

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para incrementar la disponibilidad de la Línea de Extrusión de Polipropileno en una Industria de Plásticos

Para obtener el título profesional en Ingeniería Mecánica Eléctrica

Elaborado por

Edward Gustavo Zavala Romero

 [0009-0008-0015-396X](https://orcid.org/0009-0008-0015-396X)

Asesor

MSc. Edgard Guadalupe Goñas

 [0000-000-2144-6058](https://orcid.org/0000-000-2144-6058)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Zavala Romero [1]
Referencia/Reference	[1] E. Zavala Romero, " <i>Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para incrementar la disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno en una industria de plásticos</i> " [Trabajo de Suficiencia Profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Zavala, 2024)
Referencia/Reference	Zavala, E. (2024). <i>Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para incrementar la disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno en una industria de plásticos</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis padres, por el amor, sacrificio, apoyo y confianza que me han brindado a lo largo de mi vida, cuyos frutos se reflejaron en hacerme un buen hijo y gracias a ellos soy un profesional.

A mis hermanas, por los ánimos y consejos para seguir superándome cada día.

A mi hijo Emiliano y mi compañera Almendra, por ser mi energía infinita de motivación.

Agradecimientos

A Dios y a la Virgen de las Mercedes patrona de mi querido Pueblo de Paramonga, por haberme permitido lograr este sueño.

A Victor Lopez y Omar Zelada, compañeros de trabajo en la empresa "Industrias Fibraforte S.A", por facilitarme información valiosa sobre la operatividad de la planta.

A mi asesor, el Ing. Edgard Guadalupe por su apoyo en el desarrollo de este Trabajo de Suficiencia Profesional.

Resumen

La industria de Producción de materiales plásticos en el Perú tiene como desafío lograr la máxima disponibilidad de los equipos de sus líneas productivas, el cual permite obtener mayores ganancias. Para lograr este objetivo, es importante que las empresas mejoren sus estrategias de mantenimiento con nuevas metodologías en la Gestión de Mantenimiento.

El presente trabajo investigación evalúa y analiza la relación causa-efecto de las variables: “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” y “Disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno”, el cual da como resultado, que una deficiente Gestión del Mantenimiento de los equipos críticos de la línea productiva reduce la disponibilidad, como consecuencia de la falta de una gerencia de mantenimiento y poco conocimiento del personal de mantenimiento de la planta sobre las técnicas cualitativas, cuantitativas o estadísticas del mantenimiento, que comprende el análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de equipos y sistemas. No obstante, esta deficiente Gestión de Mantenimiento involucra una falta de actividades de monitoreo de condición de equipos críticos que les permita identificar fallas prematuras y programar tareas proactivas.

De igual manera, las empresas de manufactura que llevan a cabo sus actividades con una gestión de mantenimiento deficiente no tienen identificado los equipos críticos de las diferentes líneas de producción de la planta y tampoco en qué etapa de su ciclo de vida se encuentran, además los mantenedores desconocen los métodos de análisis de modos y efectos de falla, no se utilizan datos históricos o estadísticos sobre el tiempo entre fallas para evaluar su confiabilidad y determinar el mantenimiento preventivo óptimo para cada equipo crítico, así como también no se evalúan los tiempos promedios de reparación que les permitan reducir costos.

Ante esta situación, con el fin de optimizar la gestión del mantenimiento basada en la confiabilidad, primero se realizó un análisis de criticidad de los equipos de la línea de extrusión de polipropileno y se identificaron aquellos con mayor impacto negativo en el proceso productivo en caso de fallas inesperadas; luego, se utilizó datos históricos o

estadísticos del tiempo entre fallos de estos equipos para determinar la mejor distribución de probabilidad de fallas y el proceso del mantenimiento centrado en confiabilidad para describir los modos y efectos de fallos, esto permitió establecer la frecuencia de mantenimiento óptimo a través del diagrama de decisiones y el análisis de confiabilidad. Por lo tanto, luego de proponer un plan de mantenimiento preventivo para cada equipo crítico, se logró incrementar la disponibilidad de maquina y mejorar la gestión de mantenimiento de la línea de extrusión.

Palabras Claves: Extrusión, Polipropileno, Gestión de Mantenimiento, Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad, Tasa de fallos, Tiempo Medio entre Fallas, Tiempo Medio de Reparación.

Abstract

The plastic materials production industry in Peru faces the challenge of achieving maximum availability of its production line equipment, which allows for greater profits. In order to achieve this objective, it is important for companies to improve their strategies with new methodologies in Maintenance Management.

This research study evaluates and analyzes the cause-effect relationship of the variables "Reliability-centered Maintenance" and "Availability of a polypropylene extrusion line", which results in the finding that poor maintenance management of critical equipment in the production line reduces availability due to a lack of maintenance management and the little knowledge of the maintenance staff regarding qualitative, quantitative, or statistical maintenance techniques, which include reliability, maintainability, and availability analysis of equipment and systems. However, this poor maintenance management also involves a lack of condition monitoring activities for critical equipment, which would allow for the identification of premature failures and the scheduling of proactive tasks.

Similarly, manufacturing companies that carry out their activities with poor maintenance management fail to identify the critical equipment of the different production lines in the plant and do not know at what stage of their lifecycle they are in. Additionally, maintainers are unaware of failure mode and effects analysis methods, historical or statistical data on time between failures are not used to assess reliability and determine optimal preventive maintenance for each critical equipment, and average repair times are not evaluated to reduce costs.

In light of this situation, in order to optimize maintenance management based on reliability, a criticality analysis of the polypropylene extrusion line equipment was first carried out, identifying those with the greatest negative impact on the production process in case of unexpected failures. Then, historical or statistical data on the time between failures of these equipment were used to determine the best probability distribution of failures and the reliability-centered maintenance process that describes failure modes and effects, allowing

for the establishment of the optimal maintenance frequency through decision diagrams and reliability analysis.

Therefore, after proposing a preventive maintenance plan for each critical equipment, machine availability was increased and maintenance management of the extrusion line was improved.

Keywords: Extrusion, Polypropylene, Maintenance Management, Reliability, Maintainability, Availability, Failure Rate, Mean Time Between Failures, Mean Time to Repair.

Prologo

El presente trabajo de suficiencia profesional tiene como finalidad incrementar la disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno mediante la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, el cual permite optimizar la gestión de mantenimiento.

Para lograr el objetivo de optimizar la Gestión del Mantenimiento de una línea de extrusión de polipropileno, utilizando como herramienta el análisis de confiabilidad, se han combinado las técnicas cualitativas y cuantitativas (estadísticas) y se ha utilizado el proceso de implementación del RCM.

El **primer capítulo** titulado “Introducción”, se precisa las generalidades, así como también la descripción y formulación del problema, el objetivo general que se quiere alcanzar, finalmente se precisa los antecedentes investigativos nacionales e internacionales del trabajo.

El **segundo capítulo** titulado “Marco Teórico y Conceptual”, presenta aspectos teóricos importantes en los cuales que se fundamenta el desarrollo de la investigación como: la evolución del mantenimiento y las nuevas tendencias de mantenimiento; tipos de mantenimiento y el proceso de implementación del RCM (*Reability-Centred Maintenance*), es cual es importante en el desarrollo del presente trabajo de investigación. Asimismo, considera el modelo probabilístico de fallos de Weibull que se aplica para el cálculo de la confiabilidad y la frecuencia optima de mantenimiento preventivo.

El **tercer capítulo** titulado “Hipótesis y Operacionalización de Variables”, se plantea la hipótesis general para ser verificada o contrastada, además se precisa la identificación de la variable independiente y dependiente, así como los indicadores.

El **cuarto capítulo** titulado “Metodología de la Investigación”, se indica el tipo y diseño de metodología a emplear en el desarrollo del presente trabajo de investigación. Además, se describe la unidad de análisis, es decir, la empresa de manufactura de productos no primarios donde se ubica la línea de extrusión de polipropileno y una descripción general

de las etapas que su proceso productivo, el cual es sujeto de estudio. Finalmente, a manera de resumen, se plasma el análisis metodológico realizado en la matriz de consistencia.

El **quinto capítulo** titulado “Desarrollo del trabajo de Investigación”, en la primera parte se muestra la recolección de datos históricos de falla y tiempos de reparación entre los meses de enero y setiembre del año 2023, se determinan los sub-sistemas o equipos críticos de la línea de extrusión de polipropileno mediante el análisis de criticidad; luego, se efectúa la evaluación de Modos y Efectos de falla (AMEF), también se contempla la evaluación de la confiabilidad y cálculo de la frecuencia optima de mantenimiento mediante la distribución probabilística de Weibull de los equipos críticos de la línea de extrusión. Para finalizar el proceso de RCM, se presenta la Hoja de Decisión de cada equipo crítico y el cálculo del costo de no disponibilidad.

El **sexto capítulo** titulado “Análisis de Discusión de Resultados”, contiene el análisis de los resultados y contrastación de hipótesis.

El trabajo de suficiencia profesional finaliza, presentando las conclusiones y recomendaciones obtenidas del trabajo de investigación, así como también, las referencias bibliográficas y los anexos correspondientes.

Índice

Resumen	v
Abstract	vii
Prologo	ix
Índice	xi
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación.	2
1.3 Objetivos del Estudio.....	7
1.3.1 Objetivo General.....	7
1.4 Antecedentes Investigativos	7
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	12
2.1 Marco Teórico	12
2.2 Marco Conceptual	37
Capítulo III. Hipótesis y operacionalización de variable.....	39
3.1 Hipótesis General.....	39
3.2 Operacionalización de Variables	39
Capítulo IV. Metodología de la investigación	40
4.1 Tipo y diseño de la investigación	40
4.1.1 Tipo de investigación	40
4.1.2 Diseño de Investigación.....	41
4.2 Unidad de Análisis.....	41
4.3 Matriz de consistencia	46
Capítulo V. Desarrollo del trabajo de investigación	47
5.1 Recolección de Datos.....	47
5.2 Procesamiento de la Información	51
5.3 Análisis de la Información.....	82
Capítulo VI. Análisis de Discusión de Resultados	86
6.1 Contrastación de hipótesis	86
6.2 Discusión de Resultados	87
Conclusiones	88
Recomendaciones	90
Referencias Bibliográficas	91
Anexos	93

Índice de Figuras

Figura 1.1: Incremento de los costos de insumos plásticos.....	3
Figura 2.2: Disponibilidad de una línea productiva de extrusión de polipropileno	6
Figura 2.1: Evolución del Mantenimiento.....	14
Figura 2.2: Tipos de mantenimiento según la Norma EN-13306:2018	16
Figura 2.3: Curva P-F.....	18
Figura 2.4: Proceso de Implementación del RCM	20
Figura 2.5: Categorías de Modos de Falla	23
Figura 2.6: Diagrama de flujo del RCM	25
Figura 2.7: Diagrama de Decisión del RCM © 1997 Aladon Ltd.....	28
Figura 2.8: Matriz de Criticidad propuesta por el modelo MCR	32
Figura 2.9: Estados de Funcionalidad de un activo	33
Figura 2.10: Curva de la bañera o curva de confiabilidad.....	36
Figura 4.1: Vista Satelital de la empresa Industrias Fibraforte.....	41
Figura 4.2: Volumen de producción (Kg)	42
Figura 5.1: Diagrama Pareto de etapas de la línea	49
Figura 5.2: Clasificación de niveles taxonómicos	51
Figura 5.3: Recta de Regresión de Cizalla	63
Figura 5.4: Curva de Confiabilidad de Cizalla	63
Figura 5.5: Recta de Regresión de Unidad Oleohidráulica	64
Figura 5.6: Curva de Confiabilidad de Unidad Oleohidráulica	65
Figura 5.7: Recta de Regresión de Extrusor	66
Figura 5.8: Curva de Confiabilidad de Extrusor	67
Figura 5.9: Recta de Regresión de Bomba Melt.....	68
Figura 5.10: Curva de Confiabilidad de Bomba Melt	68
Figura 5.11: Recta de Regresión de Cabezal Plano.....	69
Figura 5.12: Curva de Confiabilidad de Cabezal Plano	70
Figura 5.13: Recta de Regresión de Cabezal Plano.....	71
Figura 5.14: Curva de Confiabilidad de Dosificador Ktron PP	72

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Historial de Scrap de una línea productiva (Kg).....	4
Tabla 2.1: Hoja de Información para Análisis de Modos y efecto de fallas (AMEF)	26
Tabla 2.2: Hoja de Decisión Del RCM II	29
Tabla 2.3: Criterios de Jerarquización para Análisis De Criticidad (MCR)	30
Tabla 2.4: Valores ponderados de los criterios de jerarquización.....	31
Tabla 4.1: Matriz de consistencia	46
Tabla 5.1: Evaluación de criticidad proceso de extrusión	48
Tabla 5.2: Tiempos de parada de la línea Leader N°2	49
Tabla 5.3: Numero de paradas no planificadas por etapa	50
Tabla 5.4: Disponibilidad de la línea antes del RCM	50
Tabla 5.5: Análisis de Criticidad de la etapa “Extrusión	52
Tabla 5.6: Análisis de Criticidad de la etapa “Corte y Apilado	53
Tabla 5.7: Análisis de Criticidad de la etapa “Alimentación y Dosificación.....	53
Tabla 5.8: Hoja de Información de Cizalla.....	55
Tabla 5.9: Hoja de Información de Unidad Oleohidráulica.....	56
Tabla 5.10: Hoja de Información de Husillo Doble.....	57
Tabla 5.11: Hoja de Información de Segmento Barril	58
Tabla 5.12: Hoja de Información de Bomba Melt.....	59
Tabla 5.13: Hoja de Información de Cabezal Plano	60
Tabla 5.14: Hoja de Información de Dosificador Ktron PP.....	61
Tabla 5.15: Distribución de Weibull de Cizalla	62
Tabla 5.16: Distribución de Weibull de Unidad Oleohidráulica	64
Tabla 5.17: Distribución de Weibull de Extrusor	66
Tabla 5.18: Distribución de Weibull de Bomba Melt	67
Tabla 5.19: Distribución de Weibull de Cabezal Plano	69
Tabla 5.20: Distribución de Weibull de Dosificador Ktron PP	71
Tabla 5.21: Hoja de Decisión de Cizalla.....	73
Tabla 5.22: Hoja de Decisión de Unidad Oleohidráulica.....	75
Tabla 5.23: Hoja de Decisión de Husillo Doble.....	76
Tabla 5.24: Hoja de Decisión de Segmento Barril	77
Tabla 5.25: Hoja de Decisión de Bomba Melt	78
Tabla 5.26: Hoja de Decisión de Cabezal Plano	80
Tabla 5.27: Hoja de Decisión de Dosificador Ktron PP.....	81
Tabla 5.28: Duración y cantidad de fallas evitados con el RCM	82
Tabla 5.29: Disponibilidad proyectada de la línea de extrusión.....	82

Tabla 5.30: Costo de no disponibilidad de la línea de extrusión	83
Tabla 5.31: Valores de MTTR de sub-sistemas críticos	84
Tabla 5.32: MTBF de sub-sistemas críticos	84
Tabla 5.33: Disponibilidad de sub-sistemas críticos	84
Tabla 5.34: Ciclo Optimo de Mantenimiento de sub-sistemas críticos.....	85

Capítulo I. Introducción

1.1 Generalidades

La finalidad del presente trabajo de investigación es proponer un mantenimiento centrado en la confiabilidad de líneas de extrusión de polipropileno para incrementar su disponibilidad, con lo cual es posible identificar fallos potenciales y sus causas, clasificar la criticidad de los fallos y proponer medidas para evitarlas, lo que permite reducir los costos de mantenimiento, mejorar las tareas de reparación, inspección, reemplazo de componente para conservar la funcionalidad, reducir el número de paradas no planificadas y evitar el mantenimiento que no es necesario.

Los procesos en línea de productos en las empresas manufactureras manifiestan baja disponibilidad porque la gestión del mantenimiento se basa en acciones correctivas, que se enfocan únicamente en solucionar fallas inesperadas que afectan directamente la producción y calidad del producto terminado. En tal sentido, el presente trabajo de investigación aplica la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (*RCM* por sus siglas en inglés), el cual influye en el incremento de la disponibilidad y consiste en responder siete (07) preguntas sobre el activo físico, luego se realiza un Análisis de Modos y Efecto de Fallas (AMEF) en las hojas de información, se desarrolla las hojas de decisiones y finalmente se toma una decisión sobre el tipo de estrategia de mantenimiento.

Luego de la aplicación del RCM, los resultados son cuantificados y orientados a establecer un plan de mantenimiento eficaz técnicamente viable y económicamente factible, así como identificar los problemas de mayor impacto en la operación y estructurar toda la información del personal, que permita desarrollar planes óptimos de mantenimiento, a través de la integración de un equipo de trabajo multidisciplinario, conformado por los mantenedores que conocen el equipo. Otros beneficios del RCM es reducir el número de incidentes, pérdidas de producción, aumenta la eficiencia, la rentabilidad y productividad de los procesos; asimismo, el RCM restaura la confiabilidad de fábrica de los activos físicos.

La metodología de RCM es empleada para proponer tareas de mantenimiento proactivo necesarios en las líneas productivas de las empresas manufactureras y permite reforzar los conocimientos de los mantenedores sobre técnicas cuantitativas y estadísticas del mantenimiento que les permitan determinar el ciclo óptimo de la frecuencia de mantenimiento.

1.2 Descripción del Problema de Investigación.

La industria de fabricación de productos plásticos en el Perú ha crecido significativamente en las últimas décadas porque el plástico es un producto versátil que adopta muchas formas y texturas; cuyas cualidades permiten que su utilización sea imprescindible en cualquier actividad económica, principalmente del sector construcción que representa el 22% de la demanda a nivel nacional según la SNI (Sociedad Nacional de Industrias). No obstante, una limitada capacidad por demoras en el proceso productivo debido a una baja disponibilidad de los activos ocasiona que las industrias de plástico no alcancen su máximo rendimiento y posteriormente el incumplimiento de los plazos de entrega, por lo tanto, provoca insatisfacción en el cliente, el cual se traduce en pérdidas de dinero a futuro.

La realidad problemática de este estudio es que las industrias de plástico que carecen de un mantenimiento adecuado no tienen identificado sus equipos críticos y uno de sus principales procesos es la producción de coberturas (techos) de polipropileno para la industria de la construcción en el Perú mediante extrusión de materiales termoplásticos. Por lo tanto, las fallas críticas en los equipos que causan una parada no planificada de toda la línea productiva resultan en una reducción de la producción y del indicador de disponibilidad.

La fabricación de productos innovadores para el sector construcción como son los techos de polipropileno, utilizados en proyectos domiciliarios, industriales e institucionales, el cual brinda una alternativa en techos ligeros, representa un negocio rentable. Sin embargo, la problemática actual de las industrias de plástico es la rotación de inventarios,

porque las resinas “commodity” (polipropileno, polietileno, policloruro de vinilo) a menudo aumentan de precio, como se observa en la Figura 1.1.

Figura 1.1:
Incremento de los costos de insumos plásticos.

LÍNEAS DE PRODUCTO	2021		2022		VARIACIÓN	
	FOB US\$	VOLUMEN	FOB US\$	VOLUMEN	FOB US\$	VOLUMEN
Polipropileno	74	54.685	93.44	53.018	27%	-3%
Policloruro de vinilo	65	46.326	82.42	40.834	26%	-12%
Polietileno	102	81.539	136.28	77.143	34%	-5%
Polímeros acrílicos en formas primarias	12	4.512	16.87	4.656	36%	3%
Copolímeros de etileno y alfaolefina de densidad baja	10	9.025	15.38	8.755	55%	-3%

Fuente: Tomado de la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (2022). “Importación de los principales insumos de la industria plástica”. (Valores expresados en Millones y Volumen en toneladas).

Con respecto a la figura anterior, los precios de los insumos que abastecen a la industria plástica peruana experimentan una constante alza en los mercados internacionales (polipropileno en 27%) debido al aumento del valor de los precios de petróleo y del gas, por ser derivados de estos productos.

Asimismo, el Instituto de Estudios Económicos y Sociales (IEES) de la Sociedad Nacional de Industrias (SNI) indicó que la industria peruana acumuló en la primera mitad del año una caída de 6,1%, mientras que la manufactura no primaria cerró los primeros seis meses del 2023 con un descenso de 7,6% lo cual es un problema, pues se trata del sector que genera mayor valor agregado y transforma las materias primas. Además, el aumento de los costos de los insumos motiva a las empresas de manufactura a mejorar sus procesos y ejecutar acciones como el desarrollo de factores productivos de clase mundial y el impulso a una gestión eficiente para optimizar costos.

Por tal motivo, la visión general en el sector de la industria plástica declarado por la Sociedad Nacional de Industrias (SNI), requiere promover una serie de eventos enfocados en la innovación, la sostenibilidad y la economía circular. Sin embargo, las industrias de plástico en el Perú tiene limitaciones en la realización de estas acciones si no cuenta con una gerencia de mantenimiento que administre desde el punto de vista técnico, organizativo y económico el área de mantenimiento, además no contar con un jefe de

mantenimiento responsable de elaborar el presupuesto del área y crear estrategias para abordar los puntos vulnerables de los equipos y la falta de personal con conocimientos sobre técnicas cuantitativas y estadísticas del mantenimiento que les permitan determinar el ciclo óptimo de la frecuencia de mantenimiento de los equipos críticos, son causas de una ineficiente gestión del mantenimiento, el cual afecta directamente al proceso productivo y el buen funcionamiento de los activos que conforman las líneas de producción.

Al respecto, cabe señalar, que las líneas productivas de las empresas de manufactura manifiestan una baja disponibilidad principalmente porque no se evalúan las fallas funcionales, es decir, no se realizan el Análisis de Modos y Efecto de fallas (AMEF). De igual forma, se desconoce en qué etapa del ciclo de vida se encuentran los equipos, por esta razón la operación del proceso productivo tiene la tendencia a operar en un estado de falla que no paraliza la línea, pero de este modo aumentan los volúmenes de merma (scrap). La tabla 1.1 muestra los valores de scrap típicos, con un valor máximo 4%, en una empresa que no realiza el AMEF de los equipos críticos en sus procesos.

Tabla 1.1:
Historial de Scrap de una línea productiva (Kg).

MES - AÑO	Prod. 1era (Kg)	Scrap (Kg)	%Scrap (<=4%)
Jun-22	103,313	3,252	3.1%
Jul-22	172,352	12,121	6.6%
Set-22	135,370	15,549	10.3%
Nov-22	219,023	11,792	5.1%
Dic-22	80,095	13,041	14.0%
Ene-23	128,069	18,440	12.6%
Feb-23	160,614	5,887	3.5%
Mar-23	209,465	29,454	12.3%
Abr-23	367,075	23,735	6.1%
May-23	219,142	26,927	10.9%
Jun-23	177,443	25,408	12.5%
Gastos totales	1,971,961	185,606	8.8%

Fuente: Tomado de la plataforma Power BI de IFFSA (2022), "OEE_YTD_2022-2023".

Para fabricar sus productos, las empresas de manufactura del sector plástico cuentan con líneas de extrusión donde se desarrolla el proceso de conversión de resinas plásticas; sin embargo, no contar con programas de mantenimiento preventivo que reduzca el tiempo de inactividad por horas, es un problema que aumenta el desgaste de estos equipos.

Del mismo modo, las empresas de manufactura que realizan su proceso productivo en base a una ineficiente gestión de mantenimiento no disponen de estadísticas de historial de fallos, tampoco se conoce cuál es el tiempo medio entre fallas (MTBF = Middle Time Between Failure), ni cuáles son los tiempos medios de reparación de fallas (MTTR = Middle Time To Repair) de los equipos, esto incrementa el tiempo de inactividad de los equipos de la línea productiva, es decir, el tiempo durante el cual la instalación se detiene y no produce ni agrega valor a la empresa y sus clientes.

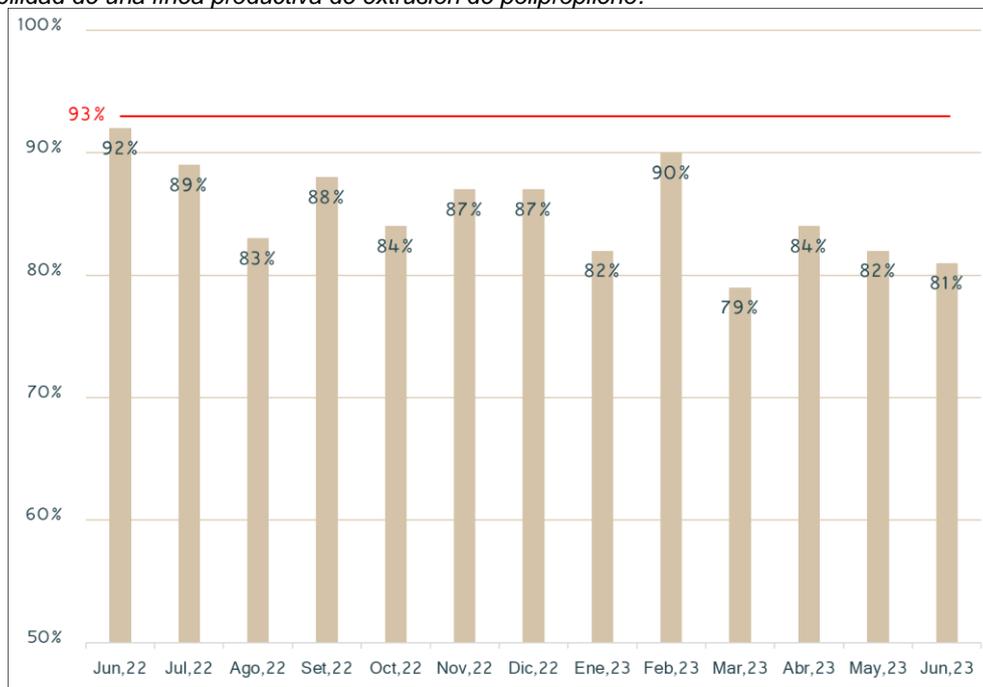
Por otro lado, la eficiencia general de los equipos OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) en industrias de plástico, es uno de los indicadores que mide cualitativamente la eficiencia y eficacia en el proceso productivo en términos de calidad, que permite determinar el nivel de capacidad productiva de las empresas. Sin embargo, los procesos de transformación son interrumpidos por problemas internos como averías y tiempos de inactividad de las máquinas, así como por la elaboración de productos defectuosos que afectan a la calidad; como resultado, el tiempo de inactividad no planificado de los equipos genera costos que reducen la eficiencia y eficacia de la línea de producción. La eficiencia general de los equipos se calcula de la siguiente manera:

$$OEE = \text{Disponibilidad} * \text{Rendimiento} * \text{Calidad}$$

En la práctica, las metas de clase mundial generalmente aceptadas para cada indicador son bastante diferentes entre sí, se considera que un valor estándar de OEE para empresas de clase mundial es del 85%. Asimismo, la disponibilidad es la cantidad de tiempo que se emplea a la producción comparada con el tiempo total que se dispone y las

empresas tienen como objetivo mantener un valor de 93% como mínimo¹, se considera el indicador más crítico y es afectado por las paradas no planificadas y averías. Como resultado, el tiempo de paros no planeados es la principal fuente de tiempo de producción perdido para las empresas que pretenden ser de clase mundial, y la baja disponibilidad de las líneas de producción afecta negativamente la eficiencia general del equipo (OEE). En la figura 2.2 muestra valores de disponibilidad de una línea productiva de una empresa de manufactura con una gestión de mantenimiento deficiente que tiene implementado el OEE en sus procesos.

Figura 2.2:
Disponibilidad de una línea productiva de extrusión de polipropileno.



Fuente: Tomado de la plataforma Power BI de la empresa IFFSA (2022), "OEE_YTD_2022-2023".

De la figura anterior, el indicador de disponibilidad de máquina se encuentra por debajo de los objetivos definidos e impacta negativamente en el resultado de la producción y de su indicador global de eficiencia (OEE), debido a las paradas no planificadas y provoca de esta manera pérdidas de horas de producción y reducción en la cantidad de productos

¹ OEE > 85% como estándar clase mundial para industria 4.0. La empresa transnacional mexicana Elementia Materiales con presencia en varios países de latinoamérica tiene cuatro (04) líneas de negocio: metales, construcción, cementos y plásticos (Polipropileno), tiene establecido como valor objetivo dentro de su plataforma Power Bi los siguientes indicadores: DISP%>93%, REND%>95%, CALID%>96%.

terminados, por lo tanto las oportunidades de mejora del presente trabajo de investigación está en la disponibilidad de máquina de líneas productivas de las empresas de manufactura.

En este contexto, las fallas que ocasiona paradas de máquinas en los equipos de las líneas productivas reducen su disponibilidad, los volúmenes de producción, aumenta los productos defectuosos (scrap) y afecta la eficiencia general de los equipos (OEE); por consiguiente, es relevante para la presente investigación optimizar la gestión de mantenimiento.

En base a la situación descrita se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Como impactan negativamente las paradas de maquina no planificadas en la disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno en Industrias de Plástico?

1.3 Objetivos del Estudio

1.3.1 Objetivo General

Proponer un sistema de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para incrementar la disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno en una Industria de Plásticos.

1.4 Antecedentes Investigativos

Villacrés Tapia, L. (2021). “Elaboración de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para las líneas de extrusión y torsión de fibras retorcidas, film y malla en la Empresa HIPLAS”.

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en Ecuador, se encuentra este trabajo de investigación que desarrolla un plan de mantenimiento preventivo basado en RCM, cuyo objetivo es prevenir averías en las máquinas y sus consecuencias, así lograr incrementar la disponibilidad y confiabilidad de la planta.

Las empresas de manufactura que implementa su mantenimiento en base a acciones correctivas para mitigar fallas reducen la confiabilidad de las maquinas, porque no cuentan con programas de mantenimiento preventivo que aseguren la continuidad de

las horas diarias de la línea de producción. Este problema impacta negativamente en los indicadores, ocasiona paradas de maquina no previstas, los cuales incrementa significativamente los costos operativos, gastos de mantenimiento y perdidas de oportunidad para producir.

El autor realizó un Análisis de Modo y Efecto de Fallas a los equipos de mayor criticidad de la línea de producción, lo que le permitió establecer una serie de actividades programadas, cuyo ahorro proyectado luego de la aplicación asciende a 6 mil dólares anuales, demostrando de esta forma la ventaja que tiene la aplicación del RCM para la creación de un programa de mantenimiento preventivo, en comparación a una gestión basado en mantenimiento correctivo.

Ronquillo Banda, P. (2021). “Gestión de Mantenimiento Basado en Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) de filtros prensa automáticos en minas de cobre para mejorar su disponibilidad”.

La finalidad del estudio es utilizar el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en la Gestión de Mantenimiento de filtros prensa automáticos utilizados en plantas concentradoras de Cobre para incrementar su disponibilidad, el autor logró realizar un análisis de criticidad en los equipos de planta, que permitió identificar los equipos críticos, posteriormente utilizó la recolección y registro de los principales modos de falla ocurridos como fuente de desarrollo para este trabajo.

La minería en el Perú es la principal actividad económica del país como aporte al producto bruto interno (PBI) y el aumento del precio del cobre es un problema para las compañías que buscan un crecimiento sostenible con la menor inversión posible, ante ello surge la necesidad importante de tener disponibles los activos más críticos. Ronquillo, logró minimizar los tiempos de inactividad ocasionadas por las fallas funcionales que se eliminaron luego de las estrategias que se desarrolló como resultado del eficiente análisis del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. De este modo, el autor demostró la hipótesis de la investigación con una proyección de la oportunidad de ahorro en los costos de

mantenimiento que representa un incremento de la disponibilidad de los filtros prensa automáticos.

Chávez Soto, H. (2020). “Gestión de un Plan de Mantenimiento Preventivo para Mejorar la Disponibilidad de una Extrusora de fibra de polipropileno”.

El objetivo de la investigación es gestionar el mantenimiento preventivo que permita incrementar la disponibilidad de una extrusora de fibra de polipropileno, el autor ha desarrollado una serie de procedimientos desde la organización de recursos humanos, análisis de criticidad y un programa de actividades relacionadas a la lubricación, inspecciones, limpieza, revisión de componentes, cambio de insumos de los equipos y análisis de costos operativos, así como también una proyección de ahorro económico.

Las empresas dedicadas a la fabricación de productos plásticos que continúan utilizando el mantenimiento correctivo como parte de la gestión de mantenimiento, influye negativamente en los costos operativos, aumenta las horas de inactividad y reduce la vida útil del activo, uno de los indicadores más afectados es la disponibilidad de máquina. Por ese motivo, Chávez logró reorganizar el área de mantenimiento para administrar correctamente los indicadores productivos y gestionar un mantenimiento preventivo con una serie de actividades enfocadas a cumplir una determinada frecuencia de mantenimiento como base para incrementar la disponibilidad de una maquina extrusora de fibra de polipropileno. Finalmente, el autor demostró la hipótesis planteada luego de proponer una gestión de mantenimiento preventivo apoyado en hojas técnicas de partes, tareas de mantenimiento y análisis de costos operativos.

Fierro Quintana, E. (2020). “Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo centrado en la confiabilidad (RCM 2) para incrementar la disponibilidad de las líneas de extrusión en una empresa productora de materiales plásticos”.

El objetivo del estudio es incrementar la disponibilidad, reducir tiempos de inactividad y numero de fallas de una línea de extrusión de materiales termoplásticos, para ello, el autor desarrolló una propuesta de mejora del mantenimiento preventivo en una línea

de fabricación de productos plásticos. Puesto que, en los últimos años el indicador de disponibilidad registró valores por debajo de 93%, el cual fue establecido como mínimo para las empresas de manufactura que aspiran convertirse de clase mundial.

Fierro, ha logrado constituir un equipo de trabajo para analizar los principales modos de falla (AMEF) que mayor impacto tuvieron en la baja disponibilidad, utilizó un diagrama de Pareto y Análisis de criticidad para determinar la línea de extrusión más crítica de todos los procesos productivos; posteriormente realizó una evaluación de la Hoja de Decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad que le permitió establecer una serie de actividades preventivas, políticas de rediseño para mitigar los modos de falla, desarrollar instructivos y procedimientos, el cual tuvo un periodo de duración de seis meses para evidenciar los resultados del estudio.

Así, luego de la propuesta de un mantenimiento preventivo centrado en confiabilidad de la línea de extrusión de mayor criticidad, el autor con el estudio logró incrementar la disponibilidad en 11.2% con respecto a los meses previos, el tiempo disponible para producir se incrementó de 261 horas a 295 horas y la confiabilidad se incrementó de 74 horas a 94 horas.

Flores Jiménez, V. (2022). “Plan de Mantenimiento basado en la Confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad del equipo de alta criticidad, en la línea de deshidratado de la planta de alimentos Villa Andina S.A.C – Cajamarca”.

El objetivo de esta investigación es eliminar los costos por dejar de producir a causa de las fallas imprevistas por mantenimiento o paradas operacionales en una planta de alimentos deshidratados ubicada en el departamento de Cajamarca utilizando la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM por sus siglas en ingles), el cual permite detectar las fallas prematuras. Flores, logró realizar el análisis de criticidad de equipos de la planta, identificó sus funciones y los modos de falla, definió las actividades a realizar para prevenir las fallas mediante el diagrama de decisiones formulado por Jhon Moubray (2002).

En ese sentido, la metodología permitió incrementar la disponibilidad del equipo de mayor criticidad de 92.6% a 96.2% y el Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) de 215.28 horas a 477.31 horas; asimismo, el ahorro económico generado por la no disponibilidad fue de S/. 149,835 durante el periodo de estudio.

Becerra Arévalo, G. (2012). “El análisis de confiabilidad como herramienta para optimizar la gestión del mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación en un centro minero”.

En la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de ingeniería se encuentra esta investigación de maestría, el cual tiene como finalidad optimizar la gestión de mantenimiento de los equipos críticos de la línea de flotación de una planta concentradora de mineral utilizando como metodología el Análisis de Confiabilidad, se han combinado las técnicas cualitativas y cuantitativas (estadísticas). Los autores, recolectaron datos históricos de fallos y con software estadísticos pudieron determinar la mejor distribución probabilístico de fallos y el ciclo óptimo para el mantenimiento preventivo.

Los autores realizaron un análisis de criticidad de los equipos de la planta concentradora y luego identificaron los modos y efectos de falla (AMEF) de dichos equipos críticos, también se presentan los datos históricos de fallos (año 2010) y de reparación de fallos de los equipos críticos de la línea de flotación, así como los software's utilizados para evaluar el ciclo de vida, la confiabilidad, la tasa de fallos, y las curvas características de cada equipo crítico de la línea de flotación. Además, contempla la evaluación de la confiabilidad de la línea de flotación, teniendo en cuenta la confiabilidad de los equipos críticos para los tiempos medios entre fallos (TMEF = MTBF); la determinación del tiempo medio de reparación (TMDR = MTTR) de cada equipo crítico de la línea de flotación; y la evaluación de la disponibilidad de equipos críticos.

Finalmente, luego de determinar que los equipos críticos evaluados se encuentran en la etapa de envejecimiento ($\beta > 1$) se propuso un plan de mantenimiento preventivo.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Evolución del concepto de Mantenimiento

Moubray John M. (2000), "Reability-Centred Maintenance" [9]. Históricamente a lo largo del desarrollo industrial, la función mantenimiento ha evolucionado por diferentes etapas a través del tiempo. En este sentido, muchos especialistas coinciden en establecer que durante el siglo XX la evolución del mantenimiento pasó por tres grandes etapas que, aunque no tienen un límite temporal definido, proporciona una idea clara sobre la evolución de las técnicas y organizaciones que se han implementado. Las etapas de evolución del mantenimiento se denominan: Primera, Segunda y Tercera Generación.

Primera Generación. La industria no se encontraba altamente mecanizada, es decir, una parada de maquina no afectaba mucho. Esto significa que la prevención de las fallas de los equipos no era prioridad en la mentalidad de la mayoría de los gerentes. Además, muchos de los equipos fueron diseños simples y sobredimensionados, por lo tanto, eran muy confiables y fáciles de reparar. Entonces no había la necesidad de realizar un mantenimiento sistemático, salvo rutinas de limpieza y lubricación. El único mantenimiento que se realizaba era el correctivo, que es la habitual reparación de un equipo cuando falla y generalmente los mismos operarios de producción intervenían el equipo.

Segunda Generación: La industria comenzó a depender del buen funcionamiento de la maquinaria, entonces el mantenimiento comenzó a identificar nuevas formas de prevenir fallas, las paradas de los equipos se volvieron prioridad para los gerentes y desde entonces las fallas podían y deberían preverse, el cual dio lugar al concepto de mantenimiento preventivo y consistió principalmente en Overhauls de equipos ejecutados a intervalos fijos, de este modo, se comenzó a implementar sistemas de control y planificación del mantenimiento, con el objetivo de controlar el aumento de los costos de mantenimiento.

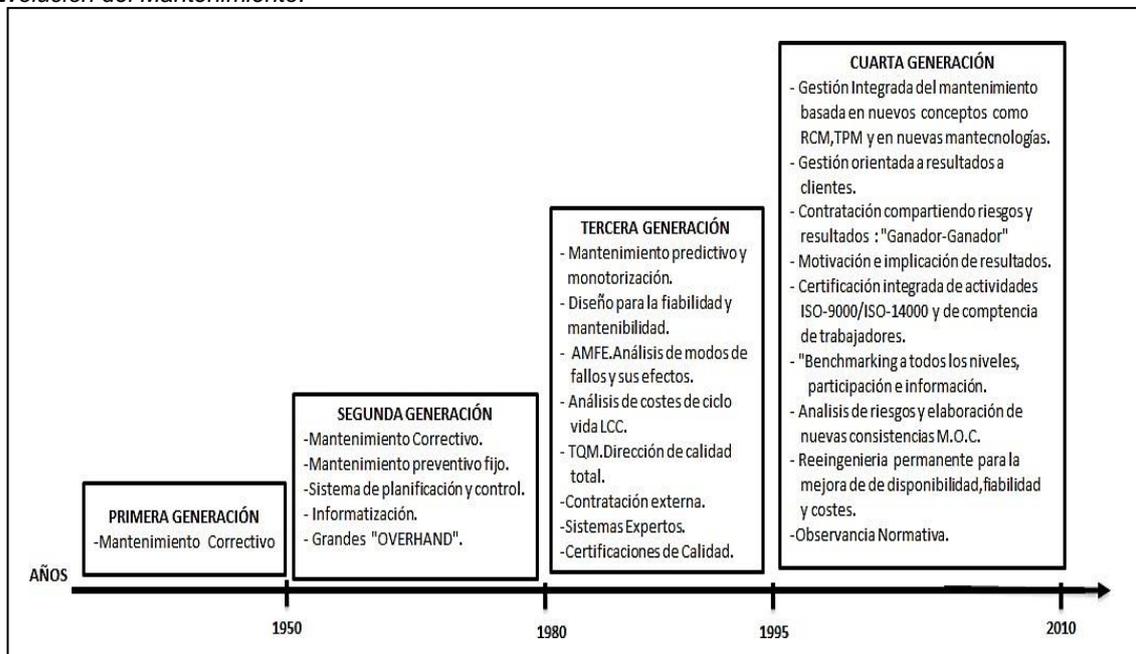
Tercera Generación: Según Moubray (2000), la tercera generación se inició aproximadamente a mediados de los setenta (70), y primera década de los ochenta (80), cuando se aceleraron los cambios a raíz del avance tecnológico y de las nuevas investigaciones, este proceso de cambio en la industria se puede clasificar en: nuevas expectativas, nuevas investigaciones y técnicas.

Desde el punto de vista de Nuevas expectativas, las paradas han afectado siempre la capacidad de producción de los activos físicos, el cual redujo la cantidad de productos fabricados, aumentó los costos operativos y una interferencia con el servicio al cliente. Asimismo, las nuevas investigaciones comenzaron a cambiar las creencias más básicas acerca del ciclo de vida de los equipos y la falla, en principio el pensamiento era simplemente que a medida que los elementos envejecían eran más propensos a fallar, tal es así que un aspecto creciente del desgaste prematuro de los equipos condujo a la segunda generación a desarrollar el concepto de la “Curva de la Bañera”. No obstante, los desarrollos de la tercera generación han revelado que aparte de la “curva de la bañera”, existe seis (06) modelos de falla que ocurren en la práctica. Finalmente, aparecieron nuevas técnicas como herramientas para la toma de decisiones, estudios aleatorios, análisis de modos, efectos de falla y sistemas expertos, monitoreo de condición, se comenzó a diseñar equipos con mayor énfasis en la Confiabilidad y Mantenibilidad, se cambió el pensamiento de los mantenedores enfocado en un trabajo en equipo y flexible. Al mismo tiempo, muchas otras técnicas comenzaron a entrar en el mercado, tal como es el caso del RCM (Reliability Centered Maintenance), el TPM (Total Productive Maintenance), entre otros.

En el libro de Gonzalez Francisco J. (2009). “Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado” [6], explica que actualmente existe una cuarta generación, el cual contiene nuevos conceptos y metodologías aplicadas a la gestión del mantenimiento. En primer lugar, refleja la necesidad de abordar las actividades de cualquier departamento o servicio de mantenimiento de forma integrada. Los responsables de mantenimiento

comienzan a estructurar todas las actividades con una visión global e integradora; es decir, inicia la integración de todos los nuevos conceptos de mantenimiento que en los últimos decenios del pasado siglo XX se han planteado de forma muy aislada, por lo tanto, los nuevos conceptos del RCM o los del TPM son imposibles de aplicar aisladamente como “filosofías de los departamentos de mantenimiento”. En ese sentido, su implementación debe contemplarse no de manera exclusiva, sino de manera conjunta con otras diversas técnicas. La figura 2.1 muestra la evolución del mantenimiento a través de los años, los objetivos planteados por los gerentes y las técnicas desarrolladas.

Figura 2.1:
Evolución del Mantenimiento.



Fuente: Tomado del libro Francisco J. Gonzalez (2009). "Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado.

2.1.2 Mantenimiento

En un contexto industrial mantenimiento significa realizar una serie de tareas a una máquina o activo para garantizar que este funcione correctamente. En este sentido, en el libro Moubray John M. (2000), "Reability-Centred Maintenance" [9], afirma que el Mantenimiento es "asegurar que el activo físico continúe haciendo lo que los usuarios quieren que hagan".

Asimismo, para la norma europea EN-13306-2018, el mantenimiento se define como “la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un elemento, destinados a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual pueda desarrollar la función requerida”.

2.1.3 Gestión y Mantenimiento

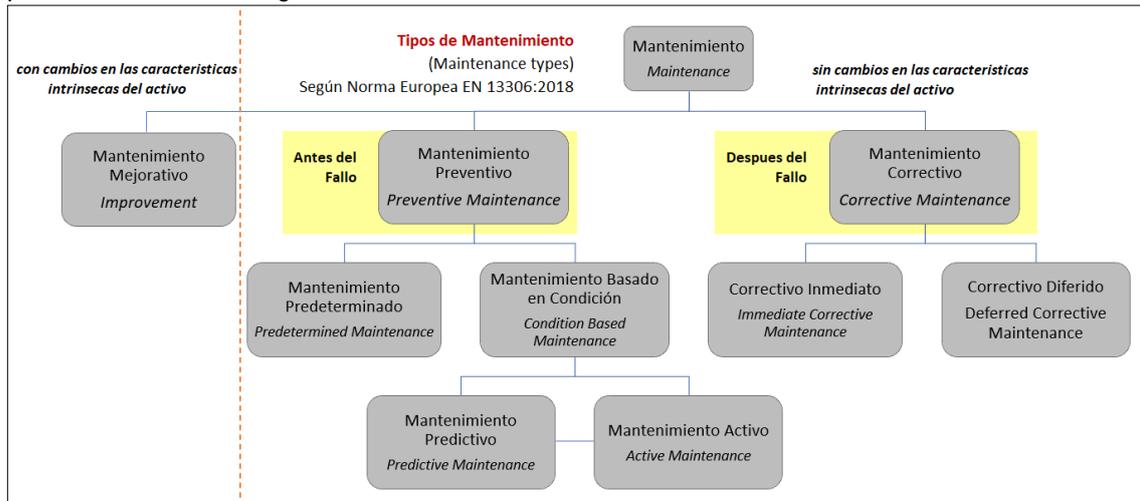
Mora Gutiérrez, Alberto (2009). “Mantenimiento. Planeación, ejecución y control” [8]. Gestión se relaciona con administración o dirección de empresas, cuya función básica es crear bienes o servicios que contribuyan a elevar el nivel de vida de la humanidad. Además, señala que la expresión “empresa” representa una organización conformada por personas, máquinas, tecnología, información, planeación y recursos financieros que busca alcanzar objetivos establecidos (eficiencia y eficacia), manejar adecuadamente los recursos disponibles (eficiencia) y respetar el medio ambiente con la mayor efectividad.

En relación con el mantenimiento, Mora Gutiérrez, Alberto (2009). “Mantenimiento. Planeación, ejecución y control” [8], manifiesta que es necesario reconocer dos aspectos básicos: gestión y operación. La primera se refiere al manejo de los recursos, asociados a la planificación, organización y control, mientras que la segunda es la realización física del servicio de mantenimiento. De otra parte, expresa que la Gestión del Mantenimiento es aquel sistema de gestión que planifica, organiza, dirige, controla y administra todas las actividades inherentes al mantenimiento. Asimismo, responde a las necesidades de producción y promueve la productividad y competitividad de la empresa.

2.1.4 Tipos de Mantenimiento

Según la norma europea UNE-EN 13306:2018 [13]. “Norma estándar europea”, el mantenimiento está dividido en dos (02) grandes agrupaciones: ***sin cambios en las características intrínsecas del activo y cambia las características intrínsecas del activo (confiabilidad, mantenibilidad, seguridad) sin modificar la función principal.*** En la figura 2.2 se muestra esquemáticamente los diferentes tipos de mantenimiento según la Norma EN-13306:2018.

Figura 2.2:
Tipos de mantenimiento según la Norma EN-13306:2018.



Fuente: Elaboración Propia.

De la figura anterior, el mantenimiento preventivo, se subdivide en solo dos tipos: mantenimiento preventivo predeterminado y mantenimiento basado en condición, el cual se divide a su vez, en mantenimiento predictivo y mantenimiento activo. Asimismo, el mantenimiento correctivo, como segundo aspecto a resaltar, tiene dos divisiones: mantenimiento diferido (programable) y mantenimiento inmediato (emergencia).

2.1.5 Mantenimiento Preventivo

La norma europea UNE-EN 13306:2018 [13], define el mantenimiento preventivo como la realización de tareas de mantenimiento programadas periódicamente para evaluar y/o mitigar la degradación de los equipos con el fin de reducir la probabilidad de fallos e imprevistos. En resumen, el propósito de este mantenimiento es adelantarse a las averías antes de que ocurran o que sean más grave, por lo que disminuye el gasto en reparaciones y el tiempo de inactividad operativa de los activos físicos.

1. Mantenimiento Predeterminado

Sustitución Cíclica, este tipo de mantenimiento consiste en reemplazar periódicamente componentes que se encuentran al final de su vida útil; no se evalúa su buen o mal estado. Por ejemplo: cambio de filtros de aceite en unidades oleohidráulicas.

Servicio cíclico, este mantenimiento no implica el reemplazo de un componente, sino que se realiza una determinada actividad cada cierto intervalo de tiempo para restaurar

a la función requerida. Por ejemplo: afilado de cuchillas en la cizalla de corte de una línea de extrusión.

2. Mantenimiento Basado en Condición

a. Mantenimiento Predictivo, está diseñado para programar acciones de mantenimiento correctivo antes de que ocurra una falla siguiendo una predicción obtenida del análisis repetido o de características conocidas. El personal de mantenimiento debe determinar primero el estado del equipo mediante técnicas de monitoreo con instrumentos de medición, luego la evaluación de los parámetros significativos de la degradación del equipo para estimar cuándo se debe realizar la intervención. Finalmente, se programan las tareas de mantenimiento para evitar fallas inesperadas.

b. Mantenimiento Activo, de acuerdo con la norma americana SAE JA1012:2011. "Guía para la norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad" [12]. Una vez que los activos físicos se ponen en servicio, no todas las averías ocurren instantáneamente de inmediato. En tales casos, es muy posible detectar que los elementos en cuestión se encuentran en las etapas finales de desgaste antes de llegar a un estado de falla.

Esta evidencia de falla inminente se llama "falla potencial", que se define como "una condición identificable que indica que ha ocurrido o está ocurriendo un mal funcionamiento". Si esta condición es detectable, puede ser posible actuar para evitar la falla total del elemento y/o evitar las consecuencias de la condición de falla.

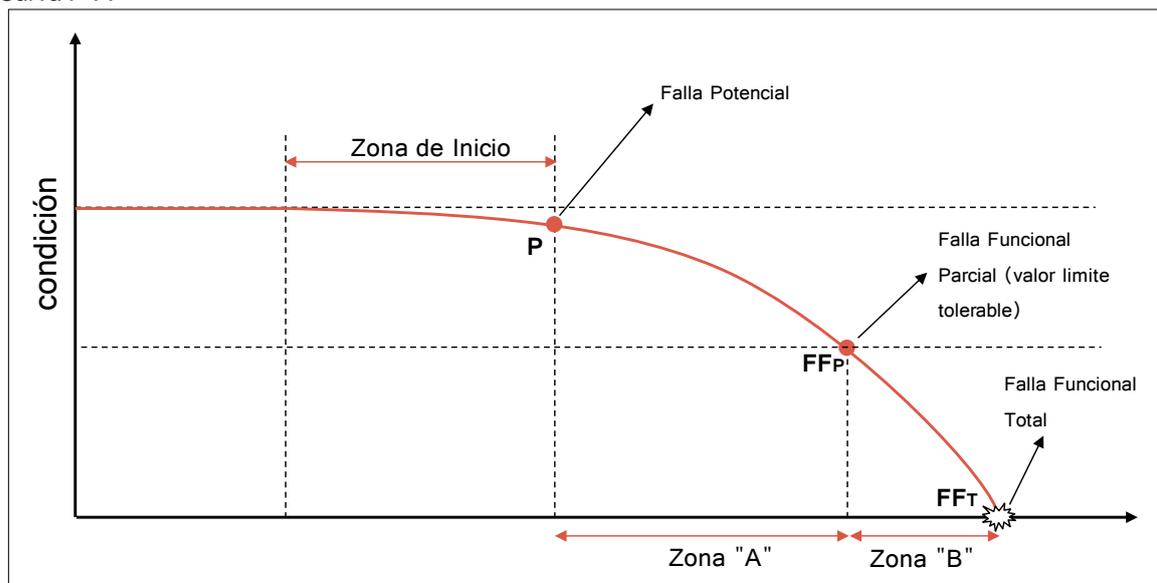
El mantenimiento Activo se clasifica en dos (02) tipos: Mantenimiento Activo Preventivo y Mantenimiento Activo Correctivo.

Mantenimiento Activo Preventivo, es la parte del mantenimiento preventivo donde se llevan a cabo acciones para restaurar un elemento directamente o bien siguiendo las degradaciones observadas a través de la monitorización de la condición, inspección o prueba, desde el inicio de la falla potencial (punto P), el cual va a seguir con el estatus de potencial falla hasta el punto de falla parcial. En esta zona la falla es potencial y potencialmente detectable.

Mantenimiento Activo Correctivo, es la parte del mantenimiento correctivo en el que se llevan a cabo acciones para restaurar el elemento desde la ocurrencia de la falla parcial hasta la falla total o parada del activo físico. En esta zona la falla solo es potencialmente detectable.

La figura 2.3 ilustra lo que ocurre en las fases finales del proceso de falla. Esta se llama curva P-F, porque muestra como comienza una falla, el activo físico se deteriora hasta el punto en el cual se detecta una potencial falla ("P") y entonces, si no es detectada y corregida, continúa deteriorándose hasta que alcanza el punto de falla funcional parcial ("FFP") y conforme va pasando el tiempo, si la falla continua sin ser detectada se llega al punto de una falla funcional total ("FFT").

Figura 2.3:
Curva P-F.



Fuente: Norma SAE JA1012:2011. "Guía para la norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad".

De la cura P-F se observa, que las actividades de condición que se realizan en la zona donde comienza una falla desde el punto "P" hasta el punto "FFP" es el mantenimiento activo preventivo (zona "A"), en esta zona la falla es potencial y potencialmente detectable donde se puede tomar acción para prevenir la falla funcional. Por otro lado, la zona donde la falla ya no es potencial debido a que se convirtió en una falla funcional parcial ("FFP") en adelante hasta la falla total ("FFT") el activo físico deja de cumplir la función para la cual fue adquirido, sin embargo todavía es potencialmente detectable y las actividades que se

realizan corresponden al mantenimiento activo correctivo (zona “B” o tiempo residual limite) y está basado en monitoreo de condición del tipo sensorial.

2.1.6 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad

Moubray John M. (2000), “Reability-Centred Maintenance” [9]. Describe el RCM (Reliability Centered Maintenance) o Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad como una metodología de mantenimiento que permite identificar fallos potenciales de los equipos y sus posibles causas, clasificar la criticidad de los fallos y proponer medidas para evitarlos. El objetivo principal de RCM, como cualquier estrategia de mantenimiento planificado, es reducir costos mediante la realización de actividades de mantenimiento que mantengan la funcionalidad y eviten mantenimiento innecesario.

El RCM es definido por Moubray (2000) como: “un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”.

Según la norma americana SAE JA1012:2011. “Guía para la norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad” [12]. Para aplicar la metodología es necesario responder satisfactoriamente siete (7) preguntas que, dependiendo del nivel de precisión y análisis, resulta en un plan de mantenimiento más eficaz y con mejores acciones para evitar fallas. Las interrogantes planteadas por la norma para responder son:

1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociadas al activo en su actual 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?

Gonzalez Francisco J. (2009). "Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado" [6], propone una pregunta adicional de análisis: "¿Es rentable prevenir dichos fallos?", en la figura 2.4 muestra el proceso de implementación del RCM.

Figura 2.4:
Proceso de Implementación del RCM.



Fuente: Francisco J. Gonzalez (2009). "Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado" [6].

2.1.7 Contexto Operacional

Moubray John M. (2000), "Reability-Centred Maintenance" [9], menciona que el contexto operacional es parte principal del proceso de RCM y evaluarlo es fundamental, además es importante que todo el personal encargado del análisis de programas de mantenimiento de cualquier activo físico comprenda totalmente el contexto en el que funciona. En ese sentido, dos activos físicos idénticos trabajando en diferentes procesos y contexto de operación, le corresponde tareas de mantenimiento totalmente distintos; por lo tanto, antes de comenzar el análisis es importante identificar el régimen de operación del activo físico, disponibilidad de mano de obra y repuestos, consecuencias de

indisponibilidad (reducción de producción, recuperación de producción en horas extras, tercerización), objetivos de calidad, seguridad y medio ambiente.

2.1.8 Definición de Función

La función de un activo en su contexto operacional está determinada por el motivo de su adquisición, que es siempre su función principal. Por otro lado, los activos cuentan con funciones adicionales que son registradas como secundarias.

Moubray John M. (2000), "*Reability-Centred Maintenance*" [9]. Explica que Todo activo físico tiene más de una función, por lo general tiene varias. Si el objetivo de mantenimiento es asegurarse que continúe realizando estas funciones, entonces todas ellas deben ser identificadas. La manera adecuada de definir una función en un análisis de RCM es: "La definición de una función consiste en un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario".

2.1.9 Falla Funcional

Las fallas funcionales son la culminación de la habilidad de un activo físico para desempeñar una función requerida, Según la norma americana SAE JA1012:2011. "*Guía para la norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*" [12], define la falla funcional como un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado.

Moubray John M. (2000), "*Reability-Centred Maintenance*" [9], 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.

2.1.10 Modo de Falla

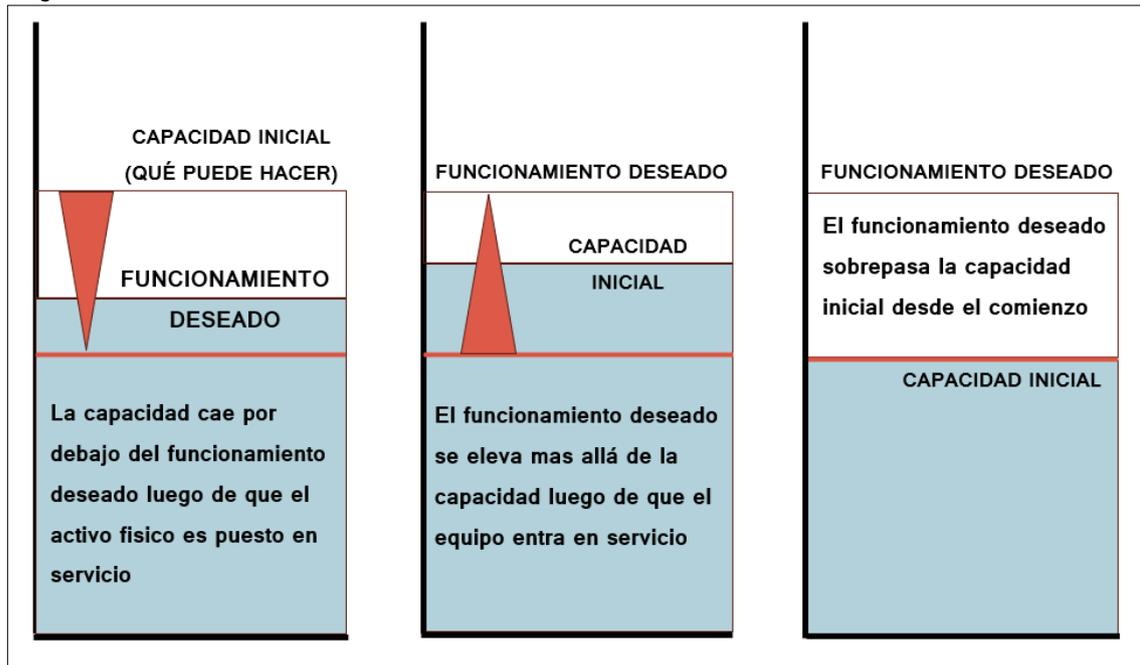
Es definido como cualquier situación o evento por el cual un activo pierde la capacidad de desempeñar su función o, en otras palabras, la forma en que un activo presenta una falla funcional. Por ejemplo, para un motor eléctrico los modos de fallo pueden ser: calentamiento, vibración, sobrecorriente, etc.

Moubray John M. (2000), "*Reability-Centred Maintenance*" [9], define el modo de falla como cualquier evento que causa una falla funcional. Se clasifican en tres grupos:

1. *Capacidad cae por debajo del funcionamiento deseado*, las principales causas de esta condición son: deterioro (fatiga, corrosión, abrasión, erosión, evaporación, degradación, etc.); lubricación (falta y falla de lubricación); polvo o suciedad; desarmes (fallas en soldaduras, uniones soldadas, soldadura en remaches y bulones, conexiones, etc.).
2. *Funcionamiento deseado por encima de*, esto sucede cuando el funcionamiento aumenta hasta quedar fuera de su capacidad y posteriormente no puede responder, esto ocasiona que se acelere el deterioro del activo físico hasta el punto de que se vuelve poco confiable y ya no es útil. Las principales causas de esta condición son las sobrecargas en los procesos.
3. *Capacidad inicial fuera de rango desde el inicio*, esto sucede cuando el funcionamiento deseado se encuentra fuera del rango de capacidad del activo físico desde el inicio, ocasionado por una inadecuada selección en el diseño o errores en el diseño.

Los modos de falla deben definirse con suficiente detalle para seleccionar una adecuada política de gestión de fallas, en la figura 2.5 muestra la clasificación de los modos de falla.

Figura 2.5:
Categorías de Modos de Falla.



Fuente: John M. Moubray (2000), "Reability-Centred Maintenance" [9].

2.1.11 Efecto de Falla

Según Moubray John M. (2000), "Reability-Centred Maintenance" [9], los efectos de la falla describen que sucede cuando ocurre un modo de falla. Asimismo, el efecto de falla es diferente a consecuencia de fallo, mientras que el primero describe lo que ocurre con el activo físico cuando se analiza el modo de falla, el segundo describe la importancia del modo de falla. Asimismo, la descripción de los efectos de falla se realiza con toda la información posible para una adecuada evaluación de las consecuencias de las fallas, el cual debe incluir lo siguiente:

1. Evidencias, esta descripción indica si la falla está asociada a efectos físicos (ruidos fuertes, incendio, humo, fugas de vapor o aire, olores extraños, manchas, paralización, etc.).
2. Riesgos para la seguridad y medio ambiente, esta descripción indica la posibilidad de lesión o accidente fatal del personal y el incumplimiento de una normativa o reglamento del medio ambiente, como por ejemplo: incendio, explosiones, derrame de productos químicos, caída de objetos, electrocución, etc.

3. La manera en que afecta a la producción y las operaciones, esta descripción indica como y cuanto afecta a la producción por parada de máquina, interrupción de una línea productiva o parada de planta.
4. Los daños físicos, esta descripción abarca como y cuanto afecta la calidad del producto y el servicio al cliente, y que penalidades financieras ocasiona.
5. Que hacer para reparar la falla, esta descripción se refiere a que medidas correctivas ejecutar para reparar el activo físico.

2.1.12 Consecuencia de Falla

Según la norma americana SAE JA1012:2011. “*Guía para la norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*” [12], las consecuencias de falla hacen referencia a los impactos derivados de la falla funcional. Se consideran las consecuencias a la seguridad de las personas, medio ambiente, calidad del producto, proceso y operaciones.

Según Moubray John M. (2000), “*Reability-Centred Maintenance*” [9], el análisis RCM consta de siete preguntas, la quinta pregunta se describe de la siguiente manera: ¿En qué sentido es importante cada falla?, dicho de otra manera, la interrogante hace referencia a las consecuencias que produce la falla. Para tal efecto, Francisco J. Gonzalez (2009). “*Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*” [6], divide las consecuencias según su gravedad en cuatro (4) grupos:

1. Consecuencias para la seguridad y medio ambiente.
2. Consecuencias de los fallos ocultos.
3. Consecuencias operacionales.
4. Consecuencias no operacionales.

2.1.13 Mantenimiento Proactivo

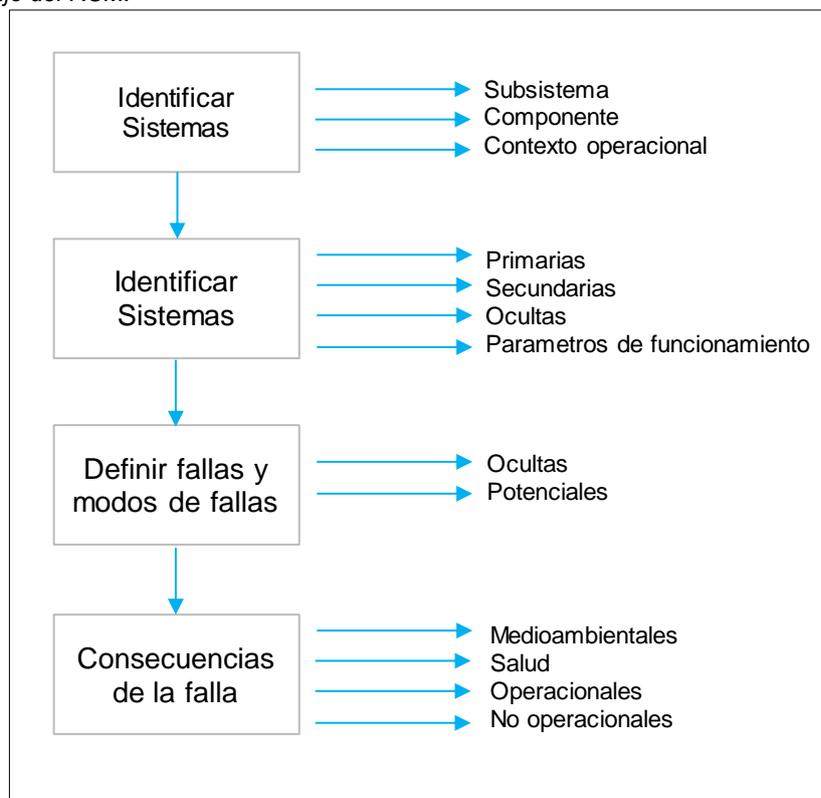
Moubray John M. (2000), “*Reability-Centred Maintenance*” [9]. En el análisis de RCM se han respondido las cinco (5) primeras preguntas, el siguiente paso es determinar

las acciones a seguir para reducir o eliminar las fallas antes de que ocurran. Estas acciones para manejar las fallas pueden dividirse en dos categorías:

1. Tareas Proactivas: Estas tareas se ejecutan antes que ocurran la falla, las técnicas de mantenimiento que se utilizan es el reacondicionamiento cíclico, tareas de sustitución cíclica y monitoreo de condición. Comúnmente estas tareas son denominadas “mantenimiento preventivo” y “mantenimiento predictivo”.

2. Acciones a falta de: Con respecto a la interrogante siete (7) cuando no es posible identificar una tarea proactiva efectiva, Estas acciones incluyen una búsqueda de las fallas ocultas (inspecciones), rediseño (modificar los equipos con el fin de mejorar su mantenibilidad), no efectuar nada y esperar que el equipo falle hasta la rotura. En la figura 2.6 se muestra un resumen del diagrama de flujos del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

Figura 2.6:
Diagrama de flujo del RCM.



Fuente: John M. Moubray (2000), “*Reability-Centred Maintenance*” [9].

2.1.14 Análisis de Modos y efectos de fallos (AMEF)

En el libro de Gonzalez Francisco J. (2009). "Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado" [6], define el análisis de los modos y efectos de fallos (AMEF), como una herramienta o metodología que permite de manera sistemática, identificar las fallas funcionales de un equipo antes de que ocurran, con el objetivo de eliminarlas o mitigarlas, con lo cual se asegura la operatividad y su confiabilidad. Es decir, el AMEF se utiliza para identificar los modos de fallas funcionales, determinar sus efectos que estos provocan e identificar acciones que conlleven para atenuar dichas fallas. En ese sentido, el AMEF es una metodología que permite asegurar la funcionalidad y por ende la confiabilidad de una máquina. El desarrollo del AMEF abarca las cuatro (4) primeras preguntas (función y parámetros de funcionamiento, falla funcional, modo de falla y efecto de falla) presentadas anteriormente en la sección 2.1.6, la metodología RCM establece un documento estructurado para la recolección de datos denominado Hoja de Información. Este documento se muestra en la 2.1.

Tabla 2.1:
Hoja de Información para Análisis de Modos y efecto de fallas (AMEF).

HOJA DE INFORMACION RCM II © 1998 ALADON LTD		SISTEMA:	SISTEMA:	FACILITADOR:	FECHA:	HOJA Nº: 1
		SUB SISTEMA:	SUB SISTEMA:	AUDITOR:	FECHA:	de: 1
FUNCIONES		FALLAS FUNCIONALES		MODO DE FALLA		EFECTOS DE FALLA
1		A		1		
				2		
				3		
				4		
				5		
				6		
				7		
				8		
				9		
				10		

Fuente: John M. Moubray (2000), "Reability-Centred Maintenance" [9].

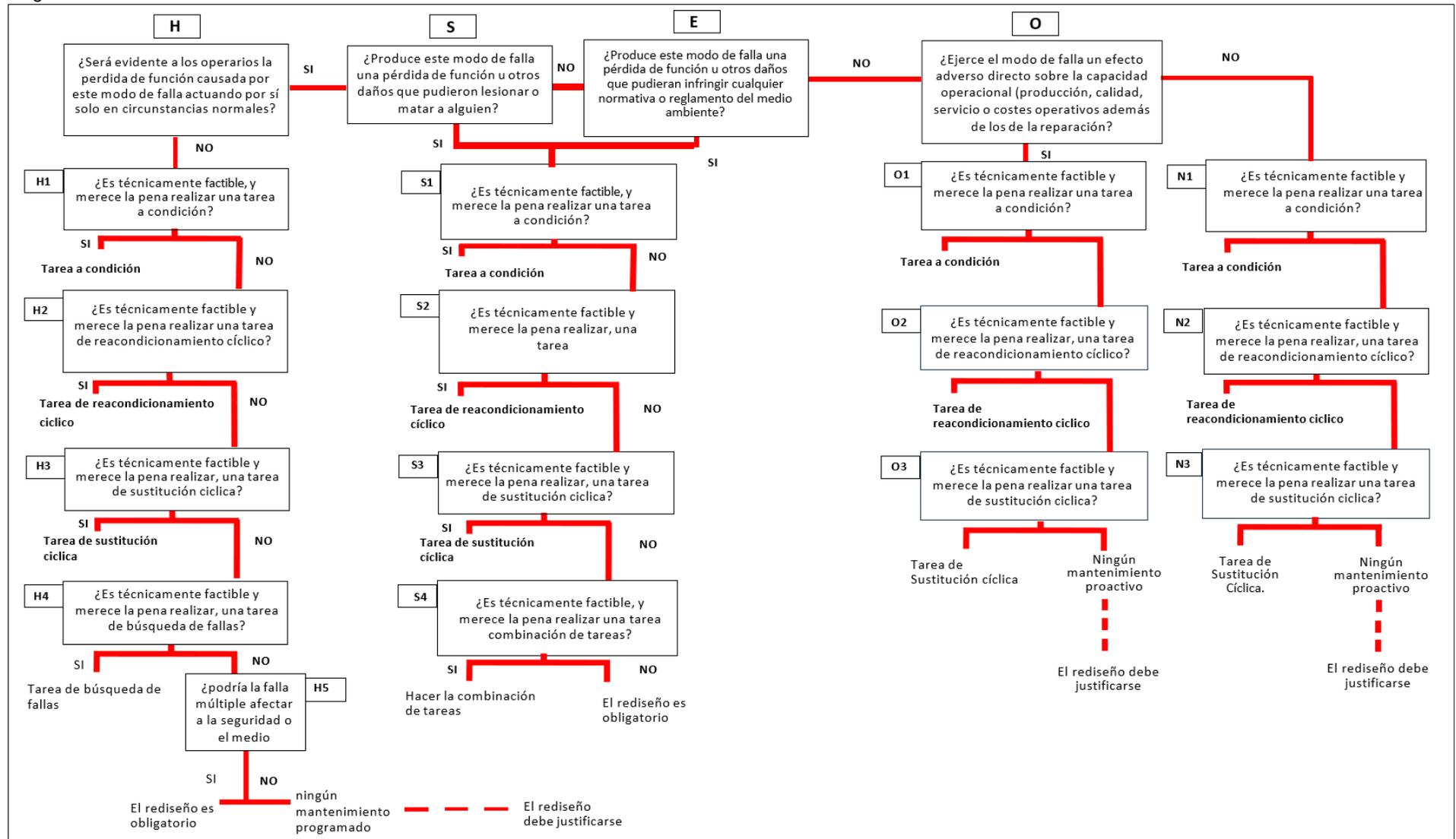
2.1.15 Proceso de Decisión de RCM

Este proceso consiste en responder las últimas tres (3) preguntas del RCM descritas en la sección 2.1.6, el cual consiste en tomar la decisión de las tareas de mantenimiento apropiadas y factibles que deben realizarse para prevenir la ocurrencia de fallos.

La metodología RCM propone un análisis basado en preguntas formuladas de manera que la primera opción sea siempre preservar las condiciones originales antes de rediseñar la máquina. La herramienta que se muestra en la Figura 2.7 permite identificar las tareas y el programa de mantenimiento adecuado a realizar, el cual integra todos los procesos de toma de decisiones en una estructura estratégica que se aplica a cada modo de falla encontrado en la hoja de trabajo descrito en la sección anterior.

Figura 2.7:

Diagrama de Decisión del RCM © 1997 Aladon Ltd.



Fuente: John M. Moubray (2000), "Reliability-Centred Maintenance" [9].

Luego de efectuar las interrogantes en el análisis del diagrama de decisión descrito en la sección anterior, las respuestas se muestran en el formulario de decisión planteado por la metodología RCM, el cual detalla la actividad propuesta para cada modo de falla analizado, con qué frecuencia debe realizarse y finalmente el área o personal técnico que va a ejecutarlo. La tabla 2.2 muestra la hoja de decisiones de RCM.

Tabla 2.2:
Hoja de Decisión Del RCM II.

HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1998 ALADON LTD				SISTEMA:			SISTEMA:		FACILITADOR:	FECHA:	HOJA Nº: 1				
				SUBSISTEMA:			SUBSISTEMA:		AUDITOR:	FECHA:	de: 1				
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			TAREA PROPUESTA	INTERVALO INICIAL	A REALIZARSE POR
F	FF	FM	H	S	E	O	O1	O2	O3	H4	H5	S4			

Fuente: John M. Moubray (2000), "Reability-Centred Maintenance" [9].

2.1.16 Análisis de Criticidad

Parra Márquez C. y Crespo Márquez A. (2012). "Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos" [10].

Es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Asimismo, para realizar un análisis de criticidad se debe: definir un alcance y propósito para el análisis, establecer los criterios de importancia, seleccionar o desarrollar un método de evaluación que permita jerarquizar los sistemas.

El modelo de criticidad semicuantitativo más utilizado es la Matriz de criticidad por Riesgo (MCR), el cual está determinada por la siguiente ecuación.

$$\text{Riesgo o Criticidad (C)} = \text{Frecuencia de Fallos (FF)} \times \text{Impacto (I)}$$

Donde la ocurrencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado y, la consecuencia está asociado con el impacto operacional, los costos de reparación, flexibilidad y los impactos en seguridad y medio ambiente.

En función de lo expuesto, en la tabla 2.3 se establecen los criterios fundamentales para realizar un análisis de criticidad.

Tabla 2.3:
Criterios de Jerarquización para Análisis De Criticidad (MCR).

CRITERIOS	PARTIDAS	CÓDIGO PARTIDA	PESO	EXPLICACIÓN
PROBABILIDAD	Frecuencia de Falla	P1	1	Considera que el número de veces que falla un activo es un indicador importante para analizar la eficiencia de la estrategia de mantenimiento y cuál es la atención que se debe dar al equipo que presenta más fallas.
	Impacto Operacional	P2	0.4	Considera que la interrupción de la operación por causa de una falla en los activos es un indicador importante, el cual muestra que nuestros activos no están siendo estratégicamente mantenidos ni gestionados.
IMPACTO	Costo de Mantenimiento	P3	0.2	Considera importante este indicador ya que los costos elevados pueden ser controlados o disminuidos a través de una estrategia de mantenimiento apropiada.
	Mantenibilidad	P4	0.05	Considera la facilidad de realizar los trabajos de mantenimiento como una variable que influye en la definición de la criticidad de equipos.
	Flexibilidad	P5	0.1	Considera la flexibilidad como una variable que influye en la definición de la criticidad de equipos.
	Impacto en la Seguridad	P6	0.1	La seguridad de las personas y de los activos es un indicador importante para definir la criticidad de los activos porque nuestra compañía considera al recurso humano como uno de sus pilares más importantes.
	Impacto Medioambiental	P7	0.05	Compromiso con el cuidado del medio ambiente, por lo tanto es un criterio importante para definir la criticidad de los activos.
	Impacto Calidad y/o Rendimiento	P8	0.1	La empresa trabaja para presentar a sus clientes productos de la mejor calidad, es por esta razón que la influencia de las fallas de equipos en la calidad de sus productos es un indicador muy importante a considerar.

Fuente: Parra Márquez C. y Crespo Márquez A. (2012). "Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos" [10].

El análisis de criticidad aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio donde formen parte, el peso de cada criterio se determina de acuerdo con la validación por juicio de expertos de los responsables de la parte operativa de las empresas. Luego de definir los criterios fundamentales de jerarquización mencionados, se le asigna valores a cada partida que multiplicados por el peso validado por juicio de expertos en la tabla anterior, se efectúa el cálculo numérico del Riesgo o Criticidad. La tabla 2.4 muestra los valores ponderados a cada partida, diseñados para el proceso de jerarquización de la frecuencia de fallos (FF) e impacto (I).

Tabla 2.4:*Valores ponderados de los criterios de jerarquización.*

FACTOR DE FRECUENCIA DE FALLA - PESO(1.0)	CATEGORIA	V1
Es probable que el activo falle más de 4 veces por año	Muy Alto	5
Es probable que el activo falle 4 veces por año	Alto	4
Es probable que el activo falle 2 veces por año	Medio	3
Es probable que el activo falle 1 vez por año	Bajo	2
Es probable que el activo falle 1 vez en 2 o mas años	Muy Bajo	1
IMPACTO OPERACIONAL - PESO(0.4)	CATEGORIA	V2
La falla ocasiona una pérdida de producción del 75 - 100%	Muy Alto	5
La falla ocasiona una pérdida de producción del 50 - 74%	Alto	4
La falla ocasiona una pérdida de producción del 25 - 49%	Medio	3
La falla ocasiona una pérdida de producción del 10 - 24%	Bajo	2
La falla ocasiona una pérdida de producción del 0% - 9%	Muy Bajo	1
COSTO DE MANTENIMIENTO - PESO(0.2)	CATEGORIA	V3
Reparar la falla ocasiona un costo mayor de 10,000 US\$	Muy Alto	5
Reparar la falla ocasiona un costo entre 5,000 y 10,000 US\$	Alto	4
Reparar la falla ocasiona un costo entre 1,000 y 5,000 US\$	Medio	3
Reparar la falla ocasiona un costo entre 500 y 1,000 US\$	Bajo	2
Reparar la falla ocasiona un costo menor de 500 US\$	Muy Bajo	1
MANTENIBILIDAD - PESO(0.05)	CATEGORIA	V4
La reparación del equipo es muy compleja y requiere de un alto tiempo de ejecución	Alto	5
La reparación del equipo es de complejidad media y requiere de un tiempo de ejecución considerable	Medio	3
La reparación del equipo es sencilla y requiere poco tiempo de ejecución	Bajo	1
FLEXIBILIDAD - PESO(0.1)	CATEGORIA	V5
El equipo es único y no dispone de un equipo con características similares	Alto	5
El equipo dispone de un equipo con características similares pero no se encuentra instalado	Medio	3
El equipo dispone de un equipo con características similares instalado en stand by	Bajo	1
IMPACTO EN LA SEGURIDAD - PESO(0.1)	CATEGORIA	V6
Riesgo de muerte inminente o falla catastrófica en el activo	Muy Alto	5
Daños muy graves que dejan secuela después de un tratamiento o reparación	Alto	4
Daños graves, que desaparecen con tratamiento o reparación	Medio	3
Daños leves, que desaparecen con tratamiento o reparación	Bajo	2
No existe riesgo para las personas ni activos	Muy Bajo	1
IMPACTO MEDIOAMBIENTAL - PESO(0.05)	CATEGORIA	V7
La falla provoca daños medioambientales irreversibles fuera de la empresa	Muy Alto	5
La falla provoca daños medioambientales irreversibles dentro de la empresa	Alto	4
La falla provoca daños medioambientales cuyos efectos no violan las normas	Medio	3
La falla provoca daños medio ambientales reversibles	Bajo	2
La falla no provoca ningún daño al medioambiente	Muy Bajo	1
IMPACTO EN LA CALIDAD Y/O RENDIMIENTO - PESO(0.1)	CATEGORIA	V8
La falla afecta totalmente la calidad del producto	Alto	5
La falla afecta parcialmente la calidad del producto	Medio	3
La falla no afecta la calidad del producto	Bajo	1

Fuente: Parra Márquez C. y Crespo Márquez A. (2012). "Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos" [10]. Asimismo, estos valores también son tomados mediante juicio de expertos del personal operativo.

El siguiente paso para determinar la criticidad de los equipos es realizar el cálculo de la Frecuencia de fallos y el Impacto de la siguiente manera:

i. Frecuencia de Fallos = $P1 = V1 * 1$

ii. Impacto = $P2 + P3 + P4 + P5 + P6 + P7 + P8$

$$\text{Impacto} = V2*0.4 + V3*0.2 + V4*0.05 + V5*0.1 + V6*0.1 + V7*0.05 + V8*0.1$$

$$I_{\text{mín}} = 1*0.4 + 1*0.2 + 1*0.05 + 1*0.1 + 1*0.1 + 1*0.05 + 1*0.1 = 1$$

$$I_{\text{máx}} = 5*0.4 + 5*0.2 + 5*0.05 + 5*0.1 + 5*0.1 + 5*0.1 + 5*0.05 = 5$$

iii. Escala (1-5)

$$\text{Rango} = (5 - 1) / 5 = 0.8 \text{ (rango de las columnas de la matriz de criticidad).}$$

Finalmente, los resultados obtenidos de la evaluación de los factores anteriores se presentan en una matriz de criticidad 5x5 como se ilustra en la figura 2.8, donde el eje vertical está formado por cinco (05) niveles de frecuencia de fallos, mientras que el eje horizontal está formado por cinco (05) rangos del impacto de fallos.

Figura 2.8:
Matriz de Criticidad propuesta por el modelo MCR.

PROBABILIDAD (P)	IMPACTO (I)				
	1 - 1.80	1.81 - 2.60	2.61 - 3.40	3.41 - 4.20	4.21 - 5
5	2	3	3	3	3
4	2	2	2	2	3
3	1	1	1	2	3
2	0	0	0	1	1
1	0	0	0	1	1

CRITICIDAD
Muy Alta = 3
Alta = 2
Media = 1
Baja = 0

Fuente: Parra Márquez C. y Crespo Márquez A. (2012). "Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos" [10].

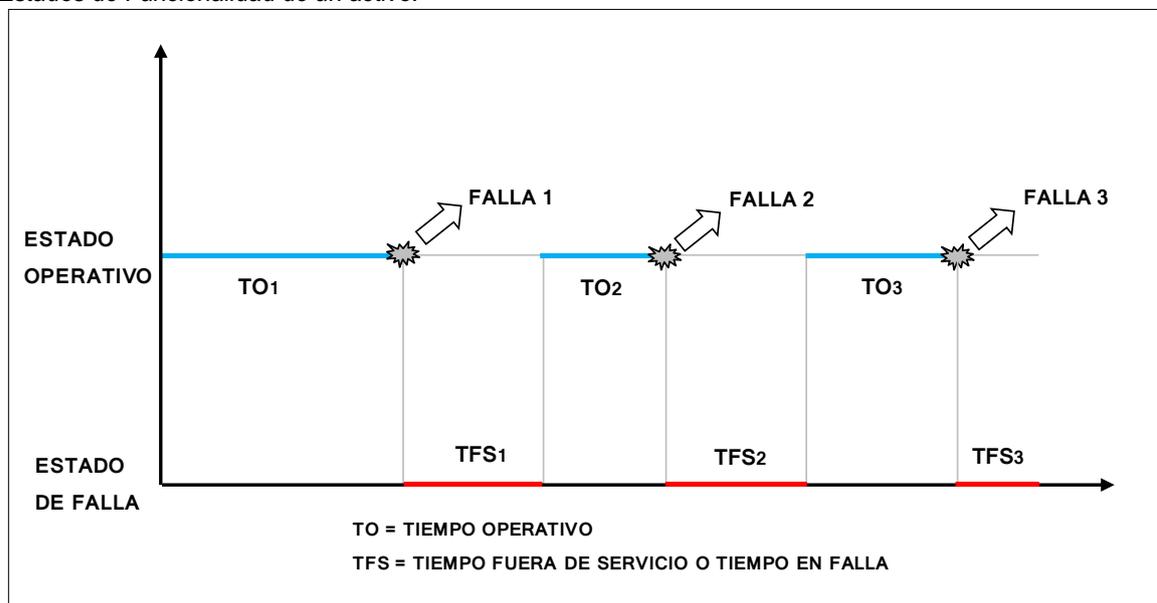
2.1.17 Fundamentos sobre Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad

Mora Gutiérrez, Alberto (2009): "Mantenimiento. Planeación, ejecución y control" [8]. La confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad de un activo o maquina son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas fundamentadas en cálculos

matemáticos, estadísticos y probabilísticos que tiene el mantenimiento para su análisis y su evaluación integral y específica. Asimismo, por medio de estos tres (3) conceptos permite a los mantenedores planificar, organizar, dirigir, controlar y ejecutar totalmente la gestión y operación del mantenimiento.

La Confiabilidad es la probabilidad de que el activo realice correctamente su función durante un rango de tiempo y se mide a partir del número y duración de las fallas; mientras que la Mantenibilidad es la probabilidad de que el activo pueda ser reparado o mantenido en el tiempo esperado y se cuantifica a partir de la cantidad y duración de las reparaciones; finalmente la disponibilidad es la probabilidad de que el activo se encuentre operativo cuando sea requerido y se obtiene por cálculo y deducción matemática a partir de la confiabilidad y mantenibilidad. Un activo o maquina siempre se encontrará en dos estados mutuamente excluyentes, operativo y estado de falla, en la figura 2.9 muestra los estados de funcionalidad de un activo durante su ciclo de vida.

Figura 2.9:
Estados de Funcionalidad de un activo.



Fuente: Parra Márquez C. y Crespo Márquez A. (2012). "Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos" [10].

De la figura anterior, Parra Márquez C. y Crespo Márquez A. (2012). "Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos" [10], define a los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad a través de las siguientes expresiones:

1. Tiempo Medio entre Fallos (TMEF = MTBF): Este indicador mide el tiempo promedio que es capaz de operar un equipo sin interrupciones, la expresión matemática es:

De la figura 2.9 se obtiene:

$$TMEF(MTBF) = \frac{TO_1+TO_2+TO_3}{3}, \text{ o en forma general}$$

$$TMEF(MTBF) = \frac{\sum_{i=1}^n TO_i}{N^\circ \text{ Eventos \u00fasiles}} \text{ (hrs)}$$

2. Tiempo Medio de Reparaci\u00f3n (TMDR = MTTR): De igual manera, este indicador mide el tiempo promedio que tarda los mantenedores en restituir un activo a una condici\u00f3n adecuada de operaci\u00f3n despu\u00e9s de un fallo, la expresi\u00f3n matem\u00e1tica del MTTR es:

$$TMDR(MTTR) = \frac{TFS_1+TFS_2+TFS_3}{3}, \text{ o en forma general}$$

$$TMDR(MTTR) = \frac{\sum_{i=1}^n TFS_i}{N^\circ \text{ Correctivos}} \text{ (hrs)}$$

3. Disponibilidad: Este indicador permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total que un equipo est\u00e1 en condiciones para cumplir su funci\u00f3n requerida, la expresi\u00f3n matem\u00e1tica es:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} 100\%$$

4. Distribuci\u00f3n probabil\u00edstica de Weibull: Weibull, W (1951). "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability" [15]. La Distribuci\u00f3n de Weibull, debido a su alta flexibilidad, es el modelo probabil\u00edstico m\u00e1s utilizado en aplicaciones de confiabilidad, el cual permite modelar de manera eficaz los tiempos de fallos de equipos o sistemas en plantas industriales.

Sea "T" la variable aleatoria "tiempo hasta el fallo", entonces la funci\u00f3n de densidad de probabilidad de falla (falla instant\u00e1nea en el tiempo t), se expresa de la siguiente manera:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-t_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t-t_0}{\alpha}\right)^\beta} \text{ Donde } t \geq t_0; \beta > 0; \alpha > 0$$

La tasa de falla para esta distribución es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-t_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad \text{Donde } t \geq t_0; \beta > 0; \alpha > 0$$

La confiabilidad o fiabilidad es la probabilidad de que un activo físico cumpla una misión específica (no falle) bajo condiciones de operación determinadas en un periodo de tiempo específico:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\alpha}\right)^\beta} \quad \text{Donde } t \geq t_0; \beta > 0; \alpha > 0$$

Asimismo, la esperanza de vida MTBF se calcula de la siguiente manera:

$$MTBF = t_0 + \alpha * \Gamma \left[\frac{\beta+1}{\beta} \right]$$

α : parámetro de escala o vida característica.

β : parámetro de forma Beta de Weibull.

t : tiempo en cualquier momento.

t_0 : es el parámetro inicial de localización y define el punto de partida u origen de la distribución.

El presente trabajo de suficiencia profesional se enfoca en utilizar la distribución probabilística de Weibull para el caso: $t_0 = 0$, es decir, demostramos que cualquier grupo de datos que sigan la distribución de Weibull se representa por una línea recta llamada "Curva de Regresión de Weibull". En ese sentido, partimos de la hipótesis de que el origen es perfectamente conocido y que coincide con los datos experimentales.

La curva de regresión de Weibull es de la siguiente forma: $Y = AX + B$

$X = \ln(t)$ (variable función de t)

$Y = \ln\{-\ln[1 - F(t)]\}$ (función de t)

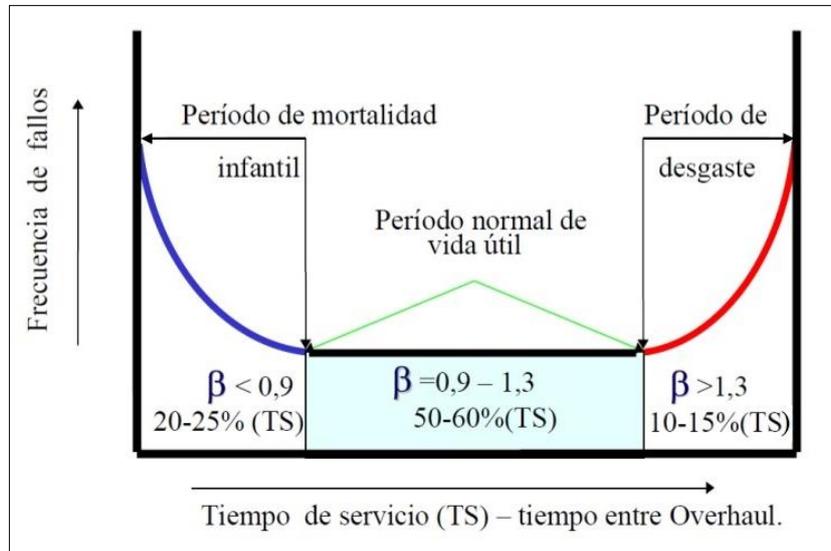
$B = -\beta \ln(\alpha)$ (constante)

$A = \beta$ (coeficiente director)

5. Curva de la Bañera o Curva de Davies

La curva de la bañera es una representación gráfica del comportamiento de la tasa de fallas de un activo físico a lo largo de su vida útil. 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 $\beta > 1$), tal como se muestra en la figura 2.10.

Figura 2.10:
Curva de la bañera o curva de confiabilidad.



Fuente: Parra Márquez C. y Crespo Márquez A. (2012). "Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos" [10].

2.2 Marco Conceptual

Activo: Es un recurso con valor que algo o alguien posee con el propósito de generar un beneficio futuro para ser utilizado en la producción de bienes o servicios, los cuales pueden ser: Físicos, Humanos, Financieros, Tangibles, Intangibles, etc. Los Activos Físicos corresponden a las inversiones de capital necesarios para el desarrollo habitual de las empresas, son aquellos elementos que tienen forma física; es decir, es cualquier activo material que se puede ver y tocar, tales como maquinarias, equipos, edificios, muebles, vehículos, materias primas, herramientas, infraestructura, etc.

Ciclo: En la metodología RCM, el Ciclo de Vida es una serie de etapas identificables a través de las cuales un activo, un proceso, un producto, o una actividad atraviesa durante el periodo de tiempo en el cual conserva su capacidad de utilización, desde la adquisición, operación, mantenimiento, modernización, cese y/o eliminación.

Gestión: Es un conjunto de procedimientos y tareas por una o más personas para coordinar las actividades laborales dentro de una organización, que se llevan a cabo para lograr un determinado objetivo o resultado de calidad.

Proceso: Sucesión de actos, operaciones o acciones planificadas realizados con cierto orden, que se dirigen a un punto o finalidad, con el objetivo de transformar una serie de recursos (input o estado inicial) en un resultado específico que puede ser un producto o servicio (output o estado final). El mantenimiento de activos físicos, el área de mantenimiento de una empresa, fabricación de productos para la construcción son ejemplos de procesos.

Facilitador: Según Moubray John M. (2000). “*Reability-Centred Maintenance*” [9], es aquella persona que