción, para luego estudiar caso a caso las fallas potenciales a través de un análisis de modos y efectos de falla (AMEF). Al definir los modos y las causas de las fallas se pudo establecer un catálogo de fallas completo para cada subsistema, en donde se condensa información relevante en cuanto a criticidad de cada una ellas y el impacto en las metas de producción, mantenimiento, salud y medio ambiente; así como su priorización. Luego, mediante el desarrollo de la hoja de decisión RCM, con ayuda del árbol lógico, se determinaron las siguientes estrategias de mantenimiento para eliminar las causas de las fallas identificadas:

- Optimización del mantenimiento preventivo.

- Implementación de mantenimiento predictivo.
- Optimización del cambio sistemático de componentes en función de la frecuencia de las fallas.
- Implementación de inspecciones sensoriales por parte de los operadores.
- Identificación de mejoras en las instalaciones a cargo de Ingeniería de Mantenimiento.
- Identificación de repuestos críticos.

Como resultado de la aplicación de la metodología se espera lograr incrementar la vida útil de los componentes de los equipos, así como la disponibilidad de los mismos al disminuir las fallas y sus consecuencias, incrementando así la confiabilidad operacional del activo significando mayores beneficios económicos para la empresa.

Resultados: El activo seleccionado para este estudio muestra indicadores de seguridad operacional bastante desfavorables, una disponibilidad porcentual de un 42.8 % desde ningún punto de vista es concebible económicamente para una empresa, menos para una que, como es el caso de packaging CMPC chile, pretende ser líder en excelencia operacional a nivel internacional. Para complementar esto, el diagrama de Jack Nife es revelador para indicar la posición que tiene el equipo en comparación con sus similares dentro del proceso productivo. Sugiriendo indudablemente que es necesario confrontar el problema y dar un paso hacia adelante en la gestión del activo. Es por eso que un estudio RCM es la mejor manera de dilucidar los principales problemas que están aquejando el funcionamiento de la máquina flexoplegadora MARTIN 618. Con la interpretación del diagrama de Pareto,

establecimos que los focos estarían centrados en la plegadora, rapidset y slotter, con este primer paso sacamos provecho de abordar el 70 % de los objetivos, que para nuestro caso resultaría en un aumento de la confiabilidad y disponibilidad del equipo si logramos administrar las tareas de mitigación. Estos objetivos son las fallas que provocan intervenciones de emergencia deteniendo el activo mientras está produciendo. El segundo análisis de Pareto nos profundiza el estudio dando oportunidad de desentrañar los problemas desde su causa raíz, siendo este uno de los objetivos principales de la metodología evitando caer en redundancias o ineficiencia de las tareas por realizar un estudio demasiado superficial.

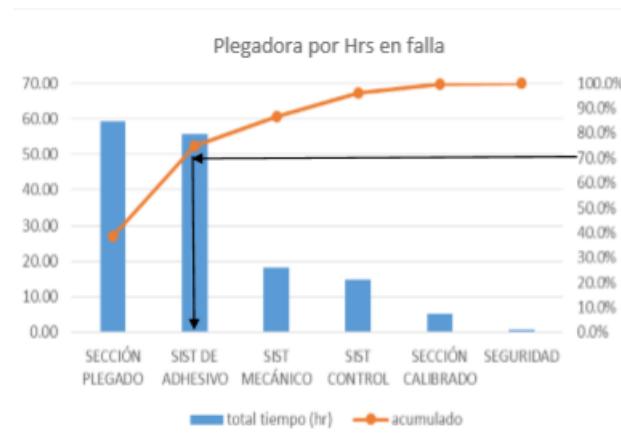


FIGURA 3.3: Diagrama de Pareto por número de fallas para Plegadora [47]

Las fallas en los sistemas generalmente son aleatorias y su probabilidad de ocurrencia pueden ser modeladas a través de diversos métodos matemáticos. Para la confiabilidad operacional la que más se adapta es la distribución de Weibull y al obtener el comportamiento de cada subsistema podemos establecer metas de confiabilidad o límites a los cuales la empresa está dispuesta a trabajar. Si observamos las curvas de confiabilidad de cada uno de los subsistemas críticos, tenemos que para la sección de

plegado, el sistema de adhesivo y el árbol de ranurado a las 200 horas de funcionamiento tendrían una probabilidad de funcionamiento del 55 % lo que es muy bajo para una empresa de excelencia operacional, para el grupo de tinta y la lona de aspiración a las mismas 200 horas de funcionamiento presentan una probabilidad cercana al 64 % de confiabilidad.

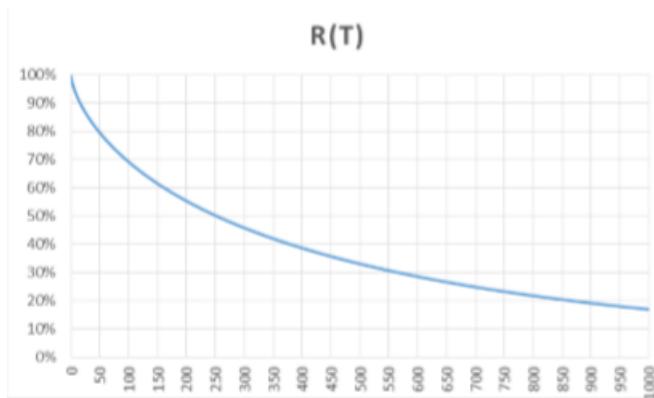


FIGURA 3.4: Curva de confiabilidad para la sección de plegado [47]

MTBF [Hrs]	MTTR [Hrs]	β	θ	γ
219.4	1.78	0.6837	430.0546	0

FIGURA 3.5: Indicadores de mantenimiento para la sección de plegado [47]

Conclusiones: El presente estudio RCM pretende brindar herramientas y conocimientos para la gestión de la instalación y con esto implementar un programa eficaz de mantenimiento, logrando llevar a la empresa a la excelencia operacional que está buscando, aumentando la confiabilidad y mantenibilidad de sus equipos y otorgando grandes beneficios económicos. Claramente la metodología no debe terminar acá, sino que debe seguir un proceso constante. Ciertamente los principales problemas de hoy no serán los mismos de mañana si es que se logra satisfacer las necesidades que justificaron en primer lugar este análisis. Es indudable que el proceso debe

seguir a través del tiempo y que debe involucrar a cada integrante del ciclo de producción.

3.3 TECNOLOGÍAS INNOVADORAS QUE UTILICEN GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO ASISTIDO POR COMPUTADORA.

Objetivos:

- Mostrar la integración de un sistema de información de activos como un CMMS con el sistema de realidad aumentada.
- Demostrar cómo la información integrada de activos de un CMMS con la tecnología de realidad aumentada puede reducir la indisponibilidad.

Resumen: El objetivo final de los encargados del mantenimiento en cualquier industria es maximizar el tiempo de actividad de la producción y mantener la indisponibilidad de los activos al mínimo. Estos factores afectan la capacidad de la industria para cumplir los plazos de producción, sin dejar de garantizar la buena calidad de los productos manteniendo los costos de producción al mínimo. Para lograr este objetivo, se requieren herramientas innovadoras y métodos efectivos del mantenimiento. Estudios previos muestran que el crecimiento de la complejidad de las tecnologías de manufactura actual necesitarán incrementar las competencias, así como la capacitación del personal para resolver rápidamente las interrupciones que ocurren. Así, es difícil lograr una operación de reparación eficiente, especialmente cuando un fallo funcional de la máquina involucra varios posibles problemas, así como la asignación de las habilidades técnicas y fuentes para atender el fallo de equipo requieren más que solo la información reportada por el operador. La

realidad aumentada es una de las tecnologías que emergen en el marco de trabajo de la Industria 4.0, que provee un camino para acelerar el proceso de mantenimiento y minimiza el servicio del trabajo de mantenimiento debido a la información limitada entregada por el operador.

Resultados: El desarrollo de un sistema RA-CMMS para el mantenimiento fue demostrado en una impresora 3D, la cual es una tecnología emergente que transformará el cómo los productos serán fabricados en el futuro. Debido al avance que subyace en esta tecnología, el mal funcionamiento de una impresora 3D puede ser causada por diversas fuentes. En este estudio, se consideran dos tipos de fallas: fallas que involucren un componente que se puede reparar, y fallas que requieren cierta experiencia para resolver el problema. Los pasos para desarrollar el sistema RA-CMMS son los siguientes: la relación entre los diferentes componentes fue diseñada para un almacenamiento eficiente de un alto volumen de datos.

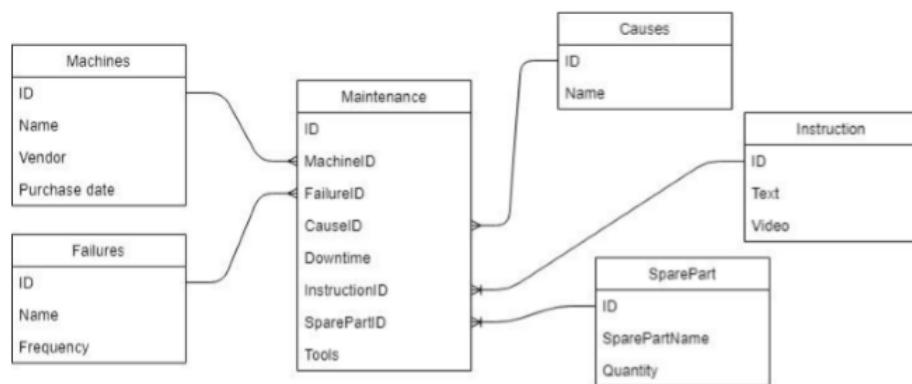


FIGURA 3.6: Diagrama UML que describe la relación de los registros entre máquinas, fallas, causas y acciones de mantenimiento [48]

En segundo lugar, la interfaz de usuario fue diseñada para presentar la información relevante del activo. Por ejemplo, las instrucciones de mantenimiento pueden ser presentadas en formato de texto o mensajes verbales, seguidos

por etiquetas para determinar con precisión la localización del objetivo con animaciones 3D o videos. La interfaz del usuario fue realizada según la visión del usuario sobre los elementos de la impresora, y el reconocimiento de comandos se realiza con gestos manuales o a través de la voz, con el objetivo de navegar en el menú o el control de contenidos digitales. La imagen objetivo es anexada por medio de realidad virtual a la impresora 3D para entregar la localización en la cual el contenido digital debe ser puesto según el marco de referencia en la visión del usuario. Así, el usuario puede acceder a la funcionalidad a través de la aplicación de Realidad aumentada para el diagnóstico de las tareas, o crear órdenes de trabajo utilizando un teclado inalámbrico. Cuando ocurre una falla inesperada, el operador puede hacer un reporte a través del comando de voz o puede observar el tipo de falla y las posibles causas.

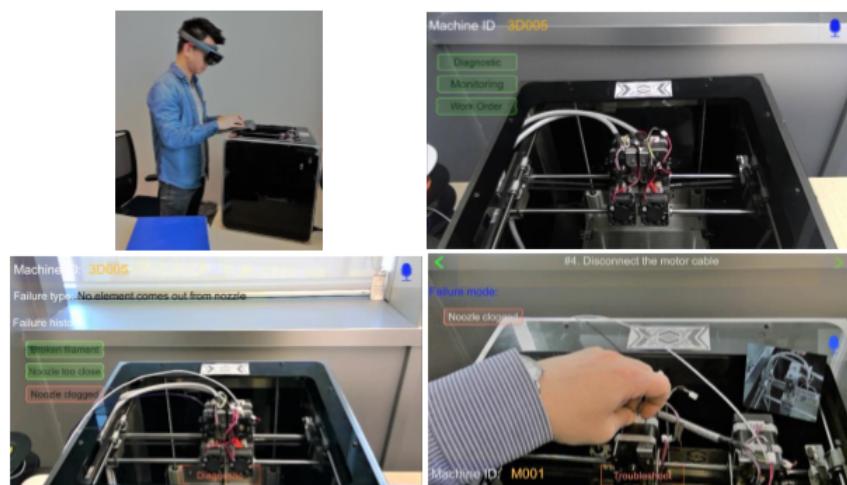


FIGURA 3.7: Sistema de Realidad Aumentada integrado con CMMS. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: (a) operador utiliza el sistema utilizando teclado inalámbrico; (b) funcionalidad del sistema; (c) operación de diagnóstico basado en el historial de fallas; (d) guía del sistema al operador a través de instrucciones de texto y video [48].

Conclusiones: El propósito principal de los sistemas de Realidad aumentada

y la integración a través de CMMS es establecer una aproximación más efectiva para tratar con las paradas inesperadas en el contexto cotidiano de la industria, la cual es caracterizada por la complejidad, conectividad y diversidad del sistema de producción. A través de la obtención de información completa sujeta a la información de los activos y las buenas prácticas de las acciones de mantenimiento en el ambiente de la realidad aumentada, esta aproximación puede asistir al operador no capacitado, para diagnosticar instantáneamente, o reparar cualquier falla del equipo, minimizando el tiempo de reparación no programado. Además, la inspección inmediata de los activos con fallas en sus funciones puede ayudar a idear una planificación de mantenimiento más precisa y, de este modo, evitar las operaciones de mantenimiento no productivos. La reducción del tiempo de recuperación podrá mejorar la disponibilidad de los equipos y, por lo tanto, incrementar la rentabilidad y la ventaja competitiva en la industria.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

4.1.1 Descripción de la empresa

3Dlux es un emprendimiento dedicado al diseño e impresión 3D, fundada el año 2016 por Javier Oliva y Juan Marinetti. La empresa comenzó con el propósito de utilizar la tecnología de impresión 3D FDM para la fabricación de piezas, enfocadas principalmente a las soluciones del área industrial y manufactura. Así, el año 2017 la empresa comenzó con una etapa de investigación y aprendizaje de la maquinaria para estos efectos, y la posibles industrias en las cuales la impresión 3D podría agregar valor. El interés de Javier, diseñador de profesión, por trabajar con softwares de diseño 3D y la visión de Juan, empresario, por incursionar en nuevas áreas de negocio, fueron dando forma al estado actual de la empresa. La primera capacitación o acercamiento a la industria fue en Estados Unidos, donde Javier estuvo de pasante en la empresa de impresión 3D *3DChimera* durante dos semanas. Tanto las máquinas como el modelo de negocio que utilizaban, fueron tomados como ejemplo para lo que se implementaría en Chile. Posterior a este hecho, el primer año de desarrollo se llevó a cabo con la colaboración de la empresa *Acrus-ccl*, dedicada al etiquetado de vinos ubicada en la comuna de Conchalí. Allí, haciendo uso de una oficina facilitada para estos

efectos, se instalaron las primeras máquinas e impresoras 3d, haciendo trabajos ocasionales y a pedido. En 2018, la empresa se trasladó a las dependencias de la Fundacion Mustakis, en la comuna de Recoleta, emplazamiento que ocupa en la actualidad. Hoy, el taller cuenta con 9 impresoras 3d y desarrolla piezas para distintas industrias como minería, salud, entre otras. La capacidad instalada ha permitido la producción de piezas de un volumen aproximado de 300 unidades por pedido; asimismo, la diversidad de impresoras da la posibilidad de trabajar con diversos filamentos de impresión 3D, tanto materiales tradicionales (PLA, ABS y PETG) como plásticos de ingeniería (ASA, PC, entre otros). Dentro de los servicios ofrecidos está el diseño y fabricación de productos y piezas, escaneo 3D y capacitaciones orientadas al uso de las máquinas.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las ventajas del proceso de impresión 3D FDM como la fabricación de diseños complejos, el bajo coste de inversión y la obtención de un objeto final, han hecho que muchas empresas dedicadas al rubro de la manufactura comiencen a incorporar a sus líneas estas máquinas. Por otra parte, la existencia de pequeñas empresas y emprendimientos dedicados a la impresión 3D ha generado un avance en el conocimiento, aplicación y difusión de esta tecnología. Sumado a lo anterior, la personalización de los productos en masa da lugar a que, para maximizar la producción, es necesario el control y la gestión de una mayor cantidad de impresoras. Es por esto que, a mayor cantidad de máquinas, también aumenta la complejidad, ya sea en la operación misma, o mantenerlas en un estado confiable y disponible. A medida que fue aumentando la cantidad de activos, la empresa se vio en la necesidad de optimizar el proceso de producción y mantenimiento,

detectando los siguientes problemas:

- Imposibilidad de monitorización de múltiples máquinas funcionando a la vez.
- Impresoras detenidas frecuentemente por mantenimiento correctivo.
- Impresoras detenidas por varias horas debido a dificultades con la identificación de los problemas.
- Existencia nula o insuficiente de datos referidos a los mantenimientos realizados.
- Existencia nula o insuficiente de datos referidos al material utilizado.

4.3 APLICACIÓN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA TEORÍA DE LA CONFIABILIDAD

4.3.1 Selección del equipo

Análisis de falla

El primer paso para encontrar los equipos más críticos en la granja de impresión 3D es el estudio de los registros de fallos, obtenidos a través del levantamiento de información de fallas ocurridas entre el 12 de mayo y el 10 de octubre del año 2020. Este registro consta (ver Apéndice, Figura 4.73) de la fecha de aparición de la falla, fecha de término del mantenimiento correctivo, descripción de la falla, tiempo aproximado de reparación y descripción de la actividad correctiva.

El diagrama de Pareto corresponde a una técnica gráfica simple para ordenar elementos, desde el más frecuente hasta el menos frecuente. Esta herramienta presenta, en forma decreciente, la contribución relativa de cada elemento al efecto total, que puede basarse en la cantidad de sucesos u otras mediciones de impacto sobre el efecto [49]. Según el mismo autor, la metodología incluye las siguientes etapas:

- Selección de elementos a estudiar.
- Selección de la unidad de medición de análisis.
- Selección del periodo de tiempo.
- Listar los elementos de izquierda a derecha, de modo que disminuya la magnitud de la unidad de medición.
- Dibujar un rectángulo cuya altura representa la magnitud de la unidad de medición para el elemento.
- Construir curva de frecuencia acumulada.
- identificar los elementos más importantes según el análisis realizado.

A partir de los registros de fallas se configura un diagrama de Pareto para cada máquina, a excepción de la impresora *Ender 3*, que fue puesta en operación durante el proceso de recolección de datos por tanto su muestra es insuficiente para el análisis. Así, se busca identificar cómo el 20 % de las causas son responsables del 80 % de los efectos respecto a las fallas en los equipos. Para esto, los elementos a estudiar corresponden al tipo de fallas registradas según cada impresora, en el tiempo comprendido por el levantamiento de información realizado. La unidad de medición corresponde a la frecuencia de las fallas para

cada máquina, y se agrupan según la similitud de las fallas o el subsistema donde ocurre. A continuación, se muestran las fallas y frecuencias agrupadas para las impresoras del taller.

Falla	Frecuencia
No extruye Filamento	4
Desacople o corte de cable	3
Mala adhesión a la cama	3
Rotura de cama	2
Falla LCD	1
Cama desnivelada	1

TABLA 4.1: Fallas y frecuencia de ocurrencia para impresora X350.

Falla	Frecuencia
No extruye filamento	4
Mala adhesión a la cama	3
Ruido indeseado en la fuente	2
correa poca tensión	1
Rotura de cama	1

TABLA 4.2: Fallas y frecuencia de ocurrencia para impresora X400.

Falla	Frecuencia
No extruye filamento	3
Error en calentador	2
colisión extrusor-cama	1
rotura de cama	1
eje desnivelado	1

TABLA 4.3: Fallas y frecuencia de ocurrencia para impresora Prusa MK2.

Los resultados representados en el diagrama de Pareto son los siguientes:

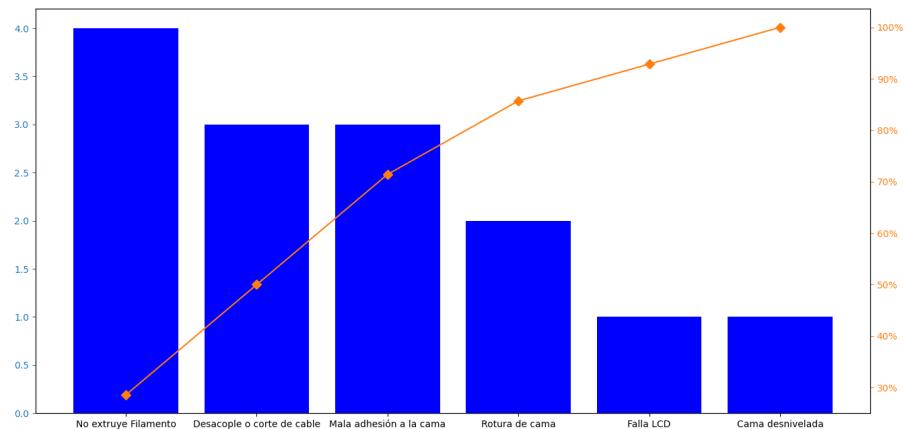


FIGURA 4.1: Diagrama de Pareto para impresora X350.

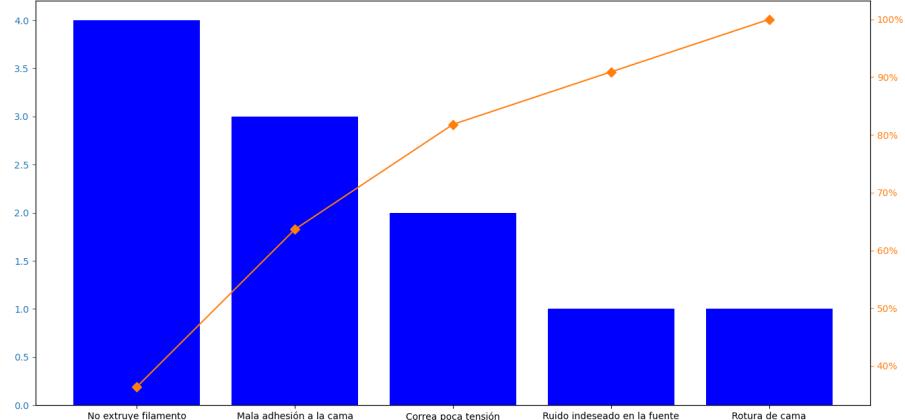


FIGURA 4.2: Diagrama de Pareto para impresora X400.

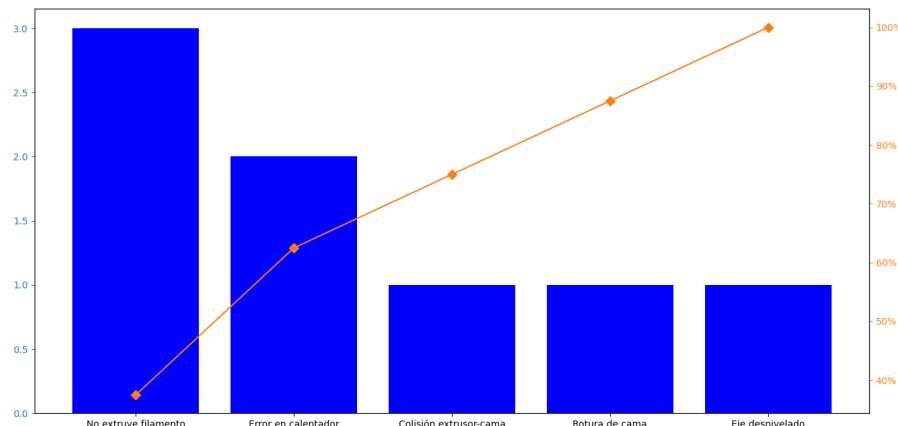


FIGURA 4.3: Diagrama de Pareto para impresora Prusa MK3.

Se puede observar que, para todas las impresoras estudiadas, la mayor cantidad de fallos que se han debido reparar consiste en la inexistencia de extrusión de filamento. Este suceso suele ocurrir luego de cambios de material o la limpieza incorrecta del conjunto extrusor luego de ciertas horas de impresión. Como muestra la figura 4.1, la impresora X350 ha presentado defectos por paradas catastróficas que no permiten una puesta en marcha inmediata, como la rotura de componentes en la cama caliente y desconexiones de la pantalla LCD por el movimiento del cabezal de extrusión. Por otra parte, la máquina X400 presenta como segunda falla la mala adhesión a la cama. Esto sucede tanto por configuraciones erróneas del proceso, como incompatibilidad del material de impresión con la superficie de la cama caliente. Asimismo, la figura 4.2 da a entender que existen registros de fallas catastróficas como la rotura de la cama que tienen un efecto sobre la producción, no obstante, la frecuencia de este suceso es mínima. En relación a la impresora MK3 (ver figura 4.3, las fallas aparecidas no afectan en mayor medida la puesta en marcha inmediata, salvo un evento en específico de rotura de la cubierta PEI por una incorrecta nivelación

de la cama. De estos resultados, se obtiene que el énfasis de las tareas de mantenimiento se deben enfocar en el correcto funcionamiento del conjunto de extrusión, el monitoreo de la condición de la cama caliente y nivelación de ejes para la prevención de colisiones.

Análisis de criticidad

Para determinar la máquina de impresión 3D más crítica, se debe efectuar un análisis de criticidad a los equipos del taller. Debido a que la empresa no ha registrado periódicamente las fallas ocurridas y las acciones de mantenimiento realizadas, el análisis se basará en establecer cual sería la condición más favorable, así como la condición menos favorable de cada uno de los criterios a evaluar, según apreciaciones generales e información obtenida en los últimos seis meses. Para esto, los aspectos a evaluar son:

- Impacto a la seguridad
- Costo de reparación
- Frecuencia de las fallas
- Costo operacional

Las tablas de ponderaciones para cada uno de estos son las siguientes:

Frecuencia de las fallas	Ponderación
mayor que 13 /semestre	5
12-9/semestre	4
8-5/semestre	3
4-1/semestre	2
0 /al semestre	1

TABLA 4.4: Ponderaciones para el ítem de frecuencia de fallas

Costo de reparación	Ponderación
mayor a \$80.000	10
\$60.000 - \$79.000	8
\$40.000 - \$59.000	6
\$20.000 - \$39.000	4
Menor a \$20.000	2

TABLA 4.5: Ponderaciones para el ítem de costo de reparación

Impacto a la seguridad	Ponderación
Muy grave	10
Grave	8
Severo	6
Moderado	4
Bajo	2

TABLA 4.6: Ponderaciones para el ítem de Impacto a la seguridad

Impacto Operacional	Ponderación
Para la operación	15
80 % de parada	12
60 % de parada	9
40 % de parada	6
20 % de parada	3

TABLA 4.7: Ponderaciones para el ítem de impacto operacional

Los resultados del análisis de criticidad para elegir el activo más crítico se muestran en la siguiente tabla:

Ítem	Activo	Frecuencia de fallas	Seguridad	Operacional	Reparación	Total Consec.	Critic. Total
1	Impresora PRUSA MK3	1	2	9	8	19	19
2	Impresora ENDER 3	1	2	6	4	12	12
3	Impresora X350 G. RepRap	3	4	12	8	24	72
4	Impresora X400 G. RepRap	2	4	12	8	24	48

TABLA 4.8: Análisis de criticidad para determinar el activo más crítico.

El puntaje final se obtiene multiplicando el valor obtenido de las frecuencias por la sumatoria total de las consecuencias para cada Activo. De este análisis se desprende que la impresora *X350 German RepRap* es el equipo con mayor criticidad en función de las variables estudiadas, en el periodo comprendido entre mayo y octubre de 2020.

4.3.2 Descripción del equipo

La máquina modelo X350 de la fundación GermanRepRap es una impresora 3D de código abierto, dirigida tanto a consumidores en general como a usuarios industriales. Posee un cabezal de doble extrusión, superficie de construcción rectangular descendente con respecto al eje-z y climatizada. El volumen total de la máquina es de 600x444x517 mm y el volumen de construcción comprende los 350x200x210 mm.

A continuación, se resumen los datos técnicos generales de la máquina:

Materiales	ABS, PLA, PS, PP, PVA
Dimensiones	600x444x517 mm
Volumen de impresión	350x200x210 mm
Voltaje de Operación	110/230 V
Consumo	250 W
Configuración	Unidad prefabricada/Lista para imprimir
Tecnología	FDM
Grosor de capa	0,02 mm
Velocidad de impresión	10-150 mm/s
Velocidad de viaje	10-300 mm/s
Cama de impresión	T° max 120°C
Conexión a red	WLAN/Ethernet
Peso	29 Kg
Boquilla	0,4 mm

TABLA 4.9: Ficha Técnica de la máquina X350 German RepRap [50].



TABLA 4.10: Impresora X350 desde izquierda a derecha, arriba a abajo: (a) frente; (b) inferior; (c) lateral; (d) superior; (e) trasera; (f) primer plano extrusor.

Los componentes principales del equipo son:

- Paneles de chapa metálica: cubierta lateral plegada, que sirve como estructura y bancada de la máquina. Contempla el volumen completo de la impresora, y sirve como barrera térmica para el volumen de fabricación.
- Paneles de metacrilato: cubierta superior y barrera frontal de la máquina. Sirve como barrera térmica y está unida a la estructura de chapa metálica por medio de bisagras.

- Varillas lisas: varillas de acero rectificadas de diámetro 8 mm, cuya función es servir de guía para los ejes del plano x-y. Las varillas del eje-x están unidas a dos carros laterales; las varillas del eje-y están unidas a la estructura de panel de chapa metálica, y soportan los carros del eje-x.
- Rodamientos lineales: elementos de rodadura para el movimiento en el plano x-y. Están unidas, tanto a los carros del eje-y como al cabezal de impresión en el eje-x.
- Husillos: barra roscada de diámetro 8 mm y paso 2 mm que sirve como elemento de transmisión de movimiento desde los motores paso a paso a la cama caliente en el eje-z.
- Motores Paso a Paso: dispositivo electromecánico que transforma los pulsos eléctricos a movimiento angular. Los motores paso a paso que componen la impresora son del tipo NEMA 17, con una corriente máxima de 1.5 A. Existe uno para generar el movimiento de cada eje.
- Finales de carrera: dispositivo electrónico que funciona como interruptor del movimiento de los ejes, y limita el recorrido de los ejes x-y-z. Además, la interrupción del movimiento de todos los ejes coincide con el origen de la máquina.
- Correas GT2: elemento de transmisión de movimiento desde los motores paso a paso a los ejes x-y. La transformación de movimiento angular a lineal se realiza en las poleas dentadas unidas al motor.
- Cama caliente: superficie de impresión de la impresora 3D compuesta por una resistencia que abarca toda el área.

- Termistor: componente electrónico resistivo de 100K, que funciona como sensor de temperatura de extrusor y cama caliente.
- Extrusor E3D: componente mecánico de empuje de filamento. Está compuesto por piezas que ejercen presión al filamento contra la rueda del motor de extrusión.
- Difusor: Componente metálico cilíndrico construido con un número específico de aletas, que sirve como disipador térmico del conjunto extrusor.
- Ventilador de difusor: pequeña turbomáquina que produce un flujo de aire constante contra el difusor, para enfriar de forma eficiente el conjunto extrusor.
- Ventilador de capa: pequeña turbomáquina que produce un flujo de aire contra la capa en construcción, con el fin de solidificar el plástico apenas es extruido por la boquilla.
- Garganta: Conducto metálico con hilos en su exterior. Está unido tanto al difusor como al bloque calentador y sirve como conducto para el paso del filamento hasta la zona de calentamiento.
- Calentador: resistencia de material cerámico de alta potencia, que sirve como elemento calentador para fundir el filamento.
- Bloque calentador: Bloque metálico que sirve como elemento térmico y de unión entre garganta y boquilla.
- Boquilla: elemento fabricado en latón o acero con un diámetro de salida menor al de entrada. Es la pieza final del conjunto extrusor y entrega un flujo constante de plástico para la fabricación de la pieza.

- Placa electrónica: Placa de circuito impreso compuesta por un microcontrolador re-programable y pines de entrada y salida. Este elemento controla la impresora en su conjunto y establece la comunicación entre el microcontrolador, los sensores y actuadores.
- Interfaz LCD: dispositivo electrónico que muestra información relevante de la impresora en forma gráfica y sirve como elemento de interacción entre el operador y la máquina. Cuenta con una conexión para tarjetas SD, una pantalla LCD y un potenciómetro para controlar la impresora 3D.
- Fuente de alimentación: fuente conmutada que transforma la energía eléctrica de corriente continua a alterna. Alimenta la placa electrónica, los dispositivos electromecánicos y resistivos de la máquina.

La tabla de componentes para la impresora X350 resulta de la siguiente forma:

ITEM	COMPONENTE	CANTIDAD
1	PLACA CONTROLADORA GREPRAP	1
2	PANTALLA LCD CON LECTOR PER. SD	1
3	DRIVERS A4988	4
4	DISIPADOR DE CALOR PARA DRIVER	4
5	FUENTE DE PODER S-360-24	1
6	FUSIBLE 15A 250V 32mm	1
7	CABLE 2,5MM NEGRO	1
8	CABLE 2,5MM ROJO	1
9	CABLE 1MM NEGRO	3
10	CABLE 1MM ROJO	3
11	CABLES CONECTOR NEMA 17	8
12	CABLES CONECTOR 2PIN 1MM	4
13	CABLES CONECTOR 3 PIN 1MM	3
14	TIRA LED 24V	1
15	FINAL DE CARRERA MECÁNICO	3
16	TERMISTOR 100K	2
17	HEATBLOCK DYZ	1
18	CALENTADOR CAMA 24V	1
19	BOQUILLA DYZ	1
20	ALUCORE	1
21	VENTILADOR 24V 12,5X12,5MM	1
22	VENTILADOR 24V 50X50MM	2
23	NEMA 17	3
24	EXTRUSOR DYZ	1
25	CORREA GT2	3
26	POLEA GT2	4
27	BARRAS LISAS 8MM	6
28	BARRAS ROSCADAS 8MM PASO 2MM	1
29	RODAMIENTOS LINEALES 8MM	8
30	RODAMIENTOS DE BOLA 8MM	2
31	SOPORTES ALUMINIO DE BARRAS	4
32	CUBIERTA CHAPA METÁLICA	1
33	CUBIERTA POLICARBONATO	2

TABLA 4.11: Tabla de componentes para impresora X350.

A continuación, se resumen las recomendaciones de mantenimiento y los problemas frecuentes que el fabricante entrega en su guía para el usuario [50]:

Problema	Solución
El equipo no enciende	Revise la fuente de alimentación
El extrusor no calienta	Revise si la conexión del cable del calentador está bien conectada
la cama no caliente	Revise si la conexión del cable de la cama está bien conectada
La impresora se detiene en medio del proceso	Revise los siguientes ítem: Fuente de poder, tarjeta SD, Gcode inválido
No hay material saliendo de la boquilla, o el flujo es inconsistente	Rectifique la presión de contacto en el extrusor, limpie la boquilla, revise la alimentación de filamento
el objeto en impresión se despega de la cama	Limpie la superficie de construcción. Si es necesario, lubrique la cama con acetona. Verifique la distancia entre la boquilla y la superficie.

TABLA 4.12: Tabla de problemas frecuentes entregados por el fabricante.

4.3.3 Contexto Operacional

El activo en cuestión realiza sus operaciones en el Taller de Impresión 3Dlux, ubicado en la calle Puma 1180, comuna de Recoleta. Durante los dos años previos a 2020, la máquina operaba junto a otras ocho máquinas impresoras 3D FDM de tipología cartesiana y diversos volúmenes de impresión. Debido al contexto de emergencia sanitaria, se determinó que existirían dos lugares para la producción, reduciendo la cantidad de máquinas en el taller a cuatro. La capacidad de producción de las máquinas se encuentra entre 50 y 80 gramos por hora, dependiendo del material utilizado y otras variables asociadas al proceso de impresión. El recinto es de 55,44 metros cuadrados (6,6x8,8m), el piso es de carpeta de hormigón y el encielado con aislante térmico de fibra sintética.

Cuenta con aislación térmica del exterior a través de muros de albañilería y termopaneles. Asimismo, presenta control de temperatura ambiente a través de una bomba de calor situada a un costado de la entrada al taller. Las máquinas de impresión 3D están situadas en una repisa con base metálica y cubierta de madera contrachapada. La alimentación eléctrica disponible consta de salidas a 220V AC.

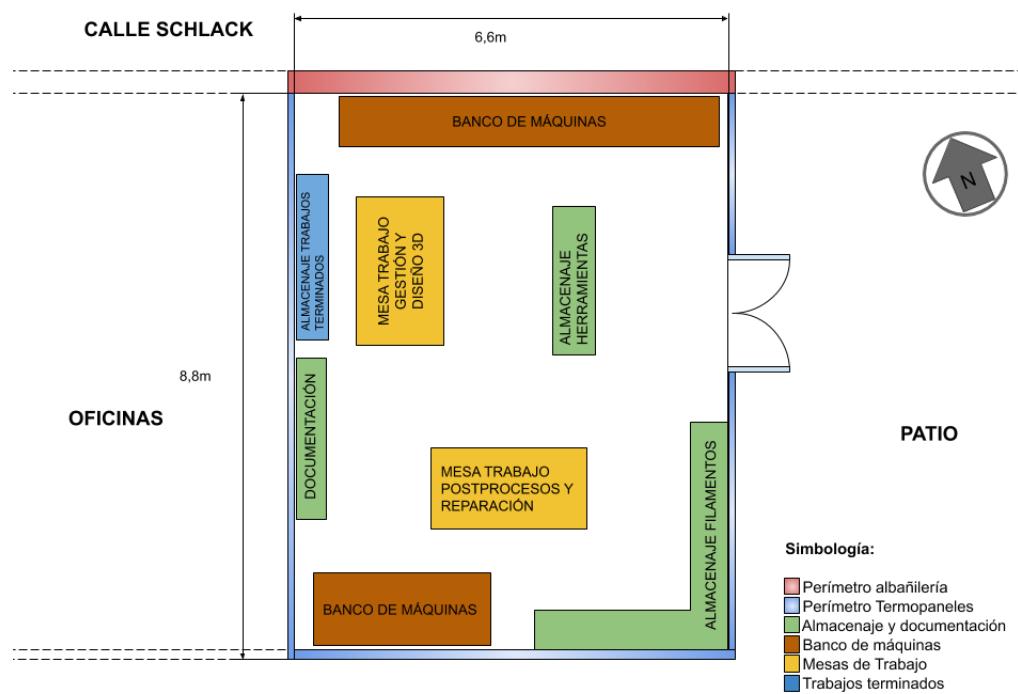


FIGURA 4.4: Layout y simbología del taller de impresión 3D.

4.3.4 Delimitación de funciones

Diagrama de Interrelaciones Funcionales

Según [49], un Diagrama de Interrelaciones Funcionales permite identificar las conexiones lógicas y secuenciales en un producto. En este caso, el diagrama se utiliza para expresar de forma gráfica el funcionamiento de una impresora 3D comprendida como un sistema. Así, se permite representar gráficamente el flujo de variables entre los diversos procesos de un sistema, así también sus entradas y salidas. En el diagrama mostrado a continuación, se representan las interacciones internas y externas en el sistema comprendido por la máquina, y los subsistemas de alimentación, control, construcción, movimiento y extrusión. Asimismo, se observa que si una de las interacciones se ve interrumpida, quiere decir que existe algún tipo de falla en la impresora, y su efecto puede propagarse en la medida que afecte a alguno de los componentes funcionales.

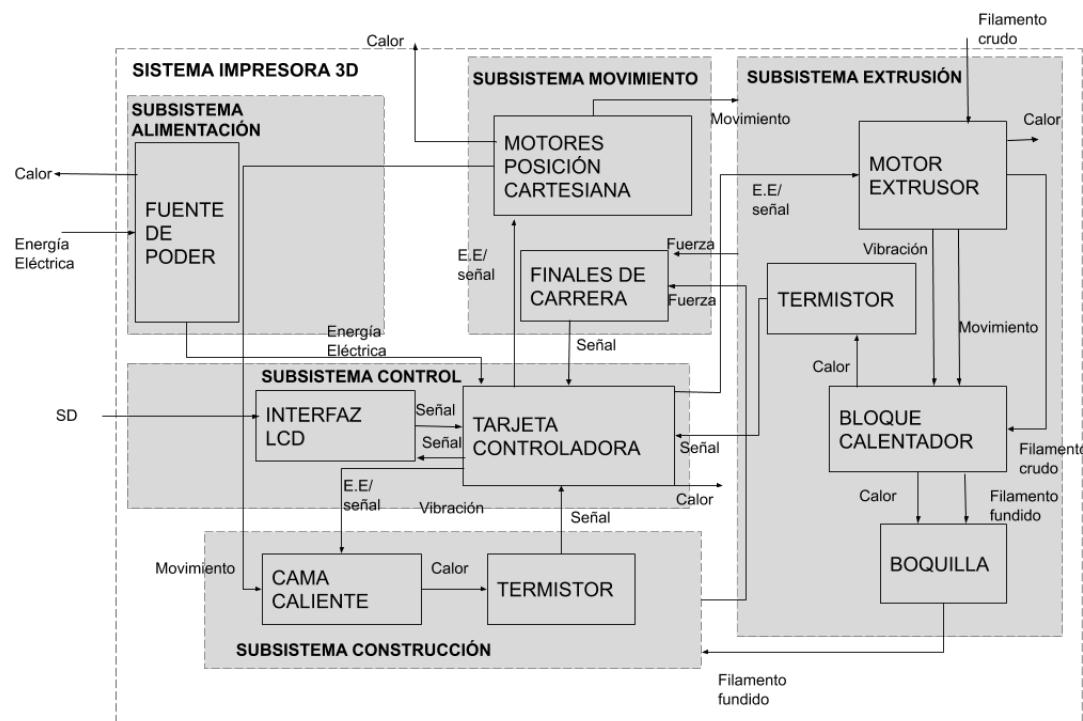


FIGURA 4.5: Diagrama funcional de bloques para la máquina de impresión 3D.

4.3.5 Determinación de fallas

Árbol de Fallas

Según [51], el método de árbol de fallos o FTA por sus siglas en inglés *Fault Tree Analysis* se trata de un método deductivo de análisis que parte de la previa selección de un suceso no deseado o evento que se pretende evitar. Seguidamente, de manera sistemática y lógica se presentan las combinaciones de las situaciones que pueden dar a lugar a la producción del evento a evitar. Se deben conformar niveles sucesivos de tal manera que cada suceso esté generado

a partir de sucesos del nivel inferior siendo el nexo de unión entre los niveles la existencia de operadores o puertas lógicas [51]. En la siguiente tabla se muestran los símbolos que se utilizan en el árbol de falla.

Símbolo	Significado
	Suceso básico. No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	Suceso no desarrollado. No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por su poco interés.
	Resultante de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas. Asimismo, se representa en un rectángulo el proceso no deseado del que parte todo el árbol.
	El suceso de salida ocurrirá si ocurren todos los sucesos de entrada.
	El suceso de salida ocurrirá si ocurren uno o más de los sucesos de entrada
	Indica que el árbol continúa en otro lugar.

TABLA 4.13: Símbolos y significados del árbol de fallas [51]

Según [51], los pasos para la resolución de árboles de fallo son los siguientes:

1. Identificar todas las puertas lógicas y sucesos básicos
2. Resolución de todas las puertas en sus sucesos básicos
3. Eliminación de los sucesos repetidos en los conjuntos de fallos.
4. Eliminación de los conjuntos de fallo que contengan a su vez conjuntos de fallo más pequeños.

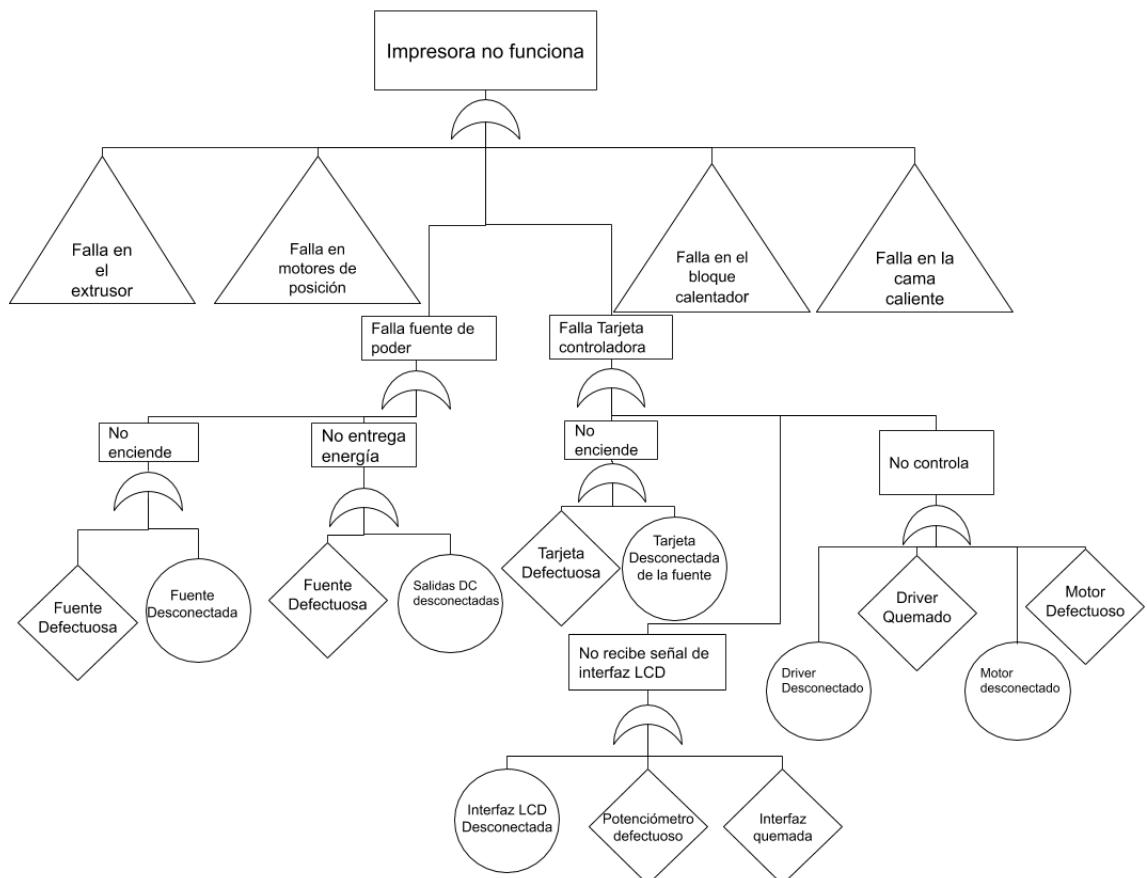


FIGURA 4.6: Árbol de fallas de impresora 3D.

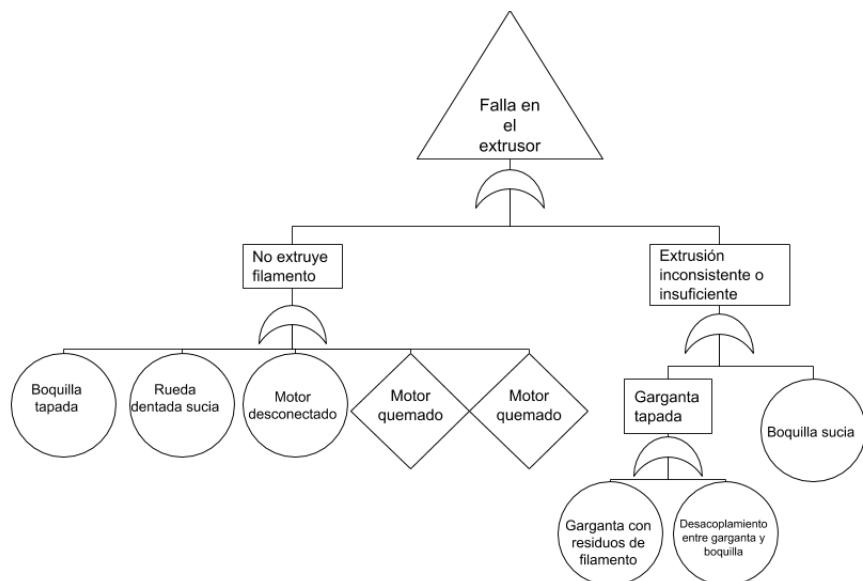


FIGURA 4.7: Continuación del árbol de fallas de impresora 3D.

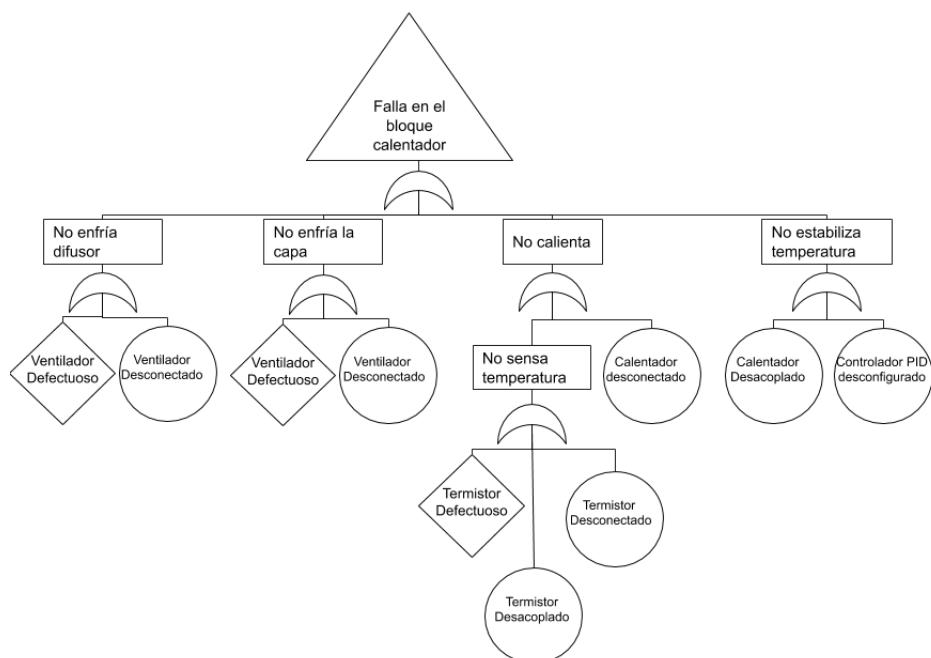


FIGURA 4.8: Continuación del árbol de fallas de impresora 3D.

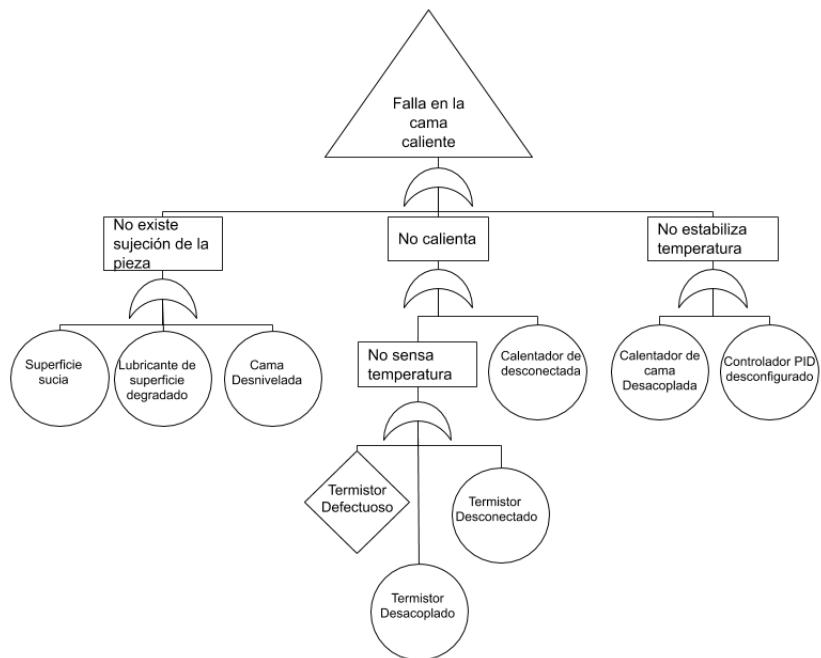


FIGURA 4.9: Continuación del árbol de fallas de impresora 3D.

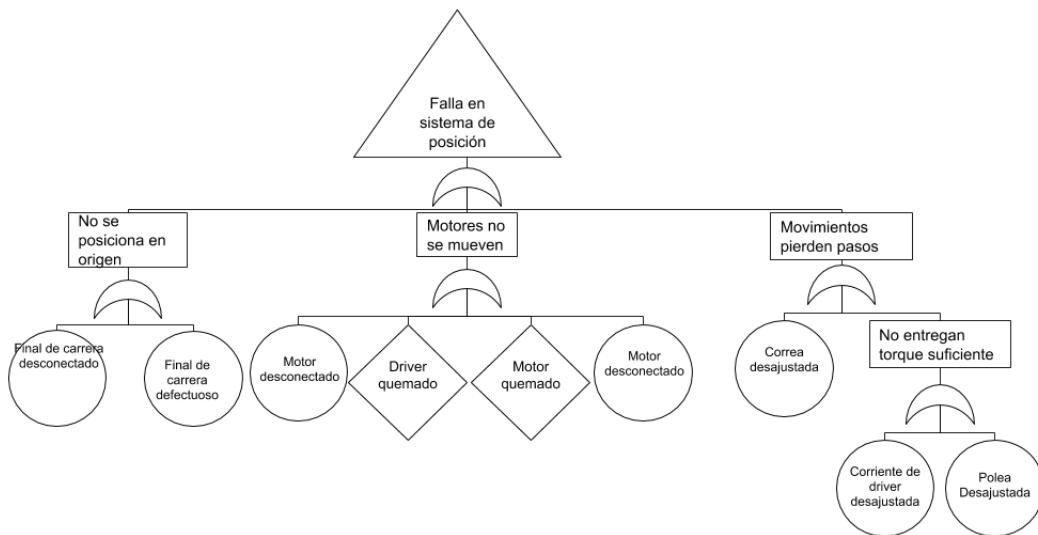


FIGURA 4.10: Árbol de fallas de impresora 3D.

4.3.6 Análisis de Modos y Efectos de Falla

Estructura del Análisis

Según la norma SAE JA-1012, un análisis de modos y efectos de fallas puede ayudar a documentar las funciones de un activo, su falla funcional, modos de falla, y los efectos que ésta puede producir. Según [52], La descripción debe ser suficientemente detallada de modo que posibilite la selección de una política de manejo de fallas adecuada, pero no tan detallada que tome demasiado tiempo realizar el proceso de análisis. Asimismo, los verbos utilizados para describir los modos de falla se deben seleccionar cuidadosamente, ya que tienen una gran influencia en el proceso de selección de las políticas de manejo de fallas. La estructura propuesta para el análisis se muestra a continuación:

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	ACTIVO		ACTIVO N°	
	SUBSISTEMA	SUBSISTEMA N°	MODOS DE FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS
COMPONENTE	FUNCTIONAL	FALLA FUNCIONAL		

TABLA 4.14: Estructura propuesta para hoja de Información RCM.

Estructura Diagrama de decisión

Si bien la norma SAE JA1012 entrega diagramas tipo para la elaboración del diagrama de decisión RCM, deja de manifiesto que existen diferencias entre los distintos tipos de diagramas utilizados en el mundo, llegando a siquiera cumplir con la normativa SAE JA1011 en algunos casos. Es por esto que, para la realización de esta herramienta, se realiza una búsqueda con el fin

de encontrar un algoritmo de decisión afín al tipo de mantenimiento que se busca hacer en este caso. En todo caso, según [52], las fases de aplicación de este diagrama se conforma típicamente por tres fases:

1. Trabajando desde el principio, utilice el diagrama de decisión para determinar las categorías de consecuencias que aplica al modo de falla en consideración.
2. Luego trabajando con la columna de consecuencias relevantes, utilice el criterio de factibilidad técnica de las posibles políticas de manejo de fallas en cada categoría.
3. Seleccione una política de manejo de fallas desde la primera categoría que satisfaga el criterio de factibilidad técnica y que tratará con las consecuencias del modo de falla en consideración.

El diagrama de decisión utilizado en este caso, se muestra a continuación:

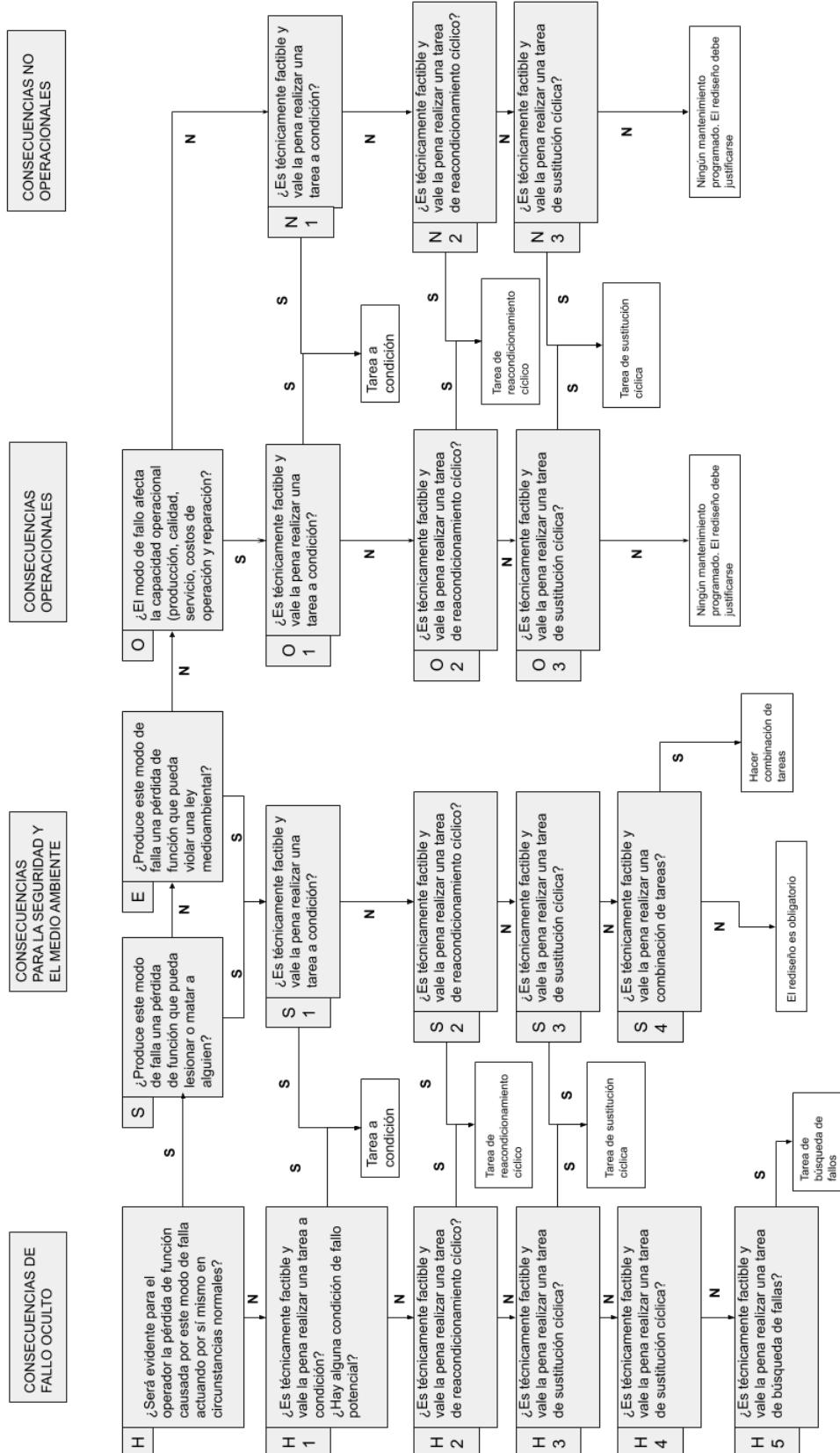


FIGURA 4.11: Diagrama de decisión para impresora 3D.

Por otra parte, la estructura para la hoja de decisión RCM es la siguiente:

HOJA DE DECISIÓN RCM		SISTEMA/ACTIVO			ACTIVO N°		
		SUBSISTEMA			SUBSISTEMA N°		
Referencia de Información	Evaluación de consecuencias	H1 S1 O1	H2 S2 O2	H3 S3 O3	Tareas a falta de	Tareas Propuestas	Frecuencia Inicial
F FF MF	H S E O	N1	N2	N3	H4 H5 S4		A realizar por

TABLA 4.15: Estructura propuesta para hoja de Decisión RCM.

Resultados

A continuación, se muestran las hojas de información RCM obtenidos para los subsistemas comprendidos en la figura 4.5.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO		ACTIVO N° 1	
	SUBSISTEMA EXTRUSIÓN		SISTEMA N° 1	
COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS
1. Calentador	1. Calentar bloque a una temperatura entre 180 °C y 250°C	1. No calienta el bloque a una temperatura entre 180°C y 250°C	1. Desacople del calentador debido a apriete insuficiente del perno prisionero	El termistor no sensará la temperatura del bloque, por lo que existe riesgo de sobrecalentamiento o inutilización de tarjeta por sobrecarga de energía. Puede generar quemaduras graves en el operario, además de roturas catastróficas en piezas del extrusor y cortes de cables. Se debe desenergizar la máquina y acoplar el calentador ajustando el perno prisionero.
			2. Calentador desconectado de la tarjeta controladora	La pantalla interfaz LCD mostrará la leyenda "DEC" en el indicador de temperatura del calentador, y no realizará movimientos ni variaciones en la temperatura. La máquina no imprimirá, ni realizará acciones relacionadas al motor extrusor. Se debe desenergizar la máquina y conectar nuevamente el calentador en los pines necesarios, verificando que los terminales no estén en contacto.
			3. Corte de cable de calentador debido a contaminación por plástico fundido.	La máquina realizará los movimientos pero no extruirá material. Puede generar atascos en el sistema de extrusión. Se debe desenergizar la máquina y verificar continuidad en el elemento con un multímetro. Si el corte se encuentra en una zona relativamente distante del elemento calentador (mayor a 20mm) el cable puede ser soldado y recubierto con fundas termoreträctiles. En caso contrario, reemplazar el elemento, verificando que el calentador corresponda al voltaje correspondiente de la fuente de poder (24V).
			4. flujo de aire de ventilador de capa apuntando al termistor	El termistor sensará una temperatura menor a la configurada y no logrará llegar a la temperatura objetivo. Puede no comenzar el proceso de impresión, generar distorsión en la extrusión de material, atascos en el sistema de enfriamiento. Se debe corregir la altura del conjunto garganta-bloque-boquilla con respecto al difusor. Si esto no es suficiente, es necesario rediseñar la pieza soporte del ventilador
			5. control PID desajustado	La temperatura objetivo no se encontrará estable, variando en intervalos cíclicos mayores a 3°C. Puede producir distorsión en la adhesión de capas y terminación superficial. Se deben corregir empíricamente los valores kd , kp , y ki en la memoria EEPROM de la máquina.

FIGURA 4.12: Hoja de información RCM para subsistema de extrusión de impresora X350.

			1. Termistor desconectado de la tarjeta controladora	La pantalla interfaz LCD mostrará la leyenda "DEC" en el indicador de temperatura de seteo, y no realizará movimientos ni variaciones en la temperatura. La máquina no imprimirá, ni realizará acciones relacionadas al motor extrusor. Se debe desenergizar la máquina y conectar nuevamente el calentador en los pines necesarios, verificando que los terminales no estén en contacto.
2. Termistor	1. sensar temperatura del bloque calentador	1. No sensa temperatura del bloque calentador	2. termistor cortado debido a contaminación con plástico fundido	La máquina realizará los movimientos y extruirá material, pero no sensará la temperatura. Puede generar distorsión en la extrusión de material y atascos en el sistema de extrusión por degradación de filamento. Se debe desenergizar la máquina y verificar continuidad en el elemento con un multímetro. Si el corte se encuentra en una zona relativamente distante del termistor (mayor a 20mm) el cable puede ser soldado y recubierto con fundas termoreträctiles. En caso contrario, reemplazar el elemento.
3. Ventilador de capa	1. Entregar flujo continuo de aire a la superficie en construcción con velocidad máxima 5000rpm.	1. No entrega flujo continuo de aire a la superficie en construcción con velocidad máxima de 5000rpm	1. cable de ventilador cortado o desconectado de la tarjeta controladora 2. Ventilador limita su velocidad debido a la suciedad	Se realizará la fabricación de la pieza, pero con el ventilador inactivo. En materiales que necesiten ventilación, presentará distorsiones de forma y en la unión de las capas. Se debe desenergizar la máquina y conectar el ventilador en la tarjeta controladora. Se realizará la fabricación de la pieza, pero con el ventilador inactivo o funcionando a menores revoluciones por minuto. En materiales que necesiten ventilación, presentará distorsiones de forma y en la unión de las capas. Se debe desenergizar la máquina y limpiar el ventilador con alcohol isopropílico.
4. Ventilador difusor	1. Entregar flujo continuo y constante de aire al difusor con velocidad 5000rpm	1. No entrega flujo continuo y constante de aire a la superficie en construcción con velocidad de 5000rpm	1. cable de ventilador cortado o desconectado de la tarjeta controladora 2. Ventilador limita su velocidad debido a la suciedad	Se realizará la fabricación de la pieza, pero con el ventilador inactivo. Existirá sobrecalentamiento en el conjunto difusor, pudiendo transferir calor al resto de los componentes fundiéndolos en el caso de ser plásticos. Se debe desenergizar la máquina y verificar continuidad en el elemento con un multímetro. Si el corte se encuentra en una zona relativamente distante de los conectores (mayor a 20mm) el cable puede ser soldado y recubierto con fundas termoreträctiles. En caso contrario, reemplazar el elemento. Se realizará la fabricación de la pieza, pero con el ventilador inactivo o funcionando a menores revoluciones por minuto. Puede existir sobrecalentamiento en el conjunto difusor, pudiendo transferir calor al resto de los componentes fundiéndolos en el caso de ser plásticos. Se debe desenergizar la máquina y limpiar el ventilador con alcohol isopropílico.

FIGURA 4.13: Continuación de hoja de información RCM para subsistema de extrusión de impresora X350.

5. Motor Extrusor	1. Entregar par motor de 56 N/cm para desplazar filamento desde la bobina al bloque calentador	1. No entrega par motor de 56 N/cm para desplazar filamento desde la bobina al bloque	Alzas de corriente o cortes de energía repentinos pueden quemar el motor.	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, pero no se extruirá filamento. Existe peligro de sobrecalentamiento en la tarjeta controladora. Se debe desenergizar la máquina, conectar el driver y medir voltaje de salida a las bobinas de los motores. En caso de que no exista diferencia de potencial, se debe reemplazar el elemento.
			2. Corriente desajustada en el driver	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, pero la potencia no será suficiente para extraer filamento, produciéndose ataques o saltos de pasos en el motor. Se debe desenergizar la máquina, conectar el driver y medir voltaje entre el potenciómetro y pin GND. el voltaje de referencia a configurar corresponde a $Vref = I_{max} \times (8 \times rs)$.
			3. perno prisionero desajustado o ausente	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, se moverá el motor extrusor pero no se extruirá filamento. Existe peligro de degradación y ataque de filamento en garganta y boquilla. Se debe extraer el filamento, desenergizar la máquina y ajustar el perno prisionero.
			4. Rueda dentada sucia o con restos de plástico	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, se moverá el motor extrusor pero no se extruirá filamento. Existe peligro de degradación y ataque de filamento en garganta y boquilla. Se debe extraer el filamento, desenergizar la máquina y limpiar la rueda dentada.
6. Garganta	1. Guiar filamento desde el motor hasta la boquilla, a través de el difusor	1. No guia filamento desde el motor hasta la boquilla	1. Contaminación por plástico degradado produce taponamientos en la garganta	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, pero no se extruirá filamento. Existe peligro de sobrecalentamiento y saltos de pasos en el motor extrusor. Se debe parar la impresión y hacer limpieza en caliente de la boquilla con herramientas de limpieza de boquilla, o enfriar el sistema y realizar limpieza química.
7. Boquilla	1. Entregar flujo constante y uniforme de filamento fundido a una superficie	1. No entrega flujo constante y uniforme de filamento fundido a la superficie	1. Contaminación por plástico degradado produce boquilla tapada	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, pero no se extruirá filamento. Existe peligro de sobrecalentamiento y saltos de pasos en el motor extrusor. Se debe parar la impresión y hacer limpieza en caliente de la boquilla con herramientas de limpieza de boquilla, o enfriar el sistema y realizar limpieza química.
			2. Boquilla desgastada por el uso	Se observará línea de impresión discontinua y sin uniformidad. Puede ocasionar defectos superficiales en las piezas. Se debe reemplazar el elemento.
			3. Boquilla desacoplada	Se producirán taponamientos en la boquilla, dando lugar a saltos de pasos en el motor extrusor. Se debe desacoplar la boquilla en caliente, limpiar los restos de filamento y volver a acoplar procurando que la boquilla haga contacto con la garganta.

FIGURA 4.14: Continuación de hoja de información RCM para subsistema de extrusión de impresora X350.

HOJA DE DECISIÓN RCM										ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO					ACTIVO N°				
										SUBSISTEMA EXTRUSIÓN					SISTEMA N°				
Referencia de Información					Evaluación de las consecuencias					H1	H2	H3	Tareas a falta de		Tareas propuestas				Frecuencia Inicial
					S1	S2	S3	O1	O2	O3									
C	F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4						
1	1	1	1	N				S							Realizar inspección y verificar que no exista juego en el calentador.		Según condición		
1	1	1	2	N				N	S						Revisar y limpiar gabinete de placa controladora,		Treinta días		
1	1	1	3	N				S							Realizar inspección general y limpiar bloque de extrusión		Según condición		
1	1	1	4	N				N	N	N	N	S			Después de algún cambio de boquilla o limpieza interior de garganta, verificar altura de ventilador calentando el extrusor a 215°C y observando la temperatura objetivo se mantenga, variando la velocidad del ventilador de 0% a 100%.		En cada cambio de boquilla o limpieza de garganta		
1	1	1	5	N				N	N	N	N	S			Calentar el extrusor a 215°C y verificar que la temperatura no supere una variación mayor a $\pm 3^{\circ}\text{C}$. En ese caso, ejecutar comando M501 en la consola de Octoprint y corroborar los valores Kp, Ki y Kd entregados. realizar variaciones controladas de estas constantes para encontrar el valor óptimo. Grabar en la memoria EEPROM con comando M500		En cada cambio de calentador		

FIGURA 4.15: Hoja de decisión RCM para subsistema de extrusión de impresora X350

2	1	1	1	N			N	S						Revisar y limpiar gabinete de placa controladora,	Cada Treinta días
2	1	1	2	N			S							Realizar inspección general y limpiar bloque de extrusión	Según condición
3	1	1	1	N			N	S						Revisar y limpiar gabinete de placa controladora,	Cada Treinta días
3	1	1	2	S	N	N	S	N	S					Revisar y limpiar alcohol isopropílico ventilador de capa y conducto interior. Verificar conexiones y realizar prueba de velocidad desde 0% a 100%.	Cada treinta días
4	1	1	1	N			N	S						Revisar y limpiar gabinete de placa controladora,	Cada Treinta días
4	1	1	2	S	N	N	S	N	S					Revisar y limpiar alcohol isopropílico ventilador de capa y conducto interior. Verificar conexiones y realizar prueba de velocidad desde 0% a 100%.	Cada treinta días
5	1	1	1	N			S							Verificar continuidad entre las bobinas, midiendo con un multímetro en los pines de entrada del motor. Si existe, verificar placa controladora y drivers. En caso contrario, se debe reemplazar el motor.	Después de una sobretensión evidente, corte de luz, o evento a condición
5	1	1	2	N			N	S						Revisar placa controladora y verificar tensión entre potenciómetro de driver y GND se encuentre en 1,7V	Cada 60 días
5	1	1	3	N			S							Soltar correas y verificar que el perno prisionero esté ajustado al eje de motor.	A condición. Antes de cambio de correas
5	1	1	4	S	N	N	S	N	S					Extraer rueda dentada y limpiar con cepillo y disolvente (cloroformo o acetona)	Cada 200 horas de impresión

FIGURA 4.16: Continuación de hoja de decisión RCM para subsistema de extrusión de impresora X350

6	1	1	1	N			S							Caliente el extrusor sobre un 20% de la temperatura configurada para el material y extruir filamento. En caso de proseguir el taponamiento, desarmar bloque extrusor y limpiar con disolvente químico y cepillo de latón.	Semanal
7	1	1	1	N			S							Caliente el extrusor sobre un 20% de la temperatura configurada e inserte aguja limpia por la salida de la boquilla. Inserte el filamento y verifique que el flujo de material es uniforme y vertical	Semanal
7	1	1	2	N			S							Realizar test de linea de capa y cambiar boquilla cuando el flujo no sea constante ni tenga ancho uniforme.	A condición, cada 300 horas de impresión
7	1	1	3	N			S							Revise que el final de la garganta no se encuentre con plástico degradado. Inserte boquilla y verifique el contacto con la garganta	A condición cada cambio de boquilla

FIGURA 4.17: Continuación de hoja de decisión RCM para subsistema de extrusión de impresora X350

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO		ACTIVO N° 1	
	SUBSISTEMA Movimiento		SUBSISTEMA N° 2	
COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS
1. Motores paso a paso	1. Entregar par motor de 56 N/cm para desplazar filamento desde la bobina al bloque calentador	1. No entrega par motor de 56 N/cm para desplazar filamento desde la bobina al bloque	1. Alzas de corriente o cortes de energía repentinos pueden quemar el motor.	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, salvo en la dirección del motor dañado. Existe peligro de sobrecalentamiento en la tarjeta controladora. Se debe desenergizar la máquina, conectar el driver y medir voltaje de salida a las bobinas de los motores. En caso de que no exista diferencia de potencial, se debe reemplazar el elemento.
			2. Corriente desajustada en el driver	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, pero la potencia no será suficiente para mover el carro extrusor, habiendo saltos de pasos en el motor. Se debe desenergizar la máquina, conectar el driver y medir voltaje entre el potenciómetro y pin GND. el voltaje de referencia a configurar corresponde a $V_{ref} = I_{max} \times (8 \times r_s)$.
			3. Cable de conexión está desconectado de la placa o el motor	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, salvo el correspondiente al motor desconectado. Existe peligro acumulación de filamento en el conjunto extrusor.
2.Polea Dentada	1. Transmitir movimiento desde el motor a la correa sin deslizamiento a velocidad lineal máxima de 100 mm/s	1. No transmite movimiento desde el motor a la correa sin deslizamiento a menos de una velocidad lineal de 100mm/s	1. perno prisionero de polea desacoplado o ausente	Se realizarán los movimientos programados para la fabricación de la pieza, se moverá el motor pero no solidariamente con la polea. Puede existir peligro de atrapamiento de dedos. Se debe desenergizar la máquina, destensar la correa y ajustar perno prisionero

FIGURA 4.18: Hoja de información RCM para subsistema de movimiento de impresora X350.

3 Correa dentada	1. Transmitir energía mecánica desde la polea dentada al sistema de extrusión a una velocidad máxima lineal de 100 mm/s	1. No transmite energía mecánica desde la polea dentada al sistema de extrusión a menos de 100 mm/s	1. correa dentada con tensión insuficiente	El conjunto extrusor no realizará movimiento completo de los ejes, presentando saltos de pasos. Existe riesgo de colisión con elementos de la máquina. Se debe desenergizar la impresora y tensar las correas en el conjunto extrusor.
			2. Correa dentada desacoplada de sistema de extrusión	El conjunto extrusor no realizará movimiento en el eje desacoplado. Se debe desenergizar la máquina, acoplar y tensar la correa en el carro extrusor
4. Barra lisa X,Y	1. Permitir el deslizamiento lineal suave del carro extrusor en ambas direcciones	1. No permite el deslizamiento lineal suave del carro extrusor en ambas direcciones	1. No desliza suave por lubricación insuficiente	Los movimientos no serán suaves y los rodamientos pueden dejar surcos y producir desgaste en las varas. Se debe deshabilitar los motores, enfriar el extrusor y lubricar. Existe peligro de atrapamiento y de quemaduras por alta temperatura de cama y extrusor.
			2. rodamientos lineales gastados	Los movimientos no serán suaves y se puede presentar juego entre las barras y el conjunto extrusor. Se deben reemplazar las piezas. Existe peligro de atrapamiento y de quemaduras por alta temperatura en cama y extrusor.
			3. No desliza porque la barra está combada o torcida	El carro extrusor no realizará el movimiento completo en el eje, y se producirán atascos y colisiones entre el carro extrusor y la pieza fabricada. Existe peligro de atascos, degradación del plástico en la pieza fabricada y cortes de cables. Se debe reemplazar la pieza.

FIGURA 4.19: Continuación de hoja de información RCM para subsistema de movimiento de impresora X350.

			1. Final de carrera desconectado o cortado	La máquina no reconocerá el origen y colisionará con el margen del área de impresión. Puede producir roturas en piezas del conjunto extrusor o la bancada. Se debe desenergizar la máquina y conectar el final de carrera.
5. Final de Carrera	1. Detectar la posición de origen del sistema de extrusión	1. No detecta la posición de origen del sistema de extrusión	2. No existe contacto entre carro extrusor y final de carrera	La máquina no reconocerá el origen y colisionará con los elementos o piezas que no permiten que el carro tenga contacto con el final de carrera. Puede producir roturas en piezas del conjunto extrusor o la bancada. Se debe desenergizar la máquina y verificar postura del final de carrera, cuidando que no existan elementos que se interpongan en el contacto. En caso de persistir, se debe rediseñar el soporte de final de carrera para ajustar contacto..
6. Barra roscada Z	1. Transmitir energía mecánica desde el motor hacia el sistema de extrusión en el eje z	1. No transmite energía mecánica desde el motor hacia el sistema de extrusión en el eje z	2. Barra roscada pandeada	la cama caliente no realizará el recorrido completo en el eje Z, y se producirán atascos y colisiones entre el carro extrusor y la pieza fabricada. Existe peligro de atascos, degradación del plástico en la pieza fabricada y cortes de cables. Se debe reemplazar la pieza.

FIGURA 4.20: Continuación de hoja de información RCM para subsistema de movimiento de impresora X350.

HOJA DE DECISIÓN RCM		ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO									ACTIVO N°				
		SUBSISTEMA MOVIMIENTO									SISTEMA N°				
		Referencia de Información			Evaluació n de las consecue ncias			H1	H2	H3	Tareas a falta de		Tareas propuestas	Frecuencia Inicial	
C	F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4		
1	1	1	1	N				S						Verificar continuidad entre las bobinas, midiendo con un multímetro en los pines de entrada del motor. Si existe, verificar placa controladora y drivers. En caso contrario, se debe reemplazar el motor.	Después de una sobretensión evidente, corte de luz, o evento a condición
1	1	1	2	N				N	S					Revisar placa controladora y verificar tensión entre potenciómetro de driver y GND se encuentre en 1,7V	30 días, y luego cada 60 días
1	1	1	3	N				S						Desenergizar la máquina y verificar las conexiones de los cables en el motor y en la placa controladora. Verificar continuidad de los cables	A condición, después de una reparación mayor o de movimientos de la máquina
2	1	1	1	N				N	S					Revisar y ajustar nuevamente en cada cambio o ajuste de correas.	Cada cambio o ajuste de correas
3	1	1	1	S	S			N	S					Revisar tensión de las correas, verificando que esté en contacto directo con la polea dentada.	Cada 300 horas de impresión
3	1	1	2	S	N	N	S	S						Revisar que la correa entre en contacto directo con las correas. Tensar la correa al mismo tiempo que se ajusta el acople. Verificar tensión moviendo el carro extrusor manualmente.	A condición, en cada cambio de correas o desarme del extrusor.

FIGURA 4.21: Hoja de decisión RCM para subsistema de movimiento de impresora X350

4	1	1	1	N			N	S					Limpiar barras con papel absorbente y agregar lubricante en el contacto de las barras con los rodamientos	semanal
4	1	1	2	N			S						Revisar evidencias visuales y sonoras, como marcas en las barras lisas o ruidos al deslizar. Realizar cambio de rodamientos	Anual
4	1	1	3	S	N	N	S	N	N	S			verificar manualmente que el carro extrusor se mantiene nivelado uniformemente con respecto a la plataforma de construcción. Cambiar cuando se observe que la barra no está recta o existe mayor roce en algunas partes del recorrido del carro.	Cada dos años
5	1	1	1	N			S						Desenergizar la máquina y verificar las conexiones de los cables el final de carrera y en la placa controladora. Verificar continuidad de los cables	A condición, después de una reparación mayor o de movimientos de la máquina
5	1	1	2	S	N	N	S	N	N	N		S	Se debe desenergizar la máquina y verificar postura del final de carrera, cuidando que no existan elementos que se interpongan en el contacto. En caso de persistir, se debe rediseñar el soporte de final de carrera para ajustar contacto..	Después de desarme de extrusor, ajuste de final de carrera o desarme de la impresora.
6	1	1	1	N			S						Verificar visualmente la barra en el movimiento de la cama en el eje Z, buscar ruidos o atasco evidente en la trayectoria.	Cada dos años o después de reparación o desarme

FIGURA 4.22: Continuación de hoja de decisión RCM para subsistema de movimiento de impresora X350

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	ACTIVO			ACTIVO N°	
	GERMAN REPRAP X350 PRO			1	
COMPONENTE	SUBSISTEMA CONTROL		SUBSISTEMA N° 3		
	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS	
1. Tarjeta Controladora	1. Controlar elementos térmicos, mecánicos y sensores de la impresora 3D según especificaciones del fabricante	1. No controla los elementos térmicos, mecánicos y sensores de la impresora 3D	1. Tarjeta controladora quemada 2. Firmware corrupto	La fuente de energía encenderá, pero la impresora no estará disponible para realizar acciones de calentamiento de extrusor. Al realizar la acción de calentar, la temperatura no subirá. La impresora encenderá pero tendrá un control limitado o nulo de las acciones de calentamiento.	
2. Pantalla LCD	1. Configurar parámetros de temperatura, flujo y velocidades a través de interfaz LCD	1. No configura parámetros de temperatura, flujo y velocidades a través de interfaz LCD	1. Pantalla desconectada	La impresora encenderá, pero no se podrá ver el estado actual y la pantalla no encenderá	

FIGURA 4.23: Hoja de información RCM para subsistema de control de impresora X350

HOJA DE DECISIÓN RCM										ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO				ACTIVO N° 1			
Referencia de Información										SUBSISTEMA CONTROL				SISTEMA N° 3			
C	F	FF	MF	Evaluación de las consecuencias		H1	H2	H3	S1	S2	S3	Tareas a falta de	Tareas propuestas	Frecuencia Inicial			
				O1	O2	O3											
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	H4	H5	S4		
1	1	1	1	N			S						Verificar que existe energía en los terminales de los elementos térmicos, mecánicos y sensores al momento de ejecutar una acción: por ejemplo, iniciar los calentadores, mover motores. En caso que no exista, cambiar la placa.		Según condición, después de alzas de energía, desconexiones inseguras.		
1	1	1	2	N			S						Ejecutar acciones básicas como imprimir un archivo, o setear temperaturas. En caso que estas no se realicen, reinstalar firmware por cable serial		Según condición, después de alzas de energía, desconexiones inseguras.		
2	1	1	1	N			S						Desenergizar la impresora y verificar conexión de la pantalla LCD, estado de los cables y conexión con la placa.		Según condición, después de ejecutar impresiones de grandes dimensiones, o colisiones evidentes entre el carro extrusor y la pantalla LCD		

FIGURA 4.24: Hoja de decisión RCM para subsistema de control de impresora X350

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO				ACTIVO N° 1			
COMPONENTE		FACCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODOS DE FALLA		EFECTOS DE LAS FALLAS	
1. Fuente de poder		1. Suministrar energía eléctrica 24V DC y 10A a la tarjeta controladora		1. No suministra energía eléctrica 24V DC y 10A a la tarjeta controladora		1. terminales de entrada a 220V desconectada		La impresora no encenderá. Se debe verificar que cada terminal esté conectada a fase, neutro y tierra, según corresponda.	
						2. Terminales de salida de 12V desconectada		La Fuente de poder encenderá, pero no lo hará la impresora. Se debe estar alerta a la polaridad de las conexiones	
						3. Fuente de poder quemada		La impresora no encenderá. No existirá otro efecto aparente, puesto que la fuente de poder se encuentra dentro de un gabinete metálico. Se debe reemplazar	

FIGURA 4.25: Hoja de información RCM para subsistema de alimentación de impresora X350

HOJA DE DECISIÓN RCM										ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO					ACTIVO N° 1				
										SUBSISTEMA ALIMENTACIÓN					SISTEMA N° 3				
Referencia de Información		Evaluación de las consecuencias								H1 H2 H3			Tareas a falta de		Tareas propuestas			Frecuencia Inicial	
		S1	S2	S3	O1	O2	O3												
C	F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4						
1	1	1	1	1	N			S						Desenergizar la impresora y revisar las conexiones de entrada, verificando que los cables de fase, neutro y tierra estén en su posición. Encender y medir voltaje con multímetro.		Según condición, después de alzas de energía, desconexiones inseguras o mantenimiento general			
1	1	1	2	N				S						Desenergizar la impresora y revisar las conexiones de salida, verificando que los cables de polo positivo y negativo. estén en su posición. Encender y medir voltaje con multímetro.		Según condición, después de alzas de energía, desconexiones inseguras o mantenimiento general			
1	1	1	3	N				S						Desenergizar la impresora y verificar señales de falla como olores a componentes quemados o color negro en la placa de la fuente o cubierta metálica. Considerar reparación o cambio de la fuente en caso que no suministre energía.		Según condición, después de alzas de energía, desconexiones inseguras			

FIGURA 4.26: Hoja de decisión RCM para subsistema de alimentación de impresora X350

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO	ACTIVO N° 1		
	SUBSISTEMA CONSTRUCCIÓN	SUBSISTEMA N° 5		
COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS
Cama Caliente	Calentar superficie a una temperatura entre 50 °C y 110°C	No calienta superficie a una temperatura entre 50 °C y 110°C	1. Desacople del calentador debido a desgaste de la fijación a la placa de la cama	El termistor no sensará la temperatura de la cama caliente, por lo que existe riesgo de sobrecalentamiento o inutilización de tarjeta por sobrecarga de energía. Puede generar quemaduras graves en el operario, además de roturas catastróficas en piezas del extrusor y cortes de cables. Se debe desenergizar la máquina y acoplar el calentador ajustando el perno prisionero.
			2. Calentador desconectado de la tarjeta controladora	La pantalla interfaz LCD mostrará la leyenda "DEC" en el indicador de temperatura del calentador de la cama, y no realizará movimientos ni variaciones en la temperatura. La máquina no imprimirá, ni realizará acciones relacionadas al motor extrusor. Se debe desenergizar la máquina y conectar nuevamente el calentador en los pines necesarios, verificando que los terminales no estén en contacto.
			3. Corte de cable de calentador debido a movimientos en el eje z.	La máquina realizará los movimientos pero no extruirá material. Puede generar atascos en el sistema de extrusión. Se debe desenergizar la máquina y verificar continuidad en el elemento con un multímetro. Si el corte se encuentra en una zona relativamente distante del elemento calentador (mayor a 20mm) el cable puede ser soldado y recubierto con fundas termoretráctiles. En caso contrario, reemplazar el elemento, verificando que el calentador corresponda al voltaje correspondiente de la fuente de poder (24V).
			4. control PID desajustado	La temperatura objetivo no se encontrará estable, variando en intervalos cíclicos mayores a 3°C. Puede producir distorsión en la adhesión de la primera capa. Se deben corregir empíricamente los valores kd , kp , y ki en la memoria EEPROM de la máquina.

FIGURA 4.27: Hoja de información RCM para subsistema de construcción de impresora X350

Termistor	sensar temperatura de la cama caliente	No sensa temperatura de la cama caliente	1. Termistor desconectado de la tarjeta controladora	La pantalla interfaz LCD mostrará la leyenda "DEC" en el indicador de temperatura de seteo, y no realizará movimientos ni variaciones en la temperatura. La máquina no imprimirá, ni realizará acciones relacionadas al motor extrusor. Se debe desenergizar la máquina y conectar nuevamente el calentador en los pines necesarios, verificando que los terminales no estén en contacto.
				La máquina realizará los movimientos y extruirá material, pero no sensará la temperatura. Puede generar distorsión en la extrusión de material y atascos en el sistema de extrusión por degradación de filamento. Se debe desenergizar la máquina y verificar continuidad en el elemento con un multímetro. Si el corte se encuentra en una zona relativamente distante del termistor (mayor a 20mm) el cable puede ser soldado y recubierto con fundas termoretráctiles. En caso contrario, reemplazar el elemento.

FIGURA 4.28: Continuación de hoja de información RCM para subsistema de construcción de impresora X350

HOJA DE DECISIÓN RCM				ACTIVO GERMAN REPRAP X350 PRO						ACTIVO N°					
				SUBSISTEMA ALIMENTACIÓN						SISTEMA N°					
Referencia de Información		Evaluación de las consecuencias		H1	H2	H3	S1	S2	S3	Tareas a falta de		Tareas propuestas		Frecuencia Inicial	
				O1	O2	O3									
C	F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4		
1	1	1	1	1	N			S						Desenergizar la impresora y revisar las conexiones de entrada, verificando que los cables de fase, neutro y tierra estén en su posición. Encender y medir voltaje con multímetro.	Según condición, después de alzas de energía, desconexiones inseguras o mantenimiento general
1	1	1	2	N				S						Desenergizar la impresora y revisar las conexiones de salida, verificando que los cables de polo positivo y negativo. estén en su posición. Encender y medir voltaje con multímetro.	Según condición, después de alzas de energía, desconexiones inseguras o mantenimiento general
1	1	1	3	N				S						Desenergizar la impresora y verificar señales de falla como olores a componentes quemados o color negro en la placa de la fuente o cubierta metálica. Considerar reparación o cambio de la fuente en caso que no suministre energía.	Según condición, después de alzas de energía, desconexiones inseguras

FIGURA 4.29: Hoja de decisión RCM para subsistema de construcción de impresora X350

4.3.7 Análisis de confiabilidad método de Weibull

Los datos utilizados para el análisis de Weibull fueron obtenidos a través del levantamiento de información de fallas ocurridas entre el 12 de mayo y el 10 de octubre del año 2020. El registro de fallas consta de la fecha de aparición de la falla, fecha de término del mantenimiento correctivo, descripción de la falla, tiempo aproximado de reparación y descripción de la actividad correctiva. La estimación de los parámetros de forma y escala se realiza según la criticidad obtenida en el análisis realizado anteriormente, y se obtendrán de dos formas con el fin de contrastar los resultados: a través de la realización de un ajuste lineal de los datos recogidos en el levantamiento de información, y por medio de la

librería de python *scipy*. Es importante mencionar que se obvía el análisis de la máquina *Ender 3*, dado que fue adquirida durante el mes de julio y solo presenta dos datos en el registro. La validación del ajuste elegido se realiza a través del test de Shapiro, esto pues, según [53], el test de Shapiro Wilk se considera uno de los más potentes para el contraste de normalidad, especialmente para muestras pequeñas.

Análisis de Weibull para impresora X350

En la figura 4.30 se muestra el ajuste lineal realizado, desde donde se obtiene la ecuación del ajuste y el coeficiente R^2 .

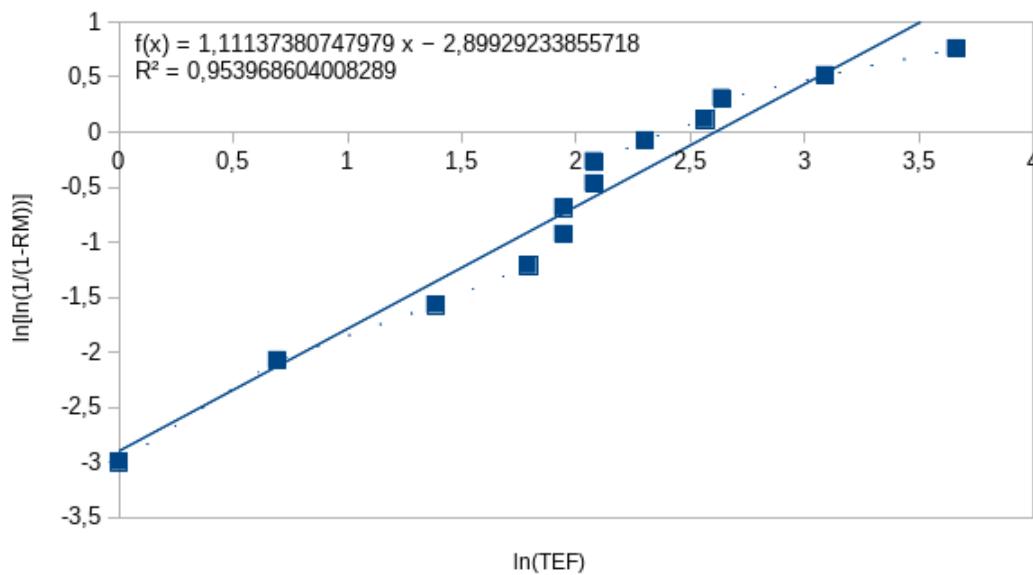


FIGURA 4.30: Gráfica de dispersión con ajuste lineal para máquina X350

De la gráfica anterior, se nota que el coeficiente de correlación R^2 es cercano a 0,95, lo que da como resultado un buen ajuste lineal de la ecuación. Se puede obtener el parámetro de forma β correspondiente a la pendiente del ajuste

lineal obtenido. En la misma línea, el parámetro de escala θ es determinado en función del parámetro de forma y el término libre, según la ecuación:

$$\theta = e^{\left(-\frac{-b}{\beta}\right)} \quad (4.1)$$

En la figura 4.36 se muestran los parámetros de Weibull obtenidos según la regresión lineal de los datos.

β	1,1113738
b	-2,8992923
θ	13,58201254

FIGURA 4.31: Parámetros de Weibull para máquina X350

```
1 | shape: 0.9554383829299531 scale: 13.133371155314343
```

TABLA 4.16: Parámetros de forma y escala obtenidos a través de la librería de python *scipy* para impresora X350.

De la misma forma, la función de confiabilidad se muestra en la figura 4.38.

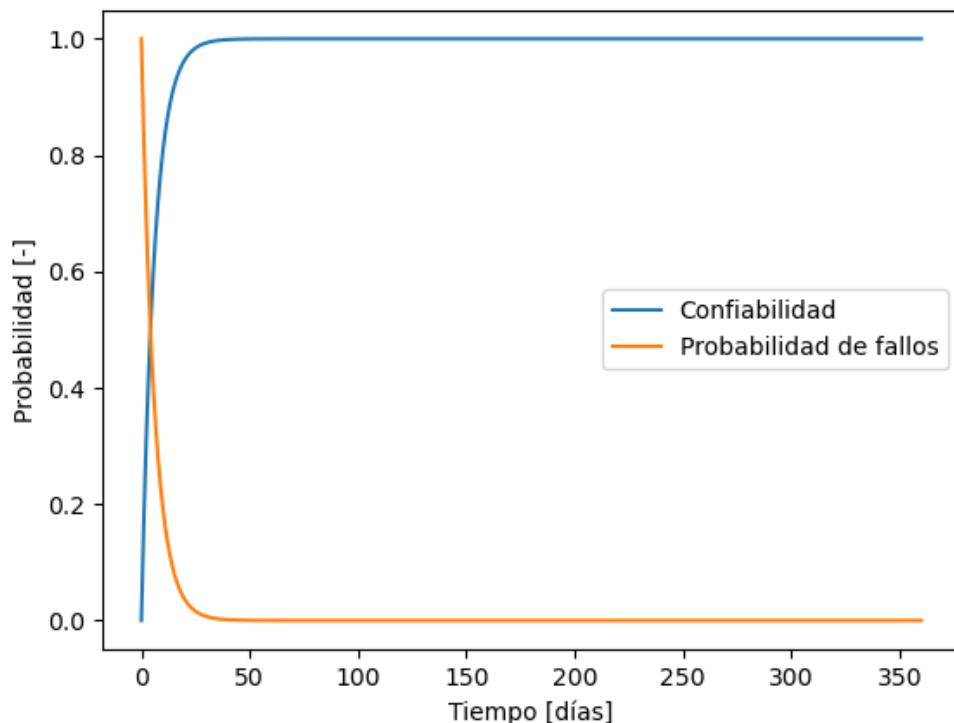


FIGURA 4.32: Gráfico de confiabilidad para máquina X350

La comprobación de la validez de los resultados obtenidos por medio del test de validación de Shapiro se realiza con el método *shapiro* del módulo *stats* de python, obteniendo el siguiente resultado:

```
1 ShapiroResult(statistic=0.9501206874847412, pvalue=0.6913892030715942)
```

TABLA 4.17: Resultados de test de Shapiro para máquina X350.

Como se observa en el resultado 4.17, el valor porcentual es mayor al nivel de significancia para esta prueba (0,05), por tanto los resultados se pueden considerar válidos.

Análisis de Weibull para impresora X400

Siguiendo el mismo procedimiento anterior, el ajuste lineal asociado a los datos obtenidos para la impresora X400 se presentan a continuación:

β	1,35078965
b	-3,98118131
θ	19,05442277

FIGURA 4.33: Parámetros de Weibull para máquina X400

β	1,35078965
b	-3,98118131
θ	19,05442277

FIGURA 4.34: Parámetros de Weibull para máquina X400

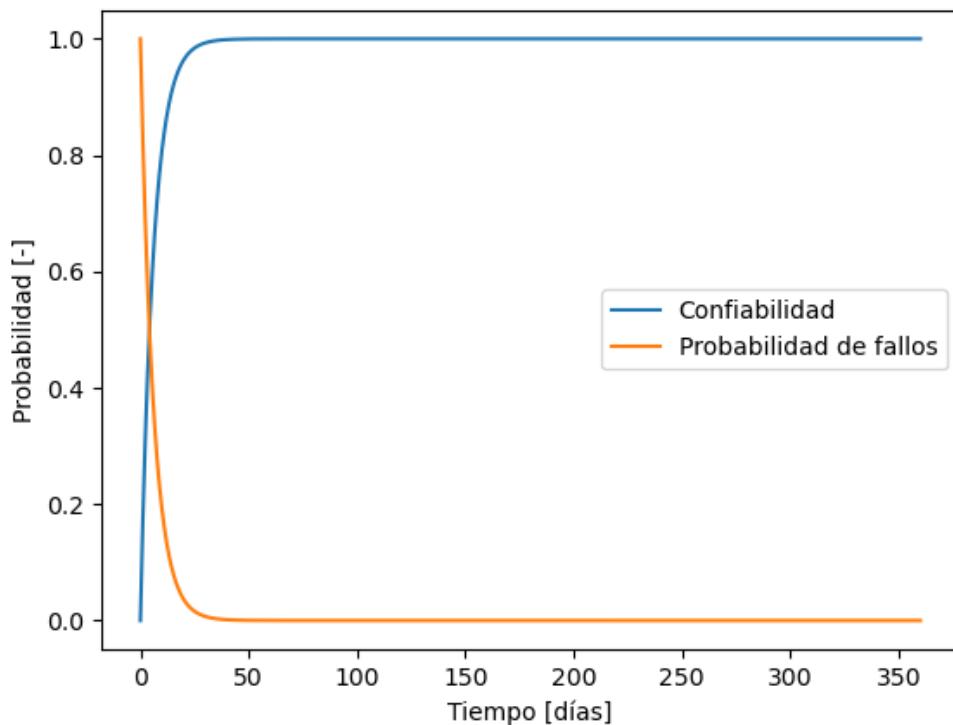


FIGURA 4.35: Gráfico de confiabilidad para máquina X400

```
1 | shape: 1.30316121331562 scale: 20.0898613669566
```

TABLA 4.18: Parámetros de forma y escala obtenidos a través de la librería de python *scipy* para impresora X400.

La comprobación de la validez de los resultados obtenidos por medio del test de validación de Shapiro entrega el siguiente resultado:

```
1 | ShapiroResult(statistic=0.9501206874847412, pvalue=0.6913892030715942)
```

TABLA 4.19: Resultados de test de Shapiro para máquina X400.

Como se observa en el resultado 4.19, el valor porcentual es mayor al

nivel de significancia para esta prueba (0,05), por tanto los resultados se pueden considerar válidos.

Análisis de Weibull para impresora Prusa MK3

β	0,71247367
b	-1,95133953
θ	15,46877319

FIGURA 4.36: Parámetros de Weibull para máquina Prusa MK3

β	0,71247367
b	-1,95133953
θ	15,46877319

FIGURA 4.37: Parámetros de Weibull para máquina Prusa MK3

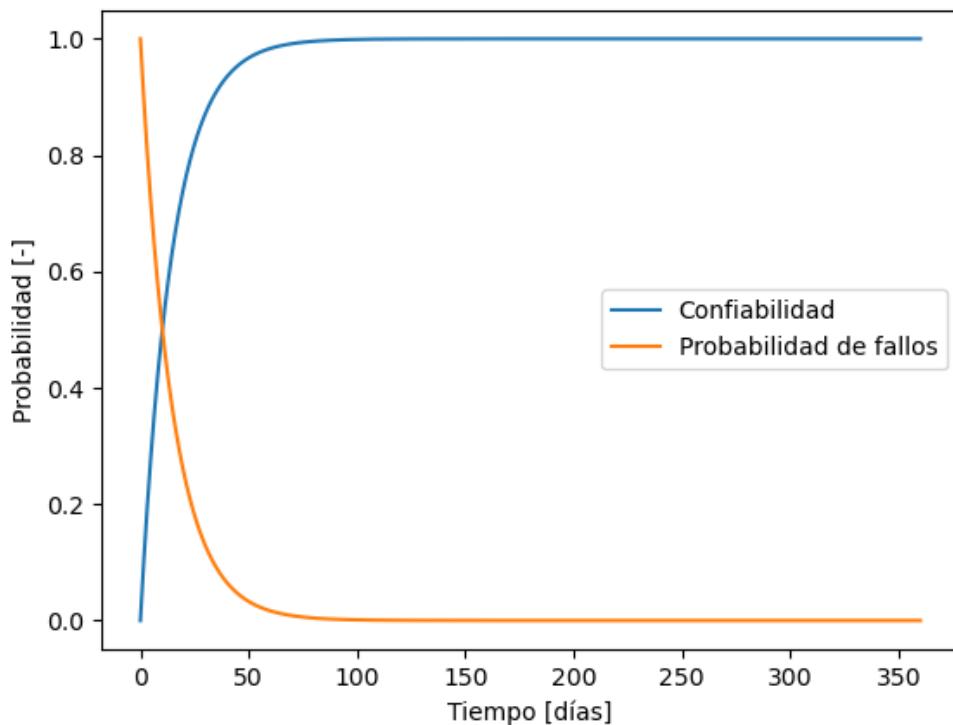


FIGURA 4.38: Gráfico de confiabilidad para máquina Prusa MK3

```
1 | shape: 0.866970622862605 scale: 14.7761423634349
```

TABLA 4.20: Parámetros de forma y escala obtenidos a través de la librería de python *scipy* para impresora Prusa MK3.

La comprobación de la validez de los resultados obtenidos por medio del test de validación de Shapiro entrega el siguiente resultado:

```
1 | ShapiroResult(statistic=0.8503733277320862, pvalue=0.12387081235647202)
```

TABLA 4.21: Resultados de test de Shapiro para máquina Prusa MK3

Como se observa en el resultado 4.19, el valor porcentual es mayor al

nivel de significancia para esta prueba (0,05), por tanto los resultados se pueden considerar válidos.

4.4 PLAN DE MANTENIMIENTO

Una vez terminado el análisis de las máquinas impresoras 3D del taller, se deben determinar los planes y acciones para los mantenimientos. En este sentido, el objeto del desarrollo del proyecto es utilizar las herramientas de software necesarias para gestionar los registros de falla de los equipos.

Mantenimiento diario o proactivo La inspección diaria se debe realizar previo a la utilización de la máquina. Esta contempla las siguientes acciones:

- Revisión de alimentación eléctrica: revisar la conexión de la fuente de alimentación de la máquina.
- Conexión a la aplicación: revisar conexión a internet, y que la máquina esté debidamente conectada al software.
- Sistema mecánico: deshabilitar motores y verificar distancia vertical entre boquilla y cama.
- Sistema térmico: verificar que boquilla y cama estén limpias y sin restos de filamento. Precalentar a la temperatura configurada.
- Sistema de extrusión: extruir filamento y verificar la uniformidad del flujo.

Mantenimiento preventivo El mantenimiento preventivo se configura en intervalos semanales, cada 30 días, y cada 60 días. Asimismo, existen acciones de

mantenimiento que se basan en las horas de impresión de la máquina, entre las 200, 300 y 3200 horas de impresión y Las acciones de mantenimiento según estos intervalos son:

- Limpieza y lubricación de barras lisas y roscadas. (semanal).
- Limpieza de extrusor en caliente (semanal).
- Revisar gabinete de placa controladora (30 días, luego cada 60 días).
- Revisar estado de conexiones en cables de termistor y calentador (30 días)
- Revisar esado de conexiones de cables de motores paso a paso (30 días).
- Recambio de boquilla (300 horas de impresión).
- Revisar y volver a tensar correas (300 horas de impresión).
- Revisión de energía de alimentación de drivers (cada 3200 horas de impresión).

4.5 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DESIGN THINKING PARA EL DESARROLLO DE APLICACIÓN WEB

En esta sección de detallará la implementación, marco de trabajo y aplicación de la metodología de Design thinking que busca obtener mejoras en los procesos de la gestión de la producción y el mantenimiento en impresoras 3D FDM a través del desarrollo y pruebas de una aplicación web. En primer lugar, se define la situación actual de la empresa, y posteriormente se detallan los pasos para la implementación del marco de trabajo propuesto para cada fase de la metodología.

4.5.1 Situación actual

Actualmente, la empresa posee un proceso definido para la recepción, producción y entrega de piezas y productos que involucra tanto al operador, la máquina de impresión y un computador donde se realiza el tratamiento de los archivos. Este proceso a grandes rasgos, consiste en la recepción y evaluación de lo solicitado por el cliente, definir si solo contempla servicios de impresión 3D u otros adicionales (diseño 3D para otros procesos, escáner 3D, post-procesos de piezas, entre otros), ejecución del o los servicios, y confirmación de despacho al cliente.

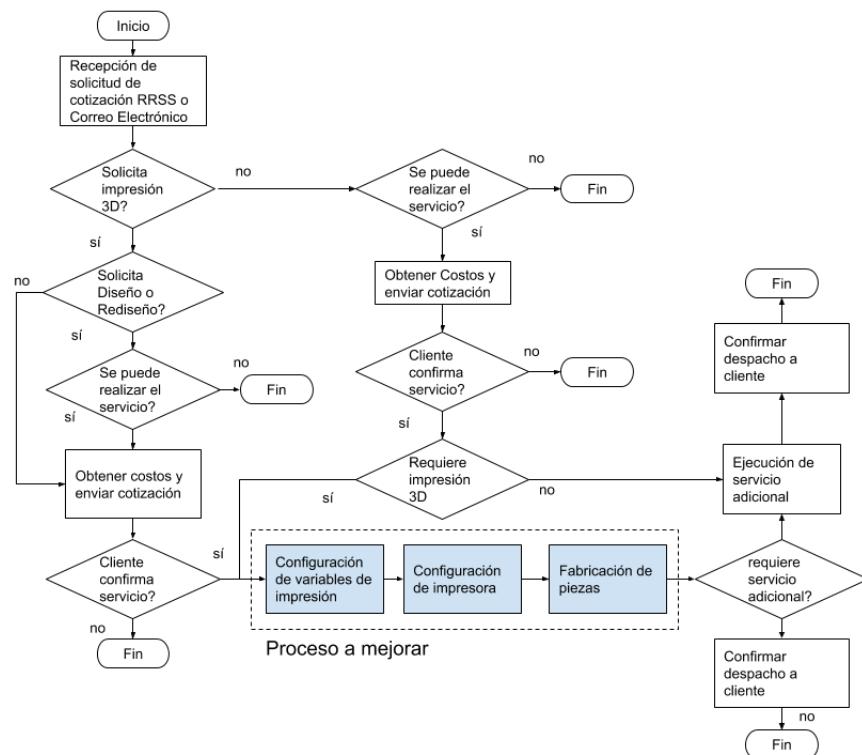


FIGURA 4.39: Diagrama de flujos para el proceso de recepción, producción y entrega de piezas y productos.

Específicamente, el interés de aplicación de la metodología es la

mejora del proceso de la producción y el mantenimiento, por tanto se delimita el marco de trabajo a estos pasos específicos del flujo, tal como se muestra en la figura 4.39. Así, se puede representar según el siguiente orden.

- Exportación de la pieza a lenguaje estándar de triángulos (.stl).
- Configuración de variables de impresión en software CAM.
- Exportación de la pieza en formato .gcode.
- Carga de archivo en la máquina.
- Precalentamiento de la máquina.
- Fabricación de la pieza.
- Extracción de la pieza y post-proceso en caso de ser necesario.

El diagrama de flujo que representa el proceso, decisiones y resultados, se muestra en la figura 4.40

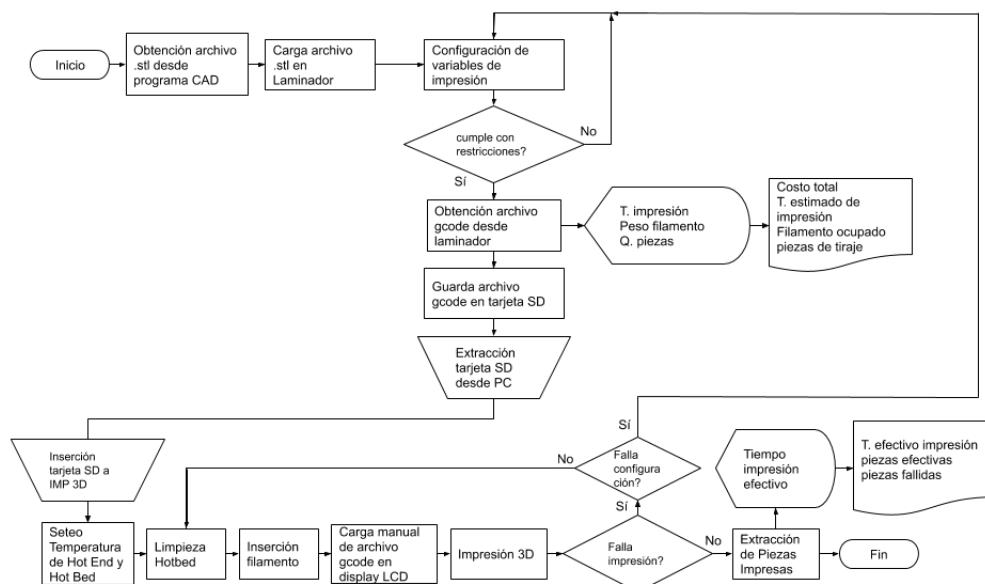


FIGURA 4.40: Diagrama de flujo del proceso de impresión 3D.

Se observa que durante el proceso existen, a lo menos, tres escenarios o lugares para la producción de una pieza. En primer lugar, se nota que todo el tratamiento del archivo se realiza en un solo computador bajo la utilización de dos softwares simultáneos, en este caso, el programa de diseño CAD y el laminador CAM. El laminador, además de convertir el archivo a un formato legible para la máquina, entrega ciertos parámetros que sirven como insumo para estimar los costos de producción, como el peso del filamento utilizado en la fabricación y el tiempo que eventualmente tardaría en terminar la operación. Luego, el archivo en formato Gcode es almacenado en una tarjeta SD y extraído del computador para ser llevado físicamente hasta la máquina de impresión 3D; en este lugar, el operador carga la tarjeta y realiza las tareas previas para la impresión del archivo, ya sea la inspección visual, limpieza del conjunto extrusor y las superficies de construcción, y el precalentamiento de la cama según el material realizado. Finalmente, al término de la operación la interfaz de la impresora muestra el tiempo efectivo de construcción, y comienza a enfriar los elementos térmicos con el fin de facilitar la extracción de la pieza; en este momento, el operador saca las piezas, verifica que cumplan con los requerimientos especificados y desecha los objetos que, producto del proceso, resultaron fallidos o fuera de especificación.

4.5.2 Planificación del marco de trabajo

Para definir el rumbo de planificación del proyecto, se estima conveniente trabajar en seis fases inspiradas en el Design Thinking: empatizar, definir, investigar, idear, prototipar y testear. De esta forma, el marco de trabajo se resume de la siguiente forma:

Etapa	Hito	Características
Empatizar	detectar problemática	Mapa stakeholders, entrevista personal, journey map
Definir	Definición de necesidades del usuario	5W, obtención de <i>insight</i>
Investigar	Conocimiento de referentes y herramientas de desarrollo	Investigación de referentes y herramientas
Idear	Obtener propuestas de desarrollo	lluvia de ideas
Prototipar	Estructurar la información, interfaz de usuario	prototipos estéticos y funcionales
Testear	prueba en entorno de producción	aplicación funcional

TABLA 4.22: Tabla resumen del marco de trabajo y sus características.

4.5.3 Empatizar

La fase de inicio consiste en investigar cómo y por qué los usuarios, en este caso todos las personas involucradas en el proceso de impresión 3D, realizan las acciones que ellos encuentran determinantes en el proceso de impresión. Según la metodología, estos son definidos como *stakeholders*. Este paso es indispensable, pues revela las personalidades, necesidades y patrones de trabajo de los sujetos, y solo así se puede comenzar a esbozar el diseño de un concepto de producto en el cual se orientará la aplicación. Esto se realiza a través de un *mapa de stakeholders*. Así, se reconoce que el principal sujeto de análisis es el operario de la impresora 3D. En la misma línea, otros participantes que tienen conexión con el proyecto son el diseñador y quien se encarga de la gestión

de la empresa. Se consideran como contribuyentes o beneficiarios indirectos a los clientes de la empresa y quienes prestan servicios o insumos; también se encuentran indirectamente los competidores con capacidad similar de producción.

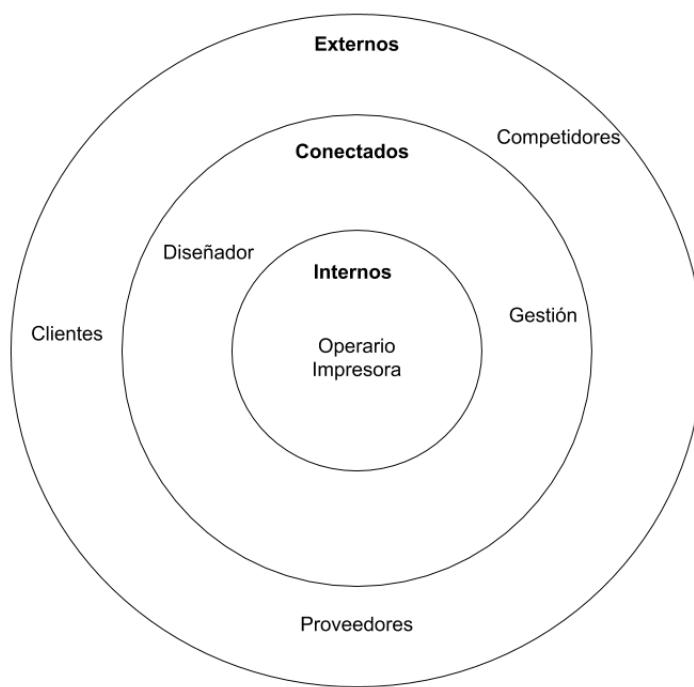


FIGURA 4.41: Mapa de Stakeholders del proyecto.

Considerando el resultado obtenido, se solicitó realizar una entrevista al operario de las máquinas con el fin de obtener información respecto a su visión de usuario respecto a entender su visión como usuario de impresoras 3D, su percepción de la actual acción y gestión del mantenimiento, la forma en que realiza el mantenimiento a las máquinas, y conocer sus canales de proveedores. El resultado de la entrevista se sistematiza en la siguiente tabla:

Presentación, ocupación y cargo	Su nombre es Javier Oliva, es cofundador de 3Dlux y diseñador de profesión.
Tareas relacionadas con impresión 3D	Las tareas que realiza se relacionan a la administración, marketing y fabricación de piezas 3D, además de post proceso de piezas en caso de ser necesario.
Importancia de sistemas de gestión de Mantenimiento	Bastante importante, pues estandariza proceso y existe mayor control. Piensa que es positivo adelantarse a las fallas y mantener las máquinas en buen estado dada su experiencia en pedidos grandes o con tiempo limitado
Realización de mantenimientos	Si ha realizado mantenimientos
Problemas relacionados con el mantenimiento	Ha tenido problemas en el desconocimiento de algunas piezas, o manejar piezas electrónicas.
Herramientas de gestión	No ocupa ninguna herramienta para gestionar el mantenimiento.
Mantenimiento preventivo o correctivo	En mayor proporción espera a que un componente falle. El mantenimiento preventivo no está calendarizado, sino que se realiza antes de trabajos largos.
Clasificación de fallas	No especifica las fallas que ocurren. Busca identificar el problema según algún subsistema de la impresora, mecánico o electrónico, por ejemplo.
Utilidad de registros de mantenimiento	Encuentra mucha utilidad a los registros, pues sería más sencillo facilitar la tarea a quienes puedan conformar el grupo.
Información relevante para el negocio	Cree relevante el detectar los tipos de falla y el procedimiento más óptimo.
Comunicación con proveedores	Si tiene comunicación con proveedores. No existe solo uno, sino que dependen de la oportunidad de compra.
Uso de Octoprint	Lo ha utilizado, pero cree que la configuración puede ser difícil en ocasiones. Sin embargo, piensa que puede ser una buena alternativa en caso que se pueda relacionar con los registros.

TABLA 4.23: Resumen de respuestas dadas por el operario de mantenimiento en entrevista.

Una forma de obtener las vivencias del operario en su recorrido durante el proceso de impresión 3D es utilizando el mapa de experiencia o *customer journey map*. Esta herramienta permite obtener información sobre cada etapa del proceso, conociendo los objetivos, actividad, puntos de contacto, sentimientos, emociones, además de obtener conclusiones que puedan surgir como oportunidad a partir de los resultados. En este caso, el mapa de experiencia pretende apoyaren la mejora de las labores que se están realizando actualmente respecto al buen estado de las máquinas en una granja de impresoras 3D con 9 máquinas. Muchas veces, no existe control sobre los pedidos grandes, entregando piezas defectuosas o en cantidades erróneas. Asimismo, debido a fallas de distinto tipo, los pedidos se atrasan en su plazo de entrega. También, las máquinas fallan y no se encuentran disponibles para realizar trabajos. Esta herramienta será usada por quien realiza esta tesis, con el fin de desarrollar herramientas digitales para mejorar y estandarizar el proceso de impresión 3D, y también mantener las máquinas disponibles y en buen estado. Los mapas de experiencia tratan de la experiencia de Javier Oliva, operario de impresoras 3D, quien a su vez está encargado de la gestión de la producción, y fueron realizados en el taller de la empresa. A continuación, se definen las etapas que se evaluarán:

1. Preparación de archivos.
 - a) Abrir archivo .stl.
 - b) Guardar archivo Gcode y extraer tarjeta SD.
2. Preparación de la impresora.
 - a) Encendido y limpieza general de la impresora.
 - b) Preparación de la impresora.
 - c) Insertar SD e imprimir archivo Gcode.

3. Finalización de la impresión.

a) Control visual de la impresión.

b) Término del proceso.

c) Control visual y registro de piezas.

Fases	1.1 Configurar parámetros impresión en laminado	1.2 Guardar archivo.gcode y extraer tarjeta SD
Objetivos	Eficiencia del proceso de impresión (más mejores piezas en el menor tiempo)	Simplificar la búsqueda de archivo en la memoria. Certeza de donde se encuentra el archivo correcto
Actividad	Se carga el archivo en .stl en el programa laminador y se introduce tarjeta SD. Se seleccionan los parámetros necesarios dependiendo de análisis de uso. Luego, se verifica que el diseño realizado cumpla con la cantidad máxima de material permitida, y el tiempo destinado para la producción. Finalmente, se obtiene el archivo en formato .gcode	Se guarda el archivo Gcode en la tarjeta Micro SD con un nombre que pueda ser identificado cuando el archivo seabra en la impresora.
Puntos de contacto	Computadora, Tarjeta MicroSD	Computador, Tarjeta microSD
Pensamientos	Preocupación por la situación actual de la impresora (limpieza, estado), o por que en el archivo tenga parámetros equivocados e imprima mal. Preocupación por si existirá disponibilidad de impresoras al momento de terminar de configurar la impresión.	Preocupación porque la tarjeta es pequeña y se puede caer o extraviar. Concentración para recordar el nombre de la pieza a imprimir. Preocupación porque no siempre hay disponibilidad de más tarjetas para otro proceso futuro.
Sensaciones	Verde (satisfacción), Amarillo (neutral), Rojo (preocupación)	Verde (satisfacción), Amarillo (neutral), Rojo (preocupación)
Conclusiones	El usuario se siente satisfecho, porque existen diversas posibilidades de configurar el proceso, y están interrelacionadas entre sí. Una preocupación es que la información referida al proceso de impresión no suele ser correcta (los tiempos son infravalorados y el tiempo real siempre es mayor al tiempo entregado por el laminador). Podría existir una oportunidad mejoría en caso que se tuviera certeza del estado de la máquina a utilizar (está limpia, no ha fallado anteriormente) para piezas similares, y que pudiese estimar de mejor manera el tiempo de impresión real.	La principal preocupación es que el nombre de la pieza pueda ser olvidado en el transcurso de llevar la tarjeta SD a la impresora. Una vez que se ha hecho la selección del operador. Otro problema es que se están utilizando tarjetas SD al azar, se suele sacar una tarjeta de alguna impresora desocupada para guardar un archivo e imprimir. Nuevamente hay preocupación por la condición presente o futura de algún elemento, como la tarjeta SD o la impresora. Una oportunidad de mejoría es establecer un estándar para el nombre de los archivos que se guardan. Asimismo, explorar posibilidades que puedan suprir el uso de la tarjeta micro SD y que sean tan confiables como ésta.

FIGURA 4.42: Primera etapa del mapa de experiencia.

Fases	2.1 Encendido y limpieza general de la impresora	2.2 Preparación de impresora	2.3 Insertar tarjeta SD e imprimir archivo gcode
Objetivos	Poner la impresora en buen estado y prevenir de fallas en la impresión por suciedad.	Establecer temperaturas de extrusor y cama óptimas para la impresión de las piezas.	Cargar el archivo en el puerto SD de la impresora, seleccionar la pieza y dar inicio al proceso de fabricación.
Actividad	Se energiza la impresora y se revisa la superficie de construcción y el conjunto extrusor de la impresora. Con una espátula se limpian restos de plásticos en la cama caliente, y con un cepillo de cerdas de latón se limpian los restos de plásticos en la boquilla y el bloque calentador.	A través de la interfaz LCD de la máquina se configura la temperatura de extrusión y de plataforma idónea para el material de fabricación. Se revisa la nivelación de la cama y la activación de ventilador de cama.	Una vez insertada la tarjeta SD en el puerto de la interfaz, se elige en el panel la opción de seleccionar la pieza a fabricar para comenzar la fabricación. Se espera a que la máquina inicie el proceso y se confirma que la primera capa se construya de buena manera.
Puntos de contacto	Impresora	Impresora	Tarjeta SD, impresora.
Pensamientos	Concentración en que los elementos deben quedar limpios para garantizar una buena fabricación.	Concentración en elegir la temperatura correcta para el proceso definido. Frustración debido a que se debe recorrer una distancia larga desde el computador hasta la máquina para realizar esta acción.	Concentración en encontrar el archivo correcto. Preocupación en que el archivo haya quedado mal configurado y se deba repetir la operación. Frustración por la distancia que hay que recorrer entre la estación de trabajo y la impresora en caso de que el archivo esté mal configurado.
Sensaciones	Verde (satisfacción), Amarillo (neutral), Rojo (preocupación)	Verde (satisfacción), Amarillo (neutral), Rojo (preocupación)	Verde (satisfacción), Amarillo (neutral), Rojo (preocupación)
Conclusiones	El usuario se siente satisfecho, porque este paso suele ser relativamente fácil y rápido en la medida que se tengan las herramientas. Ya existe una política interna en relación a la limpieza de las impresoras, y suelen haber pocos problemas en torno a esto.	La principal preocupación en este caso es que la temperatura de precalentamiento coincide en un intervalo corto respecto a la temperatura configurada en el proceso de laminación. Una oportunidad de mejoría es poder setear el precalentamiento desde el mismo lugar des de donde se configuran los archivos, con el fin de disminuir el tránsito entre la estación de trabajo y la máquina.	El usuario siempre tiene la preocupación de que el archivo esté mal configurado. Este error provoca una pérdida de tiempo muy grande, puesto que debe cancelar la impresión, extraer la tarjeta SD y volver a la estación de trabajo para repetir el proceso des de el punto 1. Una oportunidad de mejoría es poder cargar los archivos desde el mismo espacio de trabajo, con el fin de reducir la impresión de la impresora solo al momento de encendido y construcción de primera capa.

FIGURA 4.43: Segunda etapa del mapa de experiencia.

Fases	3.1 Control visual de la impresión	3.1 Término del proceso de impresión	3.3 Control Visual y registro de piezas
Objetivos	Observar cada cierto tiempo el correcto avance de la impresión en proceso.	Verificar la finalización correcta del proceso de impresión. Registrar el tiempo de producción de la pieza.	Verificar las piezas que cumplen o no con los requerimientos establecidos para la fabricación. Registrar las piezas que cumplen y desechar aquellas que salen defectuosas.
Actividad	Ya sea en intervalos temporales aleatorios o en fases críticas de la construcción de la pieza, se realiza inspección visual del proceso.	A través de la interfaz LCD la impresora entrega el estado finalizado del proceso y el tiempo que se demora la pieza en ser construida. El usuario registra el tiempo en una planilla.	Una vez terminada la impresión se extraen cuidadosamente las piezas de la máquina y se comparan visualmente con el fin de obtener aquellas piezas que cumplen con la especificación. Luego de esta selección, se registran las piezas correctas en una planilla y al resto se desechar.
Puntos de contacto	Impresora	Impresora, computador	Impresora, pieza final.
Pensamientos	Concentración en que las piezas están siendo bien construidas respecto a sus geometrías y parámetros establecidos. Preocupación en que se pueda expresar una configuración errada en la construcción de la pieza.	Tedio en el momento del registro, dado que es necesario recordar el tiempo de impresión desde el momento de lectura hasta el de registro en el computador. Frustración, puesto que, en caso de olvido, es necesario volver a revisar el estado de la impresora y nuevamente registrarlo en el espacio de trabajo.	Concentración en extraer correctamente las piezas. Tedio en el momento del registro, puesto que esto se debe hacer en el lugar de trabajo. Preocupación de olvidar realizar el registro de las piezas.
Sensaciones	 		
Conclusiones	El usuario se siente relativamente satisfecho, porque este paso no es crítico y solo depende de una inspección visual; la preocupación se concentra en alguna configuración mal realizada, por tanto, el usuario presta mayor atención a fases críticas de la construcción como voladizos o soportes.	La principal preocupación en este caso es que es muy fácil no registrar el tiempo de impresión de una pieza. Esto suele ser negativo, puesto que no permite una correcta planificación del trabajo y da lugar a demoras en la impresión y entrega de las piezas.	El usuario está preocupado por no arruinar una producción al momento de la extracción de las piezas. Asimismo, el conteo y registro se dificulta a medida que aumenta la cantidad de piezas fabricadas. Lo mismo ocurre con múltiples aplicaciones abiertas (planillas, carpetas, programas de uso en el trabajo), y no poder registrar en pocos pasos la producción.
			Una oportunidad de mejora es poder realizar un asistente de registro que libere al usuario de tener que abrir planillas para este registro, y tener un acceso fácil a éstos.

FIGURA 4.44: Tercera etapa del mapa de experiencia.

Del análisis realizado a través del mapa de experiencia, se obtienen las siguientes conclusiones en función de sus fases:

■ Preparación de archivos

- Podría existir una oportunidad de mejora al saber el estado de la máquina a utilizar respecto a los fallos anteriores, y obtener el tiempo de impresión real.
- Una oportunidad de mejora es establecer un estándar para el nombre de los archivos que se guardarán. Asimismo, explorar posibilidades que puedan suplir el uso de la tarjeta micro SD y que sean confiables.

■ Preparación de la impresora

- Se plantea como mejora el poder configurar el precalentamiento desde el mismo lugar desde donde se configuran los archivos, con el fin de disminuir el tránsito entre la estación de trabajo y la máquina.
- Una oportunidad de mejora está en poder cargar los archivos desde el mismo espacio de trabajo, con el fin de reducir la inspección de la

impresora solo al momento del encendido y construcción de primera capa.

- término del proceso de impresión
 - Se puede obtener una mejora al poder registrar automáticamente las veces en que una impresión está terminada, así como el tiempo que demoró, y la marca temporal en que ocurre el suceso.
 - Existe una oportunidad de mejora al poder realizar un asistente de registro que libere al usuario de tener que abrir planillas para el registro, así como tener un acceso fácil a estos.

4.5.4 Definir

Para comprender y definir los requisitos de diseño para la solución propuesta y, al mismo tiempo, transformarlos en objetivos de diseño, se trabaja con la técnica de las *cinco W*. Este se sintetiza desde la entrevista con el usuario, la cual arroja los siguientes resultados:

Pregunta	Resultados
¿Quién es el cliente y el público objetivo?	Operador de granja de impresión 3D que cumple más responsabilidades, como gestión de la producción, reparación y administración de la empresa
¿En qué solución del diseño piensa el cliente?	aplicaciones que puedan ser utilizadas desde computador o dispositivo móvil
¿Cuándo y por cuánto tiempo será necesitado el diseño	No existe un límite inicial, se pretende utilizar durante el tiempo en que las máquinas se encuentren operativas.
¿Dónde será utilizado el diseño?	En el taller de impresión 3D de 3Dlux, a través de una interfaz como un computador o dispositivo móvil
¿Cómo será implementada la solución?	de manera gradual, hasta completar la mayor cantidad de impresoras 3D.

TABLA 4.24: Resultados de la técnica de las cinco W.

De las técnicas anteriormente utilizadas, y a modo de conseguir los *insight* o los porqués detrás de las necesidades del usuario, se obtiene lo siguiente:

- El usuario cree importante tener un sistema de gestión y de registros, pues vislumbra mayor control de lo que se está haciendo.
- Al usuario le preocupa que la información referida al proceso de impresión no suele ser correcta (los tiempos son infravalorados y el tiempo real siempre es mayor al tiempo entregado por el software CAM).
- Existe preocupación a que no se puedan realizar los registros debido a que existe mucho tránsito entre el espacio de trabajo y el banco de impresoras.

- Al usuario le resulta frustrante la manipulación excesiva de la tarjeta SD para efectuar la fabricación.
- El usuario se siente satisfecho con la limpieza de las impresoras, pues es fácil y rápido, y no suelen haber problemas en torno a esto.
- Al usuario le preocupa una planificación incorrecta del trabajo, que pueda provocar demoras en la fabricación.
- Al usuario le resulta tedioso tener múltiples aplicaciones abiertas (planillas, carpetas, programas de uso en el trabajo), y no poder registrar en pocos pasos la producción.

4.5.5 Investigar

En esta etapa se busca obtener la mayor información posible respecto a la tecnologías desarrolladas para la gestión de los procesos de mantenimiento, ya sea para pequeñas y medianas empresas, industrias vinculadas a la producción y manufactura aditiva. Para esto, y a partir de información obtenida por fuentes externas, se realiza una investigación del tipo secundaria y cualitativa en la medida que pueda informar respecto al consumo de tecnologías de gestión. Para esto, se proponen tres tipos de investigación:

- Investigación de referentes
- Investigación de softwares a utilizar
- Investigación de las herramientas de desarrollo a utilizar.

Investigación de referentes

La investigación de referentes estará centrada en softwares o aplicaciones de gestión de la producción y/o mantenimiento disponibles en el mercado mundial. Se elegirán tres empresas que prestan este tipo de servicio, según: (a) vinculación con la impresión 3D; (b) relación con el mantenimiento; (c) relación a la producción. Asimismo, los criterios para el análisis se centran en:

- Público objetivo
- Interfaz de monitoreo de condición
- Interfaz de mantenimiento de activos
- Interfaz de producción y procesos

3Dtrust - <https://3dtrust.de/> *3dtrust* es una empresa de cinco años de antiguedad fundada en Munich, Alemania. Al principio, el equipo formaba parte de una serie de nuevas empresas que querían asegurar la cadena de suministro digital. Según la empresa, a través del cifrado y el software las empresas podían asegurarse de que estaban imprimiendo las piezas correctas. A través del desarrollo de productos y el contacto con el mercado, la empresa ha crecido hasta crear un software que puede realizar la trazabilidad, la optimización de la productividad y analizar flotas enteras de sistemas de aditivos que producen piezas a tiempo, así como los pasos de posproducción, para decidir qué se debe hacer.

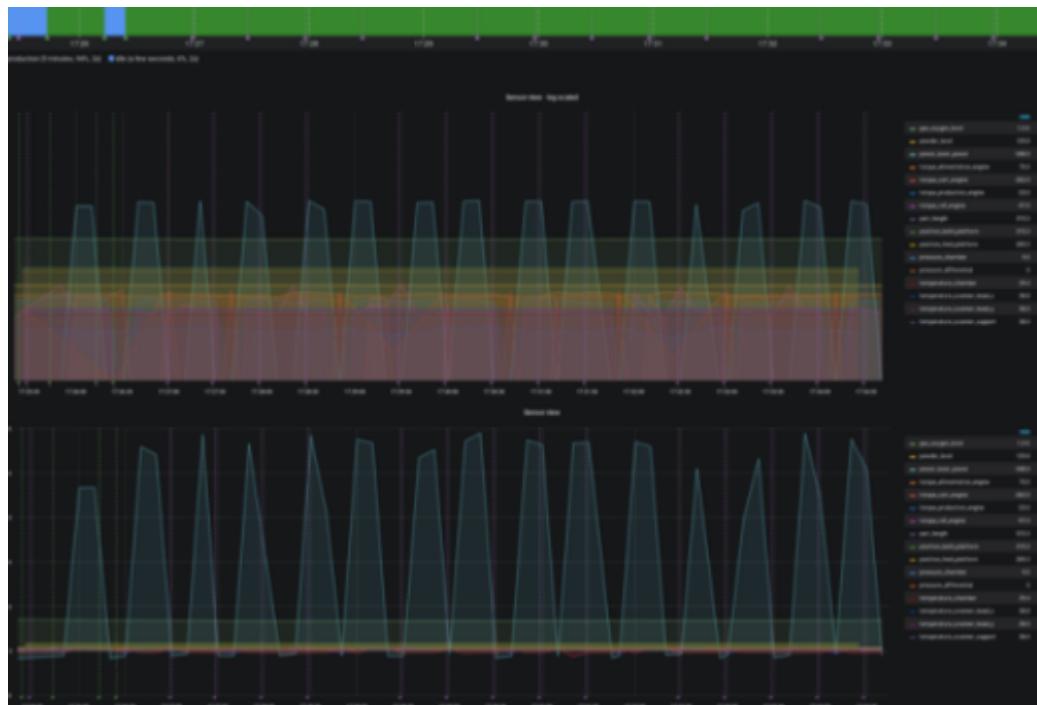


FIGURA 4.45: Captura de interfaz utilizada por *3Dtrust* para el monitoreo de la condición.

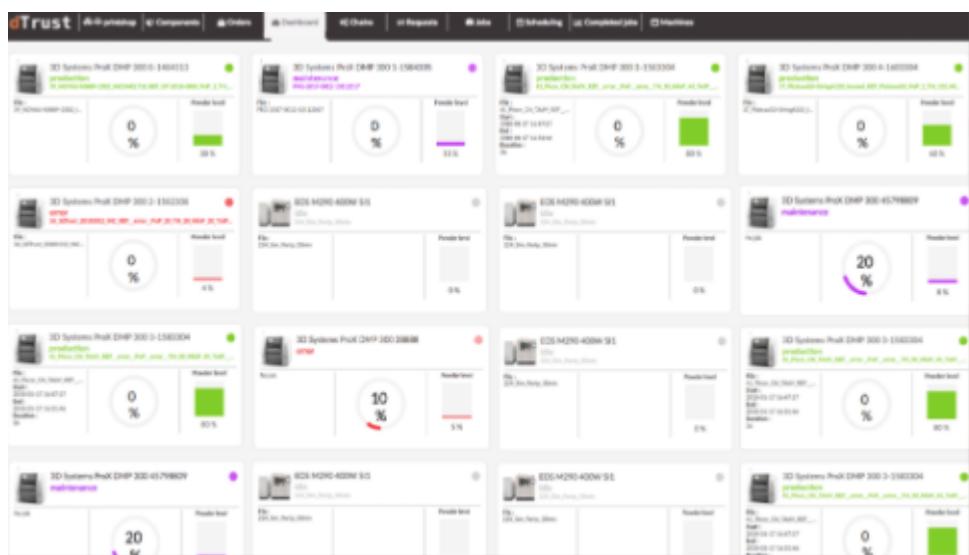


FIGURA 4.46: Captura de interfaz utilizada por *3Dtrust* para el monitoreo de la condición.

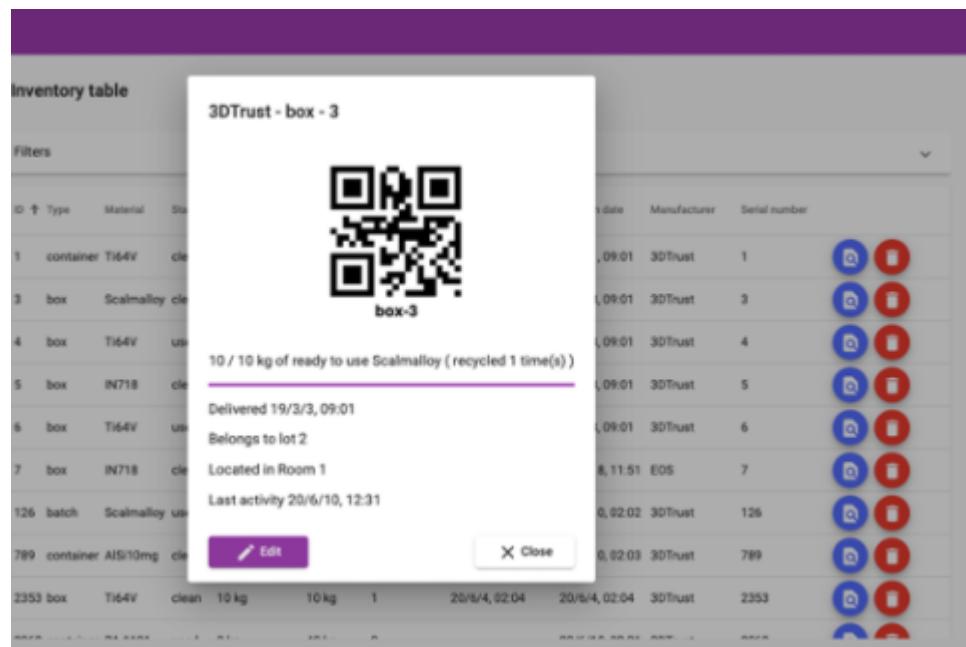


FIGURA 4.47: Captura de interfaz utilizada por *3Dtrust* para el control de la producción.

AMFG - <https://amfg.ai/service-bureaus-2/> AMFG En el sector de la impresión 3D, la empresa londinense AMFG ofrece un software de automatización de flujo de trabajo de manufactura aditiva para empresas. Su software es una solución de gestión de flujo de trabajo completa e integral. AMFG es la única plataforma de software que ofrece una solución completa de automatización de extremo a extremo para las operaciones

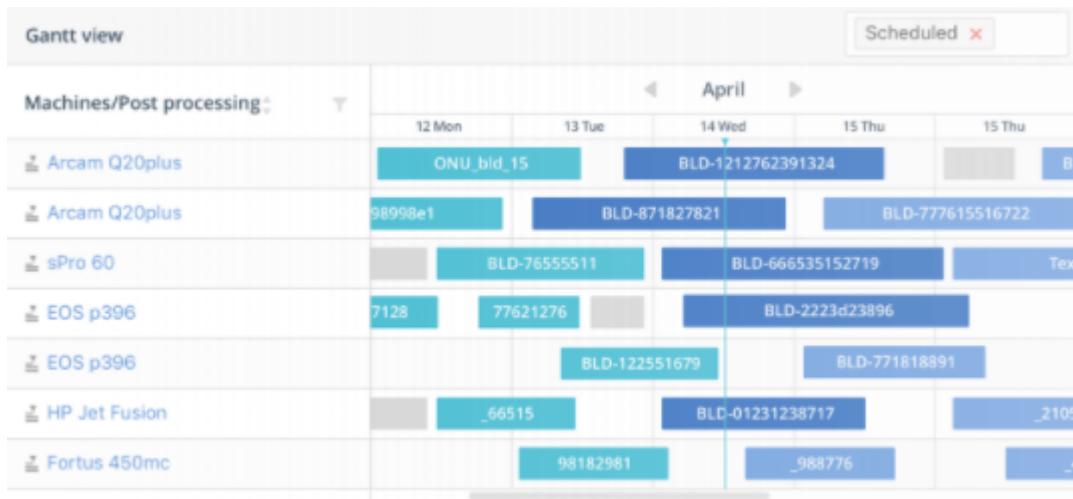


FIGURA 4.48: Captura de interfaz utilizada por AMFG para el control de la producción

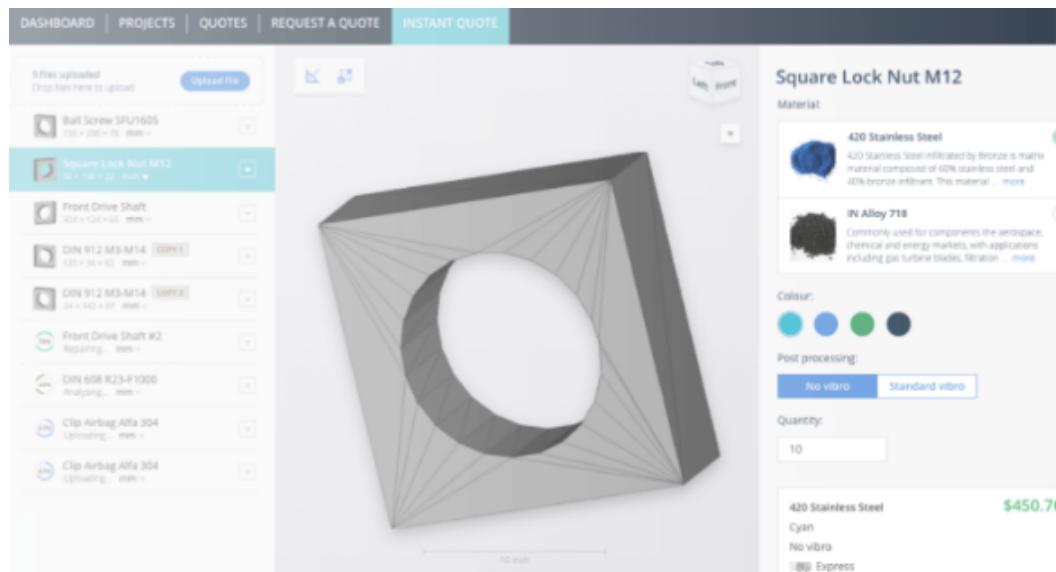


FIGURA 4.49: Captura de interfaz utilizada por AMFG para el control de la producción.

FRACCTAL - <https://www.fracttal.com/es/> FRACCTAL es una empresa fundada en Chile el año 2014 con el fin de crear un software de mantenimiento y gestión de activos accesibles a medianas y pequeña empresas. Actualmente, su software

es utilizado por empresas como Unilever, Aguas Andinas y Petrobras.

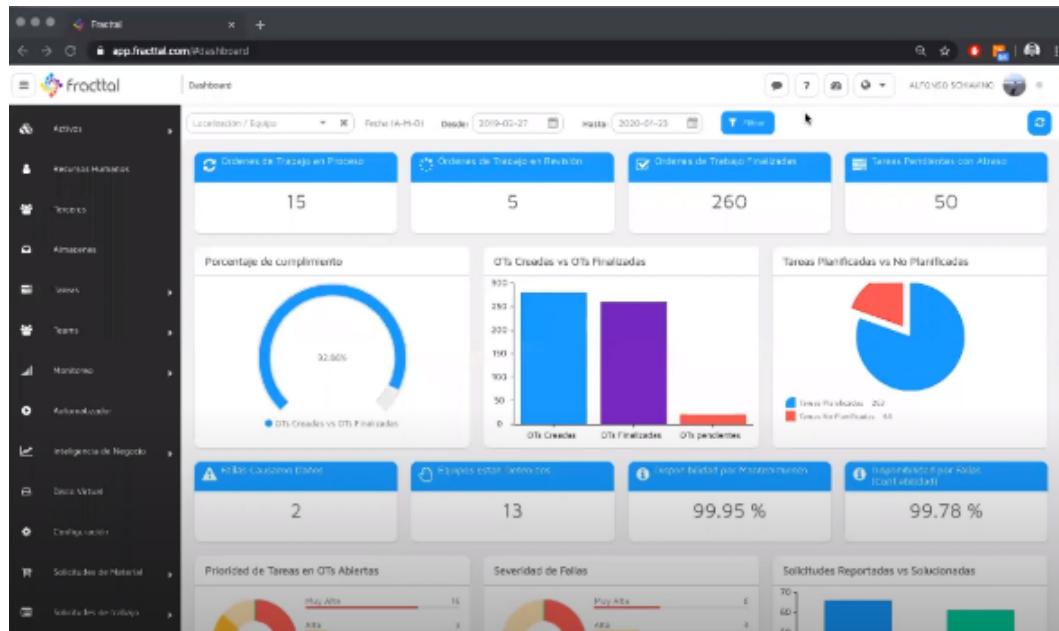


FIGURA 4.50: Captura de interfaz utilizada por *FRACCTAL* para el control de indicadores.

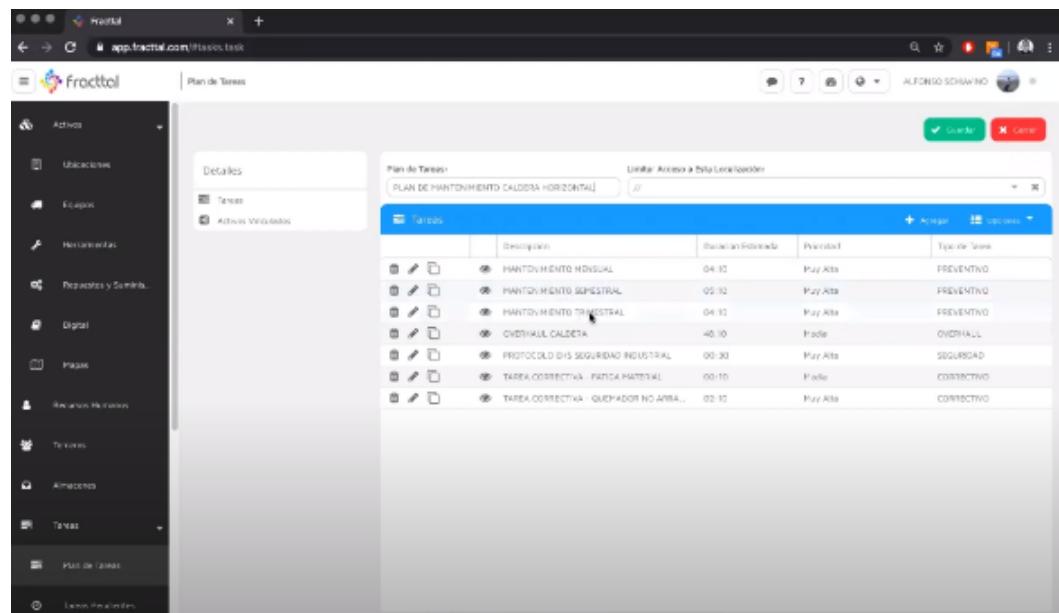


FIGURA 4.51: Captura de interfaz utilizada por *FRACCTAL* para el control del mantenimiento.

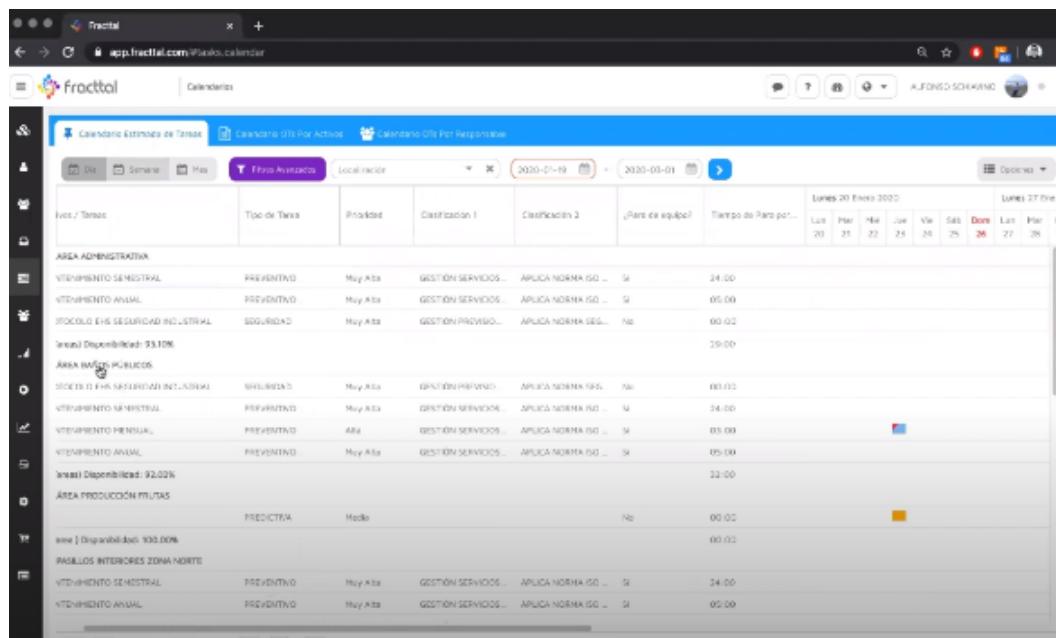


FIGURA 4.52: Captura de interfaz utilizada por la aplicación *FRACCTAL* para la gestión de tareas.

En primer lugar, se nota que el público objetivo de todas las empresas corresponde a pequeñas, medianas y grandes industrias de manufactura. Como se observa en las figuras 4.45 y 4.46, en el caso de *3DTrust* el monitoreo de la condición se realiza a través de dos interfaces distintas, una para la observación de los estados de temperatura de una impresora 3D a lo largo del tiempo, y otra a modo de *dashboard* para el monitoreo de las máquinas conectadas. En la figura 4.47, se muestra que la forma de gestionar el control de la producción es a través de las funciones básicas de las bases de datos denominada *CRUD*, por el acrónimo en inglés de las funciones leer, actualizar, eliminar o crear. Por otra parte, *AMFG* opta por realizar un calendario de actividades para la gestión de la producción. En la figura 4.48 se muestra una interfaz gráfica para representar el estado y el tiempo de realización de las tareas planificadas. Además, existe la posibilidad de verificar el modelo a imprimir en la misma aplicación. En relación a *FRACCTAL*, la principal cualidad es que en su *dashboard* entrega información a modo de

indicadores, ya sea gráficos o escalas, del cumplimiento de las tareas propuestas. En la figura 4.50 se pueden encontrar indicadores de porcentaje de cumplimiento, tareas planificadas versus no planificadas, entre otros. Al igual que con la empresa anterior, la sección relacionada a acciones y control de mantenimiento se realiza a través de funciones *CRUD*, y se muestra a través de una interfaz de base de datos; esta característica se repite respecto al sistema de gestión de tareas, como se observa en la figura 4.52.

Criterio	3DTrust	AMFG	FRACCTAL
Público Objetivo	Medianas y grandes empresas de la industria de manufactura en impresión 3D	Grandes empresas de la manufactura aditiva	Pequeñas, medianas y grandes empresas de la industria y logística
Relación con impresión 3D	Software diseñado para impresión 3D	Software diseñado para impresión 3D	Se puede implementar en algunos proceso de la impresión 3D
Mantenimiento de activos	Presenta monitoreo de la condición a través del control permanente de algunas variables	Presenta monitoreo de la condición a través del control permanente de algunas variables	Permite la gestión de los registros de mantenimiento a través de operaciones de bases de datos y la obtención de indicadores para el mantenimiento.
Gestión de los procesos	Es posible controlar y gestionar la producción a través de operaciones de bases de datos	Es posible controlar y gestionar la producción a través de la calendarización de la fabricación	Es posible controlar y gestionar la producción a través de operaciones de bases de datos

TABLA 4.25: Tabla resumen del análisis de referentes según los criterios propuestos.

Investigación de software a utilizar

Según [54], *OctoPrint* es una aplicación de código abierto y gratuita para el control de impresoras 3D. Permite administrar todas tus impresiones de forma remota y controlar el parque de máquinas con total tranquilidad. Funciona directamente desde su interfaz web, solo hay que conectar la aplicación a la red local. Concretamente, permitirá enviar varios archivos Gcode a diferentes máquinas a través de una única interfaz. La mayoría de los usuarios ahora lo instalan en una Raspberry Pi, usando la imagen OctoPi disponible en línea. *OctoPrint* también es compatible con cámaras que permitirán el monitoreo en tiempo real de una impresión y verificar de forma remota que todo funciona correctamente. En 2012, Gina Häußge desarrolló una primera aplicación de control, utilizando su propia impresora 3D. Muy rápidamente, la solución sedujo al mercado y fue el fabricante español BQ quien apoyó financieramente el desarrollo. Hoy, *OctoPrint* es ampliamente utilizado en todo el mundo, es de código abierto y completamente gratuito. Incluso se ha creado un foro para reunir a toda la comunidad de usuarios, resolver problemas técnicos, facilitar la instalación de la aplicación o intercambiar ideas.

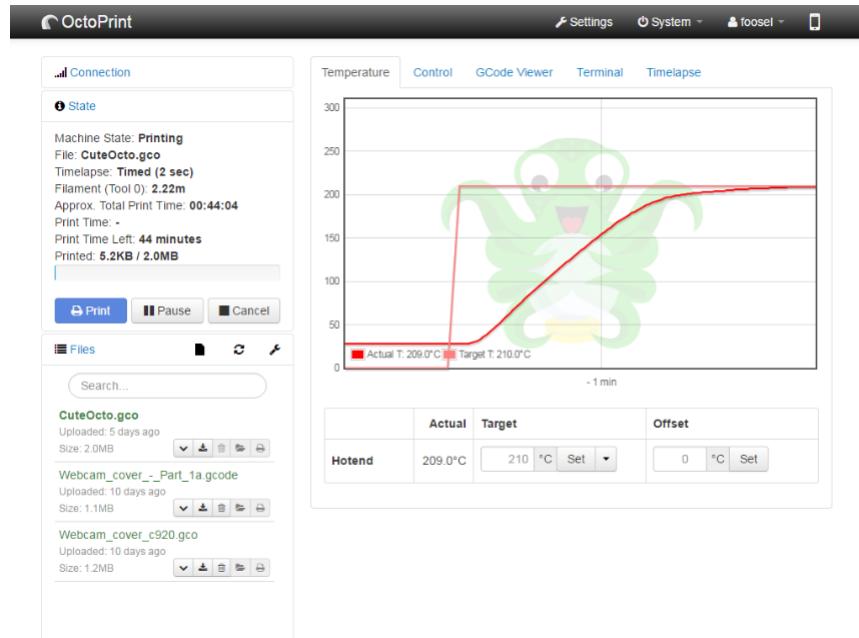


FIGURA 4.53: Interfaz del estado actual de una impresora 3D en Octoprint (Recuperado <https://www.octoprint.org>)

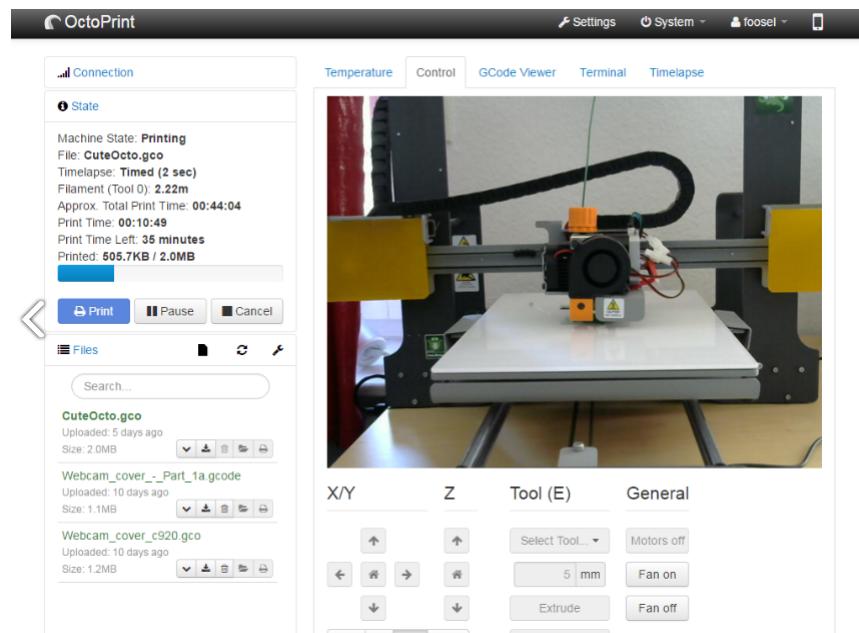


FIGURA 4.54: Interfaz del mando a distancia de una impresora 3D en Octoprint (Recuperado <https://www.octoprint.org>)

OctoPrint es un software de código abierto, y todo su código fuente

está disponible en un repositorio de *Github*, donde cualquiera lo puede clonar y modificar respecto a sus necesidades. Asimismo, el programa dispone de una API, por lo cual permite la comunicación con otros servicios a través del protocolo HTTP, inclusive con protocolos MQTT siempre y cuando se disponga del *plugin* necesario. Tanto la información general, desde la autorización del servidor, el contenido de la petición hasta la enumeración de todas las operaciones disponibles para la API se encuentran a modo de documentación en <https://docs.octoprint.org/en/master/>. Para poder establecer la comunicación a través de HTTP, es necesario contar con una *Api key* o identificador al cual se le asignarán todos los cargos que correspondan por uso de los distintos servicios. Este identificador se puede obtener en las configuraciones del servidor de *Octoprint*. Los métodos admitidos por la aplicación son del tipo GET o POST, y permiten obtener datos del servidor y enviar órdenes en formato *.json*.

```
1 GET /api/connection HTTP/1.1
2 Host: example.com
3 X-Api-Key: abcdef...
```

TABLA 4.26: Ejemplo de una consulta GET a la API de *Octoprint*.

```

1 HTTP/1.1 200 OK
2 Content-Type: application/json
3
4 {
5   "current": {
6     "state": "Operational",
7     "port": "/dev/ttyACM0",
8     "baudrate": 250000,
9     "printerProfile": "_default"
10   },
11   "options": {
12     "ports": ["/dev/ttyACM0", "VIRTUAL"],
13     "baudrates": [250000, 230400, 115200, 57600, 38400, 19200, 9600],
14     "printerProfiles": [{"name": "Default", "id": "_default"}],
15     "portPreference": "/dev/ttyACM0",
16     "baudratePreference": 250000,
17     "printerProfilePreference": "_default",
18     "autoconnect": true
19   }
20 }.
```

TABLA 4.27: Ejemplo de una respuesta en formato .json de la API de *Octoprint* ante la consulta GET.

```

1 POST /api/connection HTTP/1.1
2 Host: example.com
3 Content-Type: application/json
4 X-Api-Key: abcdef...
5
6 {
7   "command": "connect",
8   "port": "/dev/ttyACM0",
9   "baudrate": 115200,
10  "printerProfile": "my_printer_profile",
11  "save": true,
12  "autoconnect": true
13 }.
```

TABLA 4.28: Ejemplo de una consulta POST a la API de *Octoprint*.

```
1 HTTP/1.1 204 No Content
```

TABLA 4.29: Ejemplo de respuesta exitosa de la API de *Octoprint* ante la consulta POST.

las operaciones que permite la API son las siguientes:

Operación	Tipo de consulta
Recuperar archivos	GET
Subir archivo	POST
Comenzar, cancelar, reiniciar, pausar y resumir impresión	POST
Recuperar información del estado actual	GET
Recuperar estado actual de impresora	GET
Emitir comando a cama o extrusor	POST
Recuperar estado actual del modelo	GET

TABLA 4.30: Principales operaciones permitidas por la API de *Octoprint*

Dentro de todas las operaciones mencionadas en la tabla 4.30, se obtienen las siguientes variables que servirán como data de análisis para la aplicación a desarrollar:

- Estado de conexión de la impresora.
- Impresiones canceladas.
- Impresiones terminadas.
- Impresiones pausadas.
- Estado actual de la temperatura de la cama caliente y extrusor.
- Nombre de la pieza en construcción.
- Volumen de la pieza en construcción
- Tiempo de construcción de la pieza.
- Tiempo de funcionamiento de la impresora.

Investigación de las herramientas de desarrollo a utilizar

Esta etapa consiste en encontrar las herramientas de programación que puedan interactuar con la API de *Octoprint*, obtener, almacenar y procesar los datos, transformarlos en información, y que esta última esté disponible de forma clara y amigable para el usuario. La investigación estará determinada a seleccionar:

- Interfaz gráfica para el estado actual de impresoras 3D.
- Código que permita obtener datos desde la API de *Octoprint*.
- Código que permita crear, reemplazar, actualizar y eliminar bases de datos.
- Servidores para implementar la aplicación.

Grafana Según [55], Grafana es una herramienta hecha en software libre, específicamente con licencia Apache 2.0, ideada por Torkel Ödegaard (quien todavía está al frente de su desarrollo y mantenimiento) y creada en enero de 2014. Este desarrollador sueco comenzó su carrera en el ambiente .NET y en 2012 (hasta la fecha) sigue ofreciendo servicios de desarrollo y consultoría en esta popular plataforma privativa, de forma paralela con el desarrollo de software libre. Grafana es una herramienta para visualizar datos de serie temporales. A partir de una serie de datos recolectados obtendremos un panorama gráfico de la situación de una empresa u organización.



FIGURA 4.55: Visualización de datos en grafana [55].

Grafana es compatible con servidores de diversas bases de datos como *influxdb* o *MySQL*, lo que permite vincularlo a códigos realizados en otras plataformas.

Node-red/Node-red Dashboard Según [56], NODE-RED, es una herramienta de código libre (Open Source) construida en Node.js y que se encuadra en la familia de herramientas *flow-based programming (FBP) tools* (Herramientas de programación basadas en flujos). Originalmente desarrollado por el equipo de Emerging Technology Services de IBM, es ahora parte de la OpenJS Foundation, cuenta con una creciente comunidad de desarrollo muy activa y goza actualmente de un gran predicamento y una amplia difusión de aplicación en multitud de proyectos innovadores. Según el mismo autor, La programación basada en flujos es una forma de describir el comportamiento de una aplicación como una red de cajas negras o nodos, como se les llama en Node-RED. Cada nodo tiene un propósito bien definido: recibe o captura algunos datos, realiza algún tratamiento con esos datos y luego los pasa a uno o varios nodos con los que se enlaza.

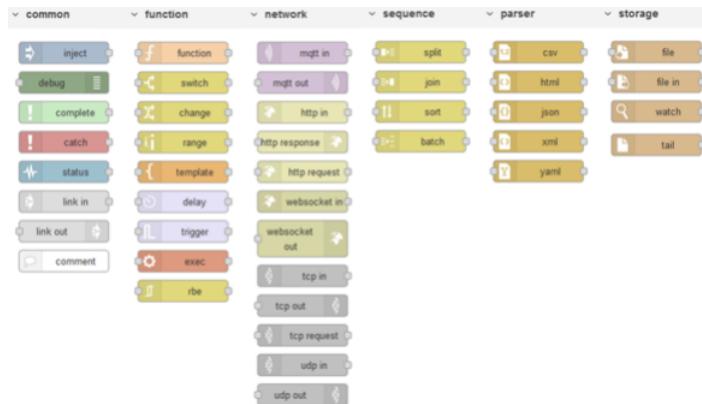


FIGURA 4.56: Nodos utilizados en la programación por flujos En Node-Red.

En palabras de [56] es importante destacar igualmente que una de sus capacidades menos conocida, pero no por ello de menor importancia y utilidad, es la capacidad de poder crear y desplegar Cuadros de Mando (Dashboards) a los que se puede acceder remotamente vía navegador y cuyo acceso puede ser, al igual que lo descrito para el editor, protegido con credenciales de acceso.

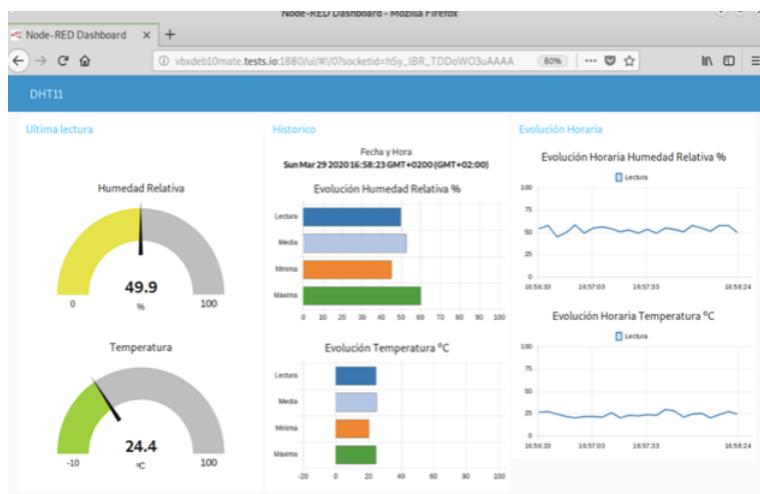


FIGURA 4.57: Dashboard de Node-red para acceso remoto por navegador.

Mysql-PHPMyAdmin Según [57], MySQL es un potente administrador de bases de datos utilizado para organizar y recopilar información. Este administrador de bases de datos es propiedad de Oracle y está desarrollado bajo una licencia GPL,

convirtiéndose así en una de las bases de datos OpenSource más utilizadas en todo el mundo. Por otra parte, PHPMyAdmin es una herramienta escrita en PHP que nos va a permitir gestionar y administrar bases de datos MySQL fácilmente a través de su sencilla interfaz web.

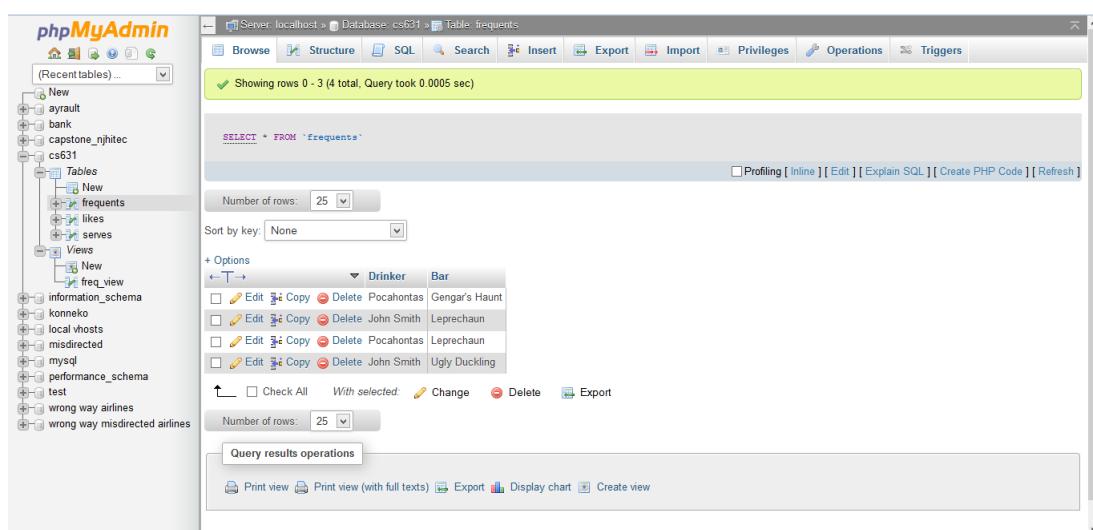


FIGURA 4.58: Interfaz de bases de datos MySQL en PHPMyAdmin

Flask-Python framework En palabras de [58], Flask es un micro Framework escrito en Python y concebido para facilitar el desarrollo de Aplicaciones Web bajo el patrón MVC. La palabra *micro* no designa a que sea un proyecto pequeño o que nos permita hacer páginas web pequeñas sino que al instalar Flask tenemos las herramientas necesarias para crear una aplicación web funcional pero si se necesita en algún momento una nueva funcionalidad hay un conjunto muy grande extensiones (plugins) que se pueden instalar con Flask que le van dotando de funcionalidad.

4.5.6 Idear

Según [59], el Brainstorming es una técnica creativa, ideada en 1939 por Alex Faickney Osborn, que se basa en la interacción entre los integrantes de un grupo para crear nuevas ideas sobre un tema en concreto. De acuerdo con esta técnica, la interacción entre los distintos integrantes del grupo potencia la creatividad y se generan ideas que, trabajando individualmente, no se conseguirían. De esta forma, gracias al trabajo en grupo, las ideas de los usuarios se retroalimentan con las de los otros integrantes del grupo. El mismo autor propone tres fases para la realización de la técnica del brainstorming [59]:

- Identificación del problema
- Generación de ideas
- Análisis

Identificación del problema Como se menciona en el Capítulo 3, los problemas detectados se relacionan a la imposibilidad del monitoreo de máquinas simultáneamente, detenciones imprevistas por mantenimientos y la ausencia de registro de datos en general. Por tanto, la pregunta para comenzar el brainstorming queda enunciada como: *¿Cómo se puede mejorar el sistema de monitoreo y mantenimiento a través de una aplicación web?*

Generación de ideas La fase de generación de ideas parte con las siguientes definiciones:

- Participantes: Javier Oliva, Pablo Ruz (moderador).
- Lugar: entrevista virtual plataforma Meet.

- Fecha: viernes 26 de junio de 2020, al medio día.
- Duración: 20 minutos, aproximadamente.

Los resultados se sistematizan según ideas orientadas a la información importante para las mejoras, la interfaz y los modos de utilización.

Información:

- Impresiones buenas y fallidas
- Estado (conectada, no conectada)
- Saber cuando y qué mantenimiento se realizó
- Info relacionada con el peso o el tiempo de una impresión
- Saber disponibilidad

Interfaz:

- Interfaz amigable
- Gráficos de distintos tipos
- Tablas para la información
- Alertas para no equivocarse

Modos de utilización:

- Desde un solo computador
- Desde un tablet

4.5.7 Prototipar

En primer lugar, se discute de qué formas se utilizarán las herramientas de desarrollo para la aplicación web. Respecto a la interfaz, uno de los requerimientos es que las impresoras puedan ser controladas remotamente. En este sentido, Octoprint ya posee una interfaz de control completa y extendible, por lo que realizar acciones POST desde otro servidor al de Octoprint puede provocar saturaciones innecesarias en los servidores. Es por esto que se define utilizar la interfaz de Octoprint como el centro de mandos principal para cada impresora, e insertar un enlace directo desde el dashboard de la aplicación. Respecto a la visualización de métricas, existen dos formas para su desarrollo: (a) aplicación web programada en JavaScript y/o Python, y en lenguajes de estilo HTML; (b) utilización de visores de métricas. La primera, involucra un trabajo mucho mayor y que no es de interés para este trabajo, no obstante, parte de su utilización puede servir para el desarrollo de las bases de datos. En el caso de los visores de métricas, proponen una mayor diversidad de usos con los mismos recursos, puesto que los gráficos y tablas ya vienen predefinidos y se pueden vincular con el resto de la aplicación. Las acciones de almacenar y procesar los datos se realizará a través de un servidor programado en Python y otro programado en Node-red. Esto se realiza para facilitar la creación de la interfaz de la aplicación y la modificación de las bases de datos. En la misma línea, la programación por flujos facilita la comunicación con bases de datos de series de tiempo. El esquema que representa la arquitectura de la aplicación se observa en la figura 4.59.

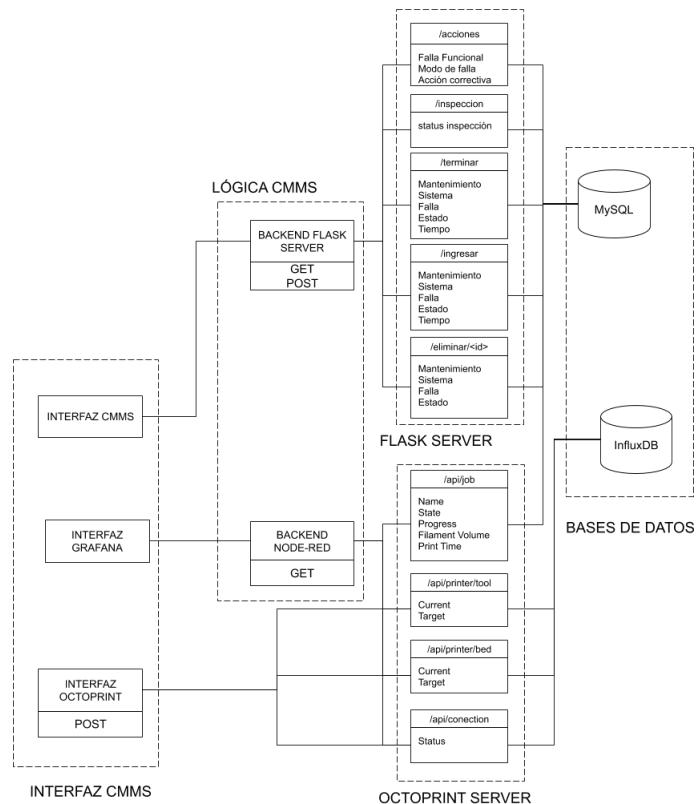


FIGURA 4.59: Esquema de la arquitectura propuesta para la aplicación

La lógica de la aplicación se encargará de requerir y recibir los datos desde la API de Octoprint, administrar las bases de datos y realizar las métricas con la información obtenida. Para el ordenamiento y el análisis de la información, se toman como base los resultados obtenidos en la Sección 3.3. En la figura 4.60 se observa la estructura e información de las bases de datos propuestas para la aplicación.

id	Marca temporal	Estado Inspección diaria
1	30/07/2020 18:41:03	Inspección realizada

id	Marca Temporal	Mantenimiento	Sistema	Falla	Estado
1	30/07/2020 18:41:03	Correctivo	Extrusión	No extruye filamento	En proceso
2	30/07/2020 19:30:09	Correctivo	Extrusión	No extruye filamento	Terminado

id	Marca Temporal	Pieza	Peso [g]	Tiempo de impresión [s]	Estado
1	31/07/2020 11:02:15	calibracion-xyz.gcode	15	912	Terminada
2	03/08/2020 1:30:04	calibracion-xyz.gcode	15	267	Cancelada

id	Sistema
1	Alimentación
2	Movimiento
3	Extrusión
4	Control
5	Construcción

id	sistema_id	Falla funcional	modo de falla	accion correctiva
1	2	No Entrega par motor de 56 N/cm para desplazar sistema de extrusión en el eje X rotando a 3200 pasos por revolución	Motor desconectado	Verifique conexiones en el motor y en la placa. Desconecte la impresora de la alimentación de energía y reconecte
	3	No calienta el bloque a una temperatura entre 180°C y 250°C	calentador desacoplado	Verificar acople de calentador al bloque y asegurar perno prisionero
3	3	No calienta el bloque a una temperatura entre 180°C y 250°C	Termistor desacoplado	Verificar acople del termistor al bloque y asegurar perno prisionero
	5	No calienta superficie a una temperatura entre 50 °C y 110°C	Calentador desconectado	Verifique conexiones del calentador. Desconecte la impresora de la alimentación de energía y reconecte

FIGURA 4.60: Esquema de las bases de datos propuestas para la aplicación

Caracterización de datos

Los datos obtenidos a través de la consulta a la API de Octoprint se pueden caracterizar de dos formas: datos obtenidos por series e intervalos de tiempo, y datos según un evento en específico. Es importante destacar que ambas no pueden ser tratadas de la misma forma, dado que las series por intervalos de tiempo suelen entregar un alto volumen de datos en un periodo específico y en general son utilizadas para la representación de los datos en vivo. Por esto, se elige utilizar *Influxdb* como servidor de bases de datos de series. En este sentido, las variables asociadas a este tipo de registro de datos son las temperaturas de la cama caliente y extrusor, estado actual de impresión, progreso de la impresión,

y las métricas calculadas de MTBF, MTTR y Confiabilidad. En la figura 4.61 se muestra la base de datos creada para la aplicación, mientras que en la figura 4.62 se incluyen los datos recogidos y métricas obtenidas.

```
> show databases
name: databases
name
-----
internal
livemetrics
```

FIGURA 4.61: Base de datos creada para series de tiempo en Influxdb

```
> show measurements
name: measurements
name
-----
bed
conf
current
hotend
mtbf
mttr
name
progreso
temp
```

FIGURA 4.62: Mediciones en base de datos de series de tiempo.

Por otra parte, la existencia de eventos específicos que puedan determinar ciertos estados de la impresora requieren un tratamiento distinto que los datos en vivo; esto es, seleccionar, borrar, ordenar o cambiar información. Así, para los registros de mantenimiento se utiliza el tipo de bases de datos relacional basada en *Mysql*. En esta linea, la base de datos cuenta con las tablas de piezas canceladas y terminadas (figura 4.66), registros de mantenimiento correctivo (figura 4.63), paradas no planificadas (figura 4.65) y registros de inspección diaria (figura 4.64). Se debe notar que, para la obtención de las métricas de MTBF, MTTR y la confiabilidad, tanto los tiempos entre falla como el tiempo final de reparación se almacenan en una base de datos relacional, y son exportadas a archivos .csv

(ver figura 4.67) para facilitar la lectura y procesamiento de la data obtenida.

		id	impresora	Mantenimiento	Sistema	Falla	Estado
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	149	X350	Correctivo	Termico	Calentador no llega a temperatura	En proceso
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	150	X350	Correctivo	Termico	Calentador no llega a temperatura	Terminado
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	151	X350	correctivo	extrusion	boquilla tapada	En proceso
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	155	X350	correctivo	extrusion	boquilla tapada	Terminado

FIGURA 4.63: Tabla de base de datos con el registro de los mantenimientos correctivos realizados.

		id	marca_temporal	inspeccion_diaria
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	1	2020-09-30 00:51:11	realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	2	2020-09-30 00:51:18	realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	3	2020-09-30 00:51:20	realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	4	2020-09-30 00:51:56	realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	5	2020-09-30 01:20:03	realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	6	2020-10-19 23:27:37	Realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	7	2020-10-19 23:32:46	Realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	8	2020-10-21 01:00:16	Realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	9	2020-11-02 22:24:42	Realizada
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	10	2020-11-08 17:13:53	Realizada

FIGURA 4.64: Tabla de base de datos con el registro de las inspecciones previas realizadas.

		id	fecha	impresora	accion	observacion
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	1	2020-11-08 16:56:45	X350	Recambio tubo PTFE	el tubo anterior se encontraba "mordido" por el se...

FIGURA 4.65: Tabla de base de datos con el registro de las actividades no planificadas a realizar.

		id	pieza	tiempo_impression	filamento
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	2	X350_CONO190_030620.gcode	3251	701
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	3	X350_CONO190_030620.gcode	3251	701
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	4	X350_SOPORETETUBOS_TAAG_300720.gcode	1056	421
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	5	X350_SOPORETETUBOS_TAAG_300720.gcode	1056	421
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	6	X350_CONO190_300720.gcode	29592	826
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	7	X350_CONO190_300720.gcode	29592	826
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	8	RETRACTION_TEST	915	49
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	9	RETRACTION_TEST	915	49

FIGURA 4.66: Tabla de base de datos con el registro de las impresiones terminadas.

```
149,2020-11-03 23:29:24,Correctivo,Termico,Calentador no llega a temperatura,En proceso  
151,2020-11-03 23:48:50,correctivo,extrusion,boquilla tapada ,En proceso
```

FIGURA 4.67: Archivo csv obtenido de la base de datos.

Métricas

Para el control de la producción y el mantenimiento se calculan las siguientes métricas:

MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas): esta métrica se obtiene calculando la diferencia entre las marcas temporales de los registro de fallas, con unidad en horas.

```
1 var div=msg.payload.length;  
2 var sum=0;  
3 for (var i=0;i<msg.payload.length;i++){  
4     sum=msg.payload[i]+sum;  
5 }  
6 var prom=sum/div;  
7 msg.payload=parseInt(prom/60000);  
8 return msg;
```

TABLA 4.31: Código en Node-red para la obtención del tiempo medio entre fallas.

MTTR (Tiempo Medio Para Reparar): este promedio se calcula realizando la diferencia entre las marcas temporales de los registro de fallas y el término de la reparación, con unidad en horas.

```

1 msg1=[];
2
3 if (msg.payload[0].length==msg.payload[1].length){
4     for (var i=0;i<msg.payload[0].length;i++){
5         var a=msg.payload[0][i];
6         var b=msg.payload[1][i];
7         diff=b-a;
8         msg1.push(diff);
9
10    }
11
12    msg.payload=msg1;
13
14    return msg;
15} else {
16    return null
17}
18
19 -----
20
21 var div=msg.payload.length;
22 var sum=0;
23
24 for(var i=0;i<msg.payload.length;i++){
25     sum=msg.payload[i]+sum;
26 }
27 var prom=sum/div;
28 msg.payload=prom/60000;
29 return msg;

```

TABLA 4.32: Código en Node-red para la obtención del tiempo medio para reparar

Confiabilidad: el cálculo de la confiabilidad se realiza dividiendo el tiempo medio entre fallas por la suma del tiempo medio entre fallas y el tiempo medio para reparar.

$$R = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100 \quad (4.2)$$

```

1 msg.payload=(msg.payload[0]/(+msg.payload[0]+msg.payload[1]))*100;
2 return msg;

```

TABLA 4.33: Código en Node-red para la obtención de la confiabilidad.

Filamento Impreso: la cantidad de filamento impreso se obtiene multiplicando el volumen del filamento ocupado (diámetro 1,75 mm) en una pieza por la densidad

promedio del plástico utilizado por defecto (PLA+).

$$m = 1,24 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot \frac{\pi \cdot 0,175^2}{4} \cdot l \quad (4.3)$$

```
1 | INSERT INTO terminadas (pieza, tiempo_impresion, filamento) VALUES (%s,%s,%s),(%s,%s,%s)
   pieza, tiempo_impresion, filamento*1.24*3.14*0,175*0,175/4)
```

TABLA 4.34: Query Mysql para la obtención de filamento impreso.

Tiempo total de impresión: el tiempo total de impresión se obtiene sumando la columna de los tiempos individuales de impresión caracterizados en la tabla de la base de datos.

```
1 | SELECT SUM(tiempo_impresion) FROM terminadas
```

TABLA 4.35: Query Mysql para la obtención del tiempo total de impresión.

Piezas canceladas: la cantidad de piezas canceladas resulta de contar todas las filas en la tabla de base de datos de piezas canceladas.

```
1 | SELECT COUNT(tiempo_impresion) FROM canceladas
```

TABLA 4.36: Query Mysql para la obtención de la cantidad total de piezas canceladas.

Piezas terminadas: la cantidad de piezas terminadas resulta de contar todas las filas en la tabla de base de datos de piezas terminadas.

```
1 | SELECT COUNT(tiempo_impresion) FROM terminadas
```

TABLA 4.37: Query Mysql para la obtención de la cantidad total de piezas terminadas.

4.5.8 Implementar y testear

Una vez terminado el desarrollo tanto de la lógica como de la interfaz de usuario, se inicia la implementación y testeo de la aplicación. Esta se realiza en el taller de impresión de la empresa, iniciando la recopilación de datos y monitoreo en vivo de una máquina. En primer lugar, se muestra el dashboard inicial (ver figura 4.68, que permite un fácil y rápido control del mantenimiento diario, mostrando una serie de pasos para considerar esta acción como realizada. Asimismo, se muestra en vivo la hora y fecha de la última acción previa a la utilización de la máquina, así como el estado actual. La siguiente pestaña de la aplicación considera el registro y control del mantenimiento correctivo, sistematizando el registro según la impresora, el tipo de mantenimiento a registrar, el subsistema en que se encuentra la falla, y una descripción de la falla. En la misma página mostrada en la figura 4.69 existe una tabla donde se registra, además de los datos anteriores, la marca temporal en la que el operario inicia la operación de mantenimiento correctivo y en la que este finaliza. También existe la posibilidad de anotar acciones no planificadas, como el recambio de alguna pieza o una revisión que no exista en las inspecciones previas, o que no se considere una acción correctiva. En la barra de navegación existe un link directo al panel de control de Octoprint (figura 4.71), donde el operario realiza todo lo relacionado al proceso de impresión, desde cargar un archivo para su fabricación, como órdenes de precalentamiento de boquilla y cama. El monitoreo de la condición y la obtención de métricas para el mantenimiento se condensan en el dashboard de la figura 4.72. Aquí, se muestra el estado actual de la máquina, temperaturas de boquilla y cama, estado de la conexión, progreso de la impresión actual, tiempo medio entre fallas y tiempo medio para reparar, confiabilidad, piezas impresas, tiempo total de impresión, filamento extruido, piezas terminadas y piezas canceladas.

OCTOCMMS ▾	MÉTRICAS	OctoPrint X350	OctoPrint X400	OctoPrint PRUSA MK3	OctoPrint ENDER 3
Inspección previa a utilizar la máquina					
<ul style="list-style-type: none">• Alimentación Eléctrica: Revise la conexión de la fuente de alimentación de la máquina• Conexión a OCTOCMMS: Revise su conexión a internet y que la máquina esté debidamente conectada al software• Sistema Mecánico: desabilite motores y nueva naturalmente el caño extrusor y cama según corresponda• Nivelación de la cama: desabilite los motores y verifique distancia vertical entre boquilla y cama. Esta debe ser aproximadamente la mitad del diámetro de la boquilla y paralela al plano de desplazamiento x-y• Sistema térmico: Revise que boquilla y cama estén limpias y sin restos de filamento extruido, y que la cama no tenga restos de plástico o superficies de apoyo. Precaliente desde Octoprint y verifique que llegue correctamente a la temperatura configurada• Sistema de extrusión: una vez precalentada la boquilla, extruir filamento y verificar uniformidad del flujo					
		Listo			
			Última revisión previa	Estado	
			2020-11-08 17:13:53	Realizada	

FIGURA 4.68: Dashboard Inicial del programa de gestión del mantenimiento

OCTOCMMS	METRICAS	OctoPrint X350	OctoPrint X400	OctoPrint PRUSA MK3	OctoPrint ENDER 3
Registro de falla					
impresora	mantenimiento	Sistema	Falla		
Iniciar mantenimiento correctivo					
Terminar Mantenimiento					
Última Acción de Mantenimiento					
Marca Temporal	Impresora	Mantenimiento	Sistema	Falla	Estado
2020-11-03 23:57:30	X350	correctivo	extrusión	boquilla tapada	Terminado
2020-11-03 23:48:50	X350	correctivo	extrusión	boquilla tapada	En proceso
2020-11-03 23:37:55	X350	Correctivo	Térmico	Calentador no llega a temperatura	Terminado
2020-11-03 23:29:24	X350	Correctivo	Térmico	Calentador no llega a temperatura	En proceso
					Eliminar registro

FIGURA 4.69: Página de registro y control de mantenimientos correctivos.

OCTOCMMS ▾	METRICAS	OctoPrint X350	OctoPrint X400	OctoPrint PRUSA MK3	OctoPrint ENDER 3								
Planificación anexa													
impresora													
Actividades planificadas en operación													
<table><thead><tr><th>Fecha</th><th>Impresora</th><th>Acción</th><th>Observación</th></tr></thead><tbody><tr><td>2020-11-08 16:56:45</td><td>X350</td><td>Recambio tubo PTFE</td><td>el tubo anterior se encontraba "mordido" por el seguro</td></tr></tbody></table>						Fecha	Impresora	Acción	Observación	2020-11-08 16:56:45	X350	Recambio tubo PTFE	el tubo anterior se encontraba "mordido" por el seguro
Fecha	Impresora	Acción	Observación										
2020-11-08 16:56:45	X350	Recambio tubo PTFE	el tubo anterior se encontraba "mordido" por el seguro										

FIGURA 4.70: Página de registro y control de acciones no planificadas.



FIGURA 4.71: Panel de control de Octoprint.

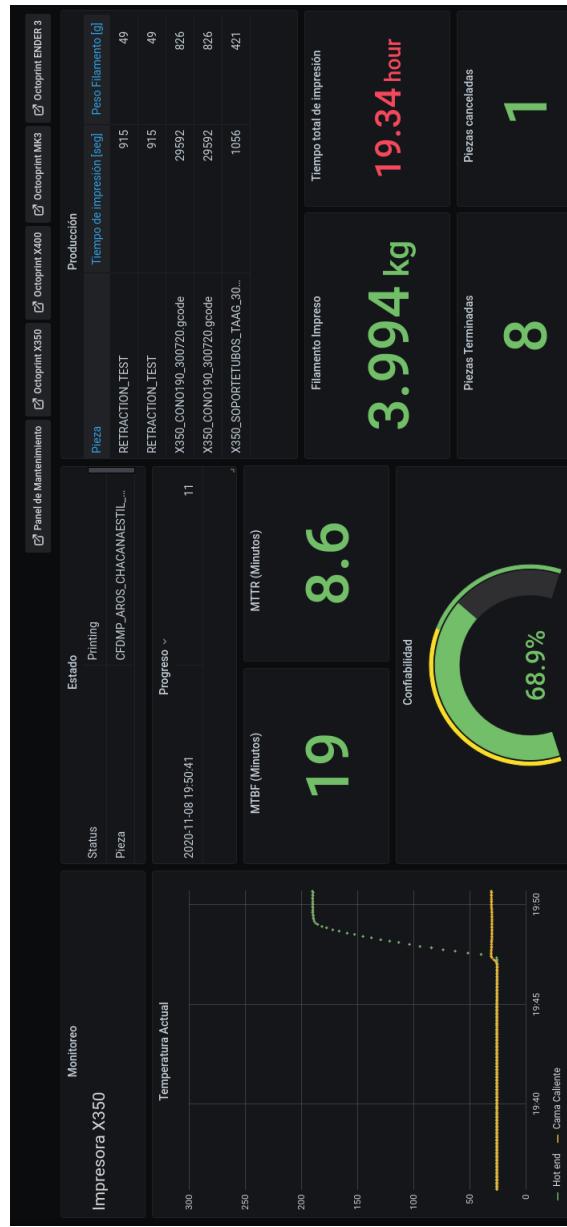


FIGURA 4.72: Dashboard de indicadores y monitoreo de la condición.

Luego de realizar la primera prueba en entorno de producción se realizan las siguientes observaciones:

- El primer prototipo no cumple con una interfaz amigable, pues existe confusión en el ingreso manual de datos correspondientes al mantenimiento correctivo. Por ejemplo, en cada falla ocurrida se debe escribir el nombre de

la impresora, el tipo de mantenimiento, el sistema y la falla.

- La información y acciones de mantenimiento preventivo aparecen muy desordenadas en el espacio de la página. Esto provoca que el usuario observa poca información en un espacio muy grande.

Para resolver a cada punto observado en el testeo de la aplicación, y a modo de segunda iteración, se propone realizar mejoras en el diseño visual e ingreso de la información. En este sentido, la etapa de prototipado se reinicia en un punto avanzado del proceso, puesto que el cambio a realizar no impacta de mayor manera en la lógica de la aplicación. En primer lugar, se reconfigura y redistribuye el dashboard de la aplicación, para que el usuario pueda encontrar toda la información respecto a los mantenimientos autónomos, semanales y mensuales, como se muestra en la figura 4.73.

Por otra parte, para mantener la integridad de los datos en el proceso de ingreso de mantenimientos correctivos, se elige la opción de crear una lista desplegable para cada ítem a revisar. Realizar esta acción permite una estandarización en el ingreso de la información dado que limita y contextualiza cada dato de entrada a la aplicación. Las figuras 4.74 y 4.75 muestran los resultados del testeo de las mejoras realizadas.

OCTOCMMS ▾	METRICAS	OctoPrint X350	OctoPrint X400	OctoPrint PRUSA MK3	OctoPrint ENDER 3		
Inspección previa a utilizar la máquina							
		<p>Alimentación Electrica: Revise la conexión de la fuente de alimentación de la impresora.</p> <p>Conexión a OCTOCMMS: Revise su conexión a internet y que el módem este debidamente conectada al software.</p> <p>Sistema Mecanico: Deshabille motores y movera manualmente el carro extrusor y cama según corresponda</p> <p>Nivelación de la cama: deshabille los motores y verifique distancia vertical entre boquilla y cama. Esta debe ser aproximadamente la mitad del diámetro de la boquilla y paralela al plano de funcionamiento X-Y</p> <p>Sistema termico: Revise que boquilla y cama estén limpias y sin resto de filamento extruido, y que la cama no tenga restos de plástico o superficies de apoyo. Precaliente desde Octoprint y verifique que llegue correctamente a la temperatura configurada.</p> <p>Sistema de extrusión: una vez precalentada la boquilla, extruir filamento y verificar uniformidad del flujo</p>	<p>Limpieza y lubricación: Limpie baras con papel absorbente e aplicar lubricante en el contacto de las baras con los rodamientos.</p> <ul style="list-style-type: none"> Limpieza de extrusor en caliente: Caliente el extrusor sobre un 20% de la temperatura configurada e inserte aguja limpialdora por la salida de la boquilla. Inserte el filamento y verifique que el flujo de material es uniforme y vertical 	<p>Última revisión semanal</p> <p>2020-11-15 20:14:13</p>	<p>Estado</p> <p>Realizada</p>	<p>Última revisión semanal</p> <p>2020-11-15 20:14:13</p>	<p>Estado</p> <p>Realizada</p>
Inspección Mensual							
		<p>Gabinete y placas: Desenrgánguez maquina, revise y limpia gabinete de placa controladora con alcohol isopropílico.</p> <p>Limpieza de extrusor en caliente: Caliente el extrusor sobre un 20% de la temperatura configurada e inserte aguja limpialdora por la salida de la boquilla. Inserte el filamento y verifique que el flujo de material es uniforme y vertical</p> <ul style="list-style-type: none"> Revisar estado de conexiones en cables de termistor y calentador 	<p>Última revisión mensual</p> <p>2020-11-15 20:14:45</p>	<p>Estado</p> <p>Realizada</p>	<p>Última revisión mensual</p> <p>2020-11-15 20:14:45</p>	<p>Estado</p> <p>Realizada</p>	

FIGURA 4.73: Segunda iteración para dashboard Inicial del programa de gestión del mantenimiento.



FIGURA 4.74: Segunda iteración para ingreso de datos de impresoras en mantenimiento correctivo.

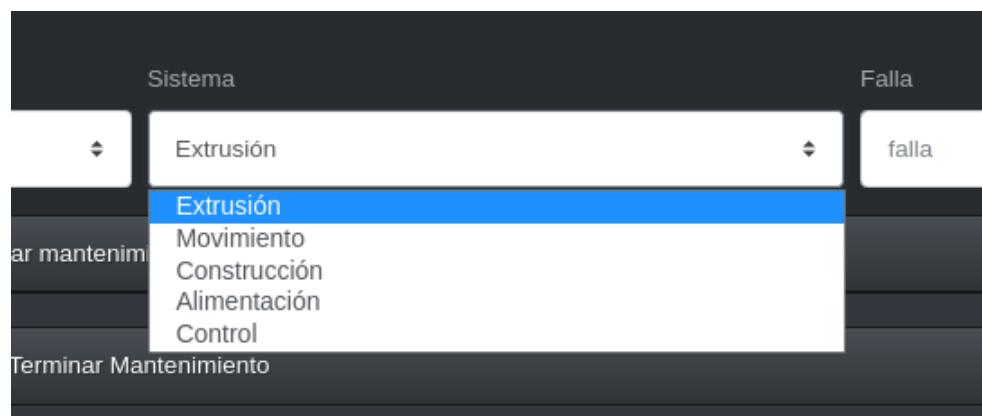


FIGURA 4.75: Segunda iteración para ingreso de datos de mantenimiento correctivo.

CONCLUSIONES

En términos generales, se puede decir que se han cumplido los objetivos propuestos para el presente trabajo de título, relacionados al diseño de una aplicación que sirva de asistente para la gestión de la producción y el mantenimiento correctivo y preventivo de impresoras 3D FDM. Se debe mencionar que, durante todo el proceso de mantenimiento basado en la confiabilidad se obvió la impresora *Ender 3*, debido a que fue adquirida y puesta en marcha durante la realización de este trabajo, por tanto el registro de fallas es mínimo y no se pueden establecer conclusiones estadísticas con tan pocos datos. En primer lugar, se evalúa la criticidad de los equipos de la granja de impresión 3D realizando el análisis de falla según el diagrama de Pareto para tres de las cuatro impresoras del taller. Debido a que esta técnica pone énfasis en una sola variable, y como la cantidad de máquinas se limita a cuatro impresoras, se utiliza para identificar qué fallas son las que más se repiten en cada equipo. No obstante, también se puede utilizar para encontrar aquellas impresoras que requieren mayor tiempo de reparación, puesto que el levantamiento de información considera los tiempos aproximados de reparación. La aplicación de esta herramienta muestra que la mayor frecuencia de fallas se encuentra en la extrusión deficiente o nula de filamento, seguido de la adhesión de las piezas a la superficie de impresión. Para elaborar el análisis de criticidad se evalúan aspectos como el impacto a la seguridad, el costo de reparación, la frecuencia de las fallas y el costo operacional implicado. Según las ponderaciones propuestas,

se obtiene que la impresora X350 German RepRap es el equipo con mayor criticidad, según el periodo comprendido entre mayo y octubre de 2020. En función de este resultado, se caracteriza y elabora la ficha técnica de la máquina, explicitando sus componentes. Luego, se delimita el contexto operacional del funcionamiento de la granja de impresión, tanto la capacidad instalada como los factores climáticos que interceden en la producción. La identificación de las conexiones lógicas o secuenciales del funcionamiento de una impresora 3D se realiza a través de un diagrama de interrelaciones funcionales, donde se identifican a lo menos cinco subsistemas: alimentación, control, construcción, movimiento y extrusión, todos con sus respectivas entradas y salidas. Se debe notar que, cada interrupción lógica entre estos subsistemas implica una falla en el sistema de la impresora, por tanto, para determinar estas fallas se realiza el método de árbol de fallas. Esta información da a lugar a la realización de un análisis de modos y efectos de falla, el cual permitió una descripción detallada del equipo, tanto en sus componentes, funciones, modos y efectos de las fallas. Los resultados obtenidos de este análisis están directamente relacionados con la creación e implementación de los planes de mantenimiento, y son el punto de partida para establecer las planillas de decisión a partir del diagrama del mismo nombre. Las decisiones respecto a las fallas establecen mantenimientos autónomos centrados en la inspección diaria de la máquina, mantenimientos preventivos semanales y mensuales, y mantenimientos a condición. Consecutivamente, se estudia la confiabilidad de los equipos del taller a través de un análisis de Weibull, el cual considera el historial de fallas de cada equipo. El análisis se realiza por medio de dos técnicas contrastadas, la linealización de la función de distribución acumulativa, y la utilización de librerías de análisis matemático en lenguaje *python*. Los parámetros obtenidos entregan información respecto a la vida estimada del elemento en estudio, como la duración para el 63,2 % de los casos. Se debe

destacar que la aplicación correcta del análisis de Weibull está enfocada en las fallas de cada subsistema o componente de una máquina, dado que, por ejemplo, la esperanza de vida de componentes como una boquilla no es la misma que los rodamientos lineales del conjunto extrusor; asimismo, la cantidad de datos obtenidos en el levantamiento de datos no entrega la información necesaria, puestos que son insuficientes para un análisis de este tipo. No obstante, el resultado obtenido por medio de este análisis si puede ser útil para estimar la confiabilidad y la tasa de fallos del sistema en general, y por tanto, permite ajustar la frecuencia de las revisiones, inspecciones y planes de mantenimiento. La elaboración del plan de mantenimiento se separa en inspección diaria/proactiva, y mantenimientos preventivos semanales, mensuales y bimestrales. La distinción entre estas actividades se desprenden tanto del análisis de modo y efectos de falla, como del análisis de confiabilidad. En la misma línea, como este trabajo se enfoca en el diseño de una aplicación web, se busca registrar la mayor cantidad de información disminuyendo la interacción entre el usuario y el ingreso de datos, puesto que su mala utilización puede falsear o volver inutilizable la información respecto al mantenimiento y las fallas. Una vez realizado el mantenimiento basado en la teoría de la confiabilidad, se aplica la metodología de Design Thinking para el desarrollo de la aplicación web. Se elige esta metodología puesto que permite situar al operador de una granja de impresión 3D en el centro del desarrollo, en función de la mejora de un proceso conocido a través de una solución innovadora y enfocada en usuario. Al plantear la situación actual, se observa que una aplicación para el control y monitoreo de impresoras puede reducir el tiempo y las decisiones que el operario debe realizar para imprimir una pieza y verificar el estado de la producción, ya sea reduciendo los escenarios u optimizando la cantidad de ventanas abiertas en el computador. Dentro de las fases de Design Thinking, el empatizar permite obtener los beneficiarios directos o indirectos de la solución

propuesta, teniendo como centro al usuario operario; en el mismo sentido, el mapa de experiencias en etapas definidas da como resultado oportunidades de mejora respecto a la valoración que el usuario otorga a cada paso que debe dar para imprimir una pieza. En lo que respecta a la investigación se pudo determinar que, en lo relacionado a los referentes, no existe una aplicación o software enfocada en el mantenimiento de impresoras, sino algunas implementaciones que, de todas formas, implican que toda la obtención de datos se realiza por medio del administrador de la plataforma de mantenimiento o producción. Por tanto, la recopilación de datos por medio de la automatización de consultas a la API de Octoprint resulta un criterio de innovación con respecto a los referentes estudiados. Gracias a la amplitud de las consultas posibles y disponibles en la documentación de Octoprint, se determina que las variables implicadas en el proceso y que permiten obtener indicadores pueden ser obtenidas a través de la programación de la aplicación web, dentro de los que se encuentran el estado de las piezas en impresión, estado de la impresora, progreso de la operación, piezas canceladas, piezas terminadas, tiempo de impresión y volumen de filamento. Todas estas variables, presentadas al usuario y contrastadas entre sí, le permiten tomar mejores decisiones respecto a si se necesitan realizar ajustes al proceso de configuración de una impresión, adquirir repuestos en el mediano plazo, comprar nuevos filamentos, entre otras. Por otra parte, se verifica la compatibilidad entre el hardware, software y protocolos de comunicación. Esto pues Octoprint puede ser fácilmente instalada en la placa Raspberry Pi, así también el servidor de programación de flujos Node-Red, la interfaz Grafana, el servidor Flask basado en python, y la plataforma CRUD de bases de datos. La estructura de las bases de datos y su exportación a formato csv permitió comprender que las variables implicadas en el registro de mantenimientos correctivos y acciones no planificadas corresponden a la marca temporal en la que se realiza un mantenimiento, el

sistema donde ocurre y su estado de inicio o término. Así, el tiempo medio entre fallos se obtiene como la división de la diferencia de las marcas temporales de dos inicios de mantenimiento correctivo consecutivos, entre la cantidad de fallos ocurridos. En la misma linea, el tiempo medio para reparar resulta del cociente entre la diferencia de marcas temporales de inicio y término de un mismo evento, y la cantidad de fallos ocurridos. Notar que, para que esta última relación matemática tenga una interpretación correcta, un evento de mantenimiento correctivo debe estar obligatoriamente terminado, de forma que la resta entre las dos marcas temporales sea efectiva; en caso contrario, la operación matemática tiene como minuendo una cantidad nula. Pues bien, la utilización de Node-red permite realizar funciones que cumplan esa condición, haciendo confiable el cálculo y su resultado. Siguiendo con el establecimiento de relaciones matemáticas, la confiabilidad se obtiene como una función entre el tiempo medio entre fallas y el tiempo medio para reparar, y su resultado se representa como un porcentaje. Este indicador se considera importante en una granja de impresoras 3D, en la medida que permite al operario priorizar impresoras para una producción específica o elegir las que tengan mejor confiabilidad para producciones de alto volumen. Finalmente, las funciones que permiten la gestión de la data y su transformación en información se realiza a través de Node-red, en simultáneo con python. Ambos lenguajes y/o paradigmas de programación se ven unidos a través de las bases de datos Mysql, y las bases de datos de series de tiempo Influxdb. Se debe mencionar que todas las herramientas de programación utilizadas en este trabajo son de código abierto, donde su código fuente está disponible en repositorios de internet.

BIBLIOGRAFÍA

1. ISO. *ISO/ASTM 52900:2015 Additive manufacturing-General principles-Terminology*. 2015.
2. BERCHON, Mathilde y LUYT, Bertier. *La impresión 3D: Guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes profesionales, artistas y manitas en general*. Editorial Gustavo Gill, 2014.
3. 3DHUB. *What is 3D printing? The definitive guide* [Recuperado de: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>]. 2018.
4. JORQUERA, Adam. *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2016.
5. LEAO, Lucas. *CAD vs CAE vs CAM: What is the Difference?* [Recuperado de: <https://www.e3seriescenters.com/modern-electrical-engineering-blog/cad-vs-cae-vs-cam-what-is-the-difference/>]. 2017.
6. RENSTROM, Joelle. *Monkey See, Monkey Make* [Recuperado de: <https://couldthishappen.com/2012/02/monkey-see-monkey-make/>]. 2012.
7. MAXEY, Kyle. *Infographic: The History of 3d Printing* [Recuperado de: engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/6262/Infographic-The-History-of-3D-Printing.aspx]. 2013.
8. 3DSOURCED. *The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2020* [Recuperado de: engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/6262/Infographic-The-History-of-3D-Printing.aspx]. 2020.
9. TORRE, Roman. *Apuntes sobre el proyecto RepRap* [Recuperado de: <http://www.laboralcentrodearte.org/es/files/2013/bloglaboral/apuntes-sobre-el-proyecto-reprap>]. 2013.
10. ALL3DP. *The Official History of the RepRap Project* [Recuperado de: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>]. 2016.
11. ALEXANDER, Donovan. *Start Your Own 3D Printing Business: 11 Interesting Cases of Companies Using 3D Printing* [Recuperado de: <https://interestingengineering.com/start-your-own-3d-printing-business-11-interesting-cases-of-companies-using-3d-printing>]. 2019.

12. VALDIVIESO, Carlota. *Gartner Hype Cycle 2019: 3D Printing Predictions* [Recuperado de: <https://www.3dnatives.com/en/gartner-hype-cycle-3dprintingpredictions-150120194/>]. 2019.
13. ASTM. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. 2013.
14. DUDEK, Piotr. FDM 3D PRINTING TECHNOLOGY IN MANUFACTURING COMPOSITE ELEMENTS. *Archives Of Metallurgy and Materials*. 2013, vol. 58.
15. BOURNIAS, Alkaios. *Introduction to FDM 3D printing* [Recuperado de: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>]. 2017.
16. 3DSOURCED. *The 4 Types of FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar and Scara)* [Recuperado de: <https://3dsourced.com/3d-printers/types-of-fdm-3d-printer-cartesian-delta/>]. 2020.
17. TAKAMORI, Ryoma. Growable Robot with Additive-Additive-Manufacturing. En: *Conference on Human Factors in Computing*. 2018.
18. SAYGIN, Ahmet; CAKAN, Abdulla y TINKIR, Mustafa. Modeling And Position Control Of Scara Type 3D Printer. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGY RESEARCH*. 2016.
19. ISO. *Petroleum , petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. 2016.
20. LEÓN, Félix Gómez de. *Tecnologías del Mantenimiento Industrial*. Universidad de Murcia. Servicio de Publicaciones, 1998.
21. GARRIDO, Santiago García. *Organización y Gestión Integral el Mantenimiento*. Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2010.
22. FERNÁNDEZ, Francisco González. *Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. Fundación Confemetal, 2005.
23. PALENCIA, Oliverio García. *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial*. Ediciones de la U, 2012.
24. SHENOY, Dinesh. *Maintenance Resources Management Adapting MRP*. Taylor & Francis e-Library, 2005.
25. ARUN, Louis. *Proposal for the fourth generation of maintenance and the future trends & challenges in production*. 2012. Tesis de maestría. Mälardalen University Sweden.
26. HIDE, Malcolm. Fourh Generation Maintenance. *Strategic Maintenance Ltd*. 2013.
27. HOULE, Louis. Fourth-Generation Maintenance. *Technical Quarterly*. 2016.

28. JIMENEZ, Fernando. *Mantenimiento preventivo de sistemas de automatización industrial*. 2015.
29. ISO. *Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines*. 2018.
30. SIFONTE, Jesús. *Norma SAE JA1011 – Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)* [Recuperado de: <http://www.pdmtechusa.com/criterios-evaluacion-rcm/>]. 2017.
31. SAE. *SAE JA1011: Evaluation Criteria for Reliability-Centred Maintenance(RCM) Processes*. 1999.
32. MESA, Dairo. *La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento*. Scientia et Technica, 2006.
33. CANOS, Jose; LETELIER, Patricio y PENADES, Carmen. *Metodologías Agiles en el Desarrollo de Software*. 2012. Informe técnico. DSIC-Universidad Politecnica de Valencia.
34. MUELLER, Christian. *Handbook of Design Thinking. Tips and Tools for how to design thinking*. 2018.
35. AMBROSE, Gavin y HARRIS, Paul. *Design Thinking*. 2010.
36. ALVAREZ, Miguel. *Que es la programacion orientada a objetos* [Recuperado de: <https://desarrolloweb.com/articulos/499.php>]. 2019.
37. IZQUIERDO, Luis. *Introduccion a la programación orientada a objetos* [Recuperado de: <http://luis.izqui.org/resources/ProgOrientadaObjetos.pdf>]. 2013.
38. CODINA, Luis. Hojas de estilo. *El profesional de la informacion*. 2012, vol. 11, n.º 4.
39. SPIP. *Introduccion a las hojas de estilo* [Recuperado de: <https://www.spip.net/esarticle2500.html>]. 2012.
40. CAMPS, Rafael; CASILLAS, Luis; COSTAL, Dolors; GIBERT, Marc; MARTIN, Carme y PEREZ, Oscar. *Bases de Datos*. Ed. por •. Fundacio per a la Universita Oberta de Catalunya, 2005.
41. MARINI, Emiliiano. *El modelo Cliente Servidor*. 2012.
42. MERINO, Marcos. *Que es una API y para que sirve* [Recuperado de: <https://www.ticbeat.com/tecnologias/que-es-una-api-para-que-sirve/>]. 2014.
43. ADMINISTRACIONES PUBLICAS, Ministerio de Hacienda y. *Buenas Practicas en el diseño de APIS y Linked Data*. 2019.
44. GARCIA, Joaquin. *Que es una placa SBC* [Recuperado de: <https://www.hwlibre.com/que-es-una-placa-sbc/>]. 2014.
45. HALFACREE, Gareth. *Raspberry Pi: User Guide*. Ed. por KING, Phill. Raspberry Pi Trading Ltd., 2018.

46. FERA, Marcello; MACCHIAROLI, Roberto; FRUGGIERO, Fabio y LAMBIA-SE, Alfredo. Production Management Fundamentals for Additive Manufacturing. *InTechOpen*. 2018.
47. CRUZ, Bernardo. *Aplicación de modelo RCM bajo las normas SAE JA1011 y JA1012 para mejorar la gestión de mantenimiento en la máquina flexoplegadora de cartón Martin 618* [Universidad de Santiago de Chile]. 2018.
48. ARANSYASH, Dedy; ROSA, Francesco y COLOMBO, Giorgio. Smart Maintenance: A Wearable Augmented Reality Application Integrated with CMMS to Minimize Unscheduled Downtime. *Computer-Aided Design and Applications*. 2019.
49. UNIT. *Herramientas para la Mejora de la Calidad*. Instituto uruguayo de normas técnicas, 2009.
50. GERMAN-REPRAP. *X350 3D-printer quick start guide*. 2016.
51. PIQUÉ, Tomas. *NTP 333: Análisis Probabilístico de riesgos: Metodología del Árbol de fallos y errores*. 1998. Informe técnico. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
52. SAE. *SAE JA1012: Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)*. 2002.
53. CORREA, Angie. *Taller Pruebas de bondad de ajuste* [Recuperado de: <https://www.rpubs.com/angiepcorreas/391417>]. 2018.
54. MARCHANTE, Alicia. *OctoPrint, la aplicación para controlar tu impresora 3D* [Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/octoprint-aplicacion-control-impresora-210820202/>]. 2020.
55. OLANO, Jimmy. *Qué es Grafana y cómo podemos emplearlo para la monitoreación* [Recuperado de: <https://pandorafms.com/blog/es/que-es-grafana/>]. 2019.
56. SANCHO, Pablo. *Fundamentos de Node-Red* [Recuperado de: <https://www.techedgegroup.com/es/blog/fundamentos-node-red/>]. 2019.
57. VELASCO, Ruben. *Cómo instalar y configurar un servidor MySQL y PHPMyAdmin* [Recuperado de: <https://www.redeszone.net/2017/03/18/instalar-configurar-servidor-mysql-phpmyadmin/>]. 2017.
58. MUÑOZ, Jose. *Qué es Flask* [Recuperado de: <https://openwebinars.net/blog/que-es-flask/>]. 2017.
59. LEIS, Christian. *Cómo hacer un Brainstorming y generar ideas creativas para tu negocio* [Recuperado de: <https://aulacm.com/guia-hacer-brainstorming-generar-ideas-creativas/>]. 2020.

APÉNDICE

4.6 REGISTRO Y LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

IMPRESORA	INIC REPARACION	TERMINO REPARACION	FALLA	TIEMPO REPARACIÓN[hrs]	ACCIÓN
X350	09/03/20	09/03/20	No extruye filamento	0,723	Limpieza con acetona
X400	13/03/20	13/03/20	Se despegan piezas de la cama		reacondicionamiento y sellado de cámara tempearada
X350	12/05/20	12/05/20	Cable cortado ventilador de capa	1,42	Se solda cable y se conecta
X400	25/05/20	25/05/20	No extruye filamento	2,25	Limpieza física y cambio de boquilla
X350	03/06/20	03/06/20	No extruye filamento		2 Limpieza física y cambio de boquilla
X350	03/06/20	03/06/20	Termistor desacoplado	1	Cambio de tornillo y acople de termistor
X400	15/06/20	15/06/20	No se adhieren piezas a la cama	0,12	se agrega pegamento a la superficie
PRUSAMK3	16/06/20	16/06/20	eje x desnivelado	0,25	Se utiliza asistente nivelación en eje Z
X400	30/06/20	30/06/20	No extruye filamento	0,15	Limpieza de engrane de extrusión
X350	13/07/20	13/07/20	cama desnivelada	0,5	Nivelación de cama con pernos
X400	14/07/20	14/07/20	No se adhieren piezas a la cama	0,2	se limpia la superficie y se agrega pegamento
PRUSAMK3	20/07/20	20/07/20	Error "HOT BED ERROR"	1	Se revisan conexión de termistores
X350	21/07/20	21/07/20	No extruye filamento	1	Limpieza con acetona
PRUSAMK3	21/07/20	21/07/20	Error "HOT BED ERROR"	0,25	Se calienta cama con pistola de calor
X400	22/07/20	22/07/20	No extruye filamento	0,5	Limpieza de engrane de extrusión y boquilla con aguja
X350	23/07/20	23/07/20	No reconoce SD por colisión de extru	0,5	se reconecta pantalla LCD
ENDER3	27/07/20	27/07/20	No extruye filamento	1	Se desarma extrusor y se corrige la inserción de tubo PTFE
X350	27/07/20	27/07/20	Termistor desacoplado	0,5	Se revisa y se reconecta a los cables de la placa
X350	06/08/20	06/08/20	Primera capa se despega	0,1	Nivelar cama
X400	10/08/20	10/08/20	Ruido ventilador en fuente de poder	1,5	Se recambia el ventilador
X400	12/08/20	12/08/20	Correa X con poca tensión	0,5	Se tensa la correa
X350	19/08/20	19/08/20	No extruye filamento	0,5	Limpieza de garganta con aguja
X350	26/08/20	26/08/20	No se adhieren piezas a la cama	0,1	calibrar cama con tornillos inferiores
X400	26/08/20	26/08/20	No extruye filamento	1	desamar y limpiar boquilla

FIGURA 4.76: Registro de fallas en taller de impresión 3D.

PRUSAMK3	1/9/20	1/9/20	Extrusor bloqueado con plástico		2,5	Se desarma extrusor y se reemplaza calentador, termistor y boquilla
X350	09/09/20	11/09/20	Rotura de cama		6	Se cubre la superficie con macilla
PRUSAMK3	9/9/20	9/9/20	No extruye filamento		0,5	Extraer filamento y limpieza de garganta con aguja
X400	11/09/20	11/09/20	Ruido en sistema electrónico		4	se limpia fuente de poder y ventiladores
PRUSAMK3	12/09/20	12/09/20	Colisión de boquilla con cama caliente		0,1	Calibración de sensor capacitivo y nivelación automática
PRUSAMK3	14/09/20	15/09/20	Rotura de cubierta PEI de cama		3	Limpieza con acetona y recambio de cubierta
ENDER3	15/09/20	15/09/20	No extruye filamento		0,5	Se limpia plástico adherido a rueda de extrusión
X350	16/09/20	16/09/20	Rotura de cama		5	Se limpia y agrega macilla
X400	22/09/20	22/09/20	Rotura de cubierta PEI de cama		1	se pegan superficies rotas con pegamento y se aplica calor con pistola
X350	24/09/20	24/09/20	No se adhieren piezas a la cama		0,25	Limpiar cama con agua y agregar pegamento
X350	30/09/20	30/09/20	No extruye filamento		0,3	Se corrige valor de retracción y se limpia boquilla
PRUSAMK3	5/10/20	5/10/20	No extruye filamento		0,45	Limpieza de rueda extrusora

FIGURA 4.77: Continuación de registros de fallas en taller de impresión 3D.

4.7 ANÁLISIS DE WEIBULL

Ranking	TEF	Rango Medio	Ln(TEF)	Ln(Ln(1/(1-RM)))
1	1	0,049	0,000	-2,9991
2	2	0,118	0,693	-2,0744
3	4	0,188	1,386	-1,5720
4	6	0,257	1,792	-1,2141
5	7	0,326	1,946	-0,9286
6	7	0,396	1,946	-0,6854
7	8	0,465	2,079	-0,4684
8	8	0,535	2,079	-0,2677
9	10	0,604	2,303	-0,0761
10	13	0,674	2,565	0,1130
11	14	0,743	2,639	0,3067
12	22	0,813	3,091	0,5152
13	39	0,882	3,664	0,7592
			26,183	

FIGURA 4.78: Tiempo entre fallas, rango medio y linealización de función para análisis de Weibull para impresora X350.

Ranking	TEF	Rango Medio	Ln(TEF)	Ln(Ln(1/(1-RM)))
1	2	0,067	0,6931	-2,663843085
2	8	0,163	2,0794	-1,72326315
3	11	0,260	2,3979	-1,202023115
4	14	0,356	2,6391	-0,8216665151
5	14	0,452	2,6391	-0,5085953937
6	15	0,548	2,7081	-0,2303654447
7	16	0,644	2,7726	0,03292496191
8	19	0,740	2,9444	0,2990329319
9	21	0,837	3,0445	0,5939772167

FIGURA 4.79: Tiempo entre fallas, rango medio y linealización de función para análisis de Weibull para impresora X400.

Ranking	TEF	Rango Medio	Ln(TEF)	Ln(Ln(1/(1-RM)))
1	1	0,095	0,000	-2,3089
2	2	0,230	0,693	-1,3432
3	3	0,365	1,099	-0,7898
4	8	0,500	2,079	-0,3665
5	21	0,635	3,045	0,0082
6	34	0,770	3,526	0,3858
7	42	0,905	3,738	0,8579

FIGURA 4.80: Tiempo entre fallas, rango medio y linealización de función para análisis de Weibull para impresora Prusa MK2.

Pauta entrevista a trabajadores vinculados a la impresión 3D (gestión del mantenimiento)

Objetivos de la entrevista:

- Entender la visión del usuario (Operador de impresoras 3D), y cómo percibe y realiza la gestión actual del mantenimiento de impresoras 3D.
- Identificar como el funcionario realiza las tareas de mantenimiento de impresoras 3D.
- Identificar las necesidades del funcionario para entender cuales son las variables más importantes según su entorno para el correcto manejo del mantenimiento de impresoras 3D.

Introducción:

"Hola, mi nombre es _____ y soy memorista de la carrera de Ingeniería Civil Mecánica de la USACH. Para mi trabajo de título, me he visto en la necesidad de realizar un estudio para identificar posibles oportunidades de mejora en los sistemas de mantenimiento relacionados a impresoras 3D FDM. Por demás, toda información que nos proporciones es completamente confidencial y será utilizada solo con fines académicos.

Duración estimada: 15-20 minutos.

Formato de entrevista: Videollamada.

Sección de preguntas(Visión del usuario):

1. Háblame sobre ti ¿Cuál es tu ocupación o cargo?
2. ¿Qué tareas realizas en relación a la impresión 3D?
3. ¿Cuál es la importancia de tener un sistema de gestión del mantenimiento en impresoras 3D?

Sección de preguntas (sobre la gestión de reclamos u opiniones):

4. ¿Ha realizado usted mantenimiento a sus máquinas de impresión 3D?
5. ¿Ha tenido usted problemas con el mantenimiento de máquinas?
6. Si usted realiza tareas de mantenimiento ¿Mediante qué herramienta las gestiona?
7. ¿Realiza usted mantenimientos preventivos, o espera hasta que algún componente falle?
8. ¿Cómo realiza la clasificación de las fallas ocurridas?

FIGURA 4.81: Pauta de preguntas para entrevista personal.

9. ¿Le sería útil a usted, en sus procesos, realizar algún tipo de registro o

asistencia para el mantenimiento de impresoras 3D?

10. ¿Qué información cree usted que debiese tener el mantenimiento de las máquinas, y que puedan ser importantes en su negocio?

Sección de preguntas (en base a la conexión de canales)

11. ¿Tienen comunicación con proveedores de repuestos para sus máquinas?

12. ¿Usted utiliza softwares de código abierto, o tiene proveedores de software para la impresión 3D?

13. Alguna sugerencia o algo que quiera agregar.

FIGURA 4.82: Continuación de pauta de preguntas para entrevista personal

1 Mi nombre es Javier oliva, soy el cofundador de 3dlux y diseñador de profesión. La tarea que realzo es formar parte ocupando los cargos de administración, marketing y fabricación de piezas 3D. Si el cliente lo requiere, también pintar y otros post procesos.

3 bastante importante, porque básicamente estandariza todos los procesos de mantenimiento para tener un mayor control de la mantención; poder adelantarse a las fallas, poder mantener en óptimas condiciones la maquinaria, sobre todo cuando los plazos son cortos. Es importante trabajar lo más rápido posible, que las máquinas estén con un buen mantenimiento ahorra mucho tiempo, y cualquier falla en la mantención podría ser fatal.

4 Si he realizado mantenimiento. He tenido problemas en el sentido del desconocimiento de alguna pieza o como manejar alguna pieza electrónica que desconozco, ocupar repuestos, son algunos de los que he presentado a este momento.

5 No he ocupado ninguna herramienta para gestionar el mantenimiento.

6 En mayor porcentaje es esperar hasta que un componente falle, y el mantenimiento preventivo no está calendarizado, no existe una fecha definida, sino que el mantenimiento preventivo se realiza antes de un trabajo grande o muy largo, donde se necesita que la máquina esté bien en todo el proceso. Creo que la limpieza es lo más importante, de las varillas y que alguna pieza no tenga alguna falla.

7 No se hace algo como especificarla, sino que, si hay una falla, se arreglan todas de una vez. quizás, se puede identificar cual es el problema, si es eléctrico o mecánico y a partir de eso se puede dirigir como se hace el arreglo, es decir, si lo hace otra persona, si lo hago yo, dependiendo de las facultades de la persona.

9 Si, totalmente, más que nada teniendo un registro de todas las fallas históricas sería mucho más sencillo para facilitar la tarea a quienes se puedan agregar al grupo, y así tomar mejores decisiones; así también la asistencia, cómo poder reparar una pieza pues existiría un protocolo para seguir.

10. Detectar el tipo de falla, qué tipo de falla es si es eléctrica, mecánica, y en base a eso cuál es el procedimiento más óptimo para poder arreglarla, si se necesita cambiar el elemento completo o se puede arreglar, cuánto podría costar el repuesto, con qué proveedor encontrarlo.

11 Si tengo comunicación. Son varios del mercado local y, dependiendo de lo que sea y de las oportunidades de compra se consigue con uno o con otro. No hay un solo proveedor. Por parte de los programas, se ocupan programas gratuitos como Fusion360, Meshmixer, varios de tratamiento de modelo de 3D para poder editarlos o repararlos si tiene algún problema.

FIGURA 4.83: Respuestas de entrevista personal

12. en ese momento no tengo nada que agregar. Quiza, como soy el diseñador, que todo lo que vaya a registro de cómo reparar ciertas cosas sea gráficamente como super entendible o amigable con el usuario e intuitivo.

FIGURA 4.84: Continuación de respuestas de entrevista personal.