

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

**Plan De Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para
determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de
la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera**

**Para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería con Mención en
Gerencia e Ingeniería de Mantenimiento**

Elaborado por

Miguel Angel Ccapa Rojas

[000-0002-7110-2181](tel:000-0002-7110-2181)

Asesor

Dr. Gilberto Becerra Arévalo

[0000-0002-7576-9194](tel:0000-0002-7576-9194)

LIMA, PERÚ

2023

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi madre y a la memoria de mi padre, quienes con sus consejos y enseñanzas de vida forjaron mi carácter que me ha permitido alcanzar mis metas, también se lo dedico a mi familia por estar siempre presente en todo este trayecto de vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre quien es mi motor de vida y a la memoria de mi padre quien ha sido mi mayor inspiración.

A la vida, por enseñarnos que cada instante es valioso y que debemos vivirlo con gratitud y plenitud.

A los sueños porque nos permiten anhelar un futuro mejor y conseguir metas más allá de nuestras expectativas.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación evalúa y analiza la relación causa-efecto entre las variables "Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad" y "Determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera". Como consecuencia de este análisis, se encontró una falta de gestión de mantenimiento en dichos equipos que repercute directamente en la baja disponibilidad mecánica.

En este contexto, no se tiene conocimiento de cuáles son los equipos críticos para las distintas líneas de producción de la planta ni en qué etapa se encuentran en su ciclo de vida. Tampoco se realiza el análisis de los modos y efectos de las fallas. Solo se tiene un registro de cada parada de máquina. Este registro incluye la descripción de la falla, sus efectos y los tiempos entre cada falla. Sin embargo, esto no ha sido suficiente para contrarrestar las consecuencias negativas en términos de productividad, costos de reparación elevados, reducción de la vida útil de las máquinas, pérdida de calidad del producto y competitividad de la organización.

Ante esta situación, en la presente investigación, en primer lugar, se realizó una selección de datos de falla y, con el apoyo del Software MiniTab 19, se llevaron a cabo pruebas de bondad de ajuste de Anderson-Darling (A-D) a los tiempos entre fallas (TEF) de los equipos críticos y los tiempos característicos con sus correspondientes probabilidades. Como resultado, se pudo determinar en qué etapa del ciclo de vida se encontraba cada equipo, además de establecer el ciclo óptimo de intervención de mantenimiento basado en el análisis de confiabilidad realizado.

En segundo lugar, la aplicación de la metodología denominada Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) hizo posible el examen de las funciones principales y secundarias, la identificación de los modos de fallo, los efectos de dichos fallos y la clasificación de los riesgos de los equipos más críticos. Para establecer el plan de mantenimiento, se llevó a cabo un análisis AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Fallas), en el cual se seleccionaron los modos de fallo más representativos. Se llevaron a cabo análisis de los posibles fallos en la hoja de información y en la hoja de decisión, con el propósito de establecer las labores de mantenimiento y su respectiva frecuencia.

En conclusión, se logra el objetivo de determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera mediante el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Palabras claves: disponibilidad, confiabilidad, RCM, mantenimiento, gestión

ABSTRACT

The present research work evaluates and analyzes the cause-and-effect relationship between the variables "Reliability-Centered Maintenance Plan" and "Determining the Optimal Point of Equipment Interventions in the Wood Flooring Production Line of a Factory." As a result of this analysis, a lack of maintenance management in this equipment was identified, which directly impacts mechanical availability.

In this context, it is unknown which equipment is critical for the different production lines of the plant and at what stage they are in their lifecycle. Failure modes and effects analysis is not being conducted. There is only a record of each machine stoppage, including a description of the failure, its effects, and the time between each failure. However, this has not been sufficient to mitigate the negative consequences in terms of productivity, high repair costs, reduced machine lifespan, product quality, and organizational competitiveness.

Given this situation, in the current research, firstly, a selection of failure data was performed, and with the support of MiniTab 19 software, Anderson-Darling (A-D) goodness-of-fit tests were conducted on the times between failures (TBF) of critical equipment and their respective probabilities. As a result, it was possible to determine the lifecycle stage of each piece of equipment and establish the optimal maintenance intervention cycle based on the reliability analysis.

Secondly, the application of the methodology known as Reliability-Centered Maintenance (RCM) allowed for the examination of primary and secondary functions, the identification of failure modes, the effects of these failures, and the classification of risks for the most critical equipment. To establish the maintenance plan, a Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) was conducted, in which the most representative failure modes were selected. Analyses of potential failures were carried out in the information sheet and decision sheet to determine maintenance tasks and their respective frequencies.

In conclusion, the objective of determining the optimal point of equipment interventions in the wood flooring production line of a factory has been achieved through the design of a Reliability-Centered Maintenance plan.

Keywords: availability, reliability, RCM, maintenance, management.

Índice de Contenidos

CAPÍTULO I . Aspectos generales y metodológicos de la investigación	1
1.1 Antecedentes de la investigación	1
1.2 Identificación y Descripción del Problema de estudio	13
1.3 Formulación del problema	15
1.3.1 Problema principal	15
1.3.2 Problemas secundarios	15
1.4 Justificación e importancia de la investigación	16
1.5 Objetivos	17
1.5.1 Objetivo principal	17
1.5.2 Objetivos específicos	17
1.6 Hipótesis	18
1.6.1 Hipótesis general	18
1.6.2 Hipótesis específicas	18
1.7 Variables, dimensiones e indicadores	18
1.8 Unidad de análisis	20
1.9 Fuentes de información	20
1.10 Tipo y Nivel de investigación	20
1.10.1 Tipo de investigación	20
1.10.2 Nivel de investigación	21
1.11 Método de diseño de la investigación	21
1.12 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	21
1.13 Análisis y procesamiento de los datos	22
CAPÍTULO II . Marcos teórico y conceptual	23
2.1 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	23
2.1.1 Proceso de implementación del RCM	28
2.1.1.1 Formación del equipo natural de trabajo	29
2.1.1.2 Selección del sistema y definición del contexto operacional	31
2.1.1.3 Jerarquización y criticidad de los equipos	33

2.1.1.4	Análisis del contexto operacional	37
2.1.1.5	Desarrollo de análisis de modos y efectos de fallos (FMEA)	40
2.2	Fundamentos sobre confiabilidad.....	42
2.2.1	Indicadores básicos de análisis estadístico de fiabilidad (Variables continuas)	43
2.2.2	Función de confiabilidad	45
2.3	Confiabilidad de sistemas	47
2.3.1	Sistemas en serie	47
2.3.2	Sistemas en paralelo	48
2.4	Curva de la bañera o de Davies	49
2.5	Bondad de ajuste	52
2.6	Modelo de Weibull.....	53
2.7	Cálculo de Disponibilidad	56
2.8	Modelo de minimización de costos basado en reemplazo preventivo por tiempo (edad constante).....	59
2.9	Impacto económico de un modo de falla	60
2.10	Marco Conceptual	61
CAPÍTULO III . Desarrollo de la Investigación		63
3.1	Descripción general de la empresa	63
3.2	Análisis de criticidad de todo el sistema de producción.....	64
3.3	Descripción de línea de maquinado 01	66
3.4	Datos históricos de fallas en línea de maquinado 01.....	68
3.5	Pruebas de bondad de ajuste para determinar distribución estadística ..	69
01	Evaluación de etapa de ciclo de vida de equipos de la Línea de Maquinado	70
01	Determinación de disponibilidad mecánica de máquinas Línea Maquinado	73
3.8	Valoración de Confiabilidad de máquinas de Línea Maquinado 01	75
3.9	Aplicación de la metodología RCM a la Línea de Maquinado 01.....	77
3.9.1	Definición del equipo de trabajo.....	77

3.9.2	Selección del sistema	78
3.9.3	Definición del contexto operacional – Línea de Maquinado 01.....	79
3.9.4	Análisis de criticidad de los equipos de la Línea de Maquinado 01 ...	81
3.9.5	Evaluación de las fallas funcionales de los equipos críticos.....	82
3.9.6	Realización de Hoja de Información.....	82
3.9.7	Realización de Hoja de Decisión.....	88
3.9.8	Evaluación económica de cada modo de falla	90
3.10	Impacto económico por indisponibilidad de la Línea de Maquinado 01 96	
3.11	Determinación de punto óptimo de intervención	97
3.12	Diseño de plan de mantenimiento propuesto	103
CAPÍTULO IV . Discusión de resultados y contrastación de las Hipótesis		109
4.1	Análisis de los resultados de la investigación.....	109
4.2	Contrastación de las hipótesis formuladas	110
CONCLUSIONES		117
RECOMENDACIONES.....		118
REFERENCIAS		119
ANEXOS.....		121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Resultados de parámetros de confiabilidad de bombas de agua</i>	6
Tabla 2 <i>Valores alfa y beta de la tres cámaras de refrigeración</i>	12
Tabla 3 <i>Paradas de máquina no planificada en Línea de Maquinado 01</i>	16
Tabla 4 <i>Operacionalización de variables</i>	19
Tabla 5 <i>Planilla de Hoja de Información RCM</i>	26
Tabla 6 <i>Planilla de Decisión RCM</i>	28
Tabla 7 <i>Ponderación de la FF</i>	34
Tabla 8 <i>Ponderación del IP</i>	35
Tabla 9 <i>Ponderación del SS</i>	36
Tabla 10 <i>Ponderación del CR</i>	36
Tabla 11 <i>Ponderación del TR</i>	36
Tabla 12 <i>Ponderación del TO</i>	37
Tabla 13 <i>Listado de máquinas y su respectivo sistema de producción al que pertenecen</i>	65
Tabla 14 <i>Listado de máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01</i>	66
Tabla 15 <i>Resumen de distribución estadística de máquinas de la línea de producción</i>	70
Tabla 16 <i>Análisis de ciclo de vida de máquinas de Línea de Maquinado 01</i>	71
Tabla 17 <i>Disponibilidad del sistema</i>	74
Tabla 18 <i>Parámetros MTBF y MTTR respectivamente, obtenidos con el Software MiniTab</i> 19	75
Tabla 19 <i>Parámetros forma y escala de la distribución Weibull</i>	76
Tabla 20 <i>Confiabilidad de máquinas de Línea de Maquinado 01</i>	76
Tabla 21 <i>Criticidad de máquinas</i>	82
Tabla 22 <i>Hoja de Información de Medidor de Humedad</i>	83
Tabla 23 <i>Hoja de Información de Medidor de Humedad (continuación)</i>	84
Tabla 24 <i>Hoja de Información de Multilamina 01</i>	85
Tabla 25 <i>Hoja de Información de Multilamina 01 (continuación)</i>	86
Tabla 26 <i>Hoja de Información de Multilamina 01 (continuación)</i>	87
Tabla 27 <i>Hoja de Decisión de Medidor de Humedad</i>	88
Tabla 28 <i>Hoja de Decisión de Multilamina 01</i>	89
Tabla 29 <i>Hoja de Decisión de Multilamina 01 (continuación)</i>	90
Tabla 30 <i>Costos de cada modo de falla de Medidor de Humedad</i>	91
Tabla 31 <i>Costos de cada modo de falla de Medidor de Humedad (continuación)</i>	92
Tabla 32 <i>Costos de cada modo de falla de Medidor de Humedad</i>	93
Tabla 33 <i>Costos de cada modo de falla de Medidor de Humedad (continuación)</i>	94
Tabla 34 <i>Costo de falla (Cf) y Costo Mant. Prev. (Cp) de Medidor de Humedad y Multilamina 01</i> 96	
Tabla 35 <i>Impacto económico por indisponibilidad de máquina ocasionado por fallas</i>	96
Tabla 36 <i>Resumen de resultados de análisis de bondad de ajuste de cada modo de falla</i>	98
Tabla 37 <i>Resumen de tiempo óptimo de intervención de Medidor de Humedad y Multilamina 01</i>	103

Tabla 38 <i>Plan de mantenimiento de Medidor de Humedad basado en la metodología RCM</i>	104
Tabla 39 <i>Plan de mantenimiento de Medidor de Humedad basado en la metodología RCM (continuación)</i>	105
Tabla 40 <i>Plan de mantenimiento de Multilamina 01 basado en la metodología RCM</i>	106
Tabla 41 <i>Plan de mantenimiento de Multilamina 01 basado en la metodología RCM (continuación)</i>	107
Tabla 42 <i>Plan de mantenimiento de Multilamina 01 basado en la metodología RCM (continuación)</i>	108
Tabla 43 <i>Criticidad equipos Línea de Maquinado 01</i>	110
Tabla 44 <i>Hoja de Información</i>	111
Tabla 45 <i>Resultados de bondad de ajuste obtenido con el Software MiniTab 19</i>	112
Tabla 46 <i>Valores de β obtenidos en análisis con Software MiniTab 19</i>	113
Tabla 47 <i>Resumen de tiempo óptimo de intervención de Medidor de Humedad y Multilamina 01</i>	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Aumento de la OEE en la máquina de embalaje</i>	2
Figura 2 <i>Proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad</i>	4
Figura 3 <i>Ubicación geográfica del ámbito de desarrollo de la investigación.</i>	14
Figura 4 <i>Principales causas de fallas de ocasionan paradas de máquina.</i>	15
Figura 5 <i>Flujograma de implantación del RCM</i>	29
Figura 6 <i>Integrantes de un equipo natural de trabajo de RCM</i>	31
Figura 7 <i>Matriz de criticidad</i>	37
Figura 8 <i>Diagrama entrada proceso salida</i>	38
Figura 9 <i>Diagrama entrada proceso salida: Sistema de compresión</i>	40
Figura 10 <i>Esquema de análisis de los modos y efectos de fallos.</i>	41
Figura 11 <i>Probabilidad de falla como integral de f(t).</i>	43
Figura 12 <i>Funciones de confiabilidad</i>	46
Figura 13 <i>Sistemas en serie</i>	48
Figura 14 <i>Sistemas en paralelo</i>	49
Figura 15 <i>Curva de la bañera</i>	50
Figura 16 <i>Beta en la Curva de la bañera</i>	51
Figura 17 <i>Curva de Davies, acciones y tácticas adecuadas, acorde al valor del Beta.</i>	52
Figura 18 <i>Distribuciones de Weibull ($\alpha = 1$)</i>	54
Figura 19 <i>Costo mínimo esperado por unidad de tiempo para MP a edad constante.</i>	60
Figura 20 <i>Presencia de Maderera Bozovich en el mundo</i>	63
Figura 21 <i>Principales productos</i>	64
Figura 22 <i>Sólidos sin barnizar (piso machihembrado-madera moldurada)</i>	64
Figura 23 <i>Ponderación de criticidad de los 4 sistemas de producción analizados</i>	66
Figura 24 <i>Diagrama de recorrido de la Línea de Maquinado 01</i>	67
Figura 25 <i>Máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01</i>	68
Figura 26 <i>Análisis de bondad de ajuste en Software MiniTab 19</i>	70
Figura 27 <i>Identificación de fase de vida de cada máquina que conforma la Línea de Maquinado 01</i>	72
Figura 28 <i>Configuración de máquinas de Línea de Maquinado 01</i>	73
Figura 29 <i>Curva de confiabilidad de máquinas de Línea de Maquinado 01</i>	77
Figura 30 <i>Integrantes de equipo natural de trabajo RCM</i>	78
Figura 31 <i>Selección del sistema</i>	79
Figura 32 <i>Diagrama Proceso Salida</i>	81
Figura 33 <i>Diagrama de Entrada Proceso Salida – Línea de Maquinado 01</i>	81
Figura 34 <i>Modos de fallas que tienen mayor impacto económico</i>	95
Figura 35 <i>Modos de fallas que tienen mayor impacto económico</i>	95
Figura 36 <i>Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 6.A.1</i>	99
Figura 37 <i>Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 8.A.1</i>	99

Figura 38 <i>Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 8.A.2</i>	100
Figura 39 <i>Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 9.A.1</i>	100
Figura 40 <i>Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 1.D.1</i>	101
Figura 41 <i>Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 4.A.1</i>	101
Figura 42 <i>Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 5.A.1</i>	102
Figura 43 <i>Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 10.A.1</i>	102
Figura 44 <i>Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad con puntos óptimo de intervenciones</i>	111
Figura 45 <i>Curva de confiabilidad de máquinas de Línea de Maquinado 01</i>	115

INTRODUCCIÓN

La presente tesis aborda el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera. Cabe mencionar que el estado situacional de mantenimiento de los equipos es deficiente. Esto se evidencia en la programación de intervenciones basada en el conocimiento empírico de los técnicos, en lugar de un enfoque ingenieril para determinar las actividades y las frecuencias óptimas de mantenimiento. Esto ha resultado en la falta de uso de indicadores clave de mantenimiento, como MTBF, MTTR y disponibilidad.

En tal sentido, lo que se pretende con la presente investigación es determinar el momento óptimo de intervenciones en los equipos de la línea de maquinado de una fábrica de pisos de madera a través del diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad. Para lograrlo, se hacen uso de conceptos teóricos relacionados con el análisis estadístico de datos, confiabilidad, disponibilidad, el modelo de minimización de costos basado en el reemplazo preventivo por tiempo, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y el software estadístico MiniTab19.

Para la mejor presentación de la tesis, se ha creído conveniente dividirlo en cuatro capítulos, que a continuación se detallan.

En el Capítulo 1, se abordan los antecedentes, el planteamiento y la formulación del problema. Se justifica la importancia de la investigación, y, además, se establecen los objetivos, junto con la operacionalización de las variables. También se presenta el tipo y nivel de investigación, así como el método de diseño de la investigación. Por último, se detallan las técnicas y el análisis de procesamiento de datos.

En el Capítulo 2, se presentan los conceptos teóricos fundamentales necesarios para la investigación, que incluyen la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), así como los términos relacionados con la confiabilidad, disponibilidad y el modelo de minimización de costos basado en el reemplazo preventivo por tiempo.

En el Capítulo 3, se realiza una descripción del área de estudio, se evalúa su criticidad, se analizan los datos de falla, se verifica la bondad de ajuste, se determinan los parámetros alfa y beta, se lleva a cabo una evaluación del ciclo de vida y se calcula la confiabilidad y disponibilidad actuales del área de estudio. Además, se desarrolla el modelo del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), lo que conduce a la formulación de un

plan de mantenimiento adecuado al contexto operacional de los equipos utilizados en la industria maderera, con frecuencias óptimas de intervención de mantenimiento y tiempos adecuados para el reemplazo de componentes.

En el Capítulo 4, se exponen y discuten los resultados de la investigación, y se realiza la contrastación de las hipótesis formuladas.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones que se derivan de la investigación.

CAPÍTULO I . Aspectos generales y metodológicos de la investigación

1.1 Antecedentes de la investigación

En la actualidad, las compañías en el sector industrial comprenden que la gestión efectiva del mantenimiento de sus maquinarias y estructuras es una valiosa ventaja competitiva, ya que una óptima administración del mantenimiento influye en asegurar la producción de alta calidad.

Una administración eficiente del mantenimiento en una instalación industrial resulta en una mayor confiabilidad y disponibilidad de sus equipos e instalaciones, lo que previene detenciones imprevistas y los consecuentes costos económicos asociados a la producción y la empresa.

En este sentido, el reto de gestionar el mantenimiento de manera eficiente para alcanzar una alta disponibilidad y confiabilidad de las máquinas en plantas industriales ha sido objeto de investigación y enfoques diversos por parte de expertos en el campo, como:

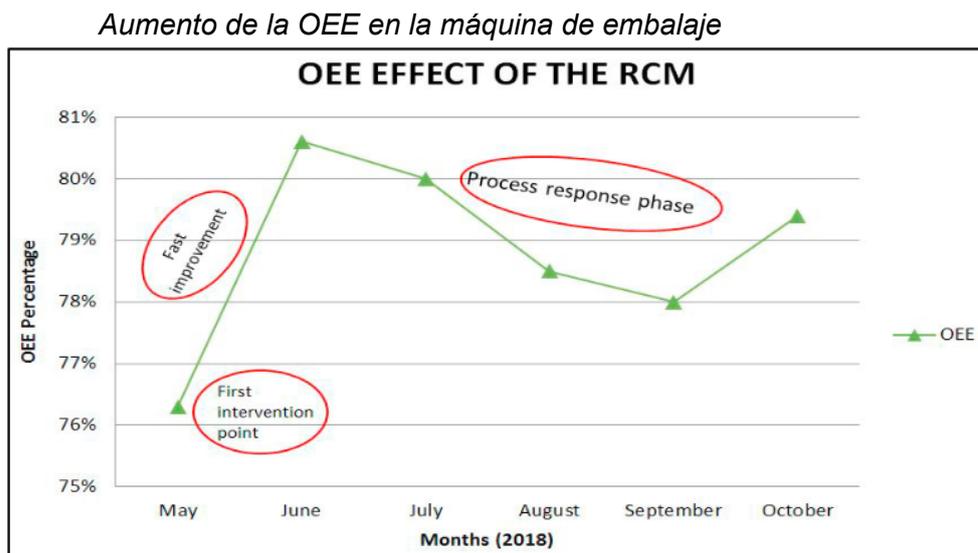
YAVUZ ET AL. (2019)¹, en su estudio, se planteó como objetivo la aplicación del proceso RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) para la máquina envasadora encargada del envasado de tabletas de chocolate. Esto lo logró mediante una serie de pasos que incluyeron el establecimiento de los equipos críticos, la designación del equipo RCM, el análisis de la condición actual de la máquina y la ejecución y monitoreo del Mantenimiento Basado en Condición (CBM). Además, llevó a cabo la identificación de las funciones del equipo, la aplicación de una hoja de información (donde se generó una lista de pérdidas de función, modos de falla y efectos de falla), y la utilización de una hoja de decisión (donde se evaluaron los impactos ambientales, la salud y seguridad ocupacional,

¹ Yavuz, O., Doğan, E., Carus, E., & Görgülü, A. (2019). Reliability centered maintenance practices in food industry. (Artículo Científico). Elsevier B.V. - ScienceDirect

el cambio de diseño, la viabilidad, las actividades de mantenimiento planificadas, las actividades de mantenimiento de averías, las actividades de mantenimiento predictivo y las inversiones en nuevos equipos).

Como resultado de esta investigación, logró un aumento positivo en la Eficiencia General del Equipo (OEE). Consiguió evitar averías no planificadas y errores relacionados con la calidad del producto. Por último, este estudio, en el que participaron todos los involucrados, planteó desafíos a los responsables de la operación de los equipos. En la Figura 1.1 que se muestra a continuación, se ilustra el aumento en la OEE de la máquina de embalaje.

Figura 1



Nota. La evaluación de los datos de 6 meses de este estudio piloto, muestran como resultado de la aplicación, aumentó la disponibilidad del equipo y se eliminaron los problemas experimentados debido a la calidad. Tomado de "Reliability Centered Maintenance Practices in Food Industry" (p.7), por Yavuz et al. (2019). Elsevier B.V. – ScienceDirect

AGUALONGO (2020)², en su trabajo de investigación, se presentaba como un problema crítico el hecho de que en el área de extrusión de la empresa HOLVIPAS S.A. no se tenía conocimiento de la disponibilidad de las máquinas y equipos. Esto se debía a

² Agualongo Yansapanta, L. R. (2020). Análisis de fiabilidad de máquinas y equipos por la ley de Weibull en el área de extrusión de la empresa Holviplas SA y su incidencia en la disponibilidad (Tesis de Maestría), Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Mecánica Mención Diseño). (<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30606>)

la falta de un estudio específico que abordara esta cuestión. Además, se exponía la carencia de planes de mantenimiento adecuados, lo que resultaba en pérdidas económicas significativas para la empresa. Fue en este contexto que el autor se propuso como objetivo primordial determinar la fiabilidad utilizando el método matemático y gráfico de Weibull.

Para llevar a cabo este análisis, el autor recurrió a datos estadísticos recopilados de actividades de mantenimiento previas. Estos datos le permitieron identificar, mediante una matriz AMEF, los componentes críticos que eran propensos a sufrir fallas. Además, se implementaron y analizaron diversos indicadores, como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR), el tiempo de operación (T_o), la tasa de fallos (λ), la fiabilidad ideal (R_t) y la disponibilidad (D).

La evaluación de la fiabilidad se concretó mediante el análisis estadístico de la distribución de Weibull para cada máquina y equipo, empleando tanto el método matemático como el gráfico. Esto proporcionó un criterio más sólido sobre la posición de las máquinas en la curva de la bañera y las acciones de mantenimiento pertinentes que se recomendaban implementar. Es importante señalar que la investigación se basó en las normas NTP 331 y NTP 679 para el análisis de Weibull y AMEF, respectivamente.

Los datos estadísticos arrojaron que la disponibilidad se encontraba en un rango que oscilaba entre el 98,52% y el 99,36%. Además, a través del AMEF, se confirmó que la caja de transmisión de la extrusora era el componente más crítico, con un valor de NPR (Número de Prioridad de Riesgo) de 210, que era el más alto en todo el estudio de la investigación.

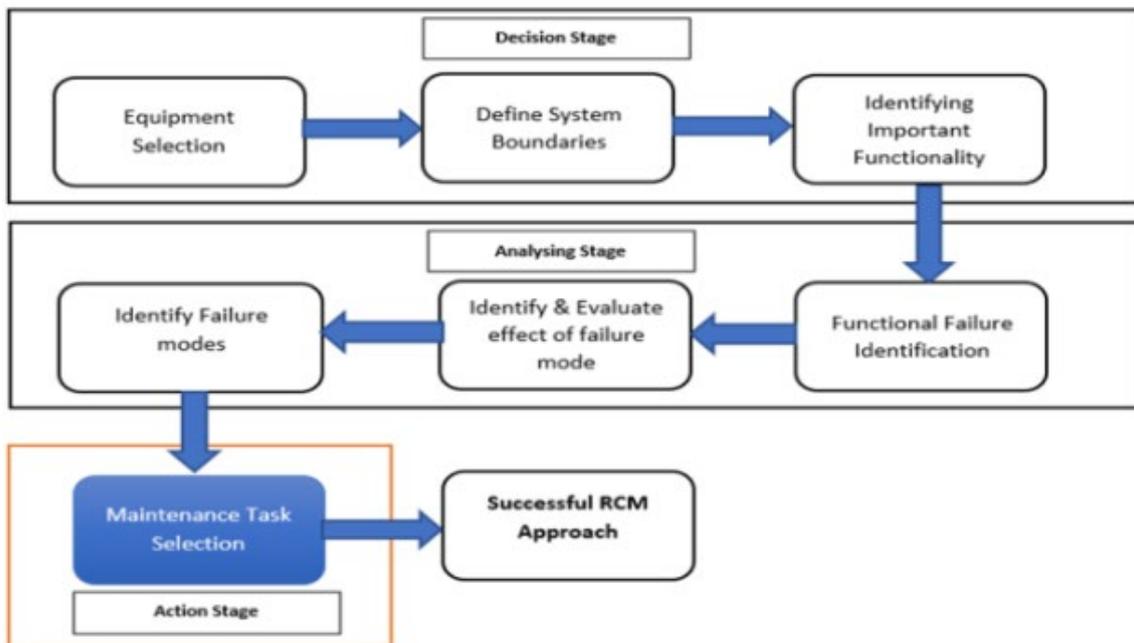
ROSITA & RADA (2021)³, en su trabajo de investigación, exponen la aplicación del RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) a los equipos de la empresa de

³ Rosita, K. K., & Rada, M. V. (2021). Equipment Reliability Optimization Using Predictive Reliability Centered. 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (págs. 348-354). (Artículo Científico). IEEE.

fabricación ABC. Los objetivos finales que se discuten en este estudio son cómo la empresa pudo identificar modos de falla, consecuencias de falla y crear tareas de mantenimiento más efectivas y aplicables para minimizar el riesgo de falla y el tiempo de inactividad del equipo, utilizando el marco RCM personalizado para la empresa. Los autores detectaron que los equipos se enfrentaban con frecuencias de fallas repentinas, crisis de mano de obra y consumo inusual de repuestos que afectaban directamente la capacidad de producción y los gastos operativos. Enseguida, en la Figura 2 se expone el proceso de aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en la empresa ABC.

Figura 1

Proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad



Nota. En la figura se enumeran los pasos detallados del marco RCM que se deben llevar a cabo. Tomado de “Equipment Reliability Optimization Using Predictive Reliability Centered” (p.3) por Rosita & Rada, 2021, 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications. IEEE.

El inicio de la metodología comenzó con la selección del equipo de trabajo, la definición de los límites del sistema, la identificación de funcionalidades importantes, las fallas funcionales, la identificación y evaluación de los efectos de los modos de falla mediante el AMEF. Se enumeraron los modos de falla según su ubicación funcional. Esta numeración se utilizó como un indicador de la criticidad o prioridad del riesgo de cada falla, influenciada por la gravedad, ocurrencia y detección de la misma. Esto permitió ponderar

las fallas mediante el Nivel de Probabilidad de Riesgo (RPN), un indicador que se calcula multiplicando la Severidad (S), la Ocurrencia (O) y la Detección (D). Con esto, se logró categorizar y priorizar cada falla, asignando las tareas de mantenimiento más adecuadas. Como resultado, se permitió que las máquinas funcionaran de la manera más confiable, lo que ayudó a aumentar el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y reducir el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR), incrementando así la disponibilidad.

CHÁVEZ ET AL. (2020)⁴, en su investigación, los autores se propusieron describir y analizar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema de reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF. Esta necesidad surgió debido a la importancia de tomar medidas que redujeran las pérdidas de producción causadas por las fallas en dicho sistema. El estudio se centró en un conjunto de cinco bombas multietapas identificadas como P1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E. La metodología utilizada se describe a continuación; en primer lugar, se recopilaron datos relacionados con los tiempos de funcionamiento efectivo, las fallas, las reparaciones, los tiempos de producción perdidos, los tiempos de mantenimiento, los tiempos de suministro y otros tiempos relevantes. Se separaron los tiempos de mantenimiento en categorías de correctivo y preventivo, siendo que, para este estudio en particular, se utilizaron únicamente los tiempos de mantenimiento correctivo.

En segundo lugar, se realizaron cálculos de los parámetros de Weibull y se llevaron a cabo pruebas de bondad de ajuste utilizando tres pruebas distintas: Kolmogórov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado (χ^2), con el fin de verificar si los datos recopilados se ajustaban a la distribución seleccionada. Luego, con la ayuda de una hoja de cálculo y el software FIASOFT, se verificó la adecuación de la función elegida y se

4 Chávez, M., Jiménez, J., & Pushug, M. I. C. (2020). Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) del sistema de reinyección de agua de formación. (Artículo Científico). Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía, 5(9), 249-267. (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7437976>)

procedió a estimar los parámetros β , η , MTBF y MTTR. Además, se realizó una parametrización y alineación utilizando un método de máxima verosimilitud con una función específica diferente a Weibull para estimar sus propiedades de ajuste basadas en el parámetro Beta (β). El propósito de esta alineación fue estimar los parámetros de una línea recta, a saber, el intercepto y la pendiente, para minimizar el error.

Los análisis previamente mencionados permitieron calcular los parámetros CMD (Disponibilidad, Mantenibilidad y Confiabilidad), analizar las curvas de densidad acumulada de falla, la confiabilidad, la tasa de falla lambda y realizar pronósticos de curvas y parámetros.

Los resultados revelaron, como se muestra en la Tabla 1.1, que las cinco bombas analizadas seguían una distribución de Weibull. En ese momento, las bombas P-1501A y P-1501B se encontraban en la etapa I de la fase III, mientras que la bomba P-1501C estaba en la Fase II, conocida como rodaje o vida útil. Así pues, las bombas P-1501D y P-1501E se encontraban en la Fase I, que corresponde a la mortalidad infantil. Finalmente, la Tabla 1 muestra los parámetros de confiabilidad del sistema de agua en cuestión.

Tabla 1

Resultados de parámetros de confiabilidad de bombas de agua

Bomba	Parámetro de forma Beta (β)	Parámetro de escala (η)	Tiempo medio entre fallas (MTBF)	Distribución que cumple u Confiabilidad
P-1501A	1.37	1350.2	1234.51	Weibull
P-1501B	1.46	1504.9	1362.78	Weibull
P-1501C	0.995	670.23	671.81	Weibull
P-1501D	0.789	104.89	1197.31	Weibull
P-1501E	0.91	1287.51	1346.81	Weibull

Nota. Esta imagen nos muestra los diferentes valores de β para las distintas bombas. Tomado de “Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) del sistema de reinyección de agua de formación” (p.1), por Chávez et al., 2020, Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía, 5(9), 249-267.

Basándose en estas observaciones, se hizo la siguiente recomendación: Para las bombas P-1501A y P-1501B, cuyos valores de β estaban en el rango de 1.05 a 1.95, se

sugirió la implementación de la táctica de TPM (Mantenimiento Productivo Total) junto con un enfoque parcial de RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). En el caso de la bomba P-1501C, cuyo valor de β estaba en el rango de 0.95 a 1.05, se recomendó una táctica de mantenimiento reactiva. Por último, para las bombas P-1501D y P-1501E, cuyos valores de β se situaban entre 0 y 0.95, se sugirió un enfoque de mantenimiento reactivo, aunque en menor medida que en los otros casos.

ARTEAGA Y GOROZABEL (2021)⁵, en su investigación, los autores tenían como objetivo principal la implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en las maquinarias de mayor criticidad ubicadas en la Plaza Calderón. Esta estrategia se planteó con el propósito de reducir el índice de fallos y aumentar la disponibilidad de los activos.

En su estudio, los autores destacaron la importancia de contar con un registro codificado de las fallas y sus atributos para poder estimar la confiabilidad basándose en el historial de estas fallas. Esta necesidad surgió debido a la falta de claridad sobre cuál era el factor más influyente en las altas horas de paradas no programadas durante los años 2018 y 2019. En respuesta a esta necesidad, se propuso la creación de un catálogo de fallas elaborado a través del Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF). El objetivo principal de este catálogo era identificar de manera sistemática la función del activo, los componentes que solían presentar fallas, las fallas asociadas, el impacto en el rendimiento general y las causas subyacentes de las fallas.

La elaboración de estos catálogos requería un profundo conocimiento sobre la construcción y operación de los activos, lo que resultaba en un proceso costoso. Por esta razón, se sugirió enfocar el análisis solo en los equipos críticos, en este caso, las vitrinas

⁵ Arteaga Bazurto, L. E., & Gorozabel Chata, F. B. (2021). Implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad a maquinarias críticas de la plaza calderón/implementation of reliability-centered maintenance to critical machinery at plaza calderón. (Artículo Científico) (<https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/1784>)

panorámicas de refrigeración. Para llevar a cabo esta selección, se consideró esencial definir previamente los niveles de criticidad de los activos, con el fin de dirigir los esfuerzos y recursos hacia las áreas donde eran más importantes y necesarios.

La obtención de la criticidad de los equipos se logró mediante una ecuación matemática que combinaba la frecuencia y la consecuencia. Este enfoque se aplicó a través de un instrumento que evaluaba los criterios relacionados con las consecuencias de las fallas de los activos en una línea de producción industrial. De esta manera, se identificaron los activos que requerían la construcción del catálogo de fallas.

Por otro lado, la obtención del AMEF se basó en las normas ISO 14224, SAE JA1011 y SAE JA1012. Estas normas tenían como objetivo identificar los subsistemas y las partes de los activos, asociándolos con las fallas funcionales, sus causas y efectos. Esto permitió generar el catálogo de fallas de manera sistematizada. Además, se llevó a cabo la recopilación y análisis de datos históricos de fallas y se registraron los trabajos de mantenimiento realizados. Los resultados obtenidos de la investigación demostraron una notable reducción en la tasa de fallos y un incremento en la disponibilidad de los activos críticos.

GANDUR (2017)⁶ en su trabajo de investigación, el autor se propuso principalmente crear un plan de mantenimiento utilizando la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) al "Sistema de aire acondicionado" que, en ese momento, era el equipo más crítico en la Clínica Universitaria Bolivariana (CUB). Esta necesidad surgió de la imperante necesidad de contar con una metodología que permitiera una gestión de mantenimiento eficiente y efectiva.

⁶ Gandur Peña, F. H. (2017). Adaptación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en un sistema crítico de aire acondicionado de la Clínica Universitaria Bolivariana (CUB). Escuela de Ingenierías. (Tesis de maestría) (<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/3577>)

El proceso de aplicación de la metodología RCM se inició con una actualización del inventario existente en la CUB, lo que permitió identificar los diferentes tipos de aires acondicionados instalados en el lugar. Esta actualización fue el primer paso para llevar a cabo un análisis de criticidad, en el que se aplicaron diversos criterios para jerarquizar los equipos. Estos criterios fueron luego validados mediante la herramienta informática ACRITEQUIP.

Posteriormente, se procedió a realizar un Análisis de Modo y Efectos de Fallas (AMEF) para comprender en profundidad las posibles fallas y sus efectos en el sistema. Continuando con la implementación del RCM, se utilizaron las siete preguntas clave de esta metodología para realizar un análisis detallado del sistema y, como resultado, se generó un plan de mantenimiento completamente adaptado a las necesidades de los aires acondicionados más críticos.

Finalmente, se llevó a cabo la capacitación del personal para que estuvieran preparados para futuras implementaciones de RCM en otros tipos de equipos presentes en la CUB. Por otro lado, como resultado de la implementación de la metodología, se pudo constatar una reducción significativa en las fallas, lo que se tradujo en un aumento notable de la disponibilidad del Sistema de Aire Acondicionado más crítico en la clínica.

CAMPOS ET AL. (2019)⁷, en este trabajo, los autores tenían como objetivo desarrollar una metodología denominada "RCM aumentada" aplicada al túnel de viento del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) del Instituto Politécnico Nacional de México. La metodología se obtuvo a través del análisis exhaustivo de las normas SAE JA1011 y SAE JA1012. En el proceso de realización del análisis de modos de falla y efectos (AMEF), se utilizaron como referencia las normas SAE J1739,

⁷ Campos López, O., Tolentino Eslava, G., Toledo Velázquez, M., & Tolentino Eslava, R. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 23(1), 51-59. (Artículo Científico) (<https://www.redalyc.org/journal/614/61458265006/movil/>)

ISO 14224, la base de datos OREDA y se tomaron en cuenta algunos casos de estudio relevantes.

Se llevó a cabo la recopilación de información detallada sobre el túnel de viento y se realizaron entrevistas con el personal involucrado en la operación y mantenimiento para definir el contexto operacional y la taxonomía del equipo de estudio. El proceso de clasificación comenzó al reconocer el motor eléctrico y el ventilador centrífugo como los elementos principales, mientras que se identificaron el variador de frecuencia, así como los sistemas de calibración, control de velocidad e hilo caliente, como subsistemas fundamentales.

Durante el análisis de RCM, se identificaron un total de 6 funciones, 23 fallas funcionales, 30 efectos de falla, 32 modos de falla y 132 efectos de falla. Se determinó que los 23 efectos de falla analizados tenían una criticidad media, y las consecuencias de las fallas se limitaban al ámbito operativo, según el contexto operacional. De estos, 5 eran ocultos y 18 eran evidentes. A través de la aplicación del NPR (Número de Prioridad de Riesgo, se logró identificar rápidamente los efectos de falla más críticos.

El resultado principal de la investigación fue la elaboración de un plan de mantenimiento integral para el túnel de viento. Este plan incluyó 27 tareas de mantenimiento basado en la condición, destacando actividades como el análisis de vibraciones mecánicas, la termografía infrarroja y el monitoreo eléctrico del motor. También se incluyeron 7 tareas de restauración, entre las que sobresalía el mantenimiento de las computadoras de los sistemas de calibración, hilo caliente y control de velocidad.

Además, se emitieron recomendaciones que mejoraron la confiabilidad del túnel de viento. Estas recomendaciones incluyeron la implementación de bitácoras de operación y mantenimiento, la colocación de señalizaciones que promovieron el cuidado del equipo y condiciones de seguridad adecuadas, entre otras medidas.

QUISIGÜIÑA ET AL. (2021)⁸, en el presente trabajo de investigación, los autores tenían como objetivo determinar los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) del sistema de refrigeración de una industria dedicada a la elaboración de conservas de atún en Ecuador. También se buscaba evaluar el período de vida en el que se encontraban las tres cámaras de refrigeración, que eran los objetos de estudio. Esta necesidad se manifestaba debido a la importancia del mantenimiento de los equipos frigoríficos, ya que desempeñan un papel crucial en la prevención de problemas relacionados con la aparición de organismos patógenos en los alimentos.

La metodología utilizada se basó en el método de Mínimos Cuadrados, elegido por su simplicidad y facilidad de aplicación. Además, la representación gráfica y la ecuación lineal de regresión resultante se utilizaron como prueba de bondad de ajuste de la distribución estadística seleccionada. Además, se empleó la distribución de Weibull para establecer en qué fase de vida se encontraba cada activo. Los tiempos operativos y de reparación se obtuvieron a partir de los datos históricos del software "Sistema de Mantenimiento Programado".

Los resultados obtenidos a través del método de Mínimos Cuadrados indicaron que los parámetros de forma de las cámaras de refrigeración 3, 4 y 5 (ver Tabla 1.2) presentaban valores de beta mayores a 1 ($\beta > 1$). Estos valores fueron los siguientes: 1.469, 1.391 y 1.612. Según la curva de Davis, esto indicaba que las tres cámaras de refrigeración se encontraban en el período de desgaste, es decir, en la etapa III de su vida útil. Este hallazgo se confirmó con los resultados de la distribución de Weibull, que arrojaron una confiabilidad del 7,00%, 3,70% y 8,72%, así como una mantenibilidad del 69,85%, 47,39%

⁸ Quisigüiña Reyes, L. G., Arteaga Linzan, Ángel R., & Rodríguez Ramos, P. A. (2021). Determinación de Indicadores de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad. Caso de Estudio: Industria de Elaboración de Conservas de Atún. Revista Cubana De Ingeniería, 12(2), e276. (Artículo Científico) (<https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/774>)

y 70,65% para las cámaras de refrigeración, respectivamente, en el período evaluado de 720 horas.

Finalmente, se llegó a la conclusión de que la cámara 4 presentaba los parámetros más bajos en confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en comparación con las otras cámaras del sistema analizado. En la Tabla 2, se presentan los valores de beta y alfa de las tres cámaras de refrigeración analizadas en el presente trabajo de investigación.

Tabla 1

Valores alfa y beta de las tres cámaras de refrigeración

Cálculos de la función estadística			
	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5
β	1,469	1,391	1,612
α	371,345	305,490	414

Nota. Tomado de (Determinación de Indicadores de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad. Caso de Estudio: Industria de Elaboración de Conservas de Atún) (p.7), por (Quisigüíña et al., 2021) Revista Cubana de Ingeniería.

ESPINOSA ET AL. (2020)⁹, los autores en este estudio tenían como objetivo llevar a cabo un análisis de las fallas en los equipos con un alto consumo eléctrico en el hotel "Oasis Playa Coco", ubicado en la cayería norte de Ciego de Ávila, Cuba. Esto se debió a los elevados niveles de consumo de energía eléctrica que estaban generando costos adicionales en la operación de los equipos del hotel. Para lograr este objetivo, se aplicó la metodología del RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad), basándose en las normas SAE JA1011 y SAE JA1012 en el marco de este proyecto de investigación.

El proceso metodológico comenzó con la formación de un grupo de expertos, seguido por la definición de niveles de criticidad. En este caso, se utilizó una ponderación

⁹ Espinosa-Martínez, J. U., De La Paz-Martínez, E. M., Pérez Bermúdez, R. A., & Acosta Pérez, I. (2020). Contribución del mantenimiento centrado en la confiabilidad para el estudio de fallos a equipos consumidores de energía eléctrica. Centro Azúcar, 47(1), 22-32. (Artículo Científico) (http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S222348612020000100022&lng=es&tlng=es)

para identificar a los equipos más críticos, aquellos que presentaban un mayor consumo de energía eléctrica. Este análisis determinó que el "sistema de agua caliente" era el más crítico en este contexto.

A continuación, se aplicó el AMEF y se seleccionaron las fallas de mayor importancia considerando sus consecuencias en términos de seguridad, impacto ambiental, servicio y costos de mantenimiento. Se establecieron medidas preventivas y actividades con frecuencias específicas, como inspecciones visuales, lubricación, verificaciones, ajustes y limpieza. También se programaron revisiones exhaustivas en momentos clave, conocidas como "Cero Horas". Es relevante destacar que la metodología empleada implicó el trabajo en grupo para la toma de decisiones, entrevistas con el personal y la revisión de documentos, todos estos elementos proporcionaron un sólido respaldo científico a la investigación. Los resultados obtenidos revelaron que los equipos críticos representaban aproximadamente el 85% de la estructura energética del hotel, lo que llevó al departamento de servicios técnicos a centrar sus esfuerzos en estos equipos.

1.2 Identificación y Descripción del Problema de estudio

La investigación se desarrolló en el contexto del sistema de producción, específicamente en la Línea de Maquinado 01. En esta línea, se encontraban máquinas como moldureras, retestadoras, cepilladoras y optimizadoras. El lugar de la investigación se ubicó en el Distrito de Lurín, Provincia de Lima, Departamento de Lima, Perú

El proceso de producción se compone de cuatro áreas productivas: Línea de Maquinado 01, Línea de Maquinado 02, Línea Finger Joint y Línea de Pisos Estructurados. En estas áreas se procesan diversos productos, tales como pisos sólidos machihembrados sin barnizar, pisos sólidos machihembrados barnizados, pisos estructurados, decking, deck tiles y tablillas, todos elaborados a partir de material de madera.

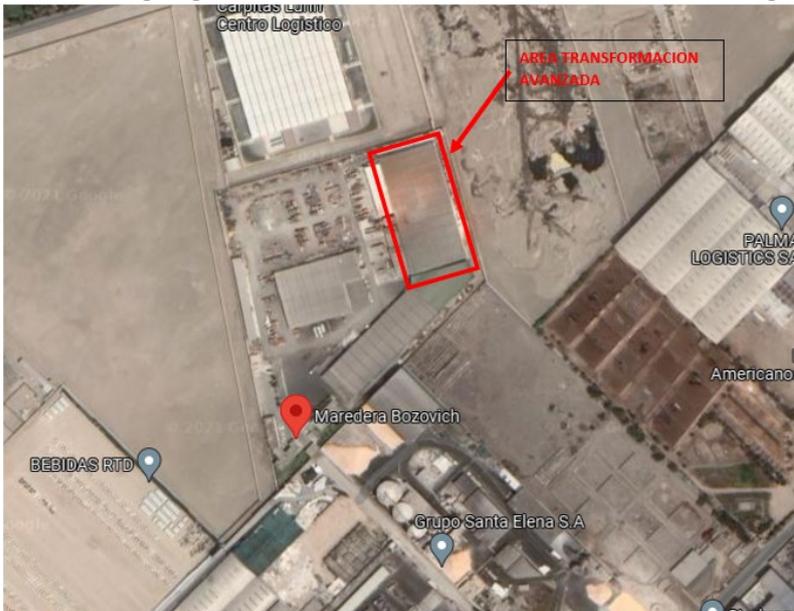
La investigación se focalizó en las máquinas que se utilizan en el procesamiento del producto de piso madera de machihembrado sin barnizar, específicamente en la Línea

01 de Maquinado. Esto se debió a que, durante el año 2021, la compañía experimentó interrupciones inesperadas en esta línea de producción.

En este sistema productivo, se constató que se llevaba un registro de cada parada de máquina; este registro incluía la descripción de la falla, sus efectos y los tiempos entre cada falla. Sin embargo, esto no fue suficiente para contrarrestar las consecuencias negativas en términos de productividad, costos de reparación elevados, reducción de la vida útil de las máquinas, pérdida de calidad del producto y competitividad de la organización. Esto demostró que no existía una gestión en el área de mantenimiento. Una prueba de ello fue que se programaban las intervenciones de mantenimiento según la disponibilidad de los técnicos, es decir, no se llevaba a cabo un estudio ingenieril de las actividades adecuadas de mantenimiento ni se calculaban las frecuencias óptimas de intervención. Por lo tanto, no se empleaban indicadores globales de mantenimiento, como los tiempos medios entre fallas (MTBF), los tiempos medios para reparar (MTTR) y Disponibilidad. En la Figura 3, se presenta la ubicación geográfica donde se desarrolló el proyecto de investigación.

Figura 2

Ubicación geográfica del ámbito de desarrollo de la investigación.

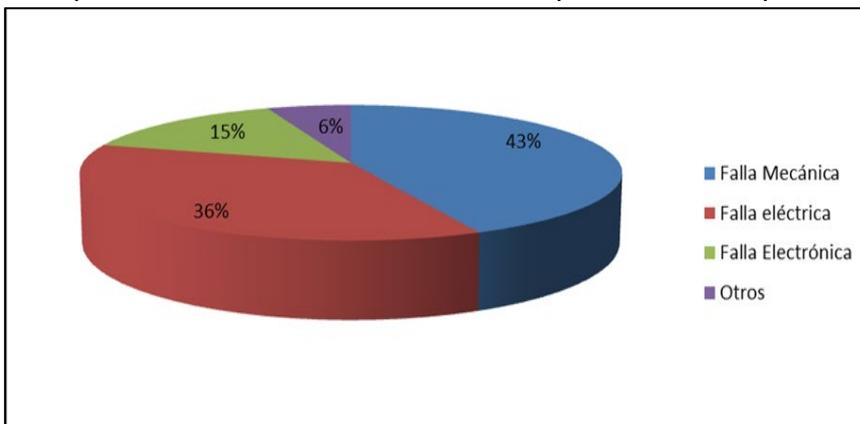


Nota. Adaptado de Google. (s.f.). [Vista satelital de ubicación geográfica de empresa Maderera Bozovich]. Recuperado el 01 de Octubre del 2023, de <https://goo.gl/maps/ZszWJYxc2VFbiyfs8>

A continuación, se muestra el análisis que se realizó de los datos históricos de las paradas de máquina, el cual ayudó a identificar las más representativas del problema principal. En la Figura 4, se presenta una representación gráfica de las principales razones que ocasionaron las paradas no programadas de las máquinas de la Línea de Maquinado 01. Esta representación incluía las siguientes categorías: falla mecánica (43%), falla eléctrica (36%), falla electrónica (15%) y otros (6%).

Figura 3

Principales causas de fallas de ocasionan paradas de máquina.



Nota. En esta imagen se visualiza las proporciones expresadas en porcentajes de las causas de falla de máquina.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema principal

¿Será un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad una herramienta para determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera?

1.3.2 Problemas secundarios

1. ¿De qué manera el análisis de criticidad y modos y efectos de fallas de equipos permitirá elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad?
2. ¿Será la estimación paramétrica una técnica para estimar el ciclo de vida de los equipos críticos?

3. ¿Cómo la evaluación económica de cada modo de falla y datos hasta la falla permitirá determinar la frecuencia óptima de intervención?
4. ¿Cuál es la disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos de la línea de maquinado?

1.4 Justificación e importancia de la investigación

La presente investigación se justifica debido a las consecuencias negativas que experimenta la organización en términos de productividad, costos de reparación elevados, reducción de la vida útil de las máquinas, pérdida de calidad del producto y competitividad. Estos problemas son el resultado de la falta de una gestión adecuada en el área de mantenimiento y la ausencia de la determinación de las frecuencias óptimas de intervenciones.

Este problema se evidencia en las 1,458. horas de paradas no planificadas en la Línea 01 de Maquinado, donde se procesa el piso de Machihembrado. Estas interrupciones no previstas generan serios problemas económicos, ya que los costos de indisponibilidad por fallas (CIF) originadas en la Línea de Maquinado 01 durante el año 2021 ascienden a \$170,994.90. En la siguiente Tabla 3 se visualiza el total de paradas de máquinas no programadas ocurridas en el 2021

Tabla 2

Paradas de máquina no planificada en Línea de Maquinado 01

N°	MÁQUINA	TIEMPO DE FALLA (HORAS)	HORAS PROYECTADAS PRODUCCIÓN	TIEMPO DE FALLA (%)	PROYECCIÓN PRODUCCIÓN (%)
1	Medidor de Humedad	203	2300	9%	100%
2	Multilamina 01	184	2300	8%	100%
3	Cepilladora 01	360	2300	16%	100%
4	Optimizadora	305	2300	13%	100%
5	Moldurera 01	455	2300	20%	100%
6	Retestadora	403	2300	18%	100%
Total		1910			

Nota. Elaboración Propia.

El presente trabajo de investigación es importante porque mediante el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM se puede determinar el punto óptimo de intervención de los equipos de la línea de maquinado. Esto permite asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos mediante la aplicación de tareas predictivas, preventivas y de verificación para cada modo de falla.

A través de la realización de análisis estadísticos, se logra determinar el punto óptimo de intervención de mantenimiento con el objetivo de minimizar el impacto en el negocio. Realizar mantenimientos con intervalos de intervención demasiado cortos genera mayores costos de operación y mantenimiento, mientras que intervenciones con intervalos excesivamente largos aumentan los riesgos de fallos que pueden afectar la seguridad, la higiene, el medio ambiente y las metas de producción. La determinación del punto óptimo de intervención busca lograr un equilibrio entre los costos y los riesgos asociados.

Por último, este proyecto también es importante porque podrá sentar las bases de la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en el resto de los equipos de la planta, priorizándolos según su criticidad.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo principal

Determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera, mediante el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Analizar criticidad y modos y efectos de falla de los equipos mediante metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad.
2. Estimar el valor paramétrico para determinar el ciclo de vida de los equipos críticos.

3. Analizar el impacto económico de cada modo de falla y datos hasta la falla para determinar la frecuencia óptima de intervención.
4. Valorar la disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos de la línea de maquinado.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

Diseñando un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad se determinará el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera.

1.6.2 Hipótesis específicas

H1. La identificación de criticidad, modos y efectos de falla de los equipos permitirá elaborar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad.

H2. La estimación paramétrica permitirá determinar el ciclo de vida de los equipos críticos.

H3. El análisis económico de cada modo de falla y datos hasta la falla posibilitará determinar la frecuencia óptima de intervención.

H4. El porcentaje de disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos de la línea de maquinado es deficiente.

1.7 Variables, dimensiones e indicadores

En la Tabla 4 se presentan las variables independientes y dependientes, junto con sus definiciones conceptuales y operacionales. Asimismo, se incluyen sus dimensiones, indicadores y escala de medición.

Tabla 3

Operacionalización de variables

PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA DETERMINAR EL PUNTO ÓPTIMO DE INTERVENCIONES DE LOS EQUIPOS DE LA LÍNEA DE MAQUINADO EN UNA FÁBRICA DE PISOS DE MADERA					
VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	OPERACIONALIZACIÓN		ESCALA DE MEDICIÓN
			DIMENSIONES	INDICADORES	
Variable independiente (X): Mantenimiento centrado en confiabilidad	El RCM es un técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos, en función de su diseño y de su construcción. El RCM asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga. (Mora, 2009, p. 444).	Se realizara conjunto de procesos secuenciales que comprenden: conformación de equipo de trabajo, criticidad de equipos, análisis de modos de falla, identificación de funciones críticas, consecuencias de falla y desarrollo de plan de mantenimiento	Análisis de modos y efectos de falla (AMEF)	Números de Modos de fallas	Valor numérico
				Números de Efectos de falla	Valor numérico
				Cantidad de Fallas ocultas	Valor numérico
			Activos críticos del proceso productivo	Cantidad de Equipos críticos	Valor numérico
				Cantidad de Funciones primarias	Valor numérico
			Ciclo de vida de los activos	Cantidad de Funciones secundarias	Valor numérico
				Valor del beta en la curva de Weibull	Valor numérico
			Disponibilidad mecánica de los equipos	MTBF (Tiempo medio entre fallas)	Porcentaje
				MTTR (Tiempo medio para reparar)	Porcentaje
			Confiabilidad de los equipos	MTBF (Tiempo medio entre fallas)	Porcentaje
Tasa de fallas	Valor numérico				
Variable dependiente (Y): Punto óptimo de intervenciones	El modelo de reemplazo preventivo por tiempo tiene por objetivo principal, cuantificar el periodo de tiempo de ejecución de mantenimiento en el cual se genera el menor costo (costo mínimo por unidad de tiempo). (Parra & Crespo, 2012, p. 196)	Se efectuara cálculos basados datos de costos y de falla para realizar intervenciones de tareas de mantenimiento preventivo	Evaluación económica	Costos de mantenimiento preventivo	Dólares/Año
				Costos de mantenimiento correctivo	Dólares/Año
			Datos de falla	(TEF) Tiempos entre fallas	Horas
				Estimación paramétrica	Valor de beta
			Valor de alfa		Valor numérico
			Frecuencia de intervención	Cantidad de horas entre cada intervención.	Horas

Nota. Elaboración Propia.

1.8 Unidad de análisis

La unidad de análisis comprende 6 equipos que se encuentran en la Línea de Maquinado 01, ubicados dentro del área de Transformación Avanzada, así como los manuales de fabricante de operación y las listas de piezas y partes de los equipos.

1.9 Fuentes de información

Fuentes de información primaria:

- Base de datos del área de producción y mantenimiento de la empresa Maderera Bozovich; esta información fue proporcionada en forma directa por el personal de mantenimiento.
- Manuales de fabricante que contienen información importante sobre el diseño y operación de los equipos.
- Tesis de maestría y doctorado que contienen información referido a implementación de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).
- Artículos científicos relacionados a gestión de mantenimiento en plantas industriales.

Fuentes de información secundaria:

- Plataforma digital del Ministerio del Ambiente del Estado Peruano.

1.10 Tipo y Nivel de investigación

1.10.1 Tipo de investigación

Teniendo en cuenta que la presente investigación busca determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la Línea de Maquinado 01 para mejorar la productividad, reducir los costos de reparación, prolongar la vida útil de las máquinas, elevar la calidad del producto y aumentar la competitividad de la organización, y que esto a su vez impactará en mejorar la disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos, podemos afirmar que la presente investigación es de tipo aplicada.

1.10.2 Nivel de investigación

Considerando que la presente investigación busca dar respuesta a las causas de eventos físicos, su enfoque radica en desentrañar las razones por las cuales ocurre un fenómeno y dilucidar las circunstancias en las que este se presenta. En otras palabras, las variables están sujetas a relaciones de causa y efecto. Es por ello que esta investigación es **explicativa**, ya que a través de hipótesis se establece la causa y el efecto para determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la Línea 01 de Maquinado.

1.11 Método de diseño de la investigación

El método de diseño de investigación del presente proyecto es de **tipo cuantitativo, experimental** ya que su finalidad es verificar o corroborar de forma deductiva las proposiciones planteadas en la investigación a través de la formulación de hipótesis basadas en relaciones entre variables. Se explora la relación causa-efecto entre variables. Además, esta investigación presenta una relación experimental, ya que se manipula la variable independiente, lo que permite observar, identificar y analizar las causas en la respuesta obtenida.

1.12 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados para recolección de los datos para este proyecto se mencionan a continuación:

- **Entrevistas**, se formularon preguntas a los implicados en persona, por teléfono, correo electrónico; esto con la finalidad de obtener información detallada sobre la interacción del área de mantenimiento en los procesos productivos de planta.
- **Observaciones en campo**, se obtuvo mientras los participantes estaban involucrados en sus actividades rutinarias. Para nuestro caso se observaron las siguientes actividades: operación y calibración de máquina, reparación y mantenimiento de equipos, reuniones de operaciones, planificación de actividades

de mantenimiento entre otros. Para ello, se utilizó como instrumento cuaderno de apuntes y registros.

- **Revisión de documentos varios:** se examinó y extrajo información de documentos referidos al historial de fallas, reparaciones de los equipos críticos y plan de mantenimiento. Para esto, se empleó cuaderno de apuntes y formatos de registro.

1.13 Análisis y procesamiento de los datos

La información recopilada se procesó utilizando los siguientes Softwares de procesamiento de datos:

- **Software ICR, Diagramas de Bloques (RBD):** Permite plantear y resolver Diagramas de Bloque de Confiabilidad (RBD) para configuraciones Serie, Paralelo, Mixtas Serie-Paralelo, Sistemas en StandBy y con Carga Compartida. Permite también analizar la Mantenibilidad de sistemas y calcular la Disponibilidad Operacional de un Equipo con varias leyes de distribución para los Tiempos hasta/entre Fallas y Tiempos de Reparación.
- **Microsoft Excel:** Recopila y analiza datos estadísticos para poder determinar y evaluar los indicadores de tiempo medio entre fallas, tiempo medio para reparación, disponibilidad y confiabilidad.
- **Minitab 2019:** Permite hallar la distribución probabilística de los datos recopilados y así poder calcular las frecuencias de intervenciones de los equipos.

CAPÍTULO II . Marcos teórico y conceptual

2.1 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El autor Mora (2009), menciona que “el RCM es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos, en función de su diseño y de su construcción. El RCM asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga” (Mora, 2009, p. 444).

Funciones de los activos físicos en RCM

Los usuarios de los activos tienen la expectativa de que el activo además de cumplir con una función, lo haga con un nivel de funcionamiento aceptable, por lo tanto, la definición de una función en conjunto con la definición de los objetivos de mantenimiento para ese activo físico no estaría completas a menos que el usuario detalle de la manera más precisa posible el nivel de funcionamiento esperado (Predictiva21, 2023). Por lo tanto,

“la definición de una función consiste de un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario” (Moubray, 2004).

Fallas funcionales en RCM

Asimismo, el entendimiento de las fallas funcionales de un activo es de vital importancia para la aplicación del RCM.

Un activo físico presenta fallas cuando este no cumple con la función esperada por el usuario. Todo lo que se requiere que haga el activo es definido como una función y cada uno de ellos tiene más de una función y frecuentemente muchas diferentes. Ya que es posible que cada una de estas funciones presente una falla, se deduce que cualquier activo puede sufrir una variedad de estados de falla distintos. Esto demuestra por qué es más preciso definir fallas en términos de pérdida de funciones específicas, en lugar de la falla de un activo en su conjunto. El proceso de RCM utiliza el término “falla funcional” para

describir estados de falla y no a una “falla” por sí sola, por lo tanto, para completar la definición de falla, se debe analizar más de cerca la cuestión de los estándares de rendimiento” (Predictiva21, 2023).

Entonces, “una falla funcional se define como la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario” (Moubray, 2004).

Análisis de modos de falla y sus efectos en RCM

Según Moubray (2004), un modo de falla puede ser descrita como una situación que probablemente haga que un activo, sistema o proceso falle. Es necesario diferenciar una “falla funcional” y un “modo de falla” por consiguiente se puede definir de manera más precisa lo que es un “modo de falla”, siendo así:

“un modo de falla es cualquier evento que cause una falla funcional” (Moubray, 2004).

El mejor modo de indicar la relación y la divergencia entre estados fallidos (falla funcional) y los eventos que podrían causarlos (modo de falla), es enumerar las fallas funcionales, para posteriormente señalar los modos de falla que pueden ocasionar cada falla funcional. Una sola máquina puede fallar por muchas razones. Un grupo de máquinas o sistemas, como una línea de producción, pueden fallar por cientos de razones. Respecto a una planta completa, esta puede fallar por miles o incluso decenas de miles de razones. (Predictiva21, 2023)

Consecuencias de las fallas en RCM

Se tienen en cuenta las consecuencias para la seguridad de las personas, el medio ambiente y la producción. Siempre que se manifiesta una falla, la organización que es usuaria del activo se ve afectada de una que otra manera. Ciertas fallas afectan la salida, la calidad del producto o el servicio al cliente; otras amenazan la seguridad o el medio

ambiente; algunas pueden aumentar los costos operativos, por ejemplo, al aumentar el consumo de energía, mientras que algunos tienen un impacto en cuatro, cinco o incluso en las seis áreas; en algunos casos podría parecer que algunas fallas no tienen ningún efecto si ocurren por sí mismas, pero pueden exponer a la organización al riesgo de otras mucho más graves. Si cualquiera de estos tipos de fallas no se evita, el tiempo y el esfuerzo que deben dedicarse a corregirlas también afectan a la organización, porque la reparación de daños ocasionados por las fallas consume recursos que podrían utilizarse mejor para otros aspectos. (Predictiva21, 2023)

RCM: Las siete preguntas básicas

Para el logro del desarrollo del RCM, es necesario la aplicación de siete preguntas básicas, que sirven para guiar a los participantes la determinación de la causa de falla del sistema y con ello desarrollar actividades que intenten prevenirlas. El autor Moubray (2004) expone lo siguiente:

El proceso de RCM formular siete preguntas: acerca del activo o sistema que se intenta revisar:

1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociado al activo en su contexto operacional?
2. ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
3. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿En qué sentido es importante cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Hoja de información

La mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre los estados de falla y los eventos que podrían causarlos es primero hacer un listado de las fallas

funcionales, y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional, como se muestra en la Tabla 5. Esta tabla también indica que, como mínimo, la descripción de un modo de falla debe consistir en un sustantivo y un verbo. La descripción debe ser lo suficientemente detallada para poder seleccionar una estrategia de manejo de falla apropiada, pero no tanto para perder mucho tiempo en el propio proceso de análisis. Los verbos que se usan para describir los modos de falla deben elegirse cuidadosamente, ya que tienen una influencia muy fuerte en el proceso posterior de selección de políticas de manejo de falla. (Moubray, 2004, p. 57)

Por ejemplo, deben usarse con una moderación expresiones como “falla” o “rotura” o “mal funcionamiento de”, ya que dan muy poca información sobre cual podría ser la manera adecuada de manejar esta falla. El uso de verbos más específicos permite seleccionar la política más adecuada dentro de un rango completo de posibilidades. Las fallas funcionales se escriben en la segunda columna de la hoja de información y deben ser codificadas alfabéticamente. Los efectos de falla se registran en la última columna de la Hoja de Información, junto al modo de falla correspondiente. (Moubray, 2004, p. 57)

Tabla 5

Planilla de Hoja de Información RCM

SISTEMA		SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA	
SUBSISTEMA			
	FUNCION	Falla Funcional	MODOS DE FALLA
1	Transferir Agua del Tanque X Al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto.	A Incapaz de transferir Agua	1 Rodamiento falla 2 El propulsor se suelta 3 Propulsor atascado por un objeto extraño 4 Campana de

Nota. Estructura de la hoja de información RCM. Tomado de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (p. 57) por Moubray, 2004, Aladon Ltd

Proceso de decisión RCM - Hoja de Decisión

El autor Moubray (2004) nos comenta que esta plantilla es utilizada para registrar las respuestas a las preguntas en el Diagrama de Decisión, y en la luz de estas respuestas, registrar:

- Que rutina de mantenimiento se va a realizar, con qué frecuencia y quien la va a llevar a cabo,
- Que fallas son lo suficientemente serias como para garantizar el rediseño.
- Casos donde se llevó a cabo una decisión deliberada para permitir que ocurran las fallas.

La Hoja de Decisión permite asentar las repuestas a las preguntas formuladas en el Diagrama de Decisión, y, en función de dichas respuestas, registrar:

- Que mantenimiento de rutina (si lo hay) será realizado, con qué frecuencia será realizado y quien lo hará.
- Que fallas son lo suficiente son lo suficiente serias como para justificar el rediseño.
- Casos en lo que se toma la decisión deliberada de dejar que las fallas ocurran.

La hoja de decisión está dividida en dieciséis columnas. Las columnas F, FF, FM identifican el modo de falla que se analiza en esa línea. Se utilizan para correlacionar las referencias de las Hoja de Información y las Hojas de Decisión.

Los encabezamientos de las próximas diez columnas se refieren a las preguntas del Diagrama de Decisión de RCM de manera que:

- Las columnas tituladas H, S, E, O, y N son utilizadas para registrar las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de cada modo de falla.

- Las tres columnas siguientes (tituladas H1, H2, H3, etc.) registran si ha sido seleccionada una tarea proactiva, y si es así, que tipo de tarea.
- Si se hace necesario responder cualquiera de las preguntas “a falta de”, las columnas encabezadas con H4 y H5, o la S4 son las que permiten registrar las respuestas.

Las últimas tres columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia con la que debe hacerse, y quien ha sido seleccionado para realizarla. La columna de “Tarea Propuesta” también se utiliza para registrar los casos en lo que se requiere rediseño, o si se ha decidido que el modo de falla no necesita mantenimiento programado (Moubray, 2004, p. 207). Lo anterior mencionado se visualiza en la Tabla 6.

Tabla 6

Planilla de Decisión RCM

<i>Planilla de decisión RCM II</i>			Sistema									Nº de sist.	Facilitador:	Fecha	Nº de hoja
			Sub- Sistema									Nº de sub. sist.	Auditor:	Fecha	De
Referencia De informacion			Consecuencia de la evaluacion				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O1 N2	H3 S3 O3 N3	Accion de Default			TAREA PROPUESTA	Intervalo Inicial	Puede ser realizado por
F	FF	FM	H	S	E	O			H4	H5	S4				

Nota. Estructura de la hoja de decisión RCM. Tomado de *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad* (p. 203) por Moubray, 2004, Aladon Ltd

2.1.1 Proceso de implementación del RCM

El proceso de implementación del RCM es una herramienta efectiva para optimizar los programas de mantenimiento y mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. Es importante que las organizaciones sigan este proceso de manera rigurosa y sistemática para obtener los mejores resultados.

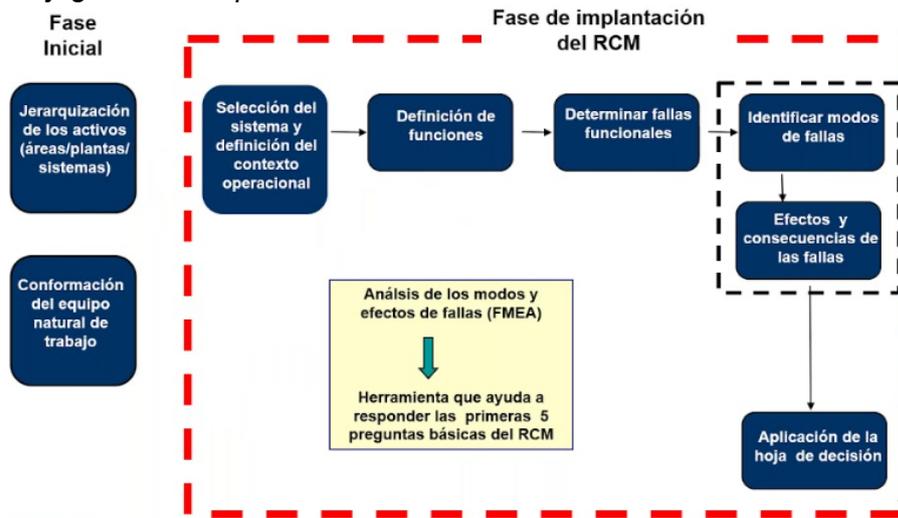
Antes de comenzar con el análisis de las necesidades de mantenimiento de los activos en cualquier organización, es fundamental conocer qué tipo de activos físicos existen y decidir cuáles son los que deben someterse al proceso de revisión del RCM. Una vez obtenido este registro para una correcta aplicación del RCM es

necesario una meticulosa planificación de los pasos a seguir (Parra & Crespo, 2012, p. 118).

La Figura 5, según Parra & Crespo (2012), ilustra el orden que se debe seguir en los pasos de proceso de implantación del RCM.

Figura 5

Flujograma de implantación del RCM



Nota. Se observan en el flujograma dos grandes fases del proceso de implementación. Tomado de *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos* (p. 118), por Parra & Crespo, 2012, Ingecon.

I. Fase Inicial:

- Formación del equipo natural de trabajo.

II. Fase de Implementación:

- Selección del sistema y definición del contexto operacional.
- Análisis de los modos y efectos de fallas (AMEF)
- Aplicación de la lógica RCM (árbol de decisión de estrategias de mantenimiento)

2.1.1.1 Formación del equipo natural de trabajo.

La formación del equipo natural de trabajo es un aspecto crítico del RCM porque ayuda a asegurar que se consideren todas las perspectivas relevantes en el análisis de la confiabilidad del equipo, y facilita la implementación efectiva de las acciones de mejora resultantes.

Para dar respuesta a las 7 preguntas básicas del RCM, es necesario crear un equipo natural de trabajo constituido por personas de distintas funciones dentro de la organización que sean capaces de responder entre todas dichas preguntas. En la práctica, el personal de mantenimiento de la organización no puede responder a todas las preguntas por sí mismo debido a que algunas de las respuestas deben ser proporcionadas por el personal de producción u operación, sobre todo relacionadas con el funcionamiento deseado del equipo y las consecuencias, y efectos de los fallos. Por este motivo, las personas que trabajan diariamente con los equipos son una valiosa fuente de información que no hay que ignorar en el análisis mediante la metodología RCM (Parra & Crespo, 2012, p. 119).

El grupo de trabajo, según Parra & Crespo (2012), de incluir los siguientes participantes:

- Personal de operación: Experto en manejo de sistemas y equipos, las personas que viven el día a día de la operación de los equipos son una valiosa fuente de información.
- Personal de mantenimiento: Expertos en reparación y mantenimiento de sistemas y equipos.
- Ingeniero de procesos: Aporta visión global de los procesos.
- Programador: Aporta visión sistemática de la actividad.
- Especialista externo: Experto en área específica. En ocasiones, también es interesante incluir al fabricante de equipos.
- Facilitador: Asesor experto en la metodología RCM

Para asegurar que todos estos puntos de vista estarán contemplados a la hora de hacer el estudio, es importante que haya personas de diferentes departamentos. En general, esto no debe significar formar grupos de menos de 4 ni más de 7

personas lo ideal es un grupo formado por 5 o 6 componentes. (Parra & Crespo, 2012, p. 119) (Ver Figura 6)

Figura 6

Integrantes de un equipo natural de trabajo de RCM



Nota. Tomado de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos (p. 119), por Parra & Crespo, 2012, Ingecon.

2.1.1.2 Selección del sistema y definición del contexto operacional

La selección del sistema y la definición del contexto operacional son dos etapas importantes en el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés). La selección cuidadosa del sistema y la definición del contexto operacional son pasos críticos en el proceso RCM. Estas etapas permiten garantizar que el análisis sea preciso, efectivo y aplicable a las condiciones de operación del equipo en cuestión.

El primer paso para dar en la implementación del RCM es la selección de los sistemas o equipos a los que se va a aplicar esta metodología. Se debe determinar la parte de nuestras instalaciones a estudiar y la parte o elementos que quedaran excluidos de ese estudio y, una delimitado el sistema a estudiar, determinar su composición, los elementos de nivel inmediatamente inferior que lo constituyen y así sucesivamente, siguiendo con una estructura de árbol hasta el nivel que ya se considere como un todo indivisible desde el punto de vista del mantenimiento. Ténganse en cuenta que esta estructura puede no ser jerárquica en el sentido

estricto, sino tener ramas que se interrelacionan en un mismo nivel o ramas entre niveles no contiguos. Los subsistemas que a su vez tienen bucles de control están en este caso y, por tanto, se deben tratar los bucles como unidades indivisibles, desde el punto de vista del sistema principal, de manera que quede reducido a una estructura jerárquica en árbol pura. (Parra & Crespo, 2012, p. 121)

Para establecer el sistema o subsistemas a los que se va a aplicar el método RCM, según Parra y Crespo (2012), es necesario definir sus límites. Su estructura debe responder a las siguientes dos preguntas:

1. ¿Cuál debería ser el nivel de detalle que se requiere para realizar el análisis de los modos y efectos de fallos del sistema seleccionado?
2. ¿Debería ser analizada toda el área seleccionada, y si no es necesario, que debería hacerse para seleccionar la parte a analizar y con que prioridad deben analizarse cada una de las partes?

Para entender mejor lo que significa nivel de detalle es necesario que los grupos de trabajo confirmen o definan los distintos niveles que presenta una determinada organización, es decir, el grado de división existente en la organización: corporación, filiales, departamentos, plantas, sistemas, equipos, componentes son ejemplos de división de una determinada organización. (Parra & Crespo, 2012, p. 121)

A continuación, según Parra & Crespo (2012), se definen algunos términos necesarios para entender el concepto de nivel de detalle:

- **Parte:** representa el nivel más bajo de detalle al cual un equipo puede ser desensamblado sin que sea dañado o destruido. Ejemplos: engranajes, bolas de cojinetes, ejes, resistores, chips... (El tamaño no es el criterio por considerar para establecer que elemento constituye una parte de un equipo determinado).

- **Equipo:** nivel de detalle constituido por un grupo o colección de partes ubicadas dentro de un paquete identificable, que cumple al menos una función relevante como ítem independiente. Ejemplos: válvulas, motores, bombas, compresores, etc.
- **Sistema:** nivel de detalle constituido por un grupo lógico de equipos que cumplen una serie de funciones requeridas por una organización. La mayoría de los sistemas están agrupados en función de los procesos más importantes. Ejemplos: sistema de generación de vapor, de tratamiento de aguas, de condensado, de protección, etc.
- **Planta:** nivel de detalle constituido por un grupo lógico de sistemas que funcionan en conjunto para proveer un producto o servicio por procesamiento o manipulación de materiales o recursos.
- **Complejo o polígono industrial:** nivel de detalle constituido por un grupo lógico de plantas que funcionan en conjunto para proveer varios productos o servicios de una misma clase o de distintas clases. Por ejemplo, un grupo de plantas de hidrogeno, azufre, etc. Que constituyen un área denominada “Complejo de Refinería, Polígono Petroquímico, etc.”

Partiendo del nivel de detalle del sistema, para responder la segunda pregunta es necesario que el grupo de trabajo identifique todos los sistemas existentes del área seleccionada y luego procesa a jerarquizar de acuerdo con los criterios de mayor importancia y criticidad del entorno operacional en el que operan dichos sistemas.

(Parra & Crespo, 2012, p. 122)

2.1.1.3 Jerarquización y criticidad de los equipos

La jerarquización y criticidad de los equipos es esencial para el éxito del análisis RCM. Al evaluar y clasificar los sistemas o equipos seleccionados, el equipo de trabajo puede identificar y enfocarse en los equipos más críticos, lo que permite priorizar los recursos de mantenimiento y garantizar que se implementen las estrategias de

mantenimiento más adecuadas para garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.

Los autores Gasca et al. (2017), proponen la siguiente metodología para evaluar la criticidad de activos:

1. Índice de criticidad (IC): Es el producto de la frecuencia de fallas FF y la consecuencia de la falla CF
2. Frecuencia de fallas (FF): Se evalúa a partir de la tasa estimada de incidencia de fallas.
3. Consecuencia de falla (CF): Se evalúa a partir de la suma del impacto en la producción IP, el impacto en la seguridad y salud SS, los costos de reparación CR, el tiempo de reparación TR, y el tiempo de operación TO.
4. Valor del Índice de criticidad (IC): Se obtiene después de aplicar las consideraciones descritas anteriormente.

Formula de Índice de Criticidad (IC)

$$IC = FF \times CF \quad (1)$$

La FF se evalúa a partir de la tasa estimada de incidencia de fallas. La ponderación de FF se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Ponderación de la FF

<i>Frecuencia de Fallas (FF)</i>	<i>Valor</i>
<i>¿Qué tan frecuente son las fallas ocurridas?</i>	
Menos de 1 por año	1
Entre 2 y 12 por año	2
Entre 13 y 52 por año	3
Más de 52 por año (más de una por semana)	4

Nota. Tomado de Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial (p. 113), por Gasca et al., 2017, Información tecnológica.

La CF se evalúa a partir de la suma de: el impacto en la producción IP, el impacto en la seguridad y salud SS, los costos de reparación CR, el tiempo de reparación

TR, y el tiempo de operación TO. Estos criterios fueron elegidos por los expertos que validaron el instrumento y las tablas de ponderación, considerando que son los más significativos en la evaluación de la consecuencia que puede ocasionar una falla en un equipo industrial. Finalmente, IC se calcula utilizando la ecuación (2). (Gasca et al., 2017, p. 113)

$$IC = FFx(IP + SS + CR + TR + TO) \quad (2)$$

El IP registra porcentualmente la producción aproximada que se deja de obtener por día, debido a fallas ocurridas; el IP define la consecuencia inmediata de la ocurrencia de la falla, que puede representar un paro total o parcial de los quipos del sistema estudiado y al mismo tiempo el paro del proceso productivo de la unidad. (Gasca et al., 2017, p. 113). La ponderación del IP se muestra en la Tabla 8.

El SS registra la ocurrencia de eventos en los cuales alguna persona puede resultar lesionada, para este indicador se sugiere obtener la información y colaboración del personal de: recursos humanos, comités paritarios y salud ocupacional de la empresa. La ponderación de SS se muestra en la Tabla 9. El CR hace referencia al costo promedio por falla requerido para restituir el equipo a condiciones óptimas de funcionamiento, incluye labor, materiales y transporte. (Gasca et al., 2017, p. 114) La ponderación del CR se muestra en la Tabla 10.

Tabla 8

Ponderación del IP

<i>Impacto en la Producción (IP)</i>	<i>Valor</i>
<i>¿Cuál es el impacto en la producción?</i>	
Menor al 25 %	1
25 % de impacto	2
50 % de impacto	3
75 % de impacto	4

Nota. Tomado de Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial (p. 114), por Gasca et al., 2017, Información tecnológica.

Tabla 9*Ponderación del SS*

<i>Seguridad y Salud (SS)</i>	<i>Valor</i>
¿Cuál es la lesión más significativa que puede presentarse en la operación del equipo?	
No hay algún riesgo de lesión	1
Lesiones leves (son asistidas dentro de la fábrica, no hay incapacidad)	2
Lesiones significativas (incapacidad entre 1 y 30 días)	3
Lesiones de incapacidad parcial o permanente (mayor de 30 días)	4

Nota. Tomado de Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial (p. 114), por Gasca et al., 2017, Información tecnológica.

Tabla 10*Ponderación del CR*

<i>Costos de Reparación (CR)</i>	<i>Valor</i>
¿Cuál es el costo anual del mantenimiento del equipo?	
Menos de 1.000 dólares	1
Entre 1.000 y 5.000 dólares	2
Entre 5.001 y 10.000 dólares	3
Más de 10.000 dólares	4

Nota. Tomado de Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial (p. 114), por Gasca et al., 2017, Información tecnológica.

El TR es el tiempo promedio por día empleado para reparar la falla, se considera desde que el equipo pierde su función hasta que esté disponible para cumplirla nuevamente. El TR, mide la efectividad para restituir la unidad o unidades del sistema en estudio a condiciones óptimas de operatividad. La ponderación del TR se muestra en la Tabla 11 (Gasca et al., 2017, p. 114)

Tabla 11*Ponderación del TR*

<i>Tiempo de Reparación (TR)</i>	<i>Valor</i>
¿Cuál es el tiempo promedio para reparar el equipo?	
Menor a 4 horas	1
Igual o mayor a 4 horas y menor a 6 horas	2
Igual o mayor a 6 horas y menor a 12 horas	3
Mayor a 12 horas	4

Nota. Tomado de Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial (p. 114), por Gasca et al., 2017, Información tecnológica.

Según Gasca et al. (2017), TO es el tiempo que dura el equipo en producción. La ponderación del TO se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12

Ponderación del TO

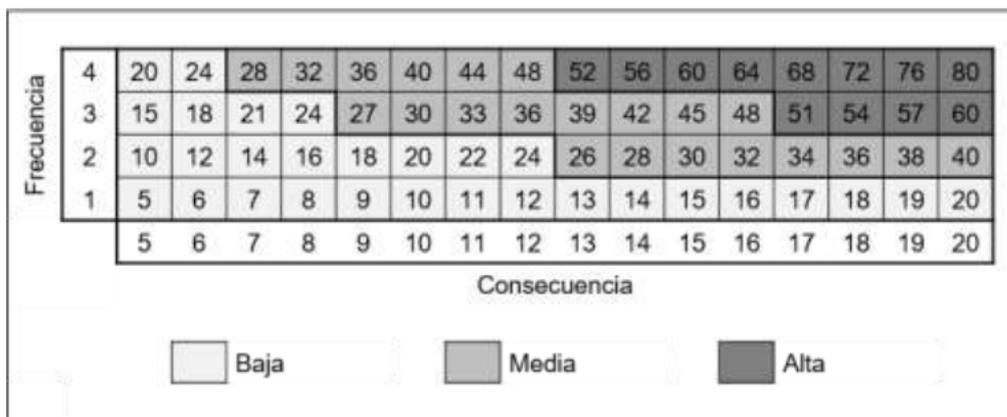
<i>Tiempo de Operación (TO)</i>	<i>Valor</i>
¿Cuál es el tiempo de trabajo de esta máquina?	
Opcionalmente	1
Un turno de trabajo	2
Dos turnos de trabajo	3
Totalmente	4

Nota. Tomado de Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial (p. 114), por Gasca et al., 2017, Información tecnológica.

Según Gasca et al. (2017), obtenido el valor del índice de criticidad de cada equipo, éstos se clasifican de acuerdo con la matriz de criticidad de la Figura 7.

Figura 7

Matriz de criticidad



Nota. Tomado de Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial (p. 115), por Gasca et al., 2017, Información tecnológica.

2.1.1.4 Análisis del contexto operacional

Una vez identificado el (los) sistema(s) críticos(s), la metodología de RCM propone que se desarrolle el contexto operacional del (los) sistema (s) a evaluar. (Parra & Crespo, 2012, p. 121)

Según Parra & Crespo (2012), comentan que para el desarrollo del contexto operacional hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Resumen operativo:** Especificar el propósito que cumple el sistema a analizar, describiendo los equipos, procesos y dispositivos de seguridad implicados, así

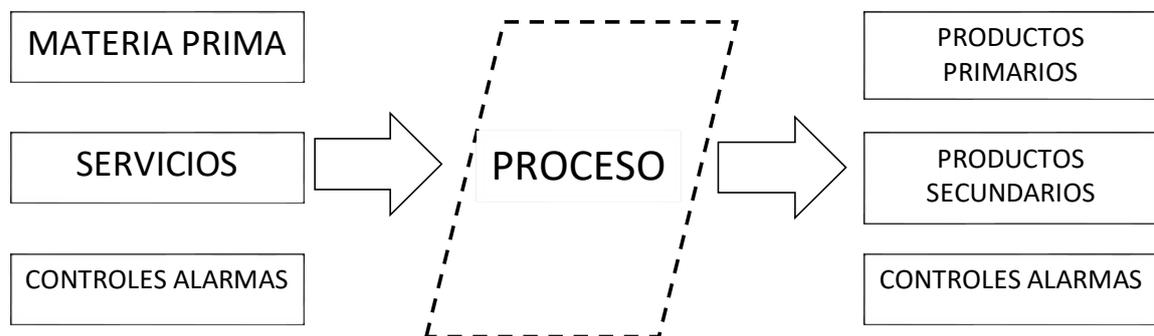
como detallar las metas relativas a la seguridad y medio ambiente y establecer planes futuros.

- **Personal:** Especificar la rotación de turnos de trabajo, las operaciones realizadas y los parámetros de calidad definidos.
- **División de procesos:** Especificar la división del proceso en sistemas, definir los límites y listar los componentes de los mismo, incluyendo indicadores y dispositivos de seguridad.

Contar con “una herramienta gráfica que facilita la visualización del contexto operacional, es el diagrama de entrada-proceso-salida (EPS) (Ver Figura 8). En estos diagramas se deben identificar las entradas, los procesos y las salidas principales del sistema” (Parra & Crespo, 2012, p. 125).

Figura 8

Diagrama entrada proceso salida



Nota. Tomado de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos (p. 125) por Parra & Crespo, 2012, Ingecon.

Enseguida, según Parra & Crespo (2012), se detallan los factores más importantes del Diagrama EPS:

Las entradas pueden ser de tres tipos:

- **Materia prima:** son los recursos tomados directamente por el proceso (sistema/equipo) para transformarlos o convertirlos (gas, crudo, madera...).
- **Servicios:** son los recursos utilizados por el proceso para la transformación de la materia prima (electricidad, agua, vapor...).

- **Controles:** entrada referida a los sistemas de control y sus efectos sobre los equipos o procesos pertenecientes al área en cuestión. Normalmente, no necesitan ser registrados como una función separada ya que su fallo siempre va asociado a una pérdida de señal de salida en alguna parte del proceso.

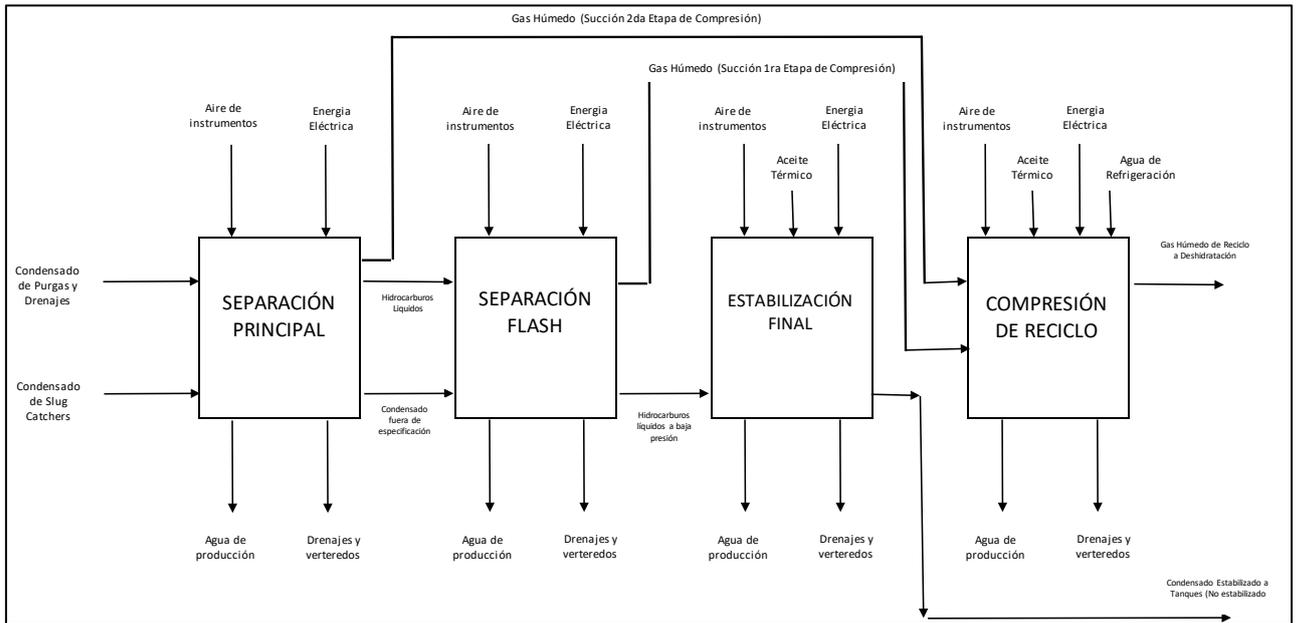
Las salidas van a estar asociadas a las funciones inherentes al sistema y pueden ser clasificadas como:

- **Productos primarios:** Constituyen los principales propósitos del sistema, generalmente son especificados por la tasa de producción y los estándares de calidad.
- **Productos secundarios:** se derivan de funciones principales que cumple el sistema dentro del proceso. La pérdida de los productos secundarios puede causar, en la mayoría de los casos, la pérdida de las funciones primarias y sus consecuencias pueden ser catastróficas.
- **Controles y alarmas:** van asociadas a las funciones de protección y control del sistema.

En la Figura 9 se presenta ejemplo de diagrama EPS:

Figura 9

Diagrama entrada proceso salida: Sistema de compresión



Nota. Tomado de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos (p. 125) por Parra & Crespo, 2012, Ingecon.

2.1.1.5 Desarrollo de análisis de modos y efectos de fallos (FMEA)

Es una herramienta utilizada en el proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) para identificar y evaluar los posibles modos de falla de un equipo o sistema y sus posibles efectos. Esta herramienta se utiliza para evaluar el riesgo asociado a cada modo de falla y para seleccionar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para minimizar los riesgos. Los autores Parra & Crespo (2012) afirman lo siguiente:

El análisis de los Modos y Efectos de Fallos (FMEA: Failures Modes and Effects Analysis) es la herramienta principal del RCM para optimizar la gestión de mantenimiento de una organización determinada, ya que ayuda a responder las primeras cinco preguntas básicas del RCM. El FMEA es un método sistemático que permite identificar los problemas antes de que ocurran y puedan afectar a los procesos y productos en un área determinada, bajo un contexto operacional dado. A partir del análisis realizado por los grupos de trabajo RCM a los distintos activos en su contexto operacional, se obtiene la información necesaria para prevenir las

consecuencias y los efectos de los posibles fallos a partir de la selección adecuada de las actividades de mantenimiento. Estas actividades se eligen de forma que actúen sobre cada modo de fallo y sus posibles consecuencias. (p. 128) (Ver Figura 2.6).

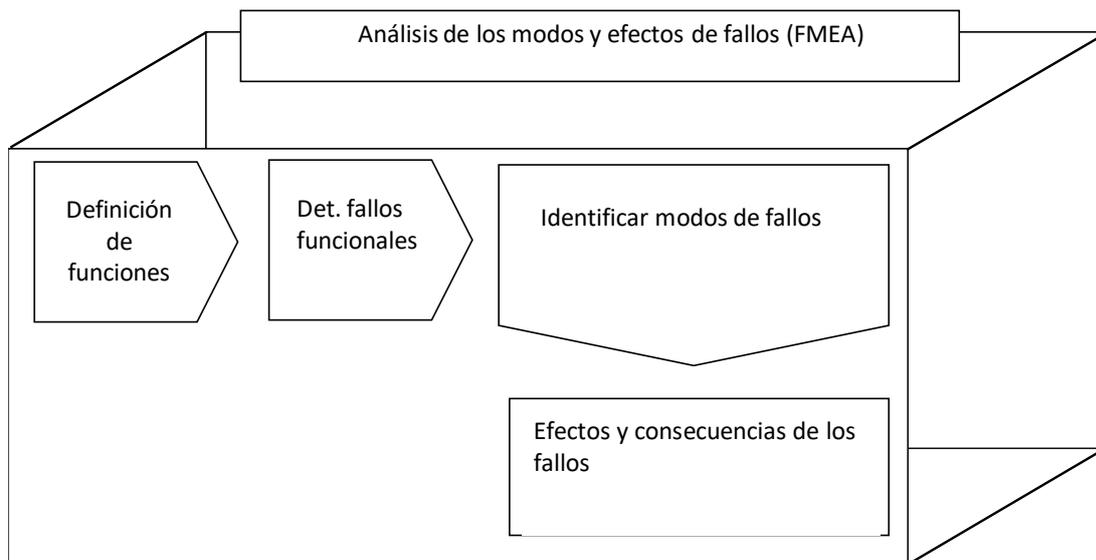
El objetivo básico del FMEA es encontrar todas las formas o modos en los que puede fallar un activo dentro de un proceso, e identificar las posibles consecuencias de los fallos en función de tres criterios básicos en el RCM: seguridad humana, seguridad del medio ambiente e impacto en la producción. (Parra & Crespo, 2012, p. 128)

Para cumplir este objetivo, los grupos de trabajo deben realizar el FMEA siguiendo la siguiente secuencia:

- Definir las funciones de los activos y sus respectivos estándares de operación/ejecución.
- Definir los fallos funcionales asociados a cada función del activo.
- Definir los modos de fallos asociados a cada fallo funcional.
- Establecer los efectos y consecuencias asociados a cada modo de fallo.

Figura 10

Esquema de análisis de los modos y efectos de fallos.



Nota. Tomado de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos (p. 128) por Parra & Crespo, 2012, Ingecon

2.2 Fundamentos sobre confiabilidad

La confiabilidad en mantenimiento es esencial para garantizar la eficiencia, la seguridad y la rentabilidad de un equipo o sistema, y es un objetivo clave del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

Como sabemos la fiabilidad es una aptitud que tiene un elemento (pieza, componente, aparato o sistema) para cumplir con unas prefijadas y mantenerse en los límites establecidos para las condiciones de explotación dadas durante un intervalo de tiempo requerido. Esta propiedad se expresa en forma de probabilidad de funcionamiento (probabilidad de que no falle el equipo/componente en estudio). Según la UNE-EN 15341: 2007, “la fiabilidad es la característica de un dispositivo expresada por la probabilidad de que este dispositivo cumpla con una función requerida en las condiciones de utilización y para un periodo de tiempo determinado”. Es decir, el concepto de fiabilidad puede definirse como la probabilidad de que un elemento funcione de manera satisfactoria durante un periodo de tiempo determinado en el que es utilizado en unas condiciones de funcionamiento específicas. (Parra & Crespo, 2012, p. 172)

Por otro lado, Arata (2005) expone lo siguiente:

Consideremos ahora como variable aleatoria el “tiempo de falla de un elemento”, es decir, el tiempo transcurrido entre el instante inicial del periodo al que se refiere la evaluación de confiabilidad y el instante en el elemento deja de funcionar; se define como densidad de probabilidad de falla aquella función $f(t)$ tal que la probabilidad infinitesimal de que el elemento se estropee en el tiempo t o en un intervalo infinitesimal de él sea precisamente $f(t)dt$. Esta probabilidad se representa en la Figura 11 por el área bajo la curva $f(t)$ en el intervalo infinitesimal $(t, t + dt)$. (p. 74)

Dado que inevitablemente el elemento acabara por estropearse en el tiempo, el área bajo la curva de la función $f(t)$ será igual a uno si se sitúa el límite temporal superior en el infinito:

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (3)$$

Estando el elemento en buenas condiciones en el instante inicial, la probabilidad de que se estropee en el tiempo t esta dado por:

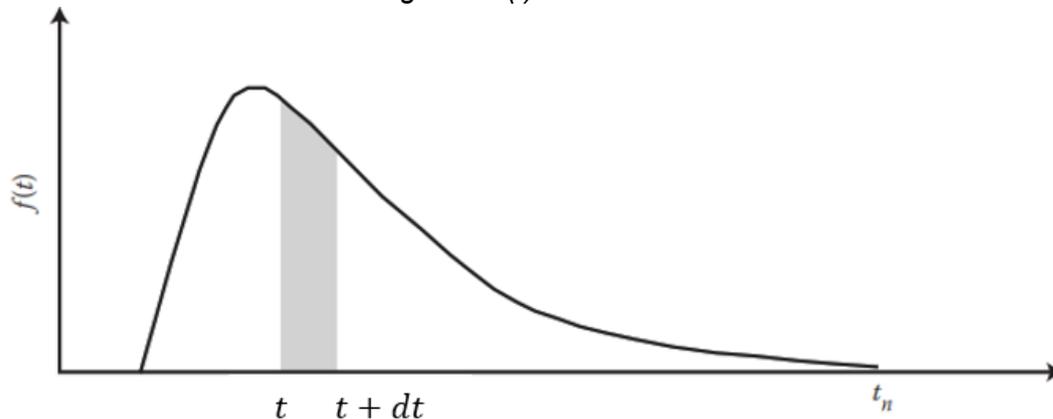
$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (4)$$

La confiabilidad, es decir la probabilidad de supervivencia (entendida como funcionamiento correcto) al tiempo t estará dada por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t) \quad (5)$$

Figura 11

Probabilidad de falla como integral de $f(t)$.



Nota. Tomado de *Manual de gestión de activos y mantenimiento* (p. 74), por Arata Andreani, 2005, RIL Editores.

2.2.1 Indicadores básicos de análisis estadístico de fiabilidad (Variables continuas)

Se refieren a los métodos y técnicas utilizados para analizar la confiabilidad de los equipos y sistemas mediante el uso de datos estadísticos continuos. Estos indicadores básicos de análisis estadístico de fiabilidad pueden ayudar a identificar patrones en los

datos y a predecir la confiabilidad de un equipo o sistema en el futuro. Esto a su vez puede ayudar a seleccionar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para minimizar el riesgo de falla. Los autores Parra & Crespo (2012), exponen la siguiente teoría:

El proceso de análisis estadístico de la fiabilidad estudia básicamente la variable aleatoria continua “tiempo hasta el fallo” (variable representada por el indicador TTF: time to failure, siglas en inglés. La información básica requerida para este tipo de análisis son las bases de datos donde almacenan los registros de tiempos históricos de fallos de los equipos. (p. 74)

En términos generales, el análisis de fiabilidad en procesos industriales, inicialmente se focaliza en la evaluación estadística de fallos en equipos no reparables. Los equipos/componentes no reparables tienen las siguientes características fundamentales:

- Su condición operativa no puede ser restaurada después de un fallo
- Su vida termina con un “único” fallo y debe ser reemplazado
- La variable aleatoria de interés es el tiempo hasta el fallo.

Para la realización de cualquier estudio de fiabilidad en activos industriales, básicamente se analizan cinco indicadores relacionados con el comportamiento de la variable aleatoria (x_i): tiempo hasta el fallo (TTF):

- La función de densidad de probabilidad del fallo, $f(x)$
- La función de distribución acumulada de probabilidad del fallo, $F(x)$
- La función de distribución acumulada inversa de probabilidad de que no ocurra el fallo, $C(x)$
- La función de frecuencia de fallos, $h(x)$
- La media (esperanza matemática): $E(x)$, en procesos de análisis de fiabilidad este indicador es conocido como: MTTF: mean time to failure (tiempo promedio hasta el fallo)

2.2.2 Función de confiabilidad

La función de confiabilidad es una herramienta estadística utilizada en el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). Los autores Jardine & Tsang (2021), afirman lo siguiente:

Una función complementaria a la función de distribución acumulativa es la función de confiabilidad, también conocida como función de supervivencia. Se determina a partir de la probabilidad de que el equipo sobreviva al menos durante un tiempo específico, t (p. 225). La función de confiabilidad se denota por $R(t)$ y se define como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (6)$$

y por supuesto, $R(t)$ también es equivalente a $1 - F(t)$. Como t tiende al infinito, $R(t)$ tiende a cero. La forma de la función de confiabilidad para las cuatro funciones de densidad se ilustra en la Figura 12. Considere un artículo que está operativo en el momento t_1 cuando comienza una misión. Es posible que deseemos determinar la probabilidad de que el elemento sobreviva a la misión de duración t . La medida requerida se puede expresar en la notación habitual de probabilidad condicional como:

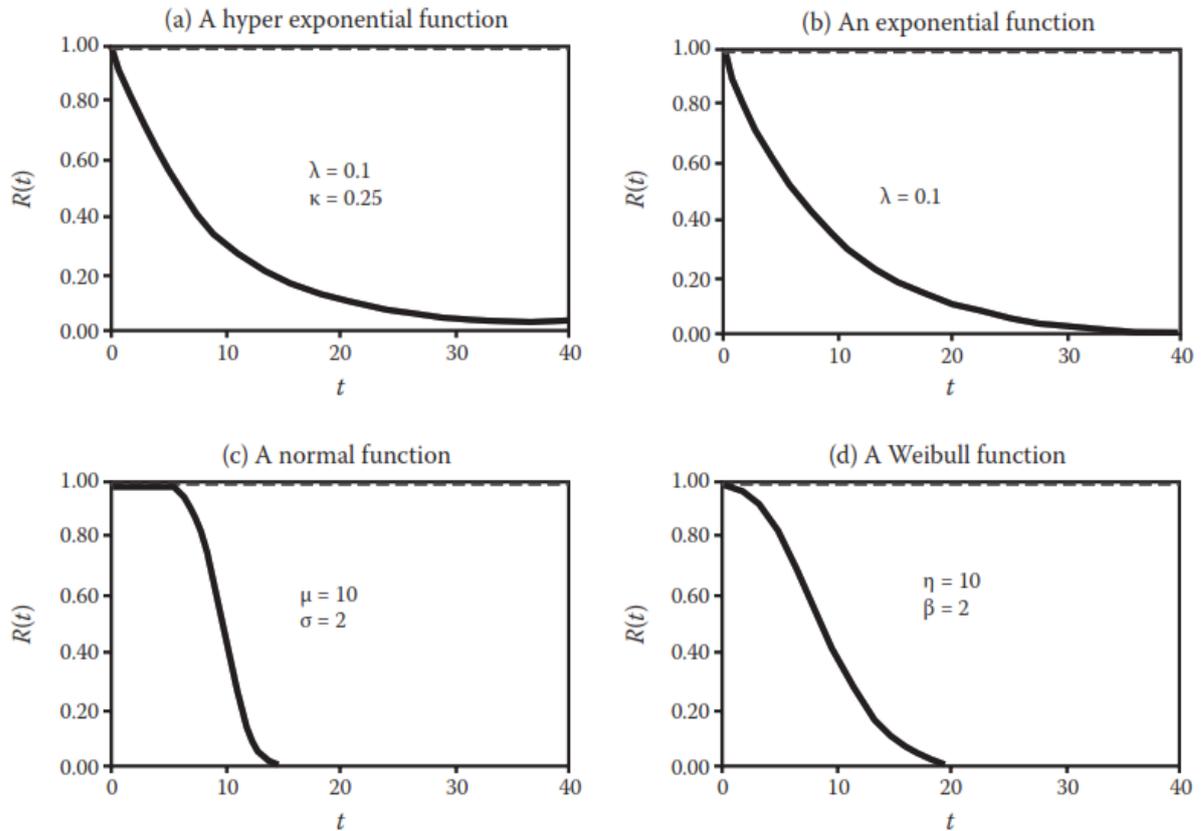
$$\begin{aligned} R(t_1 + t|t_1) &= P(T \geq t_1 + t | T \geq t_1) = \frac{P(T \geq t_1 + t)}{P(T \geq t_1)} = \frac{R(t_1 + t)}{R(t_1)} \\ &= \frac{\int_{t_1+t}^{\infty} \lambda \exp(-\lambda t) dt}{\int_{t_1}^{\infty} \lambda \exp(-\lambda t) dt} \end{aligned} \quad (7)$$

donde T es hora de fallar. Si el tiempo de falla sigue una distribución exponencial, la ecuación 21 se convertirá en:

$$R(t_1 + t|t_1) = \frac{\int_{t_1+t}^{\infty} \lambda \exp(-\lambda t) dt}{\int_{t_1}^{\infty} \lambda \exp(-\lambda t) dt} = \frac{\exp[-\lambda(t_1 + t)]}{\exp[-\lambda t_1]} = \exp(-\lambda t) = R(t). \quad (8)$$

Figura 12

Funciones de confiabilidad



Nota. Tomado de Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications (p. 226) por Jardine & Tsang, 2021, Prensa CRC

(a) Función hiperexponencial:

$$R(t) = k \exp[-2k\lambda t] + (1 - k)\exp[-2(1 - k)\lambda t] \quad (9)$$

(b) Función exponencial:

$$R(t) = \exp[-\lambda t] \quad (10)$$

(c) Función normal:

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt \quad (11)$$

(d) Función de Weibull:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (12)$$

2.3 Confiabilidad de sistemas

La confiabilidad de sistemas en serie y paralelo es un concepto importante en el RCM, ya que esto se refiere a la forma en que los sistemas están diseñados y cómo eso afecta su confiabilidad.

2.3.1 Sistemas en serie

En un sistema en serie, los componentes se colocan uno después del otro, de modo que la salida de un componente se convierte en la entrada del siguiente. Por lo tanto, el rendimiento del sistema completo está determinado por la capacidad de cada componente para funcionar correctamente. (Ver Figura 2.9). El autor Solé (1991), expresa lo siguiente:

Los sistemas en serie se caracterizan porque están en operación sólo si todos sus componentes operan. Como la probabilidad de que se presente un evento, es el producto de probabilidades de dichos eventos, se infiere que la fiabilidad es el producto de fiabilidades de sus componentes (p. 225).

Solé (1991), dice:

$$R = R_1 * R_2 * R_3 * \dots * R_n \quad (13)$$

En el caso de que todos los componentes tengan una distribución exponencial L , y siendo $R = \exp(-L_1 \cdot t)$, resulta:

$$R = e^{(-L_1 * t - L_2 * t - L_3 * t - \dots)} \quad (14)$$

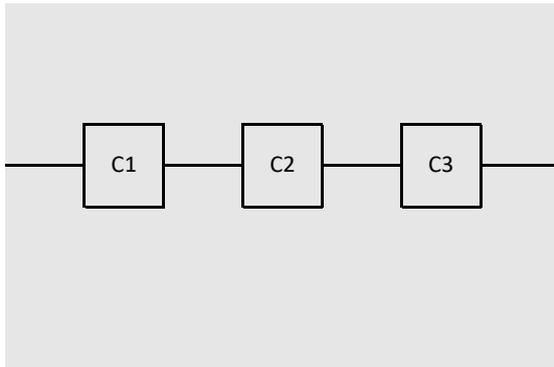
Ejemplo: Sean dos válvulas de solenoide (a y b) en serie en un circuito con probabilidades individuales de fallo/año de 0,05. La fiabilidad del conjunto es:

$$L_{(conjunto)} = La + Lb = 0.1/\text{año} \quad (15)$$

$$R_{(conjunto)} = e^{-L * t} = e^{-0.1} = 0.905 \quad (16)$$

Figura 13

Sistemas en serie



Nota. Adaptado de Fiabilidad y seguridad de procesos industriales (p. 27) por Solé, 1991, Marcombo.

2.3.2 Sistemas en paralelo

Los sistemas en paralelo se caracterizan porque el sistema falla si todos los componentes fallan en su operación. Siendo la probabilidad de que se presente un evento, el producto de probabilidades de los eventos componentes, se deriva que su no fiabilidad es el producto de sus No fiabilidades de sus componentes (Solé, 1991, p. 28). (Ver Figura 14)

Asimismo, Solé (1991), indica:

$$Q = Q_1 * Q_2 * Q_3 * \dots * Q_n \quad (17)$$

Y de aquí resulta:

$$R = 1 - Q \quad (18)$$

En el caso que todos los componentes tengan una distribución exponencial L , y siendo $R = \exp(-L_1 \cdot t)$, resulta:

$$R = 1 - (1 - e^{-L_1 \cdot t}) * (1 - e^{-L_2 \cdot t}) * (1 - e^{-L_3 \cdot t}) * \dots \quad (19)$$

Ejemplo: Sean dos válvulas de solenoide en paralelo en un circuito con probabilidades individuales de fallo/año de 0,05. Para que el sistema funcione con éxito, basta que una cualquiera o ambas válvulas operen correctamente. La No fiabilidad del conjunto es:

$$Q_{(conjunto)} = Qa * Qb = (1 - e^{-0.05}) * (1 - e^{-0.05})$$

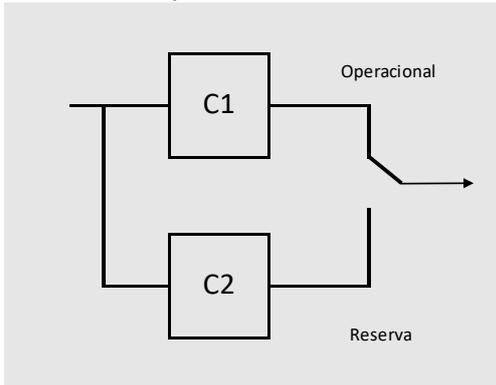
$$= 0.00238/\text{año} \quad (20)$$

Y la fiabilidad es:

$$R_{(conjunto)} = 1 - 0.00238 = 0.9976 \quad (21)$$

Figura 14

Sistemas en paralelo



Nota. Adaptado de Fiabilidad y seguridad de procesos industriales (p. 29) por Solé, 1991, Marcombo

2.4 Curva de la bañera o de Davies

Como lo afirma Jardine & Tsang (2021), la "curva de la bañera" es una representación gráfica de la tasa de falla de un equipo o sistema a lo largo del tiempo. La curva se llama "de la bañera" debido a su forma, que se asemeja a la de una bañera.

“La curva de la bañera puede interpretarse como el efecto agregado de tres categorías de fallas: fallas de calidad, fallas relacionadas con el estrés y fallas por desgaste”. (Jardine & Tsang, 2021,p. 229)

Según Jardine & Tsang (2021), las regiones A, B, y C de la Figura 15 están etiquetados como

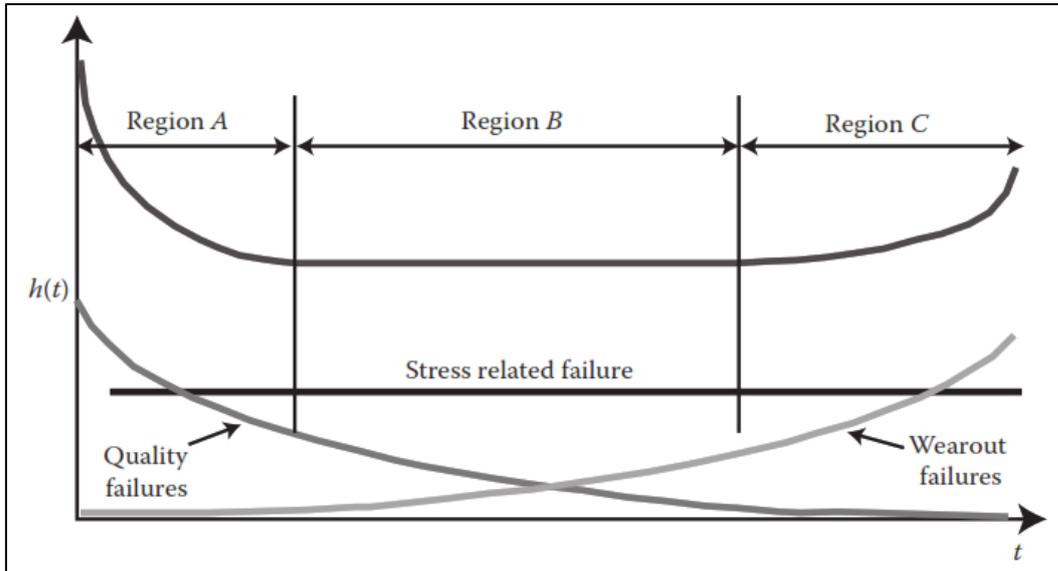
A = Período de rodaje

B = funcionamiento normal en el que las fallas que ocurren se deben principalmente a oportunidad

C = deterioro, es decir, debido al desgaste

Figura 15

Curva de la bañera



Nota. Tomado de Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications (p. 230) por Jardine & Tsang, 2021, Prensa CRC

El autor Moubray (2004), nos comentó que la curva de la bañera es una herramienta útil para el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) ya que permite identificar los modos de falla y los momentos de falla más probables de un equipo o sistema. Esto puede ayudar a desarrollar estrategias de mantenimiento adecuadas, como la implementación de pruebas de diagnóstico en los primeros años de vida del equipo o sistema para detectar fallas tempranas o la planificación de reemplazos preventivos de componentes críticos cerca del final de la vida útil del equipo o sistema.

Asimismo, Mora (2009) afirma lo siguiente:

El indicador de confiabilidad Beta es una medida de dispersión del comportamiento de las fallas y es inverso a la duración promedio de ellas. En la fase I de la curva de Davies aparecen fallas minúsculas e intensas en tiempo, son impredecibles y de comportamiento atípico. En la fase II ya se empieza a tener cierto control sobre las fallas imprevistas y empiezan a estabilizarse en tiempo de duración. Normalmente, en la fase II las fallas intempestivas y desconocidas desaparecen. En la etapa I de la fase III ya las fallas se vuelven muy similares en tiempo y se

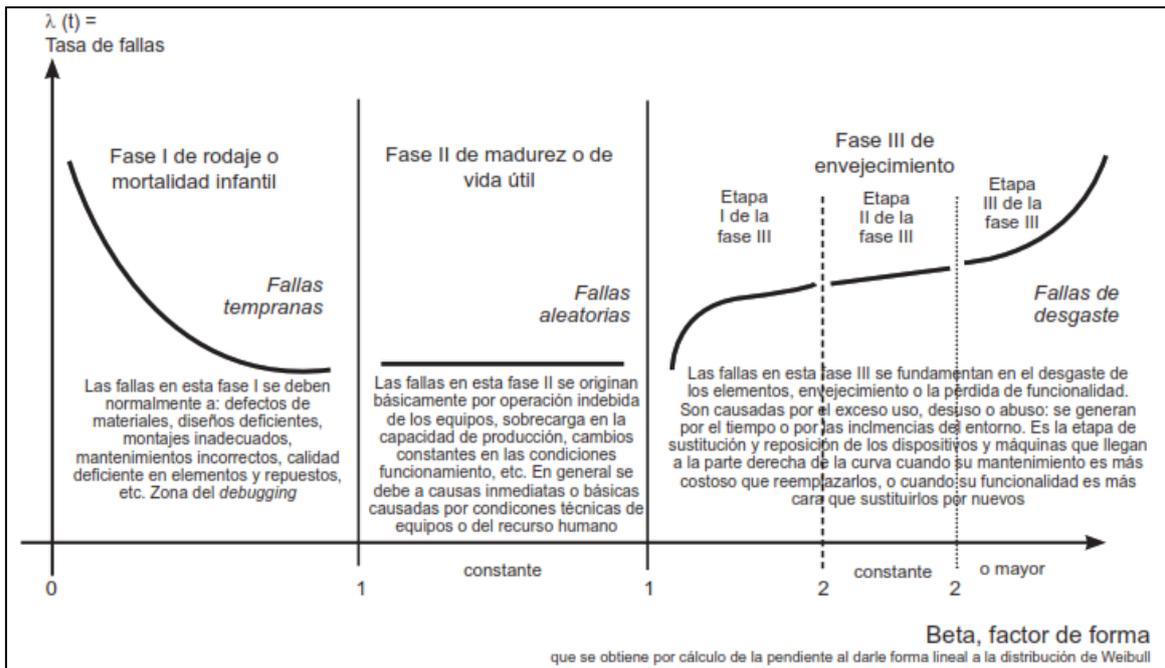
conocen con antelación. En la zona II de la fase III la duración de las fallas tiende a estabilizarse. Y en la sección III de la fase III ocurren fallas totalmente predecibles y sus tiempos de duración se normalizan totalmente (p. 108).

“la curva de la bañera se fundamenta, en la función de la tasa de fallos o función de riesgo de la Distribución Probabilística de Weibull, para diferentes valores del parámetro de forma β ($\beta < 1$; $\beta = 1$ y $\beta > 1$)” (Mora, 2009, p. 106). (Ver Figura 16)

“Conociendo el valor real de beta para una muestra de datos de fallos de un artículo, se puede determinar en qué etapa de ciclo de vida se encuentra dicho artículo, y con ello establecer una estrategia de mantenimiento adecuada” (Mora, 2009, p. 109)

Figura 16

Beta en la Curva de la bañera

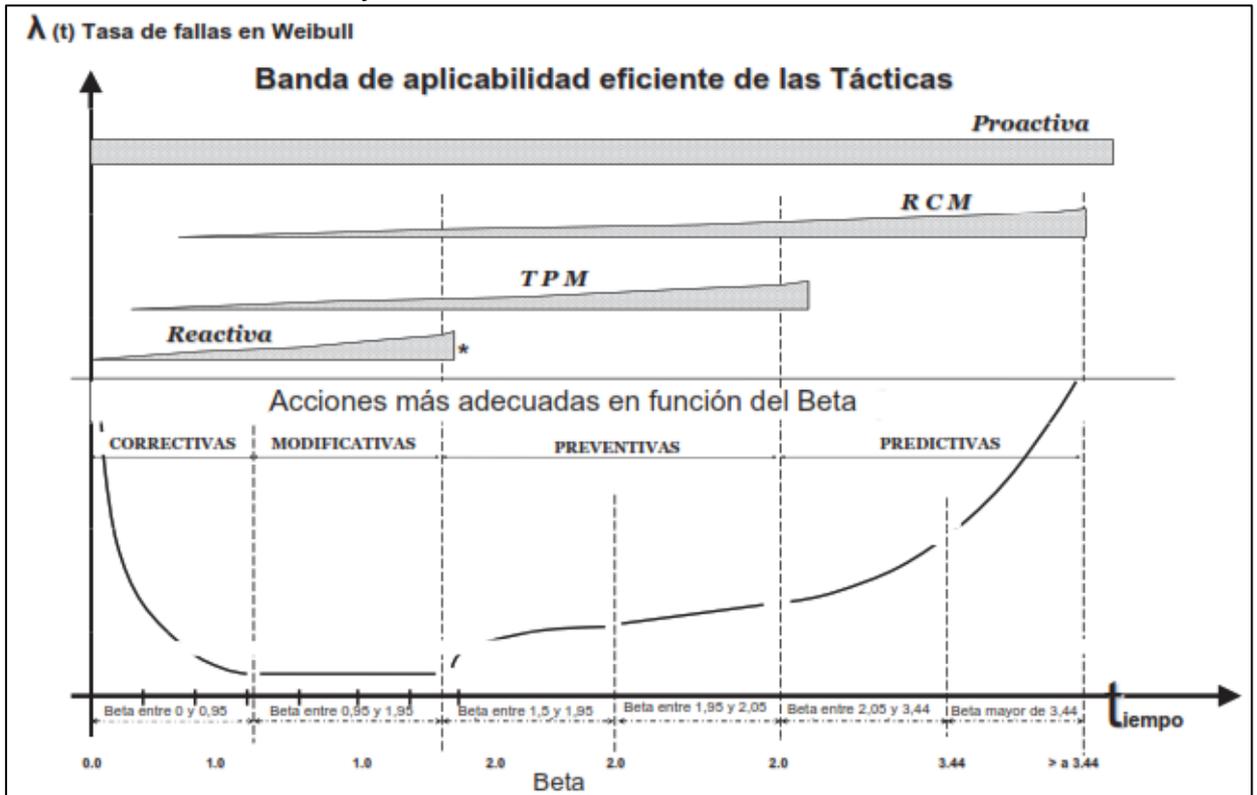


Nota. En el gráfico el indicador de confiabilidad Beta es una medida de dispersión del comportamiento de las fallas y es inverso a la duración promedio de ellas. Tomado de *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control* (p. 108), por Mora, 2009, Editorial Alfaomega

En la siguiente Figura 17 se denota que la línea a medida que se vuelve más gruesa a la aplicación de la táctica es más eficiente ya que se acomoda más a las características de las fallas y de su tasa.

Figura 17

Curva de Davies, acciones y tácticas adecuadas, acorde al valor del Beta.



Nota. En el gráfico se puede apreciar la curva de Davies, acciones y tácticas adecuadas, acorde al valor del Beta. Tomado de *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control* (p. 109), por Mora, 2009, Editorial Alfaomega

2.5 Bondad de ajuste

La prueba de bondad de ajuste es una herramienta valiosa para la evaluación de la confiabilidad de un equipo o sistema en RCM, ya que permite seleccionar el modelo de distribución de probabilidad adecuado para los datos de falla, lo que puede ayudar a predecir la tasa de fallas futuras y mejorar la estrategia de mantenimiento. A continuación, el autor Mora (2009), afirma lo siguiente:

Las pruebas de bondad de ajuste buscan comprobar una hipótesis, según la cual los datos que se observan corresponden a una distribución seleccionada bajo los parámetros estimados; entre otras pruebas para juzgar el ajuste de una muestra, se incluyen los métodos visuales y las pruebas de tendencia. (p. 201)

Las investigaciones estadísticas proporcionan una gran cantidad de pruebas que se pueden realizar para determinar si una muestra de datos corresponde a una

distribución específica. Entre ellas están la Ji^2 , la de Kolmogórov-Smirnov, la de Anderson-Darling, la de Cramer von Mises, la de Watson, la de Kuiper, entre otras. (Mora, 2009, p. 201)

2.6 Modelo de Weibull

Los autores Walpole et al. (2012), nos comentan que el modelo de Weibull se utiliza para estimar la tasa de fallas de un equipo o sistema en función del tiempo de operación, lo que permite a los ingenieros de mantenimiento planificar y programar el mantenimiento preventivo de manera más efectiva.

“la tecnología actual permite que los ingenieros diseñen muchos sistemas complicados cuya operación y seguridad dependen de la confiabilidad de los diversos componentes que conforman los sistemas”. (Walpole et al., 2012, p. 203)

La variable aleatoria continua X , según Walpole et al. (2012), tiene una distribución de Weibull, con parámetros α y β , si su función de densidad es dada por:

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha\beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^\beta}, & x > 0, \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (22)$$

Donde $\alpha > 0$ y $\beta > 0$.

En la Figura 2.14, se ilustran las gráficas de la distribución de Weibull para $\alpha = 1$ y diversos valores del parámetro β . Vemos que las curvas cambian de manera considerable para diferentes valores del parámetro β . Si permitimos que $\beta = 1$, la distribución de Weibull se reduce a la distribución exponencial. Para valores de $\beta > 1$ las curvas adoptan ligeramente la forma de campana y se asemejan a las curvas normales, pero muestran algo de asimetría. (Walpole et al., 2012, p. 203)

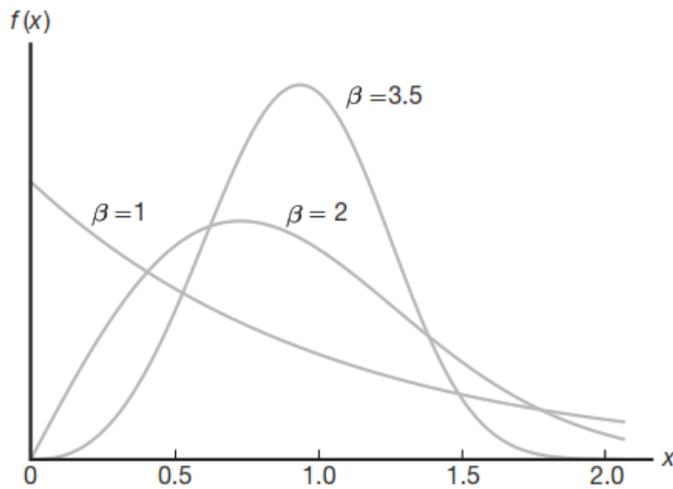
Los autores Walpole et al. (2012), indican que la media y la varianza de la distribución de Weibull se establecen en el siguiente teorema:

$$\mu = \alpha^{\frac{-1}{\beta}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \text{ y } \sigma^2 = \alpha^{\frac{-2}{\beta}} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right\} \quad (23)$$

Al igual que la distribución gamma y la exponencial, la distribución de Weibull se aplica a problemas de confiabilidad y de prueba de vida como los de **tiempo de operación antes de la falla o la duración de la vida** de un componente, que se miden desde algún tiempo específico hasta que falla. Representemos este tiempo de operación antes de la falla mediante la variable aleatoria continua T, con función de densidad de probabilidad f(t), donde f(t) es la distribución de Weibull. Ésta tiene la flexibilidad inherente de no requerir la propiedad de falta de memoria de la distribución exponencial. La función de distribución acumulativa (fda) para la distribución de Weibull se puede escribir en forma cerrada y realmente es muy útil para calcular probabilidades. (Walpole et al., 2012, p. 203-204)

Figura 18

Distribuciones de Weibull ($\alpha = 1$)



Nota. Tomado de *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (p. 204), por Walpole et al, 2012, Pearson Educación de México

Los autores Walpole et al. (2012), indican que la función de distribución acumulativa para la distribución de Weibull es dada por:

$$F(x) = 1 - e^{-\alpha x^\beta}, \text{ para } x \geq 0, \quad (24)$$

Para $\alpha > 0$ y $\beta > 0$.

Ejemplo: El tiempo de vida X , en horas, de un artículo en el taller mecánico tiene una distribución de Weibull con $\alpha = 0.01$ y $\beta = 2$. ¿Cuál es la probabilidad de que falle antes de 8 horas de uso?

Solución: $P(X < 8) = F(8) = 1 - e^{-(0.018)8^2} = 1 - 0.527 = 0.473$.

La tasa de fallas para la distribución de Weibull

Cuando se aplica la distribución de Weibull, con frecuencia es útil determinar la **tasa de fallas** (algunas veces denominada tasa de riesgo) para tener conocimiento del desgaste o deterioro del componente. Comencemos por definir la confiabilidad de un componente o producto como la *probabilidad de que funcione adecuadamente por al menos un tiempo específico en condiciones experimentales específicas*. (Walpole et al, 2012, p. 204).

Por lo tanto, de acuerdo con los autores Walpole et al. (2012), si $R(t)$ se define como la confiabilidad del componente dado en el tiempo t , escribimos:

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t), \quad (25)$$

donde $F(t)$ es la función de distribución acumulativa de T . La probabilidad condicional de que un componente fallará en el intervalo de $T = t$ a $T = t + \Delta t$, dado que sobrevive hasta el tiempo t , es:

$$\frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \quad (26)$$

Al dividir la proporción entre Δt y tomar el límite como $\Delta t \rightarrow 0$, obtenemos **la tasa de fallas**, denotada por $Z(t)$. De aquí,

$$Z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} = \frac{F'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}, \quad (27)$$

que expresa la tasa de fallas en términos de la distribución del tiempo de operación antes de la falla.

Como $Z(t) = f(t) / [1 - F(t)]$, entonces la tasa de falla es dada como sigue:

La **tasa de fallas** en el tiempo t para la distribución de Weibull es dada por

$$Z(t) = \alpha \beta t^{\beta-1}, \quad t > 0. \quad (28)$$

Interpretación de las tasas de fallas

La función de distribución de Weibull se caracteriza por su forma de curva, que puede tener una forma creciente, decreciente o constante en el tiempo. Esta curva se utiliza para describir la tasa de fallas de un equipo o sistema a lo largo de su vida útil. Los autores Walpole et al (2012) expresan la siguiente definición:

La cantidad $Z(t)$ es bien llamada tasa de fallas porque realmente cuantifica la tasa de cambio con el tiempo de la probabilidad condicional de que el componente dure una Δt adicional *dado que ha durado el tiempo t* . La tasa de disminución (o crecimiento) con el tiempo también es importante. (p. 205)

Según los autores Walpole et al. (2012), los siguientes puntos son fundamentales:

a) Si $\beta = 1$, la tasa de fallas = α , es decir, una constante. Esto, como se indicó anteriormente, es el caso especial de la distribución exponencial en que predomina la falta de memoria.

b) Si $\beta > 1$, $Z(t)$ es una función creciente del tiempo t que indica que el componente se desgasta con el tiempo.

c) Si $\beta < 1$, $Z(t)$ es una función decreciente del tiempo t y, por lo tanto, el componente se fortalece o endurece con el paso del tiempo.

2.7 Cálculo de Disponibilidad

La disponibilidad se refiere a la probabilidad de que un sistema o equipo esté operativo y listo para realizar su función cuando sea necesario durante un período determinado. La disponibilidad se expresa como un porcentaje y se calcula utilizando la relación entre el tiempo de funcionamiento real del sistema y el tiempo total disponible durante un período específico. El autor Gómez De León (1998) expone los siguientes conceptos referidos a la disponibilidad:

Refiere el concepto de disponibilidad como el significado de la capacidad de algo para ser utilizado cuando se necesite. Esto es, en definitiva, el motivo central del mantenimiento, por lo que si se encuentra la forma de medir la disponibilidad de los distintos elementos (dispositivos, equipos, sistemas, etc.) que componen la instalación en estudio, se tendrá una medida del rendimiento del mantenimiento realizado.

Se define *disponibilidad*, y se denota por $D(t)$ (a veces como $A(t)$, del inglés *availability*), como la *probabilidad* de estar en uso un dispositivo, equipo o sistema en un instante de tiempo dado.

En cuanto a la fiabilidad, es sabido que cuanto mayor sea esta, más tarde se producirá -por término medio- el fallo, es decir, mayor será el MTBF. Por lo que durante más tiempo estará disponible el ítem en cuestión. (p. 70)

Expresión matemática

Para obtener la expresión de la disponibilidad partiremos del planteamiento siguiente:

“La disponibilidad de un ítem en un instante de tiempo $(t + dt)$, es decir, la probabilidad de que se encuentre disponible en dicho instante vendrá dada por la suma de las probabilidades de los dos sucesos siguientes” (Gómez De León, 1998, p. 71)

Gómez De León (1998), expresa lo siguiente:

- a) Que esté disponible en el instante de tiempo t y no falle durante el intervalo dt subsiguiente.
- b) Que no esté disponible en el instante de tiempo t y se repare en el intervalo dt subsiguiente.

Esto se expresa como sigue:

$$D(t + dt) = D(t) \cdot (1 - \lambda(t)dt) + (1 - D(t)) \cdot u(t)dt \quad (29)$$

que, operando y dividiendo entre dt , se convierte en lo siguiente:

$$\frac{D(t + dt) - D(t)}{dt} + D(t) \cdot [\lambda(t) + u(t)] = u(t) \quad (30)$$

Hallando el límite de la expresión anterior cuando dt tiende a cero, resulta finalmente:

$$D'(t) + D(t) \cdot [\lambda(t) + u(t)] = u(t) \quad (31)$$

Ecuación diferencial de la que no siempre se puede obtener una expresión explícita de la disponibilidad.

En el caso en el que la función de distribución de fallos, $F(t)$, como la función de distribución de tiempos de reparación, $M(t)$, sigan una ley exponencial, la solución de la ecuación diferencial anterior será:

$$D(t) = \frac{1}{\lambda + u} \cdot [u + \lambda e^{-(\lambda+u)t}] \quad (32)$$

Que también recibe el nombre de *disponibilidad instantánea*

Se observa en la expresión anterior que, al aumentar infinitivamente el tiempo, la disponibilidad tiende asintóticamente al valor constante siguiente:

$$D(t) = \frac{1}{\lambda + u} \quad (33)$$

Donde D representa la disponibilidad para un tiempo infinito, o disponibilidad estacionaria, también denominada coeficiente de disponibilidad o simplemente

disponibilidad, refiriéndose entonces a la función dependiente del tiempo, $D(t)$, con el nombre de disponibilidad instantánea.

A partir de las expresiones anteriores se deduce que, en los supuestos anteriores, la disponibilidad, dada por la expresión anterior, se puede formular como sigue:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (34)$$

2.8 Modelo de minimización de costos basado en reemplazo preventivo por tiempo (edad constante)

Según Parra & Crespo (2012), en este modelo se establece un intervalo de tiempo entre reemplazos preventivos, y se determina el costo total de mantenimiento durante ese intervalo de tiempo. A medida que el intervalo de tiempo se extiende, aumenta la probabilidad de que el equipo o componente falle y necesite un mantenimiento correctivo, lo que aumentará el costo total de mantenimiento. Por otro lado, si el intervalo de tiempo es demasiado corto, se incurrirá en costos adicionales de mantenimiento preventivo innecesarios.

El modelo de reemplazo preventivo por tiempo tiene por objetivo principal, cuantificar el periodo de tiempo de ejecución de mantenimiento en el cual se genera el menor costo (costo mínimo por unidad de tiempo). A continuación, se presentan las expresiones matemáticas que permiten calcular el periodo de tiempo que genera el mínimo costo de mantenimiento de reemplazo preventivo por tiempo. (Parra & Crespo, 2012, p. 196)

$$C(ti) = \frac{(Cf \times F(ti)) + (Cp \times (1 - F(ti)))}{ti(1 - F(ti)) + \int_0^{ti} ti \times f(t)dt} = \frac{\text{unidad . monetaria}}{\text{tiempo}} \quad (35)$$

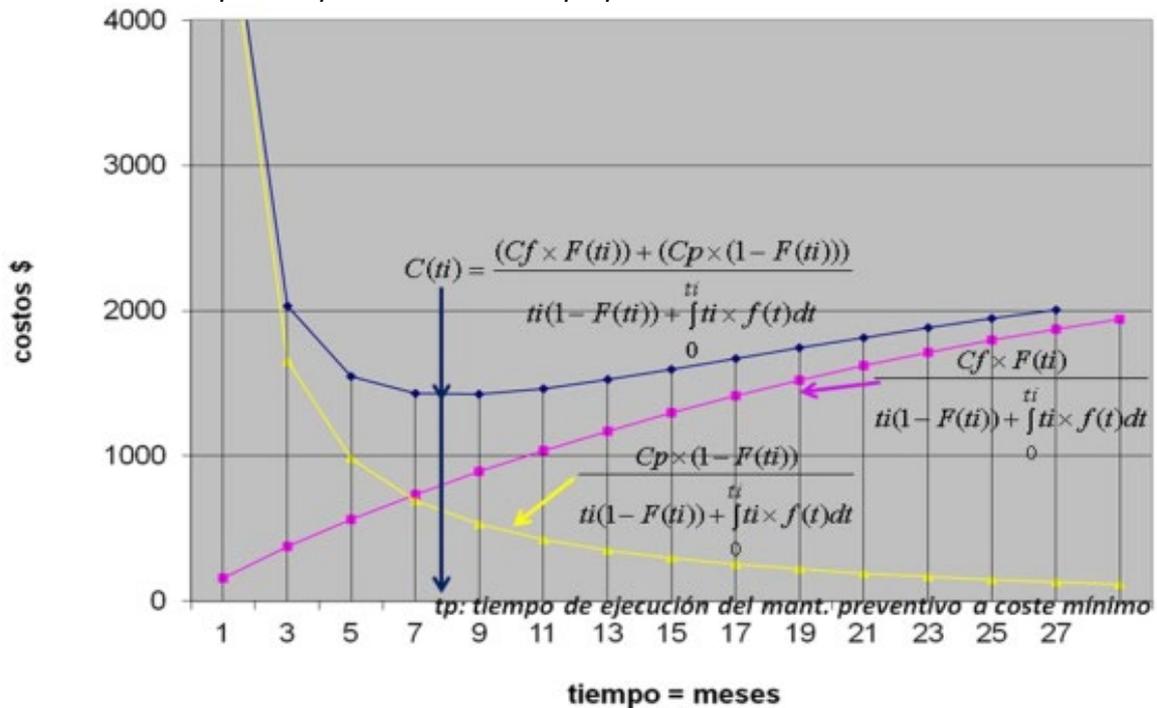
Asimismo, los autores Parra & Crespo (2012), comentan lo siguiente:

- **Ti:** tiempos hasta la falla TTFi (unidad en tiempo: horas, días, meses, años, etc.)

- **C(ti)**: costo promedio de la estrategia de mantenimiento de reemplazo preventivo por unidad de tiempo, por ejemplo: dólares/mes (el costo mínimo se encontrará evaluando el factor de costos “C” para diferentes valores de “ti” hasta conseguir el valor de costo mínimo). El periodo de tiempo asociado al valor de costo mínimo será el momento en el cual se propone ejecutar la actividad de mantenimiento de reemplazo preventivo, este tiempo se denomina “tp” (tiempo de ejecución del mantenimiento preventivo a costo mínimo). Ver Figura 2.15
- **F(ti)**: Probabilidad de ocurrencia de falla (unidad en porcentaje: %)
- **f(ti)**: Función de densidad de probabilidad de falla: f(x)
- **Cf**: costos por mantenimiento correctivo por falla (materiales, mano de obra, lucro cesante, seguridad, ambiente, etc.). Unidad: dinero; dólares, euros, etc.
- **Cp**: costos por mantenimiento preventivo/planificado (materiales, mano de obra, lucro cesante, seguridad, ambiente, etc.). Unidad: dinero; dólares, euros, etc.

Figura 19

Costo mínimo esperado por unidad de tiempo para MP a edad constante.



Nota. Tomado de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos (p. 197), por Parra & Crespo, 2012, Ingecon.

2.9 Impacto económico de un modo de falla

Según Parra & Crespo (2012), nos mencionan que los costos de la no disponibilidad por fallas (CIF) es un indicador que mide la repercusión económica ocasionada por los efectos que conlleva un modo de falla en un periodo de tiempo determinado. Asimismo, indican que la unidad de medición (dinero/tiempo) se puede dar en dólares/año, dólares/mes, etc.

Cuya expresión de cálculo, de acuerdo Parra & Crespo (2012), es:

$$CIF = FF \times MDT \times (CD + CP) \quad (36)$$

Donde:

FF: Frecuencia de fallas = fallas/mes, fallas/año, etc.

MDT: Tiempo promedio fuera de servicio = horas/fallas

CD: Costos directos de corrección por fallas por hora = \$/hora (incluye los costes de materiales y mano de obra).

CP: Costos penalización por hora = \$/hora (incluye los costos de oportunidad provocados por los eventos de fallas, paradas de plantas, retrasos de producción, productos deteriorados, baja calidad, retrabajo, impacto en seguridad, ambiente, etc.)

2.10 Marco Conceptual

- **Canteado:** Operación mediante por el cual se obtiene el ancho requerido de una determinada tabla.
- **Capacidad efectiva del sistema:** Es un parámetro fundamental que caracteriza la disposición que tiene un sistema total para cumplir con la que a él se le imponga, generalmente sobre la base de conocimiento del comportamiento de las fallas y de correspondientes reparaciones de los componentes del sistema (planta y equipos) cuando estos son operados de acuerdo con políticas uniformes establecidas previamente.

- **Curva de la bañera:** Representación gráfica característica que relaciona la tasa de fallos de un ítem con un tiempo de operación. Utilizable para elementos sujetos a degradaciones o deterioros con el tiempo. Tiene tres zonas: mortalidad infantil, vida útil y degradación.
- **Disponibilidad:** Se define como la probabilidad de que un equipo este operando, o sea, disponible para su uso, durante un periodo de tiempo determinado. Es decir, la disponibilidad es una función que permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado.
- **Línea:** Conjunto de unidades. Reciben como entrada la materia prima y entregan el producto terminado. Ello define su función.
- **Moldurado:** Operación que se lleva a cabo sobre la madera para conseguir perfiles deseados.
- **PDF:** Abreviatura de función de densidad de probabilidad.
- **Piso Machihembrado:** Se trata de listones de madera, cuyos extremos laterales están perfilados en forma de pestaña (macho) y canalones (hembra), conectados entre sí para formar una escala unificada. Suele utilizarse para revestir suelos y techos.
- **Planta:** Conjunto de líneas en el sentido de producción. Agrega además todas las funciones requeridas para entregar producto terminado. Por ejemplo: producción, mantenimiento, contabilidad, ingeniería, informática, etc.
- **Sistema:** Conjunto de componentes interdependientes, concebidos para realizar una función dada, en condiciones dadas, y en un intervalo de tiempo dado.

Figura 11

Principales productos



Nota. Adaptado de Maderera Bozovich S.A.C (s.f.). Superficies [Captura de pantalla]. Recuperado el 15 de Mayo del 2023, de <http://www.bozovich.com/superficies/>

Figura 22

Sólidos sin barnizar (piso machihembrado-madera moldurada)



Nota. Tomado de *Los pisos de madera del Perú se exportaron principalmente a China*, por Luis Miguel Guerrero, 2 de Abril 2017, de <https://enlinea.pe/2017/04/02/exportaciones-pisos-maderas-superaron-los-us-70-millones-ano-pasado/>

3.2 Análisis de criticidad de todo el sistema de producción.

La cadena de producción de Bozovich consta de 4 procesos productivos en su planta principal, ubicada en el distrito de Lurín, Lima Metropolitana. Tomando como referencia la teoría mencionada en el Capítulo II, apartado 2.1.1.3 [jerarquización y criticidad de equipos], se analizó cual es el área que requiere mayor intervención de técnicas de mejora en la gestión de mantenimiento.

Es importante mencionar que se seleccionó solo un área específica, ya que aplicar herramientas de gestión de mantenimiento en todas las áreas demandan mucho tiempo, inversión y esfuerzo, y que no se mostraran en la presente investigación.

En la Tabla 13 se visualiza los sistemas de producción con las distintas máquinas que la componen, asimismo, en cada una de ellas se indica su respectivo índice de Criticidad (IC).

Tabla 13

Listado de máquinas y su respectivo sistema de producción al que pertenecen

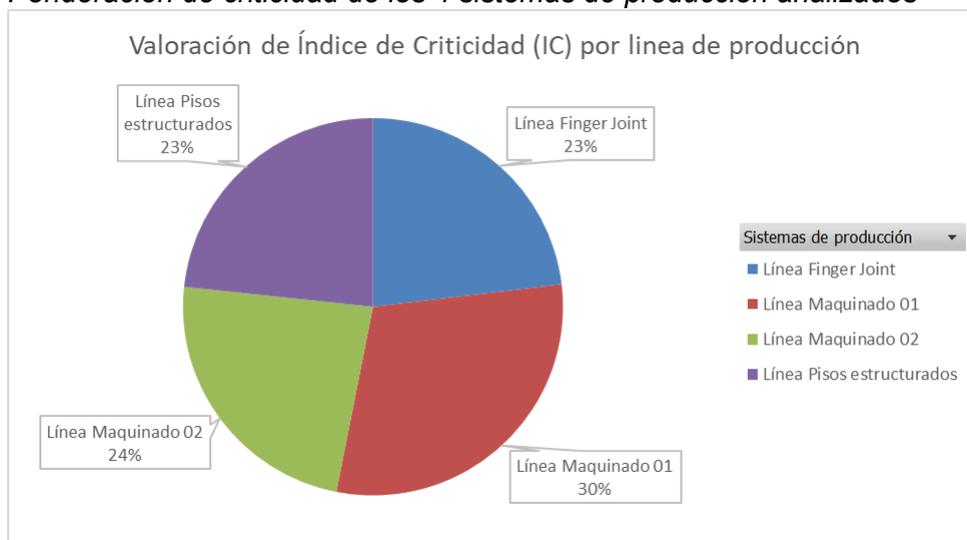
Sistemas de producción	Descripción máquina	Frecuencia de fallas (FF)	Impacto de la producción (IP)	Seguridad y Salud (SS)	Costo de reparación (CR)	Tiempo de reparación (T)	Tiempo de operación (TO)	Índice de Criticidad (IC)	Criticidad
Línea Maquinado 01	MEDIDOR DE HUMEDAD	4	3	4	3	4	4	72	Alta
Línea Maquinado 01	MULTILAMINA 01	4	4	2	3	2	3	56	Alta
Línea Maquinado 01	OPTIMIZADOR	3	3	3	3	4	3	48	Media
Línea Maquinado 01	MOLDURERA 01	3	4	3	3	2	4	48	Media
Línea Maquinado 01	CEPILLADORA 01	3	4	2	3	3	4	48	Media
Línea Maquinado 02	MOLDURERA 02	3	4	3	3	3	3	48	Media
Línea Maquinado 01	RETESTADORA GMC	2	2	2	3	3	2	24	Baja
Línea Pisos estructurados	SIERRA MÚLTIPLE DE PANELES	3	3	3	3	3	3	45	Media
Línea Pisos estructurados	LAMELADORA	2	3	3	4	3	3	32	Media
Línea Pisos estructurados	AFILADORA CNC	1	2	2	3	3	3	13	Baja
Línea Pisos estructurados	PRENSA CONTINUA	3	4	4	4	4	4	60	Alta
Línea Pisos estructurados	RETESTADORA PISOS ESTRUCTURADOS	2	4	4	4	4	4	40	Media
Línea Pisos estructurados	EXTRACTOR DE ASERRÍN 10HP	1	4	4	4	4	4	20	Baja
Línea Pisos estructurados	EXTRACTOR DE ASERRÍN 10HP	1	4	4	4	4	4	20	Baja
Línea Finger Joint	EXTRACTOR DE ASERRÍN 10HP	1	4	4	4	4	4	20	Baja
Línea Finger Joint	RODILLO DE PEGAMENTO	1	1	2	1	2	2	8	Baja
Línea Finger Joint	COMPRESORA 10HP	2	4	4	4	4	4	40	Media
Línea Finger Joint	MESA ELEVADORA RODILLOS 01	2	4	4	4	4	4	40	Media
Línea Finger Joint	MESA ELEVADORA RODILLOS 02	1	4	4	4	4	4	20	Baja
Línea Finger Joint	MESA ELEVADORA RODILLOS 03	2	4	4	4	4	4	40	Media
Línea Finger Joint	PROFI JOINT	3	4	4	4	4	4	60	Alta
Línea Maquinado 02	DESPUNTADORA 02	2	2	1	1	1	1	12	Baja
Línea Maquinado 02	DESPUNTADORA 03	2	2	1	1	1	1	12	Baja
Línea Maquinado 02	MULTILAMINA 02	4	4	2	3	2	3	56	Alta
Línea Maquinado 02	DESPUNTADORA 04	1	1	1	1	1	1	5	Baja
Línea Maquinado 02	ENZUNCHADORA 02	1	3	1	3	2	3	12	Baja
Línea Maquinado 02	CEPILLADORA 02	3	4	2	3	3	4	48	Media
Línea Maquinado 02	COMPRESORA 10HP	2	4	4	4	4	4	40	Media

Nota. Elaboración Propia

En la figura 23, se expone la ponderación de criticidad de los 4 sistemas de producción analizados, este análisis arroja el siguiente resultado; Línea de Maquinado 01 (30%), Línea de Maquinado 02 (24%), Línea Finger Joint (23%) y por último Línea de Pisos estructurados (23%).

Figura 23

Ponderación de criticidad de los 4 sistemas de producción analizados



Nota. Elaboración Propia

Como ya se ha podido notar, el sistema productivo “Línea de Maquinado 01”, es el que obtiene el mayor puntaje de criticidad, por lo que la presente investigación se desarrolló en este sistema. Es por ello, que en la Tabla 14 se muestra el inventario de máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01

Tabla 14

Listado de máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01

N°	DESCRIPCIÓN	MARCA	Cantidad	AÑO FABRICACIÓN
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	Marrari	1	2005
2	MULTILAMINA 01	Kuang Yung	1	2005
3	CEPILLADORA 01	Extend Light Machinery	1	1998
4	OPTIMIZADORA	Michael Weinig AG	1	2006
5	MOLDURERA 01	Michael Weinig AG	1	2007
6	RETESTADORA	GMC Italia	1	2008

Nota. Elaboración Propia

3.3 Descripción de línea de maquinado 01

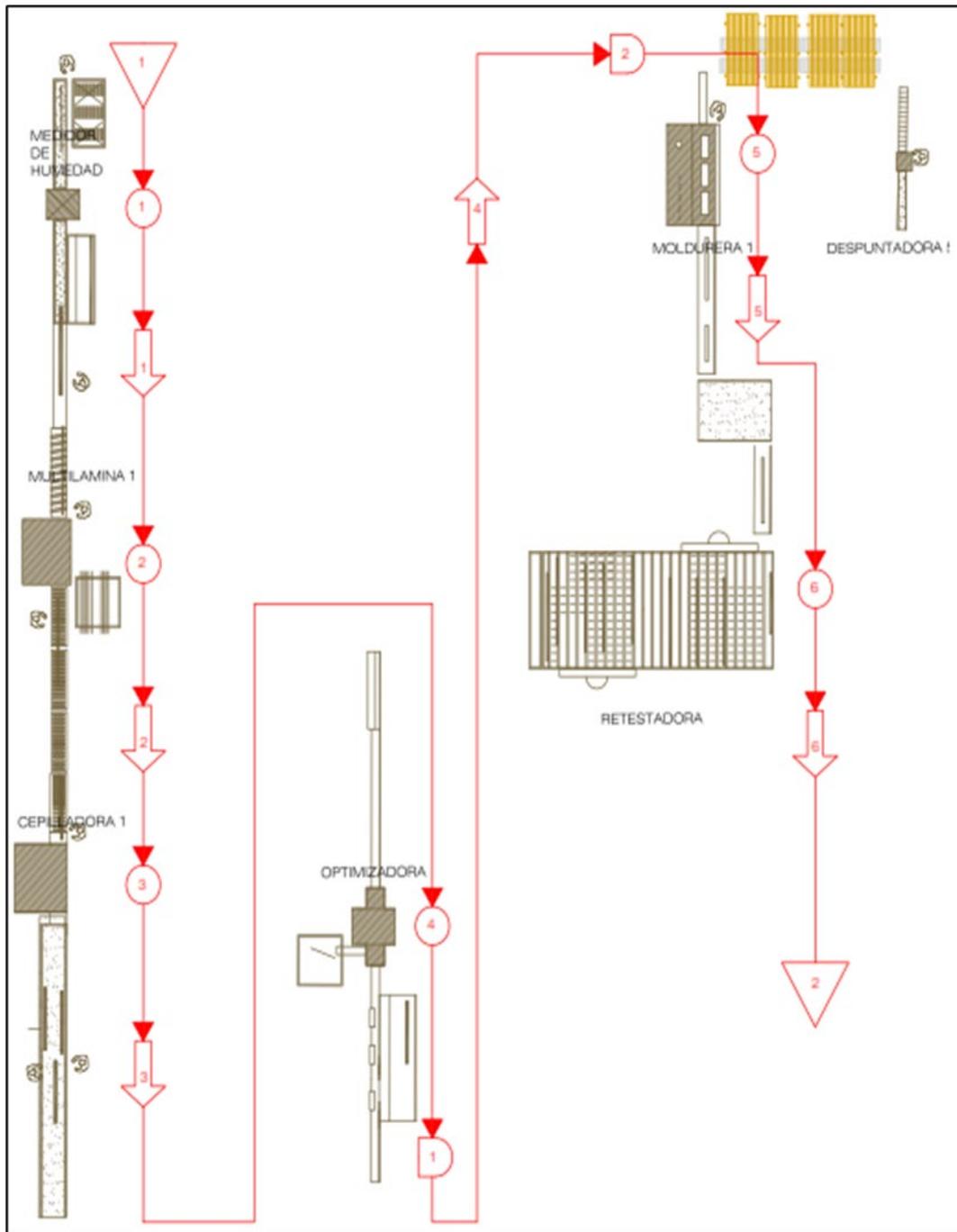
La empresa Maderera Bozovich a través de su Línea de Maquinado 01, produce diversos tipos de pisos de madera, el principal producto es el denominado “Piso de Machihembrado”, ya que es el producto más vendido y por lo tanto el que más beneficios económicos aporta a la empresa. Este producto con sus particularidades de diseño, que

ha progresado con el pasar de los años y transmitido desde la primera generación de fundadores, hace que sea destacado entre los demás competidores del mercado.

En la Figura 24, se muestra un panorama con el fin de obtener una mejor perspectiva de la distribución de las máquinas en la Línea de Maquinado 01.

Figura 24

Diagrama de recorrido de la Línea de Maquinado 01



Nota. Elaboración propia

En la Figura 25, se exponen las características físicas de las máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01

Figura 25

Máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01



Nota. Maderera Bozovich. (s.f.). [Fotografía]. Lima. Perú

3.4 Datos históricos de fallas en línea de maquinado 01

Como ya se ha mencionado anteriormente, durante el transcurso del año 2021, se presentaron fallas de máquina de diversos tipos, siendo las principales de tipo mecánico, eléctrico y electrónico, entre otros. Los datos recopilados describen las fallas ocurridas en la línea de producción mencionada, donde se detallan los TEF (tiempo entre fallas), estos valores se expresan en horas. Como detalle adicional, se asignó un código de falla a cada ocurrencia que previamente ha sido totalizada, estandarizada y clasificada según la similitud de las descripciones proporcionadas por los operadores de máquina. Es importante destacar que la empresa no ha establecido ninguna tipología de descripción de fallas antes del proyecto de investigación.

Según Gasca et al. (2017), “para estimar la confiabilidad a partir del historial de las fallas, es indispensable que éstas estén codificadas y registradas en un formato único, con todos los atributos requeridos” (p. 112)

Además, se ordenó los tiempos de las fallas de menor a mayor con el fin de mantener un mejor orden para el análisis de la magnitud de las ocurrencias. Este orden facilita la capacidad de copiar y pegar directamente los datos en el software MiniTab 19 para su uso en herramientas estadísticas.

Finalmente, es importante mencionar que los tiempos de las fallas y las reparaciones se extrajeron de una base de datos en Microsoft Excel, la cual fue establecida por la anterior gestión de la gerencia de operaciones.

En el anexo 7, se pueden visualizar los datos de las fallas hasta el año 2021. Estos datos ya han sido previamente filtrados para no incluir información que no sea relevante para el análisis necesario en este proyecto de investigación.

3.5 Pruebas de bondad de ajuste para determinar distribución estadística

Las distribuciones de falla intentan de forma teórica representar el comportamiento de las fallas. Para esta sección de la investigación se procedió a determinar las distribuciones estadísticas que mejor se ajustan a los datos fallas de cada equipo que conforman la Línea de Maquinado 01.

Este objetivo se logró mediante la aplicación del software estadístico MiniTab 19, en donde se ingresaron los TEF (Tiempos entre fallas) para que el programa determine cual es la distribución estadística adecuada. El mínimo valor de la resultante de este análisis es un indicador para seleccionar la mencionada distribución.

A continuación, en la Figura 26, se muestran los resultados de análisis de bondad de ajuste que se realizó a cada máquina que confirma la Línea de Maquinado 01.

Figura 26

Análisis de bondad de ajuste en Software MiniTab 19

MEDIDOR DE HUMEDAD	MULTILAMINA 01	CEPILLADORA 01																														
<p>Bondad de ajuste</p> <p>Anderson-Darling</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Distribución</th> <th>(ajust.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Weibull</td> <td>1.107</td> </tr> <tr> <td>Lognormal</td> <td>1.215</td> </tr> <tr> <td>Exponencial</td> <td>1.112</td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>1.452</td> </tr> </tbody> </table>	Distribución	(ajust.)	Weibull	1.107	Lognormal	1.215	Exponencial	1.112	Normal	1.452	<p>Bondad de ajuste</p> <p>Anderson-Darling</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Distribución</th> <th>(ajust.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Weibull</td> <td>1.136</td> </tr> <tr> <td>Lognormal</td> <td>1.363</td> </tr> <tr> <td>Exponencial</td> <td>3.852</td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>1.137</td> </tr> </tbody> </table>	Distribución	(ajust.)	Weibull	1.136	Lognormal	1.363	Exponencial	3.852	Normal	1.137	<p>Bondad de ajuste</p> <p>Anderson-Darling</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Distribución</th> <th>(ajust.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Weibull</td> <td>1.026</td> </tr> <tr> <td>Lognormal</td> <td>1.390</td> </tr> <tr> <td>Exponencial</td> <td>3.444</td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>1.427</td> </tr> </tbody> </table>	Distribución	(ajust.)	Weibull	1.026	Lognormal	1.390	Exponencial	3.444	Normal	1.427
Distribución	(ajust.)																															
Weibull	1.107																															
Lognormal	1.215																															
Exponencial	1.112																															
Normal	1.452																															
Distribución	(ajust.)																															
Weibull	1.136																															
Lognormal	1.363																															
Exponencial	3.852																															
Normal	1.137																															
Distribución	(ajust.)																															
Weibull	1.026																															
Lognormal	1.390																															
Exponencial	3.444																															
Normal	1.427																															
OPTIMIZADORA	MOLDURERA 01	RETESTADORA																														
<p>Bondad de ajuste</p> <p>Anderson-Darling</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Distribución</th> <th>(ajust.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Weibull</td> <td>0.895</td> </tr> <tr> <td>Lognormal</td> <td>1.102</td> </tr> <tr> <td>Exponencial</td> <td>4.389</td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>0.904</td> </tr> </tbody> </table>	Distribución	(ajust.)	Weibull	0.895	Lognormal	1.102	Exponencial	4.389	Normal	0.904	<p>Bondad de ajuste</p> <p>Anderson-Darling</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Distribución</th> <th>(ajust.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Weibull</td> <td>0.920</td> </tr> <tr> <td>Lognormal</td> <td>1.278</td> </tr> <tr> <td>Exponencial</td> <td>5.608</td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>0.926</td> </tr> </tbody> </table>	Distribución	(ajust.)	Weibull	0.920	Lognormal	1.278	Exponencial	5.608	Normal	0.926	<p>Bondad de ajuste</p> <p>Anderson-Darling</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Distribución</th> <th>(ajust.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Weibull</td> <td>0.724</td> </tr> <tr> <td>Lognormal</td> <td>0.882</td> </tr> <tr> <td>Exponencial</td> <td>4.514</td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>0.839</td> </tr> </tbody> </table>	Distribución	(ajust.)	Weibull	0.724	Lognormal	0.882	Exponencial	4.514	Normal	0.839
Distribución	(ajust.)																															
Weibull	0.895																															
Lognormal	1.102																															
Exponencial	4.389																															
Normal	0.904																															
Distribución	(ajust.)																															
Weibull	0.920																															
Lognormal	1.278																															
Exponencial	5.608																															
Normal	0.926																															
Distribución	(ajust.)																															
Weibull	0.724																															
Lognormal	0.882																															
Exponencial	4.514																															
Normal	0.839																															

Nota. Elaboración Propia.

En la Tabla 15, se presenta el resultado del análisis de distribución estadística de los datos de fallas de la línea de producción. Como se puede observar, todas las máquinas tienen una distribución estadística de Weibull.

Tabla 15

Resumen de distribución estadística de máquinas de la línea de producción.

N°	DESCRIPCIÓN	DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA	ANDERSON-DARLING
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	WEIBULL	1.070
2	MULTILAMINA 01	WEIBULL	1.136
3	CEPILLADORA 01	WEIBULL	1.026
4	OPTIMIZADORA	WEIBULL	0.895
5	MOLDURERA 01	WEIBULL	0.920
6	RETESTADORA	WEIBULL	0.724

Nota. Elaboración Propia.

3.6 Evaluación de etapa de ciclo de vida de equipos de la Línea de Maquinado 01

Para determinar en qué etapa del ciclo de vida se encuentran los equipos críticos de la línea de maquinado 01, se calculó el parámetro beta de la distribución estadística de Weibull para cada máquina. Para lograr este objetivo, se utilizó el Software MiniTab 19,

ingresando los tiempos entre fallos (TEF); luego, se analizó el valor obtenido de β en la curva de la bañera (Ver Capítulo II, apartado 2.4 “Curva de la bañera”)

Resultados de evaluación

Después de haber obtenido el parámetro de forma Beta (β) de la distribución de Weibull, se pudo identificar en que etapa de la curva de la bañera se ubican, encontrándose que 4 de las 6 máquinas que intervienen en el proceso productivo del proyecto de estudio se localizan en la Etapa III de la Fase III (Ver Tabla 16).

Tabla 16

Análisis de ciclo de vida de máquinas de Línea de Maquinado 01

N°	MÁQUINA	PARÁMETRO DE FORMA BETA (β)	UBICACIÓN DE BETA (β) EN CURVA DE LA BAÑERA	CONDICIÓN DE MÁQUINA SEGÚN CURVA DE LA BAÑERA
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	1.1	FASE II	FUNCIONAMIENTO NORMAL
2	MULTILAMINA 01	3.9	ETAPA III DE FASE III	DETERIORO DEBIDO AL DESGASTE
3	CEPILLADORA 01	1.9	FASE II	FUNCIONAMIENTO NORMAL
4	OPTIMIZADORA	2.9	ETAPA III DE FASE III	DETERIORO DEBIDO AL DESGASTE
5	MOLDURERA 01	2.5	ETAPA III DE FASE III	DETERIORO DEBIDO AL DESGASTE
6	RETESTADORA	2.4	ETAPA III DE FASE III	DETERIORO DEBIDO AL DESGASTE

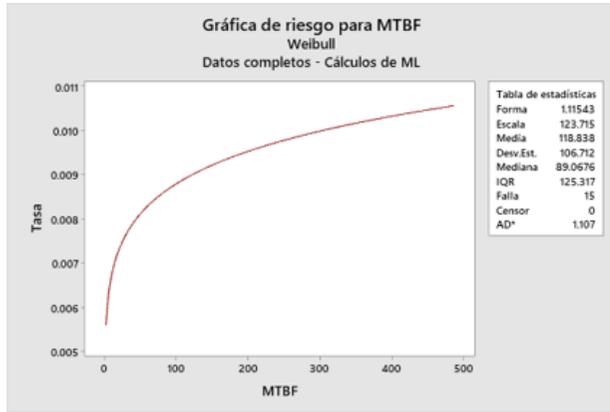
Nota. Elaboración Propia.

El valor Beta (β), y su ubicación dentro de la curva de la bañera, es muy importante para saber qué tipo de estrategia de mantenimiento es recomendable seguir. Asimismo, en el Capítulo II, apartado 2.4 [Curva de la bañera o Davies], Figura 17 (*Curva de Davies, acciones y tácticas adecuadas, acorde al valor del Beta*), se visualiza que según el valor de Beta (β), es recomendable aplicar estrategias de mantenimiento. Para el presente proyecto se desarrolló la estrategia del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM por sus siglas en inglés), por lo que se plantea el diseño de un plan de mantenimiento, siguiendo la estrategia del RCM. En la Figura 27, se muestra gráficamente los resultado del análisis de tiempos entre fallas (TEF), realizados en Software MiniTab 19, de las máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01.

Figura 27

Identificación de fase de vida de cada máquina que conforma la Línea de Maquinado 01

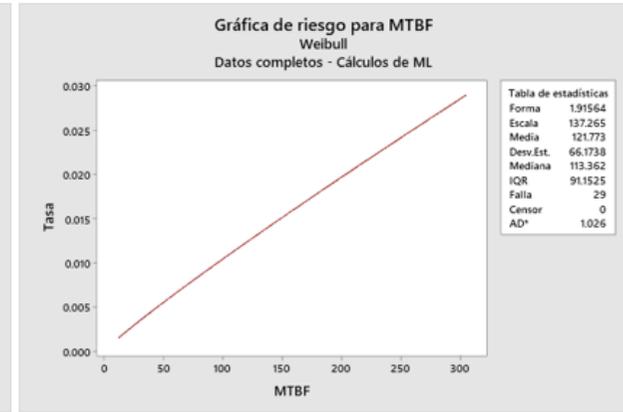
Medidor de Humedad



Multilamina 01



Cepilladora 01



Optimizadora



Moldurera 01



Retestadora



Nota. Elaboración Propia.

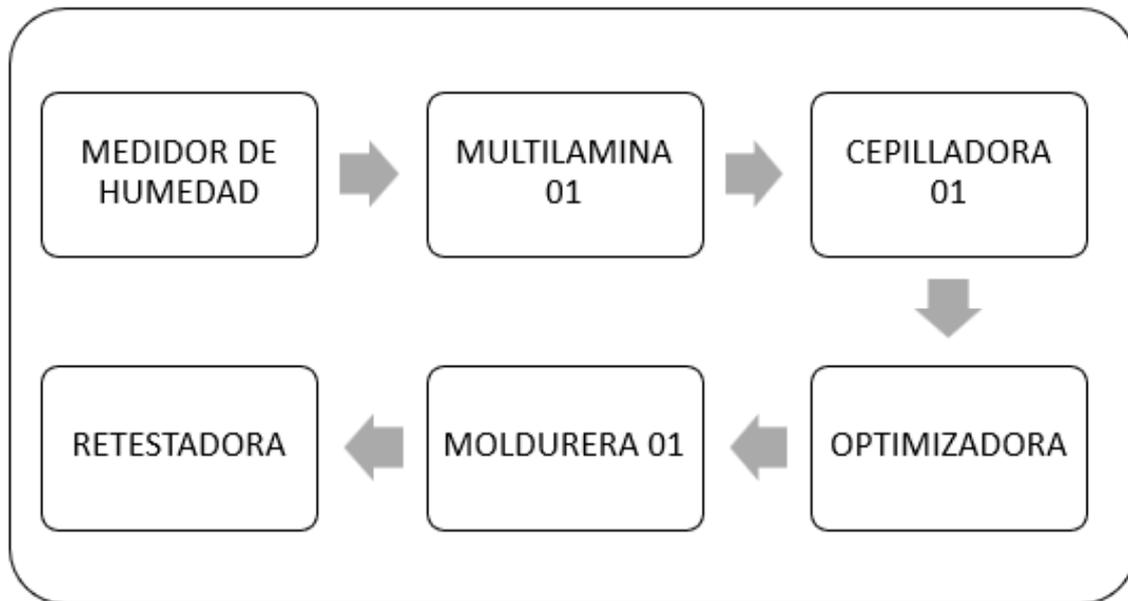
3.7 Determinación de disponibilidad mecánica de máquinas Línea Maquinado 01

Para el procesamiento de pisos de madera en formato machihembrado, es necesario que las 6 máquinas del área de estudio estén disponibles. Esta condición de operación permite considerar que las máquinas de la Línea de Maquinado 01 están en una configuración de falla en serie.

Como se puede observar en la Figura 28, las máquinas que integran la Línea de Maquinado están dispuestas en serie.

Figura 28

Configuración de máquinas de Línea de Maquinado 01



Nota. Elaboración Propia.

Cálculo de disponibilidad mecánica del sistema.

Los datos de las fallas se introdujeron en el Software MiniTab 19, y con ellos se calcularon los indicadores MTBF y MTTR. Gracias a estos cálculos, se obtuvo la disponibilidad mecánica. Dado que la configuración de las máquinas de la Línea de Maquinado 01 es en serie, la disponibilidad de esta línea se obtiene multiplicando las disponibilidades de cada máquina. (Ver Tabla 17)

Los resultados de este análisis revelaron un problema de gran importancia para la empresa, el cual genera pérdidas económicas que afectan negativamente su margen de beneficio. Esto debido a que durante el año 2021 ha experimentado paradas no planificadas de las máquinas.

De la Tabla 17, se pudo concluir que la disponibilidad del sistema del proceso productivo es de **56.12%**, lo cual es un indicador negativo.

Tabla 17

Disponibilidad del sistema

N°	DESCRIPCIÓN	MTBF (HORAS)	MTTR (HORAS)	DISPONIBILIDAD
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	118.83	13.53	89.78%
2	MULTILAMINA 01	143.95	13.14	91.64%
3	CEPILLADORA 01	121.73	12.35	90.79%
4	OPTIMIZADORA	144.64	14.44	90.92%
5	MOLDURERA 01	128.63	11.63	91.71%
6	RETESTADORA	113.37	12.44	90.11%
<i>Disponibilidad del sistema</i>				56.12%

Nota. Elaboración Propia.

En la Tabla 18, se expone los resultados de los cálculos realizados de los indicadores de MTBF y MTTR realizados en el Software MiniTab 19.

Tabla 18

Parámetros MTBF y MTTR respectivamente, obtenidos con el Software MiniTab 19

MTBF					MTTR				
MEDIDOR DE HUMEDAD									
Características de distribución					Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%					Error IC normal de 95.0%				
	Estimación	estándar	Inferior	Superior		Estimación	estándar	Inferior	Superior
Media(MTTF)	118.838	27.5253	75.4743	187.116	Media(MTTF)	13.5333	1.94563	9.71997	17.3467
Desviación estándar	106.712	32.4938	58.7517	193.822	Desviación estándar	7.53540	1.37577	5.26864	10.7774
Mediana	89.0676	24.3251	52.1494	152.121	Mediana	13.5333	1.94563	9.71997	17.3467
MULTILAMINA 01									
Características de distribución					Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%					Error IC normal de 95.0%				
	Estimación	estándar	Inferior	Superior		Estimación	estándar	Inferior	Superior
Media(MTTF)	143.950	10.8619	124.160	166.893	Media(MTTF)	13.1429	1.99197	9.23867	17.0470
Desviación estándar	40.6980	7.32399	28.6017	57.9102	Desviación estándar	7.45326	1.40853	5.14617	10.7946
Mediana	144.866	11.4938	124.002	169.239	Mediana	13.1429	1.99197	9.23867	17.0470
CEPILLADORA 01									
Características de distribución					Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%					Error IC normal de 95.0%				
	Estimación	estándar	Inferior	Superior		Estimación	estándar	Inferior	Superior
Media(MTTF)	121.773	12.2359	100.005	148.279	Media(MTTF)	12.3512	1.28864	10.0670	15.1537
Desviación estándar	66.1738	9.55882	49.8574	87.8298	Desviación estándar	6.98585	1.06383	5.18316	9.41549
Mediana	113.362	12.8747	90.7392	141.625	Mediana	11.3807	1.35221	9.01638	14.3650
OPTIMIZADORA									
Características de distribución					Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%					Error IC normal de 95.0%				
	Estimación	estándar	Inferior	Superior		Estimación	estándar	Inferior	Superior
Media(MTTF)	144.647	11.4956	123.783	169.028	Media(MTTF)	14.4444	1.19559	12.2813	16.9885
Desviación estándar	52.7772	7.61614	39.7751	70.0295	Desviación estándar	5.55710	0.879302	4.07532	7.57764
Mediana	143.305	12.2973	121.121	169.553	Mediana	14.2385	1.28436	11.9311	16.9920
MOLDURERA 01									
Características de distribución					Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%					Error IC normal de 95.0%				
	Estimación	estándar	Inferior	Superior		Estimación	estándar	Inferior	Superior
Media(MTTF)	128.632	8.68312	112.691	146.828	Media(MTTF)	11.6328	0.934243	9.93858	13.6159
Desviación estándar	54.2756	6.11939	43.5146	67.6978	Desviación estándar	5.86881	0.720334	4.61396	7.46493
Mediana	125.442	9.33680	108.414	145.144	Mediana	11.0119	0.994988	9.22467	13.1454
RETESTADORA									
Características de distribución					Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%					Error IC normal de 95.0%				
	Estimación	estándar	Inferior	Superior		Estimación	estándar	Inferior	Superior
Media(MTTF)	113.373	8.83990	97.3063	132.093	Media(MTTF)	12.4479	1.28073	10.1746	15.2291
Desviación estándar	50.0005	6.21583	39.1884	63.7958	Desviación estándar	7.33622	1.15736	5.38502	9.99443
Mediana	109.882	9.48430	92.7808	130.136	Mediana	11.3379	1.33973	8.99398	14.2927

Nota. Elaboración Propia.

3.8 Valoración de Confiabilidad de máquinas de Línea Maquinado 01

El cálculo de la confiabilidad de máquinas en un sistema productivo se basa en el análisis de la tasa de fallos y el tiempo de funcionamiento de cada máquina.

Para llevar a cabo el cálculo de confiabilidad, nos hemos basado en la teoría expuesta en el Capítulo II, sección 2.2.2. [Función de confiabilidad].

A continuación, en la Tabla 19 se presenta los indicadores de confiabilidad calculados a partir de la distribución de Weibull; se utilizó el software MiniTab 19 para el cálculo de los parámetros forma Beta (β) y escala Alfa (α), asimismo se empleó una hoja de cálculo de Microsoft Excel para la generación de las gráficas de confiabilidad.

Tabla 19

Parámetros forma y escala de la distribución Weibull

MÁQUINA	DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA	β =FORMA	α =ESCALA
MEDIDOR DE HUMEDAD	WEIBULL	1.1	123.71
MULTILAMINA 01	WEIBULL	3.9	158.89
CEPILLADORA 01	WEIBULL	1.9	137.26
OPTIMIZADORA	WEIBULL	2.9	162.01
MOLDURERA 01	WEIBULL	2.5	144.91
RETESTADORA	WEIBULL	2.4	127.8

Nota. Elaboración Propia.

Después de analizar las funciones de densidad de fallas y, por ende, la confiabilidad de cada equipo en la línea de producción estudiada ahora es posible determinar la confiabilidad de todo el sistema. Este resultado de análisis se refleja en la Tabla 20. Además, en esta misma tabla, se puede interpretar que a medida que aumenta el tiempo de operación, la confiabilidad de la maquinaria disminuye debido al desgaste y a las fallas que pueden presentarse en ese período.

Tabla 20

Confiabilidad de máquinas de Línea de Maquinado 01

MÁQUINA	HORAS DE OPERACIÓN										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
MEDIDOR DE HUMEDAD	100%	87%	75%	64%	54%	45%	38%	32%	27%	22%	18%
MULTILAMINA 01	100%	100%	100%	98%	93%	85%	72%	54%	36%	20%	9%
CEPILLADORA 01	100%	97%	91%	81%	70%	58%	46%	35%	26%	19%	13%
OPTIMIZADORA	100%	100%	98%	95%	88%	78%	66%	52%	38%	26%	16%
MOLDURERA 01	100%	99%	96%	90%	80%	67%	54%	40%	28%	18%	11%
RETESTADORA	100%	99%	94%	85%	72%	57%	42%	29%	18%	10%	5%
R-SISTEMA	100%	83%	60%	36%	18%	7%	2%	0%	0%	0%	0%

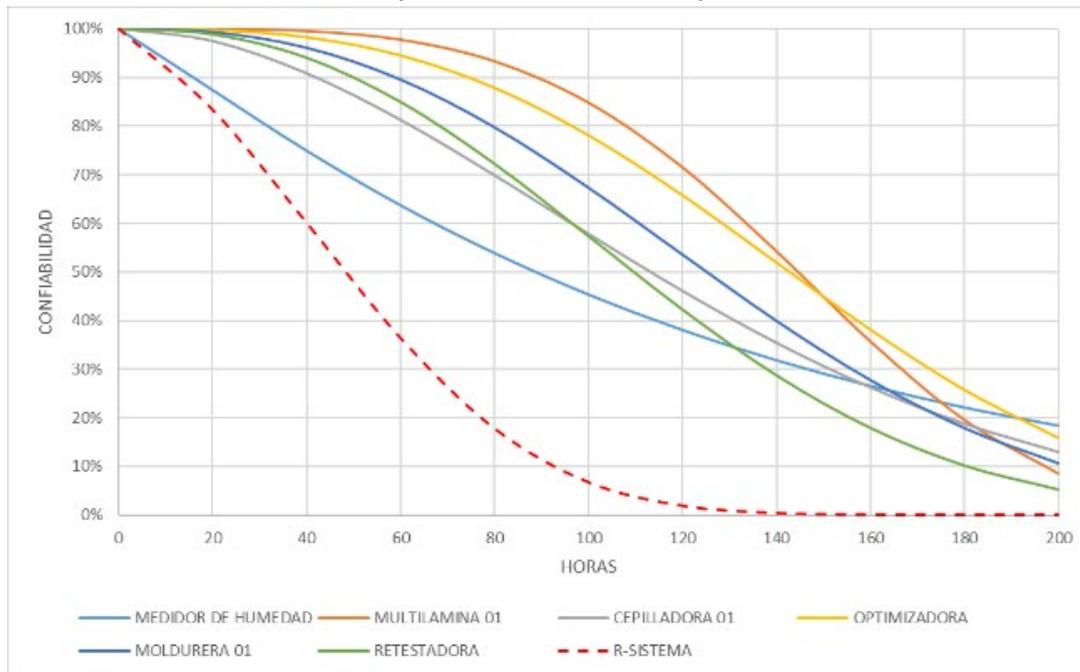
Nota. Elaboración Propia.

Dado que la configuración lógica de la Línea de Maquinado 01 es en serie, la confiabilidad de esta es la multiplicación de las confiabilidades en un determinado tiempo.

En la figura 29, según el modelo de Weibull, a las **100 horas de operación** el sistema de máquinas posee una confiabilidad de **7%**. Asimismo, en esta misma figura, se presenta las curvas de confiabilidad de máquinas que componen la Línea de Maquinado 01, y con ello las confiabilidad de todo el sistema.

Figura 29

Curva de confiabilidad de máquinas de Línea de Maquinado 01



Nota. Elaboración Propia.

3.9 Aplicación de la metodología RCM a la Línea de Maquinado 01

3.9.1 Definición del equipo de trabajo

Parra & Crespo (2012), explican que el objetivo principal de un equipo de trabajo es permitir que cada miembro contribuya con información crucial desde su propia perspectiva con relación a los activos bajo análisis. Los integrantes del equipo son elegidos de diversos niveles de la organización y áreas vinculadas al problema en cuestión. Para abordar las siete preguntas clave del RCM, es necesario conformar un equipo que incluya personas desempeñando diferentes roles en la organización. Este equipo debe colaborar para responder a todas las preguntas, asegurando que se tengan en cuenta todas las perspectivas relevantes en el proceso de estudio. En términos generales, esto no implica

tener grupos con menos de 4 ni más de 7 personas; lo óptimo sería contar con un grupo compuesto por 5 o 6 miembros.

Tomando como referencia la teoría expuesta en el Capítulo II, apartado 2.1.1.1 [Formación del equipo natural de trabajo]. A continuación, en el Figura 30 se expone la conformación del equipo de trabajo.

Figura 30

Integrantes de equipo natural de trabajo RCM



Nota. Adaptado de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos (p. 119), por Parra & Crespo, 2012, Ingecon

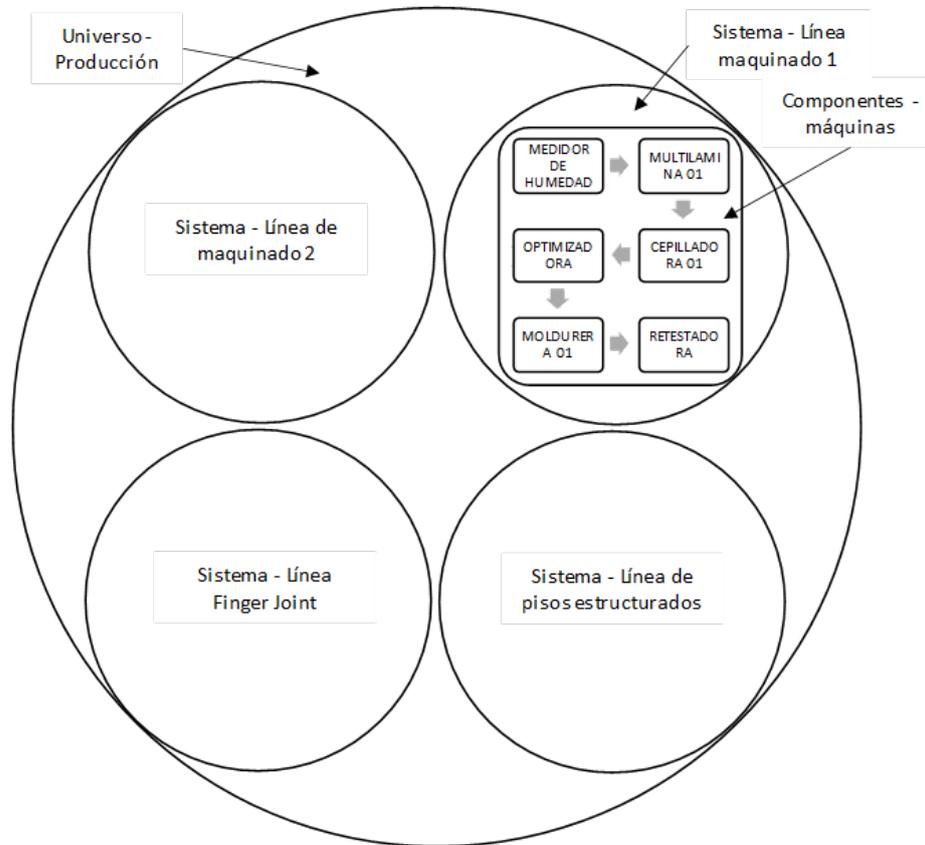
3.9.2 Selección del sistema

En la Tabla 13, (*Ponderación de criticidad de los 4 sistemas de producción analizados*) del Capítulo III, apartado 3.2, se determinó que la Línea de Maquinado 01 es el proceso de producción más crítico de toda la cadena de fabricación de pisos de Machihembrado, también llamado madera moldurada.

La Figura 31, representa el conjunto completo de producción (cadena de fabricación) con cuatro sistemas de producción (líneas de producción), y dentro de cada uno de ellos se encuentran sus respectivos componentes (máquinas), cada uno con contextos operacionales distintos.

Figura 31

Selección del sistema



Nota. Elaboración Propia.

3.9.3 Definición del contexto operacional – Línea de Maquinado 01

Una vez que se han identificado los sistemas críticos, la metodología RCM sugiere profundizar en el contexto operacional de los sistemas que se van a evaluar. Por esta razón, en los párrafos siguientes, se llevó a cabo el análisis del contexto operacional de la Línea de Maquinado 01. (Ver Figura 32)

Propósito: Proporcionar, mediante varias etapas de mecanizado, un flujo continuo de piezas de maderas machihembradas, con dimensiones, dureza y acabados establecidos en el plan de producción

Descripción del proceso: La Línea de Maquinado 01 recibe tablonés de madera que provienen del proceso previo de secado en hornos. Estos tablonés varían en longitud desde 1' hasta 12' y en espesor desde 21mm hasta 24mm. En la primera estación de trabajo, conocida como la máquina Medidora de Humedad, se retiran las piezas de madera

que contienen más del 12% de humedad. En la siguiente estación, en la Máquina Multilamina 01, se lleva a cabo la operación mecanizada de "listoneado o canteado" para obtener el ancho deseado de la tabla.

Luego, en la máquina Cepilladora 01, se logra una superficie uniforme y plana mediante la eliminación de la madera excedente en forma de virutas, que se forma a través de las cuchillas de corte, y se ajusta el espesor mínimo a 21mm. Posteriormente, en la máquina Optimizadora, se realiza la operación de "trozado o despuntado" donde las tablas se cortan perpendicularmente a las fibras para obtener las longitudes deseadas, que varían desde 1' hasta 9'. En esta etapa, también se eliminan las partes que presentan rajaduras y deformaciones.

En la estación de trabajo de Moldurera 01, se perfilan los bordes de las piezas de madera con forma de macho y hembra, y se alcanza el ancho final de 3/4" o 19.05mm. Finalmente, en la Máquina Retestadora, se mecanizan los extremos de las piezas con el perfil macho y hembra, y se ajusta la longitud deseada.

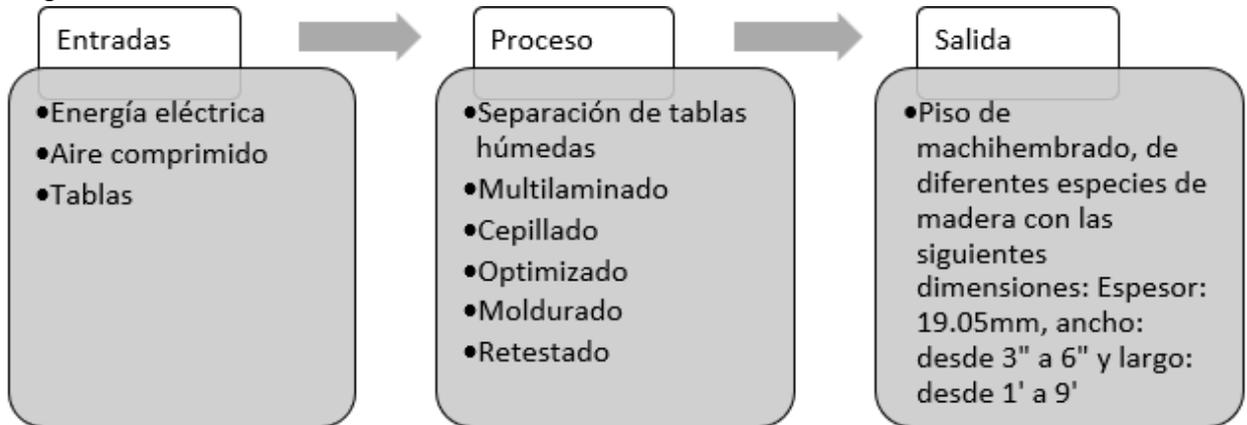
Variables más importantes del proceso:

- Materia prima de producto: Diversas especies de madera.
- Velocidad de producción: 35ml/min (metros lineales por minuto)
- Espesor de salida de piezas de madera machihembrada: 3/4" o 19.05mm
- Ancho de salida de piezas de madera machihembrada: Desde 3" hasta 6"
- Largo de salida de piezas de madera machihembrada: Desde 1' hasta 9'
- Humedad de piezas de madera: inferior a 12%

Equipos principales: Medidor de Humedad, Multilamina 01, Cepilladora 01, Optimizadora, Moldurera 01 y Retestadora.

Figura 32

Diagrama Proceso Salida

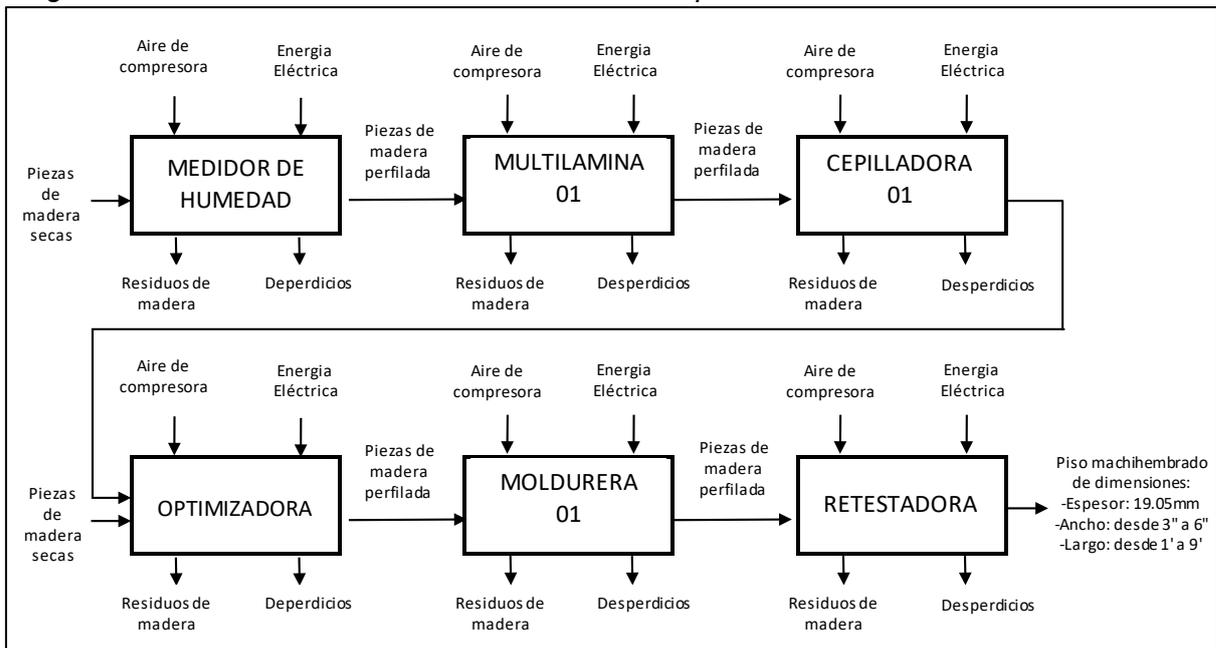


Nota. Elaboración Propia.

En la Figura 33, con la información recopilada en líneas anteriores se plasmó gráficamente el diagrama Entrada Proceso Salida.

Figura 33

Diagrama de Entrada Proceso Salida – Línea de Maquinado 01



Nota. Elaboración Propia.

3.9.4 Análisis de criticidad de los equipos de la Línea de Maquinado 01

Para identificar el nivel de criticidad de las máquinas de la línea de maquinado se tomaron en cuenta los criterios teóricos expuestos en el Capítulo II, apartado 2.1.1.3 [jerarquización y criticidad de equipos].

Tabla 21***Criticidad de máquinas***

N°	Descripción máquina	Frecuencia de fallas (FF)	Impacto de la producción (IP)	Seguridad y Salud (SS)	Costo de reparación (CR)	Tiempo de reparación (T)	Tiempo de operación (TO)	Índice de Criticidad (IC)	Criticidad
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	4	3	4	3	4	4	72	Alta
2	MULTILAMINA 01	4	4	2	3	2	3	56	Alta
3	OPTIMIZADOR	3	3	3	3	4	3	48	Media
4	MOLDURERA 01	3	4	3	3	2	4	48	Media
5	CEPILLADORA 01	3	4	2	3	3	4	48	Media
6	MOLDURERA 02	3	4	3	3	3	3	48	Media
7	RETESTADORA GMC	2	2	2	3	3	2	24	Baja

Nota. Elaboración Propia. Como puede observarse el Medidor de Humedad es la que presentan la mayor criticidad, seguido de la Multilamina 01. Después de haber obtenido este resultado elegimos a estas dos máquinas para la aplicación de la metodología RCM.

En la Tabla 21, se identificaron los equipos críticos para la Línea de Maquinado 01, las máquinas identificadas con la letra "A" son las más críticas. Para estas máquinas, se llevó a cabo un análisis de modos y efectos de falla (AMEF) para identificar los modos de falla más relevantes.

3.9.5 Evaluación de las fallas funcionales de los equipos críticos

Según Moubray (2004), la evaluación de las fallas funcionales es una etapa esencial en el proceso del RCM, ya que proporciona la base para la identificación de modos de falla críticos, la priorización de actividades de mantenimiento y la implementación de estrategias que mejoran la confiabilidad y el rendimiento de los sistemas y equipos.

3.9.6 Realización de Hoja de Información

Como ya se ha mencionado en Capítulo II, de este proyecto de investigación la Hoja de Información en el RCM se usa para documentar las funciones del activo que se está analizando, y se enumeran las fallas funcionales asociadas, los modos de fallas y sus efectos. En otras palabras, con la Hoja de Información se desarrolla las primeras cuatro preguntas del total de siete que se recomienda para la implantación de la metodología RCM. En las Tablas 22 a 26 se presenta el desarrollo de este documento de gran importancia.

I. Máquina Medidor de Humedad

Tabla 22

Hoja de Información de Medidor de Humedad

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II		SISTEMA							
		LÍNEA DE MAQUINADO 01							
Nº		FALLA FUNCIONAL (Perdida de función)		MODO DE FALLA (Causa de falla)		EFECTOS DE FALLA (Que sucede cuando se produce una falla)		SUBSISTEMA	
								MEDIDOR DE HUMEDAD	
Nº	FUNCIÓN	Ord .	FALLA FUNCIONAL (Perdida de función)	Nº	MODO DE FALLA (Causa de falla)	EFECTOS DE FALLA (Que sucede cuando se produce una falla)	CÓDIGO		
1	Desplazarse de forma vertical para permitir paso para espesor de piezas de madera desde los 10mm hasta los 30mm.	A	Base de máquina. No soporta las cargas de movimiento vertical y horizontal.	1	El dispositivo elevador no está operando a causa de la acumulación de polvo en los tornillos sinfín axiales y radiales.	El dispositivo elevador no puede funcionar a causa del polvo acumulado en el tornillo patrón. Se requieren 180 minutos para realizar la reparación.	1.A.1		
				2	El sistema de elevación no está funcionando correctamente debido al desgaste del tornillo patrón.	El desgaste del tornillo impide que el sistema de elevación pueda transmitir movimiento. El tiempo de reparación es de 30 minutos.	1.A.2		
2	Expulsar piezas de madera que contienen mas 10% de humedad	A	No se detecta piezas de madera que están por encima de 10% de humedad.	1	Dispositivo de detección de humedad de la madera no está funcionando adecuadamente a causa de una falla en la fotocelda.	Es necesario que la fotocelda funcione correctamente para que haya una sincronización adecuada entre la cinta transportadora de ingreso y el sistema de corte. Se estima un tiempo de reparación de 30 minutos.	2.A.1		
3	Llevar 10 bares de presión a todos los componentes neumáticos.	A	Imposible llevar 10 bares de presión a todos los componentes neumáticos.	1	El sistema de aire comprimido no está operando en situación estándar debido a una falla en el estrangulador de aire que se encuentra en posición cerrada.	Cuando no hay suficiente presión de aire, la máquina activa su mecanismo de protección, lo cual impide su funcionamiento. El tiempo de reparación necesario es de 60 minutos.	3.A.1		
				2	No se está generando suficiente presión de aire debido a una caída en la presión del sistema de aire comprimido de la planta.	La máquina requiere aire para que los sistemas de arrastre puedan funcionar correctamente. Cuando la presión de aire disminuye, se activa el mecanismo de protección y se apaga la máquina. El tiempo de reparación estimado es de 30 minutos.	3.A.2		
4	Mantener interior de tablero eléctrico a 20° C de temperatura	A	mecanismo de refrigeración no puede mantener temperatura interior de tablero eléctrico por debajo de los 20°C de temperatura.	1	El mecanismo de refrigeración del tablero eléctrico presenta fallas debido a la acumulación de suciedad en los filtros de succión.	Los filtros sucios impiden una buen ventilación dentro del tablero eléctrico, lo que puede llevar al sobrecalentamiento de ciertos componentes. El tiempo de reparación estimado es de 30 minutos.	4.A.1		
5	Mantener partes móviles con lubricación adecuada	A	sistema de engrase automática no lleva aceite lubricante a partes móviles.	1	El sistema de aire comprimido no está funcionando adecuadamente debido a la falta de engrase en la unidad de mantenimiento.	El sistema de aire comprimido de la máquina puede atascarse debido a diferentes piezas y partes en mal estado. Se requiere un tiempo de reparación de 60 minutos.	5.A.1		

Nota. Elaboración Propia.

Tabla 23

Hoja de Información de Medidor de Humedad (continuación)

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II		SISTEMA					
		LÍNEA DE MAQUINADO 01					
		SUBSISTEMA					
MEDIDOR DE HUMEDAD							
Nº	FUNCIÓN	Ord .	FALLA FUNCIONAL (Perdida de función)	Nº	MODO DE FALLA (Causa de falla)	EFFECTOS DE FALLA (Que sucede cuando se produce una falla)	CÓDIGO
6	Retirar desperdicios de madera a través de una cinta transportadora a 10ml/min.	A	No se puede retirar desperdicios de madera de máquina.	1	La cinta transportadora de desperdicios no está funcionando adecuadamente debido a la rotura de la faja de transmisión.	La rotura de la faja impide la transmisión de movimiento entre el motor y la cinta transportadora de desperdicios. El tiempo de reparación necesario es de 60 minutos.	6.A.1
7	Transportar 220V de tensión eléctrica a todos los sistemas eléctricos	A	Sistema de encendido de máquina no permite ingreso de 200V de tensión eléctrica.	1	La máquina no se activa debido a una falla en las botoneras de comando.	Las borneras deterioradas en posición abierta impiden el flujo de corriente hacia la máquina. Se estima un tiempo de reparación de 60 minutos.	7.A.1
		B	No existe ingreso de energía eléctrica a máquina.	1	El sistema eléctrico no está funcionando correctamente debido a un mal funcionamiento de los contactores.	La máquina funciona mediante contactores eléctricos, y cuando alguno de ellos presenta desgaste en sus contactos, el equipo no se activa. Se requieren 60 minutos para realizar la reparación.	7.B.1
		C	No llega energía eléctrica a variador de velocidad	1	El sistema eléctrico no está funcionando correctamente debido a un bloqueo en el variador electrónico.	El equipo cuenta con un dispositivo de alarma que bloquea el variador electrónico en caso de una caída de tensión. El tiempo de reparación necesario es de 30 minutos.	7.C.1
8	Transportar piezas de madera a 35ml/min	A	Incapaz de transportar piezas de madera a 35ml/min	1	La cinta transportadora de alimentación de la materia prima no está operando en situación estándar debido a una rotura.	La operación de alimentación de la materia prima se realiza mediante una cinta transportadora. Cuando esta no está activa, la operación descrita no puede llevarse a cabo. Se requieren 300 minutos para realizar la reparación.	8.A.1
				2	El sistema de suministro no está funcionando debido a la rotura del piñón de la cadena.	El piñón es responsable de transmitir el movimiento de la caja reductora a los rodillos lisos de arrastre. Cuando el piñón presenta desperfectos, no se transmite movimiento. El tiempo de reparación estimado es de 120 minutos.	8.A.2
9	Transportar piezas de madera a una presión de arrastre de 8 bares.	A	Sistema de arrastre no puede transportar piezas de madera a 8 bares de presión.	1	El sistema de arrastre no está funcionando en situación estándar debido al desgaste de los rodillos dentados de presión.	La operación de arrastre se realiza mediante rodillos dentados de presión, los cuales generan el movimiento de desplazamiento. Cuando la rueda de arrastre no tiene tracción, la madera no se desplaza sobre la mesa de maquinado. Se requieren 240 minutos para realizar la reparación.	9.A.1

Nota. Elaboración Propia.

II. Máquina Multilamina 01

Tabla 24

Hoja de Información de Multilamina 01

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II		SISTEMA					
		LÍNEA DE MAQUINADO 01					
		SUBSISTEMA					
MULTILAMINA 01							
Nº	FUNCIÓN	Ord.	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	Nº	MODO DE FALLA (Causa de falla)	EFFECTOS DE FALLA (Que sucede cuando se produce una falla)	CÓDIGO
1	Base de máquina. Absorber vibraciones causadas por componentes rotativos	A	Base de máquina. No soporta las cargas de movimiento vertical y horizontal.	1	La base del motor del eje que sostiene las sierras circulares se ha roto a causa de una vibración excesiva.	El exceso de vibración del motor provoca la fractura y posterior rotura de las "patas". Tiempo de reparación: 360 minutos.	1.A.1
		B	Base de máquina. No absorbe las vibraciones de componentes rotativos.	1	El eje que sostiene las sierras circulares de corte presenta una vibración excesiva a causa del desgaste de los rodamientos.	La falta de engrase adecuada hace que el rodamiento se caliente en exceso, lo que resulta en el bloqueo del eje. Tiempo de reparación: 480 minutos.	1.B.1
		C	Incapaz de mantener máquina estática.	1	La regla de canto de entrada está desalineada a causa de la vibración excesiva de la máquina.	La excesiva vibración causa el desplazamiento de las piezas y partes sueltas de la guía de entrada. Tiempo de reparación: 120 minutos.	1.C.1
		D	Base de máquina. No absorbe las vibraciones por rodamientos con desgaste.	1	La máquina vibra en exceso a causa del desgaste de los rodamientos de los ejes de los cabezales de corte.	Cuando el eje gira a 8000 rpm, se evidencia un mayor desgaste de los rodamientos, pudiendo escucharse roces internos. Tiempo de reparación: 360 minutos.	1.D.1
2	Bombear rocíos de lubricante cada 15 minutos	A	Mesa de mecanizado no se esta lubricando.	1	El sistema de engrase no está aplicando aceite a la mesa de entrada a causa de la obstrucción de los conductos.	La falta de engrase impide que la madera se deslice correctamente sobre la máquina. Tiempo de reparación: 90 minutos.	2.A.1
				2	La madera no se desliza adecuadamente sobre la mesa de trabajo a causa de que el lubricante contiene impurezas.	La entrada de impurezas (polvo, aserrín, astillas, etc.) en el sistema de engrase dificulta el deslizamiento adecuado de la madera. Tiempo de reparación: 45 minutos.	2.A.2
3	Contener aserrín a un caudal volumétrico de succión de 30m ³ /min	A	Incapaz de contener aserrín a caudal volumétrico de succión de 30m ³ /min	1	El sistema de contención del aserrín está inestable a causa de la rotura de las mangueras de succión.	Las roturas en la manguera reducen la fuerza de succión de la aspiradora. Tiempo de reparación: 60 minutos.	3.A.1
				2	El sistema de aspiración de aserrín no esta activo correctamente a causa de un bloqueo de residuos en el conducto de succión.	Cuando los conductos de aspiración se obstruyen, la capacidad de succión de los residuos de aserrín disminuye. Tiempo de reparación: 45 minutos.	3.A.2

Nota. Elaboración Propia.

Tabla 25

Hoja de Información de Multilamina 01 (continuación)

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II		SISTEMA					
		LÍNEA DE MAQUINADO 01					
		SUBSISTEMA					
MULTILAMINA 01							
Nº	FUNCIÓN	Ord.	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	Nº	MODO DE FALLA (Causa de falla)	EFFECTOS DE FALLA (Que sucede cuando se produce una falla)	CÓDIGO
4	Mecanizar piezas de madera con un acabado de N7 a N8 de rugosidad	A	No poder procesar piezas de madera con acabado requerido.	1	El producto presenta defectos en el acabado a causa de imperfecciones (abolladuras) en la mesa de salida.	La madera no se asienta correctamente en la mesa de trabajo, lo que resulta en un mecanizado defectuoso. Tiempo de reparación: 480 minutos.	4.A.1
				2	El producto tiene defectos en el mecanizado a causa de la falta de calibración del dispositivo de sujeción de salida.	El prensor de salida evita defectos de mecanizado en forma de "olas" en la madera. Si no está calibrado paralelamente a la mesa de mecanizado, impide un deslizamiento adecuado de la madera. Tiempo de reparación: 45 minutos.	4.A.2
				3	Las herramientas de corte no mecanizan correctamente la madera a causa de defectos en el afilado.	El perfilado de la madera se realiza con herramientas de corte que le dan forma. Si las cuchillas están desafiladas, el acabado será rugoso y con marcas. Tiempo de reparación: 120 minutos.	4.A.3
5	Medir cantidad de metros lineales que procesa la máquina	A	No puede contar los metros lineales producidos.	1	El sistema contador lineal no está funcionando correctamente a causa del desgaste de las ruedas del codificador.	Las ruedas son responsables de enviar señales al contador electrónico. Tiempo de reparación: 180 minutos.	5.A.1
6	Tablero Eléctrico. Mantener interior de tablero adosable a 20°C de temperatura	A	Se eleva la temperatura de interior de tablero eléctrico.	1	El mecanismo de refrigeración del panel eléctrico tiene fallas a causa de la polvo en los filtros de succión.	Los filtros sucios impiden una adecuada circulación de aire dentro del tablero eléctrico, lo que puede provocar sobrecalentamiento en ciertos componentes. Tiempo de reparación: 30 minutos.	6.A.1
7	Transportar 220V de tensión eléctrica a todos los motores	A	No llega energía eléctrica a los motores de arranque	1	El sistema de arranque no está funcionando correctamente a causa del deterioro del pulsador de emergencia.	El sistema eléctrico no se energiza a causa de un pulsador defectuoso. Tiempo de reparación: 60 minutos.	7.A.1
		B	No llega 220V de energía al motor de eje porta sierras circulares.	1	El sistema eléctrico no está activo adecuadamente a causa de fallas en los motores eléctricos de los ejes que sostienen las sierras circulares.	El equipo cuenta con un sistema de protección que se activa en caso de sobrecalentamiento del motor eléctrico. Tiempo de reparación: 120 minutos.	7.B.1
		C	No se puede transportar 220V de energía eléctrica.	1	La máquina no se enciende a causa de fallas en los botones de control.	Las borneras deterioradas en posición abierta bloquean el flujo de corriente hacia la máquina. Tiempo de reparación: 60 minutos.	7.C.1

Nota. Elaboración Propia.

Tabla 26

Hoja de Información de Multilamina 01 (continuación)

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II		SISTEMA					
		LÍNEA DE MAQUINADO 01					
Nº		FUNCIÓN		SUBSISTEMA			
				MULTILAMINA 01			
Nº	FUNCIÓN	Ord.	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	Nº	MODO DE FALLA (Causa de falla)	EFFECTOS DE FALLA (Que sucede cuando se produce una falla)	CÓDIGO
8	Transportar 220V de tensión eléctrica a todos los sistemas eléctricos	A	No llega energía eléctrica a sistemas eléctricos de máquina	1	Los sistemas eléctricos no esta activon adecuadamente a causa del mal funcionamiento de los contactores.	El equipo opera mediante contactores eléctricos. Si alguno de ellos falla a causa del desgaste de sus contactos, la máquina no se encenderá. Tiempo de reparación: 30 minutos.	8.A.1
		B	No llega energía eléctrica a variador de velocidad	1	Los sistemas eléctricos no esta activon correctamente a causa del bloqueo del variador electrónico.	El equipo tiene un sistema de alerta que bloquea el variador electrónico cuando hay una caída de tensión. Tiempo de reparación: 30 minutos.	8.B.1
		C	No llega 220V de tensión eléctrica.	1	El variador electrónico se bloquea a causa de la inestabilidad de la tensión eléctrica.	Esto genera un comportamiento inesperado del motor, como la imposibilidad de iniciar el motor. Tiempo de reparacion 60min.	8.C.1
9	Transportar tablonces de madera a una presión de arrastre de 8 bares	A	Presión de arrastre de transporte por debajo de 8 bares	1	El rodillo prensor de salida del producto está inestable a causa de la rotura de los resortes de presión.	Los resortes amortiguan los golpes del prensor de presión. Si están rotos, el prensor recibirá los golpes directamente de la madera. Tiempo de reparación: 120 minutos.	9.A.1
				2	No se está aplicando suficiente presión de aire a causa de una caída en el sistema neumático de la planta.	La máquina requiere aire para el correcto funcionamiento de sus sistemas de arrastre. Cuando la presión de aire disminuye, se activa un mecanismo de protección que apaga la máquina. Tiempo de reparación: 30 minutos.	9.A.2
		B	No se puede transportar madera con presión de arrastre de 8 bares	1	El rodillo liso de entrada no está funcionando a causa de la rotura de los rodamientos.	La falta de engrase adecuada hace que el rodamiento se caliente en exceso, lo que resulta en el bloqueo del eje. Tiempo de reparación: 120 minutos.	9.B.1
10	Desplazarse de forma vertical; altura mínima 0.2m, altura máxima 1m	A	No puede desplazarse de forma vertical desde 0.2m hasta 1m	1	El sistema elevador de la estructura no esta activo correctamente a causa del desgaste del tornillo de elevación.	La elevación de la estructura se realiza mediante un tornillo patrón y un motorreductor. Si el tornillo patrón no tiene hilos, no puede transmitir el movimiento a los piñones dentados. Tiempo de reparación: 120 minutos.	10.A.1
				2	El sistema elevador no esta activo a causa de la polvo en los tornillos sinfin axiales y radiales.	Un tornillo patrón sucio no transmite movimiento al sistema elevador. Tiempo de reparación: 180 minutos.	10.A.2
11	Transportarse piezas de madera a 35ml/min	A	Incapaz de transportar piezas de madera a 35ml/min	1	El rodillo liso de entrada no está funcionando a causa de la rotura de los rodamientos.	A causa de la falta de engrase adecuada, el rodamiento se sobrecalienta y el eje se trava. Tiempo de reparación: 120 minutos.	11.A.1

Nota. Elaboración Propia.

3.9.7 Realización de Hoja de Decisión

Este documento es el segundo de los dos que se aplica para ser utilizados en la aplicación del RCM. La característica de este documento es que en este se emplea cada uno de los modos de fallas listados en la hoja de información. En las Tablas 27 a 29 se presenta el desarrollo de la Hoja de Decisión para las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01.

I. Máquina Medidor de Humedad

Tabla 27

Hoja de Decisión de Medidor de Humedad

HOJA DE DECISIÓN RCM II			SISTEMA														Tareas "a falta de"	Tarea propuesta	Frecuencia Inicial	A realizar por
			LÍNEA DE MAQUINADO 01																	
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"							Tarea propuesta	Frecuencia Inicial	A realizar por	
							S1	S2	S3											
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4					Tarea propuesta	Frecuencia Inicial	A realizar por	
1	A	1	S	N	N	S	S									1. Limpiar y engrasar tornillo patrón de sistema de elevación.				Mensual
		2	S	N	N	S	N	S									1. Reemplazar tornillo patrón de sistema de elevación.	Semestral	Tec. Mecánico	
2	A	1	S	N	N	S	S									1. Limpiar sensor de detección de nivel de humedad. 2. Revisar posible rotura de cuerpo de sensor.	Semanal	Tec. Mecánico		
3	A	1	S	N	N	S	N	S								1. Reemplazar estrangulador de ingreso de aire hacia máquina.	Mensual	Tec. Mecánico		
		2	S	N	N	S	S									1. Inspeccionar funcionamiento de compresora. 2. Revisar fugas de aire en mangueras de presión.	Semanal	Tec. Mecánico		
4	A	1	S	N	N	S	N	S								1. Reemplazar filtros de aire de ingreso a tablero eléctrico.	Trimestral	Tec. Electricista		
5	A	1	S	N	N	S	S									1. Revisar posible rotura de envase de aceite de unidad de mantenimiento. 2. Inspeccionar nivel de aceite de unidad de mantenimiento.	Semanal	Operador de máquina		
6	A	1	S	N	N	S	N	S								1. Reemplazar banda transportadora de transporte de desperdicios.	Trimestral	Tec. Mecánico		
7	A	1	S	S			S									1. Limpieza y pruebas de funcionamiento de botoneras de encendido eléctrico de máquina.	Mensual	Tec. Electricista		
	B	1	S	S			S									1. Reajuste de tornillos de fijación eléctrica. 2. Comprobación de estado de cableado eléctrico.	Mensual	Tec. Electricista		
	C	1	S	S			S									1. Realizar análisis de calidad de energía, y asimismo mantenimiento de variador electrónico.	Trimestral	Tec. Electricista.		
8	A	1	S	N	N	S	N	S								1. Realizar mantenimiento preventivo al motor trifásico de banda transportadora.	Semestral	Tec. Mecánico		
		2	S	N	N	S	N	S								1. Reemplazar piñones de arrastre de rodillos de arrastre superior e inferior.	Semestral	Tec. Mecánico		
9	A	1	S	N	N	S	N	S								1. Reemplazar rodillos dentados de presión de sistema de arrastre superior e inferior.	Semestral	Tec. Mecánico		

Nota. Elaboración Propia.

II. Máquina Multilamina 01

Tabla 28

Hoja de Decisión de Multilamina 01

HOJA DE DECISIÓN RCM II			SISTEMA											LÍNEA DE MAQUINADO 01				
			SUBSISTEMA															
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"				Tarea propuesta			Frecuencia Inicial	A realizar por
							S1	S2	S3									
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4						
1	A	1	S	N	N	S	N	S					1. Cambiar los soportes (jebes) de la base del motor.	Trimestral	Tec. Mecánico			
	B	1	S	N	N	S	S						1. Engrasar correctamente chumacera. 2. Inspeccionar visualmente el componente.	Mensual	Operador de máquina			
	C	1	S	N	N	S	N	S					1. Colocar tope en la regla de canto para mejor sujeción.	Trimestral	Tec. Mecánico			
	D	1	S	N	N	S	S						1. Realizar mantenimiento a sistema de ejes de corte.	Mensual	Tec. Mecánico			
2	A	1	S	N	N	S	S						1. Limpiar los conductos de salida de aceite.	Diario	Operador de máquina			
	A	2	S	N	N	S	N	S					1. Cambiar filtro de aceite de sistema de lubricación automática.	Trimestral	Tec. Mecánico			
3	A	1	S	N	S		N	S					1. Cambiar mangueras de succión. 2. Cambiar abrazaderas de sujeción.	Trimestral	Tec. Mecánico			
		2	S	N	S		S						1. Limpiar ductos de ingreso de succión de aserrín.	Diario	Operador de máquina			
4	A	1	S	N	N	S	N	S					1. Cambiar segmento de mesa de salida.	Trimestral	Tec. Mecánico			
		2	S	N	N	S	S						1. Calibrar prensor de salida paralelamente referente a la mesa de trabajo.	Mensual	Tec. Mecánico			
		3	S	N	N	S	S						1. Revisar filo de herramienta corte antes de iniciar la producción.	Diario	Operador de máquina			
5	A	1	S	N	N	S	N	S				1. Cambiar todas las ruedas de contador lineal.	Trimestral	Tec. Mecánico				
6	A	1	S	N	N	S	N	S				1. Cambiar filtros de ingreso de tablero eléctrico.	Trimestral	Tec. Mecánico				
7	A	1	S	N	N	S	S						1. Realizar pruebas de funcionamiento de pulsador de emergencia.	Mensual	Tec. Electricista.			
	B	1	S	S			S						1. Revisar aislamiento eléctrico de las bobinas de motor, tensión y amperaje.	Mensual	Tec. Electricista.			
	C	1	S	N	N	S	S						1. Realizar pruebas de funcionamiento de botoneras de encendido.	Mensual	Tec. Electricista.			

Nota. Elaboración Propia.

Tabla 29

Hoja de Decisión de Multilamina 01 (continuación)

HOJA DE DECISIÓN RCM II			SISTEMA													Frecuencia Inicial		A realizar por			
			LÍNEA DE MAQUINADO 01																		
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1			H2			H3			Tareas "a falta de"			Tarea propuesta	Frecuencia Inicial	A realizar por
							S1	S2	S3	O1	O2	O3	H4	H5	S4						
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4	Tarea propuesta	Frecuencia Inicial	A realizar por						
8	A	1	S	S			S									1. Revisar apriete de borneras a contactor, asimismo realizar limpieza de contactos.	Mensual	Tec. Electricista.			
	B	1	S	S			S						1. Realizar análisis de calidad de energía, y asimismo mantenimiento de variador electrónico.	Trimestral	Tec. Electricista.						
	C	1	S	S			S						1. Revisar cableado eléctrico. 2. Realizar inspección visual	Trimestral	Tec. Electricista.						
9	A	1	S	N	N	S	N	S					1. Cambiar resortes de presión. 2. Cambiar amortiguadores de golpe.	Trimestral	Tec. Mecánico						
		2	S	N	N	S	S						1. Inspeccionar funcionamiento de compresora. 2. Revisar fugas de aire en sistema de aire.	Mensual	Tec. Mecánico						
	B	1	S	N	N	S	S						1. Engrasar correctamente rodamiento. 2. Inspeccionar visualmente el componente.	Mensual	Operador de máquina						
10	A	1	S	N	N	S	S						1. Engrasar correctamente en punto de lubricación.	Mensual	Tec. Mecánico						
		2	S	N	N	S	S						1. Limpiar con ceras de metal hilos de tornillo patrón.	Mensual	Tec. Mecánico						
11	A	1	S	N	N	S	S						1. Engrasar correctamente rodamiento de rodillos 2. Inspeccionar visualmente el componente.	Mensual	Operador de máquina						

Nota. Elaboración Propia.

3.9.8 Evaluación económica de cada modo de falla

Según Parra & Crespo (2012), nos mencionan que los costos de la no disponibilidad ocasionadas por fallas (CIF) es un indicador que calcula la repercusión económica ocasionada por los efectos que conlleva un modo de falla en un periodo de tiempo determinado. En el Capítulo II, en el apartado 2.9 [Impacto económico de un modo de falla], se explica la teoría para realizar el cálculo de cada modo de falla.

A continuación, en las Tablas 30 a 33, se determinó el impacto económico de las fallas ocurridas en el año 2021.

I. Máquina Medidor de Humedad

Tabla 30

Costos de cada modo de falla de Medidor de Humedad

CÓDIGO	MODO DE FALLA (Causa de falla)	Tarea propuesta	FF (Fallas/Año)	MDT (Horas/Fallas)	CD (\$)/Hora	CP (\$)/Hora	CIF (\$)/Año
1.A.1	El dispositivo elevador no está operando a causa de la acumulación de polvo en los tornillos sinfín axiales y radiales.	1. Limpiar y engrasar tornillo patrón de sistema de elevación.	4	15.5	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 657.20
1.A.2	El sistema de elevación no está funcionando correctamente a causa del desgaste del tornillo patrón.	1. Cambiar tornillo patrón de sistema de elevación.	3	19	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 604.20
2.A.1	Dispositivo de detección de humedad de la madera no está funcionando adecuadamente a causa de una falla en la fotocelda.	1. Limpiar sensor de detección de nivel de humedad. 2. Revisar posible rotura de cuerpo de sensor.	6	14.5	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 922.20
3.A.1	El sistema de aire comprimido no está operando en situación estándar a causa de una falla en el estrangulador de aire que se encuentra en posición cerrada.	1. Cambiar estrangulador de ingreso de aire hacia máquina.	4	15.5	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 657.20
3.A.2	No se está generando suficiente presión de aire a causa de una caída en la presión del sistema de aire comprimido de la planta.	1. Inspeccionar funcionamiento de compresora. 2. Revisar fugas de aire en mangueras de presión.	8	10	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 848.00
4.A.1	El mecanismo de refrigeración del tablero eléctrico presenta fallas a causa de la acumulación de suciedad en los filtros de succión.	1. Cambiar filtros de aire de ingreso a tablero eléctrico.	8	11	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 932.80
5.A.1	El sistema de aire comprimido no está funcionando adecuadamente a causa de la falta de engrase en la unidad de mantenimiento.	1. Revisar posible rotura de envase de aceite de unidad de mantenimiento. 2. Inspeccionar nivel de aceite de unidad de mantenimiento.	6	13.5	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 858.60
6.A.1	La cinta transportadora de desperdicios no está funcionando adecuadamente a causa de la rotura de la faja de transmisión.	1. Cambiar banda transportadora de transporte de desperdicios.	20	27.5	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 5,830.00
7.A.1	La máquina no se activa a causa de una falla en las botoneras de comando.	1. Limpieza y pruebas de funcionamiento de botoneras de encendido eléctrico de máquina.	6	18	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 1,144.80

Nota. Elaboración Propia.

Tabla 31

Costos de cada modo de falla de Medidor de Humedad (continuación)

CÓDIGO	MODO DE FALLA (Causa de falla)	Tarea propuesta	FF (Fallas/Año)	MDT (Horas/Fallas)	CD (\$)/Hora	CP (\$)/Hora	CIF (\$)/Año
7.B.1	El sistema eléctrico no está funcionando correctamente a causa de un mal funcionamiento de los contactores.	1. Reajuste de tornillos de fijación eléctrica. 2. Comprobación de estado de cableado eléctrico.	6	20	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 1,272.00
7.C.1	El sistema eléctrico no está funcionando correctamente a causa de un bloqueo en el variador electrónico.	1. Realizar análisis de calidad de energía, y asimismo mantenimiento de variador electrónico.	3	25.5	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 810.90
8.A.1	La cinta transportadora de alimentación de la materia prima no está operando en situación estándar a causa de una rotura.	1. Realizar mantenimiento preventivo al motor trifásico de banda transportadora.	23	32.5	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 7,923.50
8.A.2	El sistema de suministro no está funcionando a causa de la rotura del piñón de la cadena.	1. Cambiar piñones de arrastre de rodillos de arrastre superior e inferior.	24	20	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 5,088.00
9.A.1	El sistema de arrastre no está funcionando en situación estándar a causa del desgaste de los rodillos dentados de presión.	1. Cambiar rodillos dentados de presión de sistema de arrastre superior e inferior.	28	32.5	\$ 8.30	\$ 2.30	\$ 9,646.00
<i>Costo indisponibilidad por fallas en el año</i>							\$37,195.4

Nota. El impacto económico de todos los modos de fallas ocurridas en el año 2021 de la máquina Medidor de Humedad alcanzo la cifra de \$ 37, 195.4. Elaboración Propia.

II. Máquina Multilamina 01

Tabla 32

Costos de cada modo de falla de Medidor de Humedad

CÓDIGO	MODO DE FALLA (Causa de falla)	Tarea propuesta	FF (Fallas/Año)	MDT (Horas/Fallas)	CD (\$)/Hora	CP (\$)/Hora	CIF (\$)/Año
1.A.1	La base del motor del eje que sostiene las sierras circulares se ha roto a causa de una vibración excesiva.	1. Cambiar los soportes (jebes) de la base del motor.	4	11.5	\$8.30	\$2.70	\$506.00
1.B.1	El eje que sostiene las sierras circulares de corte presenta una vibración excesiva a causa del desgaste de los rodamientos.	1. Engrasar correctamente chumacera. 2. Inspeccionar visualmente el componente.	5	6.5	\$8.30	\$2.70	\$357.50
1.C.1	La regla de canto de entrada está desalineada a causa de la vibración excesiva de la máquina.	1. Colocar tope en la regla de canto para mejor sujeción.	5	11.5	\$8.30	\$2.70	\$632.50
1.D.1	La máquina vibra en exceso a causa del desgaste de los rodamientos de los ejes de los cabezales de corte.	1. Realizar mantenimiento a sistema de ejes de corte.	24	38	\$8.30	\$2.70	\$10,032.00
2.A.1	El sistema de engrase no está aplicando aceite a la mesa de entrada a causa de la obstrucción de los conductos.	1. Limpiar los conductos de salida de aceite.	8	2.5	\$8.30	\$2.70	\$220.00
2.A.2	La madera no se desliza adecuadamente sobre la mesa de trabajo a causa de que el lubricante contiene impurezas.	1. Cambiar filtro de aceite de sistema de lubricación automática.	7	6.5	\$8.30	\$2.70	\$500.50
3.A.1	El sistema de contención del aserrín está inestable a causa de la rotura de las mangueras de succión.	1. Cambiar mangueras de succión. 2. Cambiar abrazaderas de sujeción.	2	8	\$8.30	\$2.70	\$176.00
3.A.2	El sistema de aspiración de aserrín no está activo correctamente a causa de un bloqueo de residuos en el conducto de succión.	1. Limpiar ductos de ingreso de succión de aserrín.	2	8	\$8.30	\$2.70	\$176.00
4.A.1	El producto presenta defectos en el acabado a causa de imperfecciones (abolladuras) en la mesa de salida.	1. Cambiar segmento de mesa de salida.	24	46	\$8.30	\$2.70	\$12,144.00
4.A.2	El producto tiene defectos en el mecanizado a causa de la falta de calibración del dispositivo de sujeción de salida.	1. Calibrar prensor de salida paralelamente referente a la mesa de trabajo.	4	15	\$8.30	\$2.70	\$660.00
4.A.3	Las herramientas de corte no mecanizan correctamente la madera a causa de defectos en el afilado.	1. Revisar filo de herramienta corte antes de iniciar la producción.	15	17	\$8.30	\$2.70	\$2,805.00
5.A.1	El sistema contador lineal no está funcionando correctamente a causa del desgaste de las ruedas del codificador.	1. Cambiar todas las ruedas de contador lineal.	25	34.5	\$8.30	\$2.70	\$9,487.50
6.A.1	El mecanismo de refrigeración del panel eléctrico tiene fallas a causa de la polvo en los filtros de succión.	1. Cambiar filtros de ingreso de tablero eléctrico.	10	5.5	\$8.30	\$2.70	\$605.00

Nota. Elaboración Propia.

Tabla 33

Costos de cada modo de falla de Medidor de Humedad (continuación)

CÓDIGO	MODO DE FALLA (Causa de falla)	Tarea propuesta	FF (Fallas/Año)	MDT (Horas/Fallas)	CD (\$)/Hora	CP (\$)/Hora	CIF (\$)/Año
7.A.1	El sistema de arranque no está funcionando correctamente a causa del deterioro del pulsador de emergencia.	1. Realizar pruebas de funcionamiento de pulsador de emergencia.	5	4.5	\$8.30	\$2.70	\$247.50
7.B.1	El sistema eléctrico no esta activo adecuadamente a causa de fallas en los motores eléctricos de los ejes que sostienen las sierras circulares.	1. Revisar aislamiento eléctrico de las bobinas de motor, tensión y amperaje.	6	7	\$8.30	\$2.70	\$462.00
7.C.1	La máquina no se enciende a causa de fallas en los botones de control.	1. Realizar pruebas de funcionamiento de botoneras de encendido.	6	8	\$8.30	\$2.70	\$528.00
8.A.1	Los sistemas eléctricos no esta activon adecuadamente a causa del mal funcionamiento de los contactores.	1. Revisar apriete de borneras a contactor, asimismo realizar limpieza de contactos.	5	6.5	\$8.30	\$2.70	\$357.50
8.B.1	Los sistemas eléctricos no esta activon correctamente a causa del bloqueo del variador electrónico.	1. Realizar análisis de calidad de energía, y asimismo mantenimiento de variador electrónico.	5	9.5	\$8.30	\$2.70	\$522.50
8.C.1	El variador electrónico se bloquea a causa de la inestabilidad de la tensión eléctrica.	1. Revisar cableado eléctrico. 2. Realizar inspección visual	3	9.5	\$8.30	\$2.70	\$313.50
9.A.1	El rodillo prensor de salida del producto está inestable a causa de la rotura de los resortes de presión.	1. Cambiar resortes de presión. 2. Cambiar amortiguadores de golpe.	3	11.5	\$8.30	\$2.70	\$379.50
9.A.2	No se está aplicando suficiente presión de aire a causa de una caída en el sistema neumático de la planta.	1. Realizar mantenimiento preventivo a la compresora	16	10.5	\$8.30	\$2.70	\$1,848.00
9.B.1	El rodillo liso de entrada no está funcionando a causa de la rotura de los rodamientos.	1. Realizar mantenimiento preventivo a rodillos de ingreso.	8	9.5	\$8.30	\$2.70	\$836.00
10.A.1	El sistema elevador de la estructura no esta activo correctamente a causa del desgaste del tornillo de elevación.	1. Relizar mantenimiento preventivo a sistema de elevacion.	23	42	\$8.30	\$2.70	\$10,626.00
10.A.2	El sistema elevador no esta activo a causa de la polvo en los tornillos sinfín axiales y radiales.	1. Limpiar con ceras de metal hilos de tornillo patrón.	4	10	\$8.30	\$2.70	\$440.00
11.A.1	El rodillo liso de entrada no está funcionando a causa de la rotura de los rodamientos.	1. Engrasar correctamente rodamiento de rodillos. 2. Inspeccionar visualmente el componente.	8	7.5	\$8.30	\$2.70	\$660.00
<i>Costo indisponibilidad por fallas en el año</i>							\$55,522.5

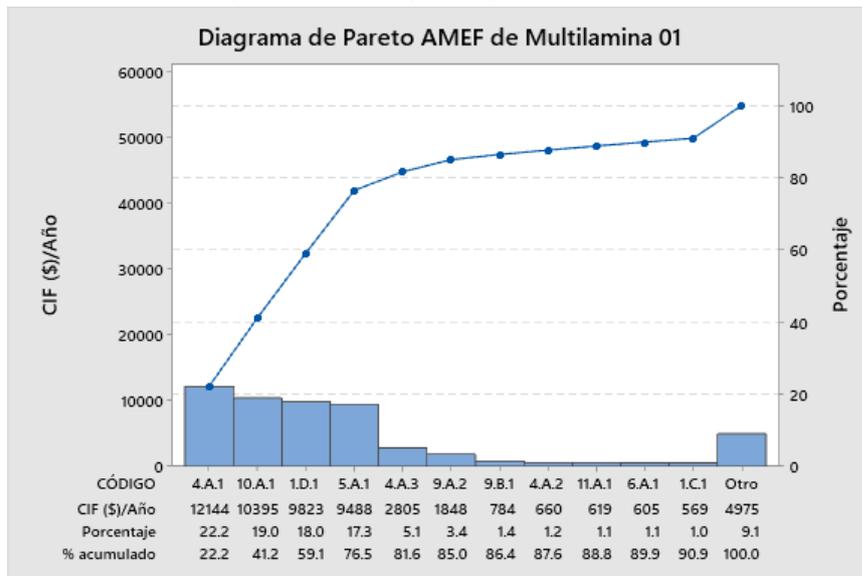
Nota. El impacto económico de todos los modos de fallas ocurridas en el año 2021 de la máquina Medidor de Humedad alcanzo la cifra de \$ 55, 522.5. Elaboración Propia.

A continuación, en las Figuras 34 y 35, a través de un análisis de Pareto, se presentan los modos de falla de mayor impacto económico de las máquinas Multilamina

01 y Medidor de Humedad. Este análisis nos ayudó a priorizar la exposición grafica de los puntos óptimos de intervención, los cuales, al tener mayor impacto económico tienen una mayor influencia en el resultado de cada plan de mantenimiento RCM realizado.

Figura 34

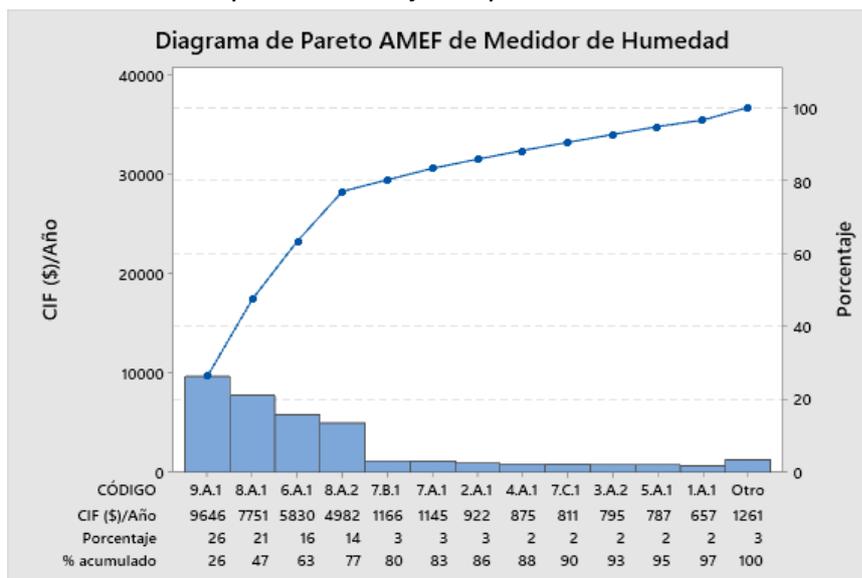
Modos de fallas que tienen mayor impacto económico.



Nota. En esta figura se puede visualizar que los modos de falla 4.A.1, 10.A.1, 1.D.1 y 5.A.1, representan el 76.5%, es decir son los que tienen mayor impacto económico en la contribución de pérdidas. Elaboración Propia.

Figura 35

Modos de fallas que tienen mayor impacto económico.



Nota. En esta figura se puede visualizar que los modos de falla 9.A.1, 8.A.1, 6.A.1 y 8.A.2, representan el 77%, es decir son los que tienen mayor impacto económico en la contribución de pérdidas. Elaboración Propia.

En la Tabla 34 siguiente, se resumen los modos de fallas con sus respectivos costos de mantenimiento preventivo y correctivo, que tienen un mayor impacto económico.

Tabla 34

Costo de falla (Cf) y Costo Mant. Prev. (Cp) de Medidor de Humedad y Multilamina 01

MÁQUINA	CÓDIGO MODO FALLA	Promedio de MANT. PREV. (\$/Día)	Promedio de MANT. CORREC. (\$/Día)
Medidor de Humedad	6.A.1	\$ 82.10	\$ 328.40
	8.A.1	\$ 100.50	\$ 402.00
	8.A.2	\$ 104.20	\$ 416.80
	9.A.1	\$ 128.40	\$ 513.60
Promedio Medidor de Humedad		\$ 103.80	\$ 415.20
Multilamina 01	1.D.1	\$ 125.00	\$ 500.00
	10.A.1	\$ 84.20	\$ 336.80
	4.A.1	\$ 96.80	\$ 387.20
	5.A.1	\$ 76.30	\$ 305.20
Promedio Multilamina 01		\$ 95.58	\$ 382.30

Nota. Elaboracion Propia.

3.10 Impacto económico por indisponibilidad de la Línea de Maquinado 01

En las tablas anteriores, se muestra únicamente el impacto económico de las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01. Esto se hace para mantener el enfoque del trabajo de investigación, ya que estas máquinas son el objeto central del análisis RCM. Ahora, en la Tabla 35, se presenta el impacto económico causado por las fallas de las máquinas en la Línea de Maquinado 01 en el transcurso del año 2021, relacionado con la fabricación de pisos Machihembrados (madera moldurada). El total de este impacto asciende a **\$170,994.90**.

Tabla 35

Impacto económico por indisponibilidad de máquina ocasionado por fallas

N°	MÁQUINA	Costo de falla (\$/Hora)	Cantidad horas por año (Horas/Año)	Costo total (\$/Año)
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	135.26	275	\$37,195.40
2	MULTILAMINA 01	160.24	346.5	\$55,522.50
3	CEPILLADORA 01	95.00	250	\$23,750.00
4	OPTIMIZADORA	70.00	200	\$14,000.00
5	MOLDURERA 01	109.00	203	\$22,127.00
6	RETESTADORA	100.00	184	\$18,400.00
<i>Costo indisponibilidad por fallas en el año</i>				\$170,994.90

Nota. Elaboración Propia.

3.11 Determinación de punto óptimo de intervención

En esta sección, se llevó a cabo la determinación del punto óptimo de intervención para los modos de fallo de mayor impacto económico de las máquinas "Medidor de Humedad" y "Multilamina 01", las cuales tienen el mayor grado de criticidad en la Línea de Maquinado 01. A continuación, con el objetivo de comprender la técnica que se aplicó, se presenta la teoría de los autores Parra y Crespo, quienes expresan lo siguiente:

El principal objetivo del modelo de reemplazo preventivo basado en el tiempo es determinar el período de mantenimiento en el que se produce el menor costo por unidad de tiempo. Su propósito es cuantificar el tiempo de ejecución de mantenimiento óptimo en términos de costos mínimos. (Parra & Crespo, 2012, p. 196)

Como se expuso en el Capítulo III, sección 3.4 [Pruebas de bondad de ajuste para determinar la distribución estadística] con los datos de los tiempos hasta la falla de cada modo de fallo, se analizaron los patrones de falla de las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01 utilizando el Software MiniTab 19 y el estadístico de bondad de ajuste Anderson-Darling (consultar Tabla 36). Una vez establecido que la distribución estadística de Weibull se ajusta mejor a los datos de falla, se calculó los parámetros β (forma) y α (escala).

En la Tabla 36 siguiente, se presentan los resultados de los parámetros α (parámetro de escala) y β (parámetro de forma) de la Distribución de Weibull.

Tabla 36

Resumen de resultados de análisis de bondad de ajuste de cada modo de falla

MÁQUINA	CÓDIGO MODO FALLA	DISTRIBUCIÓN	β=FORMA	α=ESCALA
Medidor de Humedad	6.A.1	Weibull	8.79	60.69
Medidor de Humedad	8.A.1	Weibull	10.03	62.45
Medidor de Humedad	8.A.2	Weibull	9.59	61.59
Medidor de Humedad	9.A.1	Weibull	7.96	60.02
Multilamina 01	1.D.1	Weibull	11.89	49.01
Multilamina 01	4.A.1	Weibull	11.98	48.80
Multilamina 01	5.A.1	Weibull	12.92	49.27
Multilamina 01	10.A.1	Weibull	13.47	48.96

Nota. Elaboración Propia.

Con el historial de datos de tiempos hasta la falla (Ver anexo 3) de cada modo de falla de las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01, y utilizando el software MiniTab 19, se calcularon los indicadores "**f(ti)**" (función de densidad de probabilidad de falla) y "**F(ti)**" (probabilidad de ocurrencia de falla). Estos valores, junto con los indicadores de los costos de mantenimiento "**Cf**" (mantenimiento por falla) y "**Cp**" (mantenimiento preventivo) (Ver Tabla 34), se insertaron en la ecuación (37). A partir de esto, se procedió a calcular el factor "**C(ti)**" (costo promedio de intervención de mantenimiento preventivo por unidad de tiempo) para diferentes valores de "**ti**" (tiempo de intervención).

De esta manera, se pudo determinar cuál es el valor con el costo mínimo. Este punto se denomina "**tp**" (**tiempo de ejecución de mantenimiento preventivo a costo mínimo**) y nos indica cuándo se debe llevar a cabo la actividad de mantenimiento preventivo en los modos de falla que tienen un mayor impacto económico.

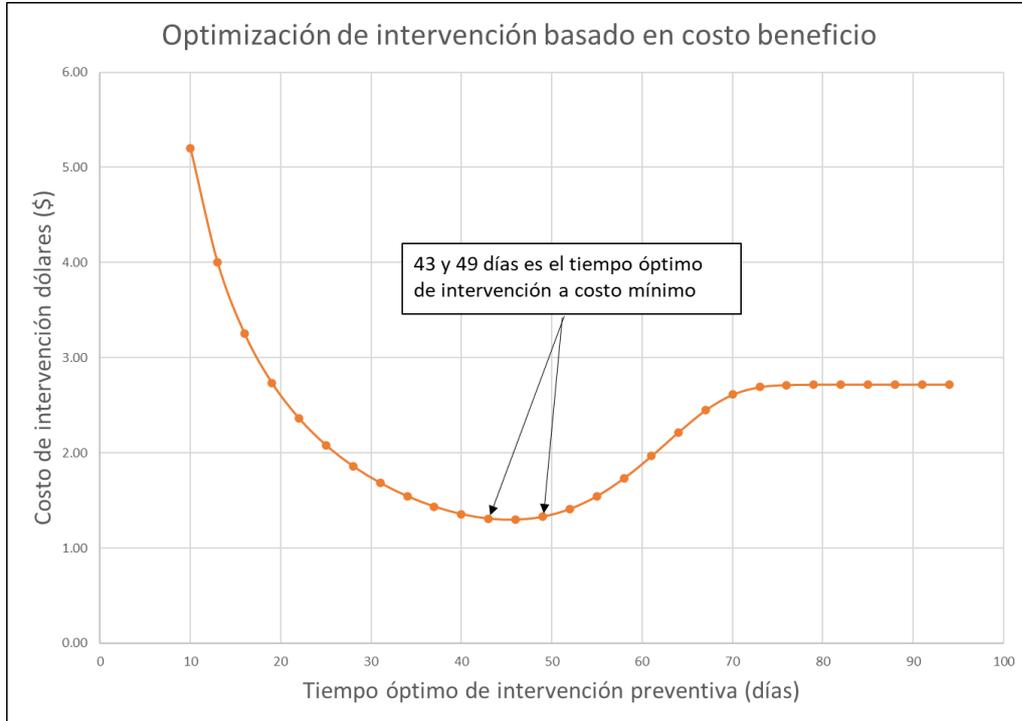
$$C(ti) = \frac{(Cf \times F(ti)) + (Cp \times (1 - F(ti)))}{ti(1 - F(ti)) + \int_0^{ti} ti \times f(t)dt} = \frac{\text{unidad . monetaria}}{\text{tiempo}} \quad (37)$$

A continuación, en las Figuras 36 al 43, se presenta gráficamente el punto óptimo de intervención de los modos de falla con mayor impacto económico en las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01. Además, en la Tabla 37 se muestra el consolidado de los tiempos óptimos de intervención.

I. Máquina Medidor de Humedad

Figura 36

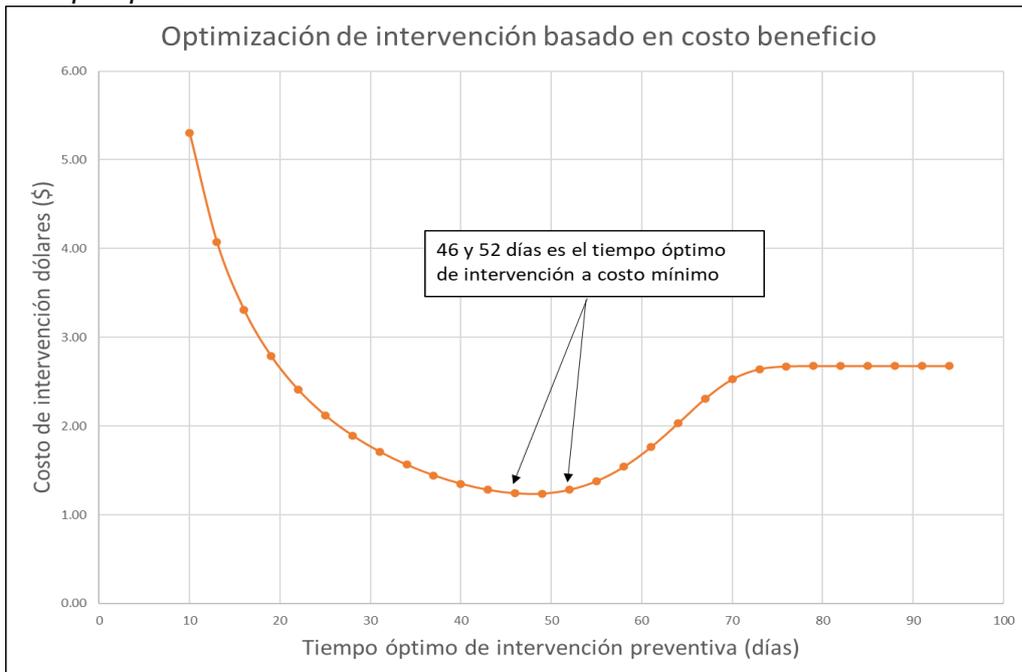
Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 6.A.1



Nota. Elaboración Propia.

Figura 37

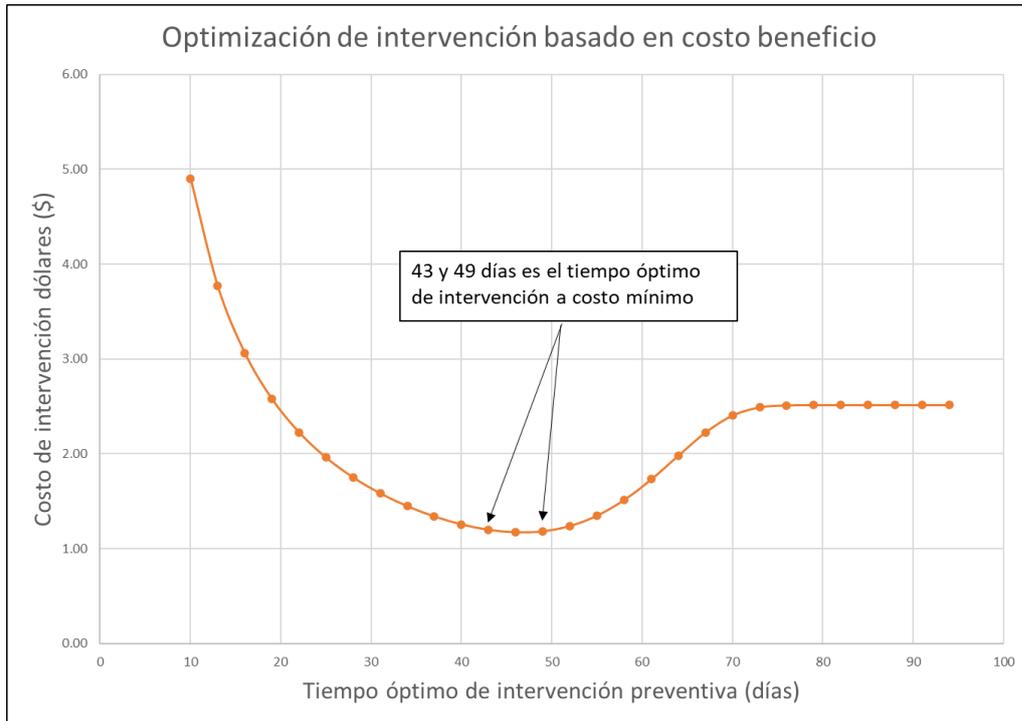
Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 8.A.1



Nota. Elaboración Propia.

Figura 38

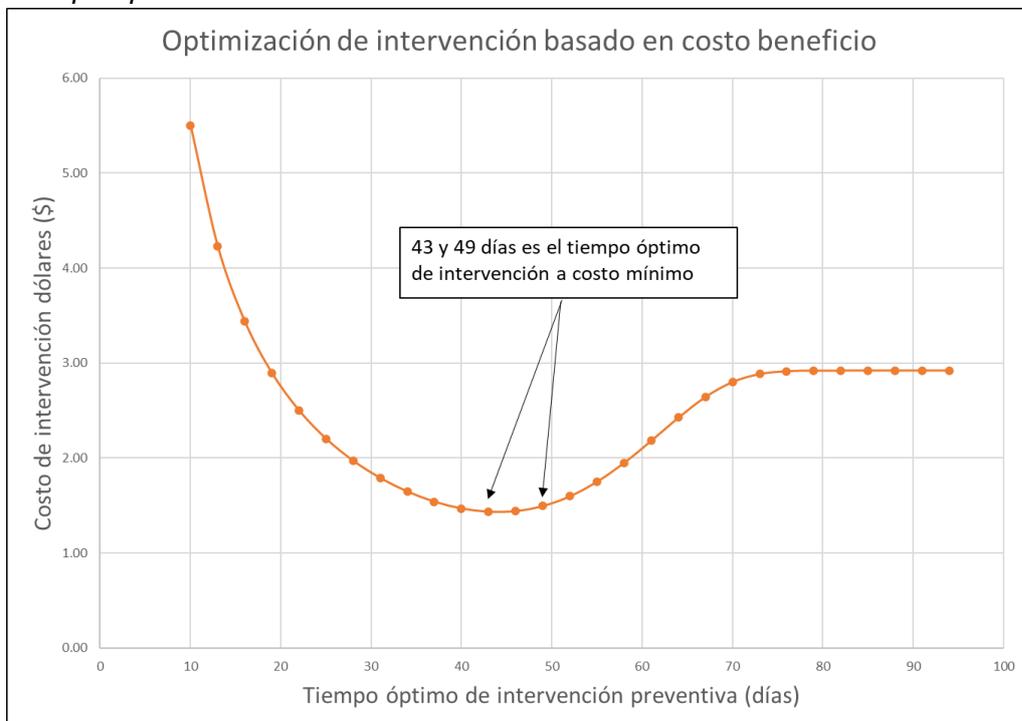
Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 8.A.2



Nota. Elaboración Propia.

Figura 39

Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 9.A.1

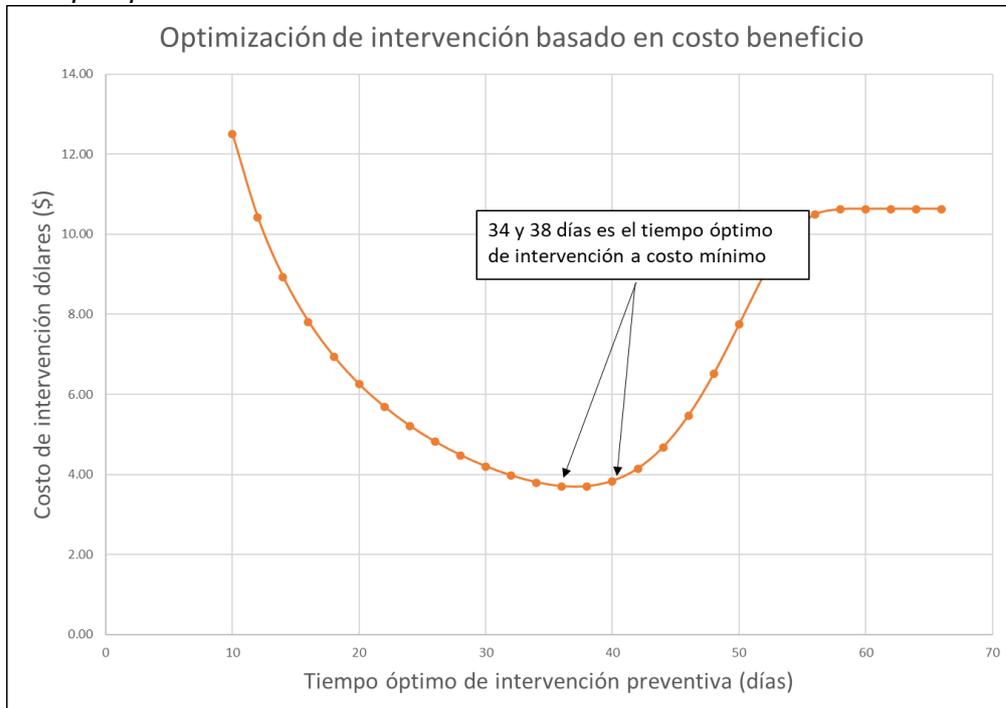


Nota. Elaboración Propia.

II. Máquina Multilamina 01

Figura 40

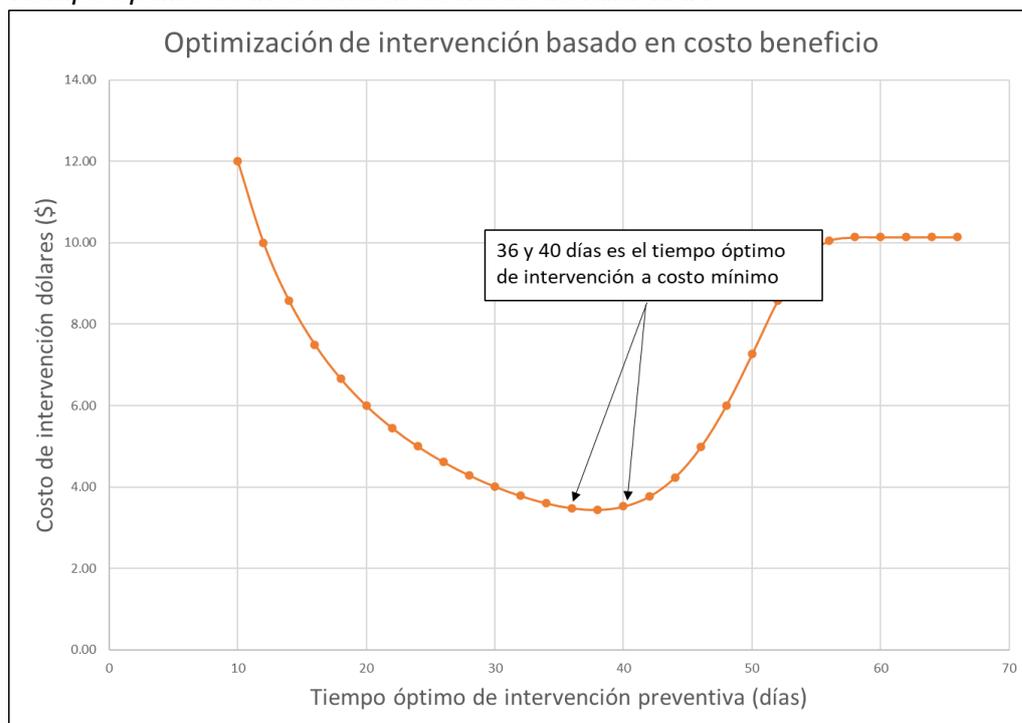
Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 1.D.1



Nota. Elaboración Propia.

Figura 41

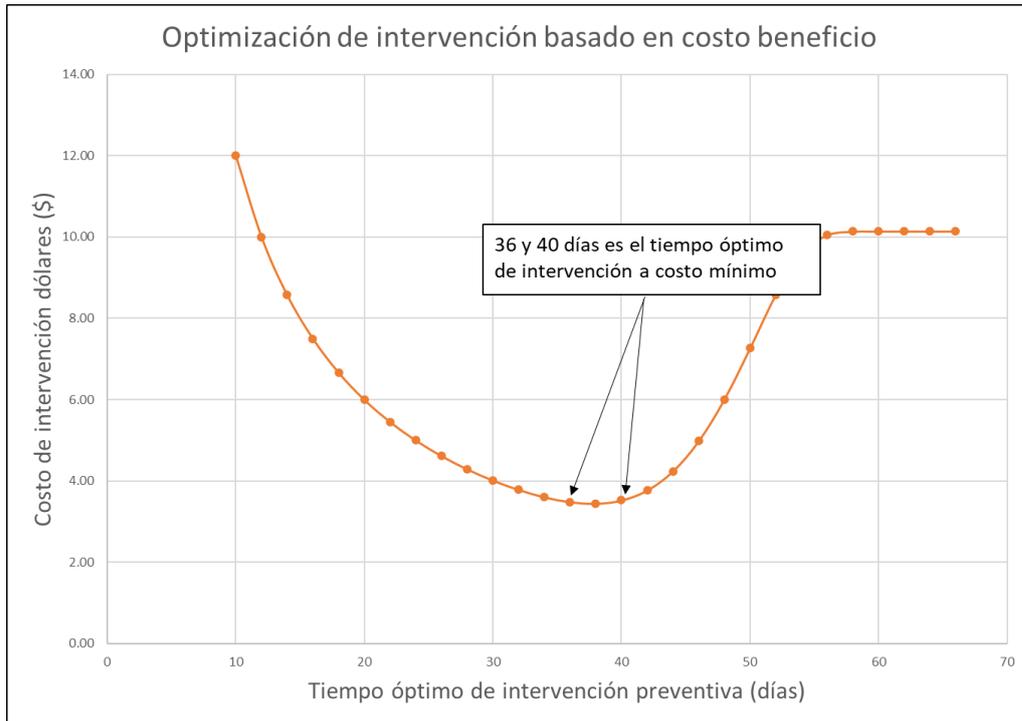
Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 4.A.1



Nota. Elaboración Propia.

Figura 42

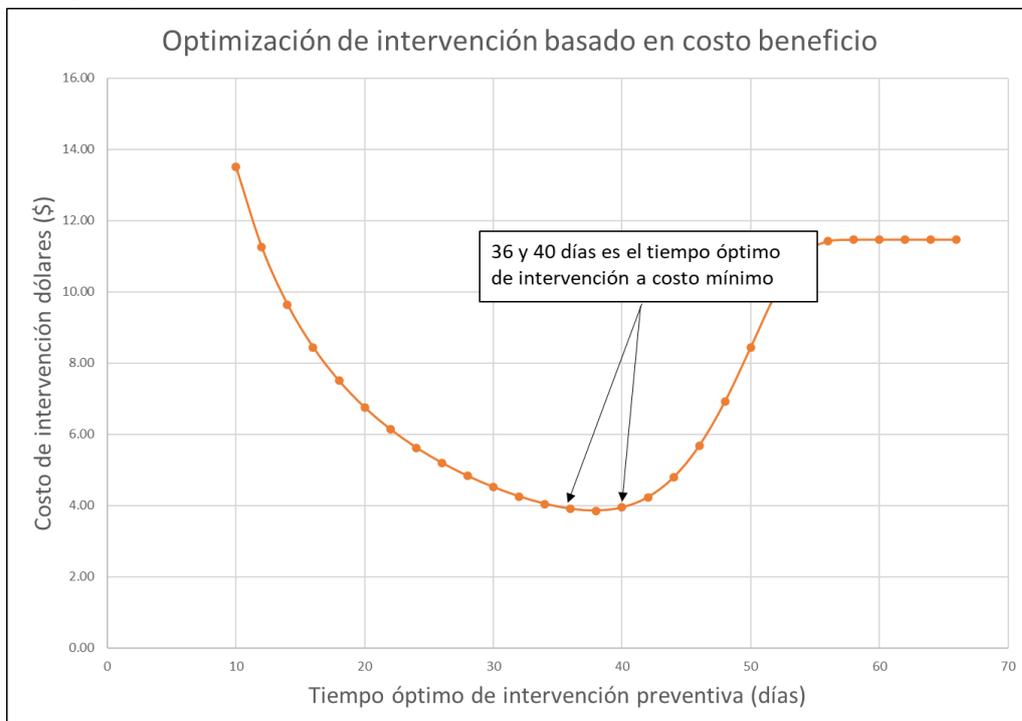
Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 5.A.1



Nota. Elaboración Propia.

Figura 43

Tiempo óptimo de intervención de modo de falla 10.A.1



Nota. Elaboración Propia.

Tabla 37

Resumen de tiempo óptimo de intervención de Medidor de Humedad y Multilamina 01

MÁQUINA	CÓDIGO MODO FALLA	TIEMPO ÓPTIMO DE INTERVENCIÓN
Medidor de Humedad	6.A.1	Entre 43 y 49 días
Medidor de Humedad	8.A.1	Entre 46 y 52 días
Medidor de Humedad	8.A.2	Entre 43 y 49 días
Medidor de Humedad	9.A.1	Entre 43 y 49 días
Multilamina 01	1.D.1	Entre 34 y 38 días
Multilamina 01	4.A.1	Entre 36 y 40 días
Multilamina 01	5.A.1	Entre 36 y 40 días
Multilamina 01	10.A.1	Entre 36 y 40 días

Nota. En la tabla se puede apreciar que los tiempos óptimos de intervención de cada modo de falla de cada máquina existe cierta afinidad por cada máquina. Elaboración Propia.

3.12 Diseño de plan de mantenimiento propuesto

Referente a los intervalos iniciales de intervención, Moubray (2004), menciona lo siguiente: “Las tareas más costosas, en términos del costo directo y de la cantidad de tiempo muerto necesario para hacerlas, tienden a determinar los intervalos básicos de los planes.” (Moubray, 2004).

Siguiendo con la elaboración del plan de mantenimiento RCM, y tras haber definido las tareas que deben llevarse a cabo, es ahora el momento de establecer las frecuencias de intervención. Estas frecuencias iniciales se han determinado de manera específica para cada caso, teniendo en cuenta factores como la criticidad de las funciones, los costos de mantenimiento, los modos de falla identificados y las estrategias de mantenimiento elegidas. Como resultado, hemos obtenido un plan de mantenimiento RCM con puntos óptimos de intervención.

En las siguientes tablas desde la 36 al 42, se muestra la realización del objetivo de la tesis, que es; *“Determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera, mediante el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad.”*

Tabla 38

Plan de mantenimiento de Medidor de Humedad basado en la metodología RCM

Medidor de Humedad			Mes 1		Mes 2		Mes 3		Mes 4		Mes 5		Mes 6		Mes 7		Mes 8		Mes 9		Mes 10		Mes 11		Mes 12														
Código	Tarea propuesta	Intervalo inicial (días)	A ejecutarse por	S.1	S.2	S.3	S.4	S.1	S.2	S.3	S.4	S.1	S.2	S.3	S.4	S.1	S.2	S.3	S.4	S.1	S.2	S.3	S.4																
1.A.1	1. Limpiar y engrasar tornillo patrón de sistema de elevación.	60	Tec. Mecánico	x																																			
1.A.2	1. Cambiar tornillo patrón de sistema de elevación.	180	Tec. Mecánico	x																																			
2.A.1	1. Limpiar sensor de detección de nivel de humedad. 2. Revisar posible rotura de cuerpo de sensor.	15	Tec. Mecánico	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
3.A.1	1. Cambiar estrangulador de ingreso de aire hacia máquina.	30	Tec. Mecánico	x			x				x				x				x				x				x				x				x				
3.A.2	1. Inspeccionar funcionamiento de compresora. 2. Revisar fugas de aire en mangueras de presión.	15	Tec. Mecánico	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
4.A.1	1. Cambiar filtros de aire de ingreso a tablero eléctrico.	30	Tec. Electricista	x			x				x				x				x				x				x				x				x				
5.A.1	1. Revisar posible rotura de envase de aceite de unidad de mantenimiento. 2. Inspeccionar nivel de aceite de unidad de mantenimiento.	15	Operador de máquina	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				

Nota. Elaboración Propia.

CAPÍTULO IV . Discusión de resultados y contrastación de las Hipótesis

4.1 Análisis de los resultados de la investigación

En este estudio de investigación, se evaluó la gestión de mantenimiento en la Línea de Maquinado 01, donde se producen pisos sólidos de madera (Machihembrado). Se identificaron áreas de mejora en la gestión de mantenimiento, especialmente en equipos que afectan negativamente la disponibilidad de la línea. En este contexto, la planta carece de información sobre los equipos críticos y la etapa de su ciclo de vida, no se realiza análisis de modos y efectos de fallas, y el registro de paradas de máquina se limita a descripciones de fallas y tiempos entre ellas. Esta limitación ha tenido un impacto negativo en la productividad, los costos de reparación, la vida útil de las máquinas, la calidad del producto y la competitividad de la organización.

Es importante destacar que, al realizar el análisis de ciclo de vida de las máquinas de la Línea de Maquinado 01, se encontró que la mayoría están en la etapa de envejecimiento, es por ello por lo que se puede deducir que los equipos de los demás procesos productivos de la empresa se encuentran en la fase de envejecimiento, por lo que se sugiere implementar planes de mantenimientos basados en el RCM, con sus respectivas frecuencias óptimas de intervención.

Al utilizar la herramienta de Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), se logró identificar las causas fundamentales de las fallas, evaluar su impacto en términos de seguridad, calidad, producción y costos, y establecer prioridades en las acciones de mantenimiento para prevenir o mitigar dichas fallas. Lo anterior expuesto se ve reflejado en el desarrollo de la hoja de información y posteriormente hoja de decisión.

Por otro lado, se determinó el punto óptimo de intervención, basados en un análisis estadístico, de los modos de fallas más representativos económicamente, con la finalidad

de tener un efecto positivo en la disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos de la Línea de Maquinado 01. Esto se debe a que se pueden llevar a cabo inspecciones, limpiezas, lubricaciones y ajustes de manera regular en los equipos, antes de que ocurran fallas o degradaciones significativas.

4.2 Contrastación de las hipótesis formuladas

Para contrastar la primera hipótesis (H1), en el Capítulo III, se desarrolló la identificación de la criticidad de los equipos de la Línea de Maquinado 01, y se encontró que dos (02) de los seis (06) son críticos, por lo tanto, requieren un mayor cuidado. Estos equipos son el Medidor de Humedad y la Multilamina 01. En la Tabla 43, se presentan estos equipos.

Tabla 43

Criticidad equipos Línea de Maquinado 01

N°	Descripción máquina	Frecuencia de fallas (FF)	Impacto de la producción (IP)	Seguridad y Salud (SS)	Costo de reparación (CR)	Tiempo de reparación (T)	Tiempo de operación (TO)	Índice de Criticidad (IC)	Criticidad
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	4	3	4	3	4	4	72	Alta
2	MULTILAMINA 01	4	4	2	3	2	3	56	Alta
3	OPTIMIZADOR	3	3	3	3	4	3	48	Media
4	MOLDURERA 01	3	4	3	3	2	4	48	Media
5	CEPILLADORA 01	3	4	2	3	3	4	48	Media
6	MOLDURERA 02	3	4	3	3	3	3	48	Media
7	RETESTADORA GMC	2	2	2	3	3	2	24	Baja

Nota. Elaboración Propia.

En el mismo capítulo, se abordó la identificación de los modos y efectos de falla. Esto se debió a que era esencial en el proceso de RCM, ya que ayudó a comprender cuáles eran las posibles formas en que un equipo de la Línea de Maquinado podía fallar y cuáles serían las consecuencias de esas fallas. Asimismo, recurriendo a la información del apartado 3.9.6 [Realización de Hoja de Información], se llevó a cabo la ejecución de la Hoja de Información. Este documento se utilizó para documentar las funciones del activo que se estaba analizando, enumerando las fallas funcionales asociadas, los modos de falla y sus efectos. En la Tabla 44 se presenta un extracto del desarrollo de la Hoja de Información de la máquina Medidor de Humedad.

Tabla 44

Hoja de Información

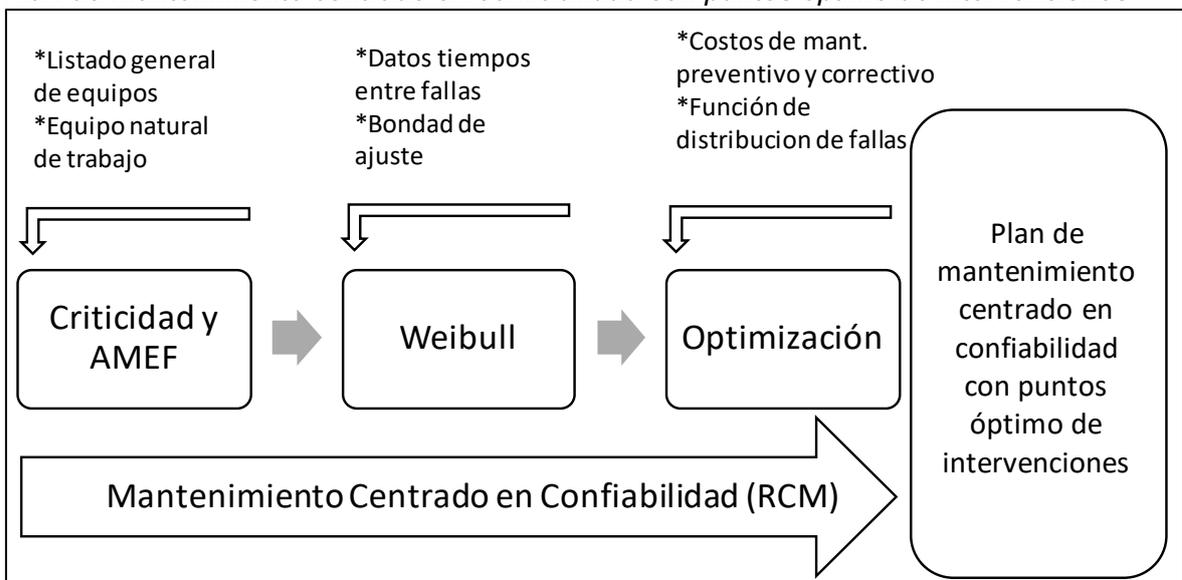
HOJA DE INFORMACIÓN RCM II		SISTEMA													
		LÍNEA DE MAQUINADO 01													
Nº		Función		Ord .		SUBSISTEMA									
						MEDIDOR DE HUMEDAD									
Nº		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		Nº		MODO DE FALLA (Causa de falla)		EFECTOS DE FALLA (Que sucede cuando se produce una falla)		CÓDIGO					
1		Desplazarse de forma vertical para permitir paso para espesor de piezas de madera desde los 10mm hasta los 30mm.		A		Base de máquina. No soporta las cargas de movimiento vertical y horizontal.		1		El sistema de elevación no está operando debido a la acumulación de suciedad en los tornillos sinfín axiales y radiales.		El sistema de elevación no puede funcionar debido a la suciedad acumulada en el tornillo patrón. Se requieren 180 minutos para realizar la reparación.		1.A.1	
								2		El sistema de elevación no está funcionando correctamente debido al desgaste del tornillo		El desgaste del tornillo impide que el sistema de elevación pueda transmitir movimiento. El tiempo		1.A.2	

Nota. Elaboración Propia.

En conclusión, la identificación de la criticidad, así como los modos y efectos de falla (en la hoja de información) de los equipos de la Línea de Maquinado 01, formaron parte de la elaboración del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad. La Figura 44 presenta el plan de mantenimiento RCM con puntos óptimos de intervención, en el cual se detallan criticidad, modos y efectos de falla de los equipos incluido en este plan.

Figura 45

Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad con puntos óptimo de intervenciones



Nota. Elaboración Propia.

En este sentido, con el análisis efectuado, se confirma que la primera hipótesis específica (H1) que establece: "La identificación de criticidad, modos y efectos de falla de

los equipos permitirá elaborar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad" es cierta.

Con relación a la comprobación de la segunda hipótesis (H2), se incorporaron los datos históricos de los tiempos hasta las fallas de cada uno de estos activos críticos en el software MiniTab 19. El objetivo fue determinar la distribución estadística que mejor se ajustara a los datos de falla, y se obtuvo que todas las fallas de los equipos siguen una distribución probabilística de Weibull.

Además, este análisis previo permitió determinar el valor de β y, con ello, conocer en qué etapa del ciclo de vida se encuentran. Estos procesos se describen en los apartados 3.5 (Pruebas de bondad de ajuste para determinar la distribución estadística) y 3.6 (Evaluación de la etapa de ciclo de vida de los equipos de la línea de maquinado 01) del Capítulo III.

En la Tabla 45, se presenta los resultados de las pruebas de bondad de ajuste de los datos de tiempos hasta la falla, que permitieron determinar la mejor distribución estadística según el software MiniTab 19.

Tabla 45

Resultados de bondad de ajuste obtenido con el Software MiniTab 19.

N°	DESCRIPCIÓN	DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA	ANDERSON-DARLING
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	WEIBULL	1.070
2	MULTILAMINA 01	WEIBULL	1.136
3	CEPILLADORA 01	WEIBULL	1.026
4	OPTIMIZADORA	WEIBULL	0.895
5	MOLDURERA 01	WEIBULL	0.920
6	RETESTADORA	WEIBULL	0.724

Nota. Elaboración Propia.

A continuación, en la Tabla 46, se detallan los valores de β obtenidos, así como la etapa de ciclo de vida en la que se encuentran, según su ubicación en la "Curva de la Bañera".

Tabla 46

Valores de β obtenidos en análisis con Software MiniTab 19.

N°	MÁQUINA	PARÁMETRO DE FORMA BETA (β)	UBICACIÓN DE BETA (β) EN CURVA DE LA BAÑERA	CONDICIÓN DE MÁQUINA SEGÚN CURVA DE LA BAÑERA
1	MEDIDOR DE HUMEDAD	1.1	FASE II	FUNCIONAMIENTO NORMAL
2	MULTILAMINA 01	3.9	ETAPA III DE FASE III	DETERIORO DEBIDO AL DESGASTE
3	CEPILLADORA 01	1.9	FASE II	FUNCIONAMIENTO NORMAL
4	OPTIMIZADORA	2.9	ETAPA III DE FASE III	DETERIORO DEBIDO AL DESGASTE
5	MOLDURERA 01	2.5	ETAPA III DE FASE III	DETERIORO DEBIDO AL DESGASTE
6	RETESTADORA	2.4	ETAPA III DE FASE III	DETERIORO DEBIDO AL DESGASTE

Nota. Elaboración Propia.

Siguiendo la teoría expuesta en el Capítulo III, con relación al concepto de la curva de la bañera, se llega a la conclusión de que dos equipos se encuentran en la Fase II (Funcionamiento Normal), mientras que los otros cuatro restantes se hallan en la Fase III (deterioro debido al desgaste o envejecimiento).

De lo anterior expuesto, se concluye, que la segunda hipótesis (H2) que menciona: *“La estimación paramétrica permitirá determinar el ciclo de vida de los equipos críticos.”*, **es cierta.**

Para la comprobación de la tercera hipótesis (H3), se recurrió a los resultados obtenidos en el Capítulo III. Se utilizaron los registros de tiempos hasta la falla de las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01 para calcular el valor del "tp" (tiempo de ejecución de mantenimiento a costo mínimo) y se usó para indicar cuándo debía llevarse a cabo la actividad de mantenimiento de los modos de falla que tenían un mayor impacto económico.

En la Tabla 47 se muestra el resumen de los tiempos óptimos de intervención de los modos de falla de mayor impacto económico.

Tabla 47

Resumen de tiempo óptimo de intervención de Medidor de Humedad y Multilamina 01

MÁQUINA	CÓDIGO MODO FALLA	TIEMPO ÓPTIMO DE INTERVENCIÓN
Medidor de Humedad	6.A.1	Entre 43 y 49 días
Medidor de Humedad	8.A.1	Entre 46 y 52 días
Medidor de Humedad	8.A.2	Entre 43 y 49 días
Medidor de Humedad	9.A.1	Entre 43 y 49 días
Multilamina 01	1.D.1	Entre 34 y 38 días
Multilamina 01	4.A.1	Entre 36 y 40 días
Multilamina 01	5.A.1	Entre 36 y 40 días
Multilamina 01	10.A.1	Entre 36 y 40 días

Nota. En la tabla se puede apreciar que los tiempos óptimos de intervención de cada modo de falla de cada máquina existe cierta afinidad por cada máquina. Elaboración Propia.

A partir de lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la tercera hipótesis (H3), que establece: *“El análisis económico de cada modo de falla y datos hasta la falla posibilitará determinar la frecuencia optima de intervención.”*, **es cierta.**

Por otro lado, para la contrastar la cuarta hipótesis (H4), nos basamos en la teoría expuesta en el Capítulo III, donde se realizó la recopilación de datos de los tiempos entre fallas. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de filtrado para eliminar los datos atípicos, seguido de una prueba de bondad de ajuste mediante el software Minitab 19. El propósito de esta prueba fue determinar la distribución estadística que mejor se ajuste a los datos de las fallas. El proceso previamente mencionado concluyó que todas las máquinas se ajustan a una distribución estadística de Weibull.

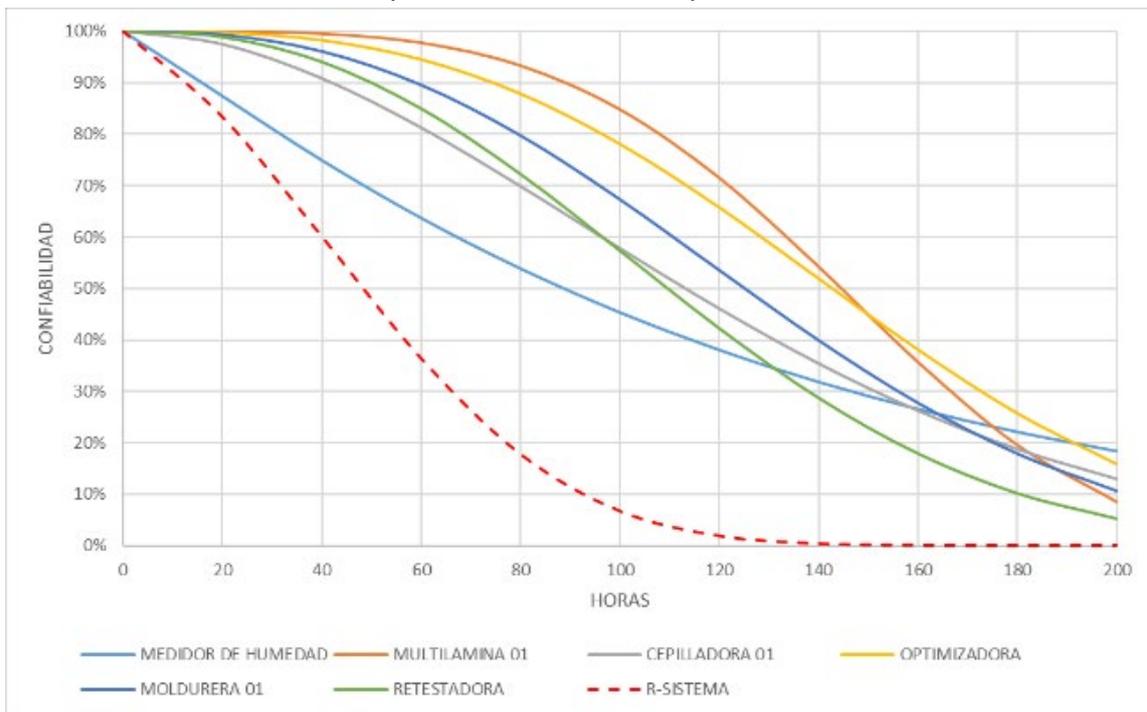
Con esta información disponible se procedió al cálculo de la confiabilidad mediante la aplicación de la fórmula de función de confiabilidad de Weibull. Dada la configuración lógica de la Línea de Maquinado 01 en serie, la confiabilidad de esta se obtiene multiplicando las confiabilidades individuales en un período de tiempo determinado.

Asimismo, con los valores MTBF y MTTR se calculó la disponibilidad mecánica de todo el sistema, el resultado de estos cálculos reveló que la disponibilidad del proceso productivo es del 56.12 %.

En la Figura 45, se muestra que, a las 100 horas de operación, el sistema de máquinas posee una confiabilidad del 7%. Este resultado es un indicador negativo, ya que el valor no asegura la continuidad de las operaciones del proceso productivo.

Figura 45

Curva de confiabilidad de máquinas de Línea de Maquinado 01



Nota. Elaboración Propia.

A partir de lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la cuarta hipótesis (H4), que establece: *“El análisis de datos de tiempo entre fallas posibilitará valorar el porcentaje de disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos de la línea de maquinado”*, **es cierta**.

Finalmente, después de contrastar las cuatro hipótesis específicas en las que se sustenta la hipótesis principal que establece: *“Diseñando un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad se determinará el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera.”* se llega a la conclusión de que dicha hipótesis principal ha sido confirmada.

CONCLUSIONES

1. En el análisis de criticidad de la Línea de Maquinado 01, se destacaron como máquinas críticas el Medidor de Humedad y la Multilamina 01, con índices de 72 y 56 en una escala de 0 a 100. Estas dos máquinas se seleccionaron para aplicar la metodología RCM. Además, a través de la técnica AMEF, se identificaron diversas funciones, fallas y modos de falla para el Medidor de Humedad (9 funciones, 11 fallas y 14 modos) y para la Multilamina 01 (11 funciones, 19 fallas y 25 modos).
2. En la determinación de fase de ciclo de vida de todos los equipos de la Línea de Maquinado 01, se identificó que los equipos siguen una distribución probabilística de Weibull. Con ello, se pudo determinar el valor de beta (β), lo que permitió identificar que 2 equipos, el Medidor de Humedad y la Cepilladora 01, se encuentran en la Fase II (Funcionamiento Normal). Mientras que los otros 4 equipos, la Multilamina 01, la Optimizadora, la Moldurera 01 y la Retestadora, se hallan en la Fase III (envejecimiento).
3. Para determinar los puntos óptimos de intervención de mantenimiento, fue necesario conocer los costos de mantenimiento preventivo y correctivo de cada modo de falla. El análisis arrojó que, en promedio, los costos son de 100 (\$/día) para el mantenimiento preventivo, mientras que el correctivo tiene un promedio de 400 (\$/día). Con estos valores, se determinó que, para el Medidor de Humedad, la frecuencia de intervención varía en el rango de 30 a 40 días, y para el caso de la Multilamina 01, el rango es de 40 a 50 días.
4. La Línea de Maquinado 01 opera bajo una lógica de falla en serie, lo que implica que el cálculo de disponibilidad y confiabilidad del sistema depende de la multiplicación de las disponibilidades individuales de cada máquina. El resultado de estos cálculos reveló que la disponibilidad del proceso productivo es del 56.12%. Mientras que la confiabilidad del sistema a las 100 horas de operación es del 7%, lo que constituye un indicador negativo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda ejecutar un análisis de criticidad a las máquinas de todas las líneas productivas de la empresa, ya que es fundamental en el marco del RCM. Esto permite priorizar los recursos de mantenimiento, enfocarse en la prevención de fallas en los equipos críticos, establecer estrategias de mantenimiento adecuadas, optimizar los costos y mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.

Asimismo, se recomienda evaluar las fallas funcionales de todas las máquinas de las distintas líneas de producción de la organización para identificar proactivamente las fallas potenciales, evaluar su gravedad, determinar acciones de mitigación adecuadas, optimizar recursos y costos, y mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.
2. Se recomienda analizar en qué fase de su ciclo de vida se hallan los equipos de toda la cadena de producción de la organización, esto con el fin de establecer estrategias de mantenimiento adecuadas. Asimismo, se puede llevar a cabo la aplicación de pruebas de detección de fallos en las primeras etapas de funcionamiento del equipo o sistema durante los primeros años de vida, o bien, se puede planificar la sustitución preventiva de componentes críticos cuando el equipo o sistema está llegando al final de su ciclo de vida.
3. Es recomendable encontrar la frecuencia óptima de intervención de mantenimiento para toda la cadena de producción, con el fin de optimizar recursos, reducir fallas, maximizar la vida útil de los equipos y mejorar el rendimiento operativo.
4. Se sugiere implementar indicadores globales de mantenimiento en toda la cadena de producción, como el MTBF (tiempo medio entre fallas) y el MTTR (tiempo medio para reparar), con el fin de determinar la disponibilidad mecánica y la confiabilidad. Esto permitirá monitorear y mejorar constantemente el desempeño del mantenimiento.

REFERENCIAS

- Agualongo Yansapanta, L. R. (2020). *Análisis de fiabilidad de máquinas y equipos por la ley de Weibull en el área de extrusión de la empresa Holviplas SA y su incidencia en la disponibilidad*. [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Ambato] Repositorio institucional de la Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/30606>
- Arata Andreani, A. (2005). *Manual de gestión de activos y mantenimiento*. RIL Editores.
- Arteaga Bazarro, L. E., & Gorozabel Chata, F. B. (2021). Implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad a maquinarias críticas de la plaza calderón/Implementation of reliability-centered maintenance to critical machinery at plaza calderón. *Universidad & ciencia*, 10(1), 202-216. <https://doi.org/https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/1784>
- Campos López, O., Tolentino Eslava, G., Toledo Velázquez, M., & Tolentino Eslava, R. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 23(1), 51-59.
- Chávez Cadena, M. I., Jiménez Cargua, J. W., & Cucuri Pushug, M. I. (2020). Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) del sistema de reinyección de agua de formación. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*.
- Gandur Peña, F. H. (2017). *Adaptación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en un sistema crítico de aire acondicionado de la Clínica Universitaria Bolivariana (CUB)*. [Tesis de maestría, Universidad Pontificia Bolivariana] Repositorio institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11912/3577>
- Gasca, M., Camargo, L., & Medina, B. (2017). Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial. *Información tecnológica*, 28(4 2017), 111-124. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000400014>
- Gómez De León, F. C. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia.
- Espinosa Martínez, J., De la Paz Martínez, E., Pérez Bermúdez, R., & Acosta Pérez, I. (2020). Contribución del mantenimiento centrado en la confiabilidad para el estudio de fallos a equipos consumidores de energía eléctrica. *Revista Centro Azúcar*, 47(1), 22-32.
- Jardine, A., & Tsang, A. (2021). *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*. Prensa CRC.
- Mora, A. (2009). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. Editorial Alfaomega.

- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Aladon Ltd.
- Parra, C. A., & Crespo, A. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos*. Ingecon.
- Predictiva21. (s.f.). *RCM II: Reliability Centered Maintenance - John Moubray*. Recuperado el 15 de Mayo de 2023, de Predictiva21: <https://predictiva21.com/libro-rcm-moubray/>
- Quisigüiña, L. G., Arteaga, Á. R., & Rodríguez, P. A. (2021). Determinación de Indicadores de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad. Caso de Estudio: Industria de Elaboración de Conservas de Atún. *Revista Cubana de Ingeniería*.
- Rosita, K. K., & Rada, M. V. (2021). Equipment Reliability Optimization Using Predictive Reliability Centered. *8th International Conference on Industrial Engineering and Applications* (págs. 348-354). IEEE. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/9436745>
- Solé, A. C. (1991). *Fiabilidad y seguridad de procesos industriales*. Marcombo.
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Pearson Educación de México.
- Yavuz, O., Doğan, E., Carus, E., & Görgülü, A. (2019). Reliability Centered Maintenance Practices in Food Industry. *3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship (WOCTINE)*. 158, págs. 227-234. Elsevier B.V. - ScienceDirect. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.046>

ANEXOS

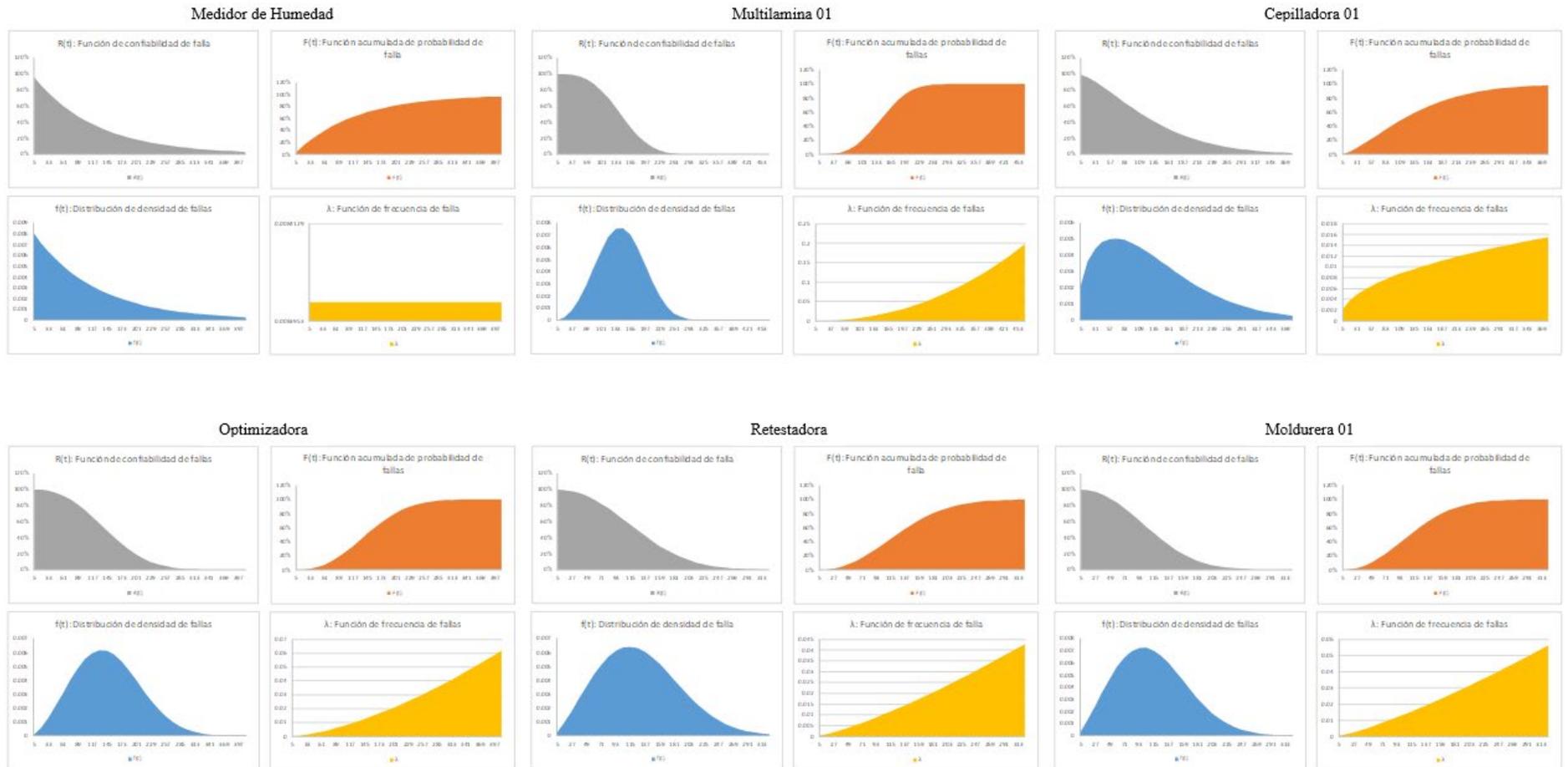
ANEXO 1: Matriz de consistencia.....	1
ANEXO 2: Resultados gráficos de indicadores de confiabilidad de la Línea Maquinado 01...2	
ANEXO 3: Datos de tiempos entre fallas de cada modo de falla de las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01.....	3
ANEXO 4: Prueba de bondad de ajuste, en el Software MiniTab19 para determinar la mejor distribución estadística según los tiempos de fallas, de los modos de fallas.....	3
ANEXO 5: Costo de plan de mantenimiento RCM de Medidor de Humedad.....	4
ANEXO 6: Costo de plan de mantenimiento RCM de Multilamina 01.....	5
ANEXO 7: Datos de tiempos entre fallas (TEF) de las máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01.....	6
ANEXO 8: Tiempo óptimo de intervención de cada modo de fallas de las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01.....	6

Anexo N° 1: Matriz de consistencia

PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA DETERMINAR EL PUNTO ÓPTIMO DE INTERVENCIONES DE LOS EQUIPOS DE LA LÍNEA DE MAQUINADO EN UNA FÁBRICA DE PISOS DE MADERA					
Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología
Problema general: ¿Será un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad una herramienta para determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera?	Objetivo general: Determinar el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera, mediante el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad.	Hipótesis general: Diseñando un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad se determinará el punto óptimo de intervenciones de los equipos de la línea de maquinado en una fábrica de pisos de madera.	Variable independiente (X): Mantenimiento centrado en confiabilidad.	X1: Números de Modos de fallas X2: Números de Efectos de falla X3: Cantidad de Fallas ocultas X4: Cantidad de Equipos críticos X5: Cantidad de Funciones primarias X6: Cantidad de Funciones secundarias X7: Valor del beta en la curva de Weibull X8: MTBF (Tiempo medio entre fallas) X9: MTRR (Tiempo medio para reparar) X10: Tasa de fallas	1. Tipo de investigación: Aplicada 2. Nivel de investigación: Descriptiva, explicativa, correlacional 3. Métodos de diseño: Investigación cuantitativa.
Problema específico 1: ¿De qué manera el análisis de criticidad y modos y efectos de fallas de equipos permitirá elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad?	Objetivo específico 1: Analizar criticidad y modos y efectos de falla de los equipos mediante metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad	Hipótesis específicos 1: La identificación de criticidad, modos y efectos de falla de los equipos permitirá elaborar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad			
Problema específico 2: ¿Será la estimación paramétrica una técnica para estimar el ciclo de vida de los equipos críticos?	Objetivo específico 2: Estimar el valor paramétrico para determinar el ciclo de vida de los equipos críticos	Hipótesis específicos 2: La estimación paramétrica permitirá determinar el ciclo de vida de los equipos críticos	Variable dependiente (Y): Punto óptimo de intervenciones	Y1: Costos de mantenimiento preventivo Y2: Costos de mantenimiento correctivo Y3: (TEF) Tiempos entre fallas Y4: Valor de beta Y5: Valor de alfa Y6: Cantidad de horas entre cada intervención.	1. Población y muestra: Comprende 10 equipos; muestra sistemática 2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos: Encuestas, entrevistas, observaciones en campo y revisión de documentos varios. 3. Técnicas e instrumentos de análisis y procesamiento de datos: Microsoft Excel, Minitab 2019
Problema específico 3: ¿Cómo la evaluación económica de cada modo de falla y datos hasta la falla permitirá determinar la frecuencia óptima de intervención?	Objetivo específico 3: Analizar el impacto económico de cada modo de falla y datos hasta la falla para determinar la frecuencia óptima de intervención.	Hipótesis específicos 3: El análisis económico de cada modo de falla y datos hasta la falla posibilitará determinar la frecuencia óptima de intervención.			
Problema específico 4: ¿Cuál es la disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos de la línea de maquinado?	Objetivo específico 4: Valorar la disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos de la línea de maquinado.	Hipótesis específicos 4: El porcentaje de disponibilidad mecánica y confiabilidad de los equipos de la línea de maquinado es deficiente.			

Nota. Elaboración propia

Anexo N° 2: Resultados gráficos de indicadores de confiabilidad de Línea maquinado 01



Nota. Elaboración propia

**Anexo N° 3: Datos de tiempo entre fallas de cada modo de falla de las máquinas.
Medidor de Humedad y Multilamina 01**

MEDIDOR DE HUMEDAD								MULTILAMINA 01							
N°	CÓDIGO FALLA	TEF	N°	CÓDIGO FALLA	TEF	CÓDIGO FALLA	TEF	CÓDIGO FALLA	TEF						
1	6.A.1	42	8.A.1	67	8.A.2	54	9.A.1	56	1	1.D.1	55	4.A.1	43	5.A.1	45
2	6.A.1	52	8.A.1	55	8.A.2	60	9.A.1	68	2	1.D.1	58	4.A.1	46	5.A.1	51
3	6.A.1	60	8.A.1	44	8.A.2	62	9.A.1	54	3	1.D.1	57	4.A.1	51	5.A.1	43
4	6.A.1	66	8.A.1	51	8.A.2	50	9.A.1	63	4	1.D.1	56	4.A.1	42	5.A.1	46
5	6.A.1	46	8.A.1	68	8.A.2	69	9.A.1	65	5	1.D.1	52	4.A.1	49	5.A.1	49
6	6.A.1	55	8.A.1	63	8.A.2	68	9.A.1	60	6	1.D.1	51	4.A.1	45	5.A.1	53
7	6.A.1	57	8.A.1	62	8.A.2	53	9.A.1	58	7	1.D.1	53	4.A.1	44	5.A.1	42
8	6.A.1	48	8.A.1	69	8.A.2	65	9.A.1	67	8	1.D.1	54	4.A.1	50	5.A.1	55
9	6.A.1	68	8.A.1	59	8.A.2	57	9.A.1	61	9	1.D.1	50	4.A.1	47	5.A.1	47
10	6.A.1	63	8.A.1	66	8.A.2	63	9.A.1	57	10	1.D.1	59	4.A.1	55	5.A.1	44
11	6.A.1	54	8.A.1	52	8.A.2	67	9.A.1	62	11	1.D.1	60	4.A.1	48	5.A.1	40
12	6.A.1	59	8.A.1	67	8.A.2	58	9.A.1	59	12	1.D.1	58	4.A.1	43	5.A.1	52
13	6.A.1	58	8.A.1	49	8.A.2	54	9.A.1	66	13	1.D.1	56	4.A.1	52	5.A.1	47
14	6.A.1	67	8.A.1	64	8.A.2	56	9.A.1	53	14	1.D.1	55	4.A.1	41	5.A.1	41
15	6.A.1	62	8.A.1	57	8.A.2	66	9.A.1	69	15	1.D.1	52	4.A.1	48	5.A.1	50
16	6.A.1	51	8.A.1	60	8.A.2	51	9.A.1	52	16	1.D.1	54	4.A.1	40	5.A.1	48
17	6.A.1	64	8.A.1	65	8.A.2	59	9.A.1	55	17	1.D.1	57	4.A.1	45	5.A.1	43
18	6.A.1	56	8.A.1	58	8.A.2	55	9.A.1	70	18	1.D.1	59	4.A.1	53	5.A.1	54
19	6.A.1	70	8.A.1	70	8.A.2	61	9.A.1	51	19	1.D.1	53	4.A.1	54	5.A.1	46
20	6.A.1	50	8.A.1	56	8.A.2	70	9.A.1	64	20	1.D.1	51	4.A.1	46	5.A.1	50
21			8.A.1	61	8.A.2	52	9.A.1	49	21	1.D.1	50	4.A.1	47	5.A.1	45
22			8.A.1	54	8.A.2	48	9.A.1	50	22	1.D.1	60	4.A.1	50	5.A.1	47
23			8.A.1	48	8.A.2	49	9.A.1	48	23	1.D.1	56	4.A.1	44	5.A.1	49
24					8.A.2	47	9.A.1	47	24	1.D.1	58	4.A.1	42	5.A.1	51
25							9.A.1	46	25					5.A.1	42
26							9.A.1	45							
27							9.A.1	44							
28							9.A.1	43							

Nota. Elaboración propia.

Anexo N° 4: Prueba de bondad de ajuste, en el Software de MiniTab19 para determinar la mejor distribución estadística según los tiempos de fallas, de los modos de fallas

MEDIDOR DE HUMEDAD		MULTILAMINA 01	
CÓDIGO MODO FALLA 6.A.1.	CÓDIGO MODO FALLA 8.A.1.	CÓDIGO MODO FALLA 1.D.1.	CÓDIGO MODO FALLA 4.A.1.
Bondad de ajuste	Bondad de ajuste	Bondad de ajuste	Bondad de ajuste
Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling
Distribución (ajust.)	Distribución (ajust.)	Distribución (ajust.)	Distribución (ajust.)
Weibull 0.779	Weibull 0.764	Weibull 0.815	Weibull 0.815
Lognormal 0.799	Lognormal 0.889	Lognormal 0.817	Lognormal 0.817
Exponencial 7.175	Exponencial 8.324	Exponencial 8.656	Exponencial 8.656
Normal 0.765	Normal 0.814	Normal 0.807	Normal 0.807
CÓDIGO MODO FALLA 8.A.2.	CÓDIGO MODO FALLA 9.A.1.	CÓDIGO MODO FALLA 5.A.1.	CÓDIGO MODO FALLA 10.A.1.
Bondad de ajuste	Bondad de ajuste	Bondad de ajuste	Bondad de ajuste
Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling
Distribución (ajust.)	Distribución (ajust.)	Distribución (ajust.)	Distribución (ajust.)
Weibull 0.815	Weibull 0.774	Weibull 0.803	Weibull 0.829
Lognormal 0.817	Lognormal 0.790	Lognormal 0.808	Lognormal 0.828
Exponencial 8.656	Exponencial 9.489	Exponencial 8.879	Exponencial 8.424
Normal 0.807	Normal 0.772	Normal 0.796	Normal 0.819

Nota. Elaboración propia.

Anexo N° 5: Costo de plan de mantenimiento RCM de Medidor de Humedad

CÓDIGO	Tarea propuesta	Cantidad (Horas/Intv.)	Costo M.O. (\$/Hora)	Costo Rep. e Ins. (\$/Intv.)	Costo Mant. RCM. (\$/Intv.)	Cantidad (Intv./Año)	Costo Plan Mant. RCM (\$/Año)
1.A.1	1. Limpiar y engrasar tornillo patrón de sistema de elevación.	3.0	\$ 2.10	\$ 10.00	\$ 16.30	6	\$ 97.80
1.A.2	1. Cambiar tornillo patrón de sistema de elevación.	0.5	\$ 2.10	\$ 50.00	\$ 51.05	2	\$ 102.10
2.A.1	1. Limpiar sensor de detección de nivel de humedad. 2. Revisar posible rotura de cuerpo de sensor.	0.5	\$ 2.10	\$ 15.00	\$ 16.05	24	\$ 385.20
3.A.1	1. Cambiar estrangulador de ingreso de aire hacia máquina.	1.0	\$ 2.10	\$ 60.00	\$ 62.10	12	\$ 745.20
3.A.2	1. Inspeccionar funcionamiento de compresora. 2. Revisar fugas de aire en mangueras de presión.	0.5	\$ 2.10	\$ -	\$ 1.05	24	\$ 25.20
4.A.1	1. Cambiar filtros de aire de ingreso a tablero eléctrico.	0.5	\$ 2.10	\$ 50.00	\$ 51.05	12	\$ 612.60
5.A.1	1. Revisar posible rotura de envase de aceite de unidad de mantenimiento. 2. Inspeccionar nivel de aceite de unidad de mantenimiento.	1.0	\$ 1.05	\$ -	\$ 1.05	24	\$ 25.20
6.A.1	1. Cambiar banda transportadora de transporte de desperdicios.	1.0	\$ 2.10	\$ 80.00	\$ 82.10	7	\$ 574.70
7.A.1	1. Limpieza y pruebas de funcionamiento de botoneras de encendido eléctrico de máquina.	1.0	\$ 2.10	\$ 10.00	\$ 12.10	12	\$ 145.20
7.B.1	1. Reajuste de tornillos de fijación eléctrica. 2. Comprobación de estado de cableado eléctrico.	1.0	\$ 2.10	\$ 10.00	\$ 12.10	12	\$ 145.20
7.C.1	1. Realizar análisis de tensiones, corrientes y aislamiento de contactos.	0.5	\$ 2.10	\$ 10.00	\$ 11.05	4	\$ 44.20
8.A.1	1. Realizar mantenimiento preventivo al motor trifásico de banda transportadora.	5.0	\$ 2.10	\$ 90.00	\$ 100.50	7	\$ 703.50
8.A.2	1. Cambiar piñones de arrastre de rodillos de arrastre superior e inferior.	2.0	\$ 2.10	\$ 100.00	\$ 104.20	7	\$ 729.40
9.A.1	1. Cambiar rodillos dentados de presión de sistema de arrastre superior e inferior.	4.0	\$ 2.10	\$ 120.00	\$ 128.40	7	\$ 898.80
<i>Costo total de plan de mantenimiento basado en el RCM</i>							\$ 5,234.30

Nota. Elaboración propia.

Anexo N° 6: Costo de plan de mantenimiento RCM de Multilámina 01

CÓDIGO	Tarea propuesta	Cantidad (Horas/Intv.)	Costo M.O. (\$/Hora)	Costo Rep. e Ins. (\$/Intv.)	Costo Mant. RCM. (\$/Intv.)	Cantidad (Intv./Año)	Costo Plan Mant. RCM (\$/Año)
1.A.1	1. Cambiar los soportes (jebes) de la base del motor.	4.0	\$ 2.10	\$ 50.00	\$ 58.40	4	\$ 233.60
1.B.1	1. Engrasar correctamente chumacera. 2. Inspeccionar visualmente el componente.	8.0	\$ 1.05	\$ 10.00	\$ 18.40	12	\$ 220.80
1.C.1	1. Colocar tope en la regla de canto para mejor sujeción.	2.0	\$ 2.10	\$ 50.00	\$ 54.20	4	\$ 216.80
1.D.1	1. Realizar mantenimiento a sistema de ejes de corte.	6.0	\$ 2.10	\$ 112.40	\$ 125.00	8	\$ 1,000.00
2.A.1	1. Limpiar los conductos de salida de aceite.	1.5	\$ 1.05	\$ 5.00	\$ 6.58	24	\$ 157.80
2.A.2	1. Cambiar filtro de aceite de sistema de lubricación automática.	0.8	\$ 2.10	\$ 25.00	\$ 26.58	4	\$ 106.30
3.A.1	1. Cambiar mangueras de succión. 2. Cambiar abrazaderas de sujeción.	1.0	\$ 2.10	\$ 30.00	\$ 32.10	4	\$ 128.40
3.A.2	1. Limpiar ductos de ingreso de succión de aserrín.	0.8	\$ 1.05	\$ 5.00	\$ 5.79	24	\$ 138.90
4.A.1	1. Cambiar segmento de mesa de salida.	8.0	\$ 2.10	\$ 80.00	\$ 96.80	8	\$ 774.40
4.A.2	1. Calibrar prensor de salida paralelamente referente a la mesa de trabajo.	0.8	\$ 2.10	\$ 30.00	\$ 31.58	12	\$ 378.90
4.A.3	1. Revisar filo de herramienta corte antes de iniciar la producción.	2.0	\$ 1.05	\$ -	\$ 2.10	24	\$ 50.40
5.A.1	1. Cambiar todas las ruedas de contador lineal.	3.0	\$ 2.10	\$ 70.00	\$ 76.30	8	\$ 610.40
6.A.1	1. Cambiar filtros de ingreso de tablero eléctrico.	0.5	\$ 2.10	\$ 15.00	\$ 16.05	4	\$ 64.20
7.A.1	1. Realizar pruebas de funcionamiento de pulsador de emergencia.	1.0	\$ 2.10	\$ 5.00	\$ 7.10	12	\$ 85.20
7.B.1	1. Revisar aislamiento eléctrico de las bobinas de motor, tensión y amperaje.	2.0	\$ 2.10	\$ 5.00	\$ 9.20	12	\$ 110.40
7.C.1	1. Realizar pruebas de funcionamiento de botoneras de encendido.	1.0	\$ 2.10	\$ 5.00	\$ 7.10	12	\$ 85.20
8.A.1	1. Revisar apriete de borneras a contactor, asimismo realizar limpieza de contactos.	0.5	\$ 2.10	\$ 10.00	\$ 11.05	12	\$ 132.60
8.B.1	1. Revisar aislamiento eléctrico de las bobinas de motor, tensión y amperaje.	0.5	\$ 2.10	\$ 30.00	\$ 31.05	4	\$ 124.20
8.C.1	1. Revisar cableado eléctrico. 2. Realizar inspección visual	0.5	\$ 2.10	\$ -	\$ 1.05	4	\$ 4.20
9.A.1	1. Cambiar resortes de presión. 2. Cambiar amortiguadores de golpe.	2.0	\$ 2.10	\$ 25.00	\$ 29.20	4	\$ 116.80
9.A.2	1. Revisar niveles de líquidos y aceite a compresora.	0.5	\$ 2.10	\$ -	\$ 1.05	12	\$ 12.60
9.B.1	1. Realizar mantenimiento preventivo a rodillos de ingreso.	2.0	\$ 1.05	\$ 25.00	\$ 27.10	12	\$ 325.20
10.A.1	1. Realizar mantenimiento preventivo a sistema de elevación.	2.0	\$ 2.10	\$ 80.00	\$ 84.20	8	\$ 673.60
10.A.2	1. Limpiar con ceras de metal hilos de tornillo patrón.	3.0	\$ 2.10	\$ 5.00	\$ 11.30	12	\$ 135.60
11.A.1	1. Engrasar correctamente rodamiento de rodillos. 2. Inspeccionar visualmente el componente.	2.0	\$ 1.05	\$ 5.00	\$ 7.10	12	\$ 85.20
<i>Costo total de plan de mantenimiento basado en el RCM</i>							\$ 5,971.70

Nota. Elaboración propia.

Anexo N° 7: Datos de tiempos entre fallas (TEF) de las máquinas que conforman la Línea de Maquinado 01

MEDIDOR DE HUMEDAD			MULTILAMINA 01		CEPILLADORA 01		OPTIMIZADORA		MOLDURERA 01		RETESTADORA	
N°	TEF (HORAS)	CÓDIGO DE FALLA	TEF (HORAS)	CÓDIGO DE FALLA	TEF (HORAS)	CÓDIGO DE FALLA	TEF (HORAS)	CÓDIGO DE FALLA	TEF (HORAS)	CÓDIGO DE FALLA	TEF (HORAS)	CÓDIGO DE FALLA
1	6	MEDH-01	65	MULT-01	5	CEP-01	35	OPT-01	50	MOLD-01	28	RET-01
2	10	MEDH-02	75	MULT-02	38	CEP-02	70	OPT-02	35	MOLD-02	38	RET-02
3	21	MEDH-03	95	MULT-03	50	CEP-03	80	OPT-03	45	MOLD-03	40	RET-03
4	34	MEDH-04	109	MULT-04	53	CEP-04	95	OPT-04	49	MOLD-04	51	RET-04
5	44	MEDH-05	130	MULT-05	58	CEP-05	98	OPT-05	52	MOLD-05	57	RET-05
6	47	MEDH-06	137	MULT-06	66	CEP-06	109	OPT-06	53	MOLD-06	58	RET-06
7	82	MEDH-07	145	MULT-07	79	CEP-07	113	OPT-07	65	MOLD-07	65	RET-07
8	87	MEDH-08	153	MULT-08	80	CEP-08	116	OPT-08	67	MOLD-08	65	RET-08
9	110	MEDH-09	155	MULT-09	86	CEP-09	137	OPT-09	75	MOLD-09	69	RET-09
10	143	MEDH-10	175	MULT-10	87	CEP-10	150	OPT-10	78	MOLD-10	76	RET-10
11	183	MEDH-11	180	MULT-11	89	CEP-11	151	OPT-11	82	MOLD-11	80	RET-11
12	187	MEDH-12	189	MULT-12	91	CEP-12	152	OPT-12	83	MOLD-12	89	RET-12
13	270	MEDH-13	195	MULT-13	92	CEP-13	154	OPT-13	92	MOLD-13	91	RET-13
14	280	MEDH-14	205	MULT-14	97	CEP-14	159	OPT-14	97	MOLD-14	100	RET-14
15	282	MEDH-15			100	CEP-15	165	OPT-15	106	MOLD-15	103	RET-15
16					108	CEP-16	170	OPT-16	109	MOLD-16	109	RET-16
17					110	CEP-17	173	OPT-17	117	MOLD-17	109	RET-17
18					111	CEP-18	214	OPT-18	121	MOLD-18	117	RET-18
19					124	CEP-19	225	OPT-19	123	MOLD-19	119	RET-19
20					155	CEP-20	235	OPT-20	126	MOLD-20	125	RET-20
21					158	CEP-21	236	OPT-21	127	MOLD-21	139	RET-21
22					165	CEP-22			139	MOLD-22	144	RET-22
23					198	CEP-23			140	MOLD-23	147	RET-23
24					213	CEP-24			147	MOLD-24	148	RET-24
25					215	CEP-25			162	MOLD-25	150	RET-25
26					217	CEP-26			168	MOLD-26	156	RET-26
27					218	CEP-27			169	MOLD-27	183	RET-27
28					240	CEP-28			172	MOLD-28	183	RET-28
29					244	CEP-29			174	MOLD-29	190	RET-29
30									177	MOLD-30	193	RET-30
31									183	MOLD-31	197	RET-31
32									186	MOLD-32	199	RET-32
33									188	MOLD-33		
34									189	MOLD-34		
35									194	MOLD-35		
36									202	MOLD-36		
37									216	MOLD-37		
38									218	MOLD-38		
39									226	MOLD-39		

Nota.

Elaboración propia.

Anexo N° 8: Tiempo óptimo de intervención de cada modo de fallas de las máquinas Medidor de Humedad y Multilamina 01

MÁQUINA	CÓDIGO MODO FALLA	TIEMPO ÓPTIMO DE INTERVENCIÓN (DÍAS)	MÁQUINA	CÓDIGO MODO FALLA	TIEMPO ÓPTIMO DE INTERVENCIÓN (DÍAS)
Medidor de Humedad	1.A.1	60	Multilamina 01	1.A.1	90
Medidor de Humedad	1.A.2	180	Multilamina 01	1.B.1	30
Medidor de Humedad	2.A.1	15	Multilamina 01	1.C.1	90
Medidor de Humedad	3.A.1	30	Multilamina 01	1.D.1	40
Medidor de Humedad	3.A.2	15	Multilamina 01	2.A.1	15
Medidor de Humedad	4.A.1	30	Multilamina 01	2.A.2	90
Medidor de Humedad	5.A.1	15	Multilamina 01	3.A.1	90
Medidor de Humedad	6.A.1	50	Multilamina 01	3.A.2	15
Medidor de Humedad	7.A.1	30	Multilamina 01	4.A.1	40
Medidor de Humedad	7.B.1	30	Multilamina 01	4.A.2	30
Medidor de Humedad	7.C.1	90	Multilamina 01	4.A.3	15
Medidor de Humedad	8.A.1	50	Multilamina 01	5.A.1	40
Medidor de Humedad	8.A.2	50	Multilamina 01	6.A.1	90
Medidor de Humedad	9.A.1	50	Multilamina 01	7.A.1	30
			Multilamina 01	7.B.1	30
			Multilamina 01	7.C.1	30
			Multilamina 01	8.A.1	30
			Multilamina 01	8.B.1	90
			Multilamina 01	8.C.1	90
			Multilamina 01	9.A.1	90
			Multilamina 01	9.A.2	30
			Multilamina 01	9.B.1	30
			Multilamina 01	10.A.1	40
			Multilamina 01	10.A.2	30
			Multilamina 01	11.A.1	30

Nota. Elaboración propia.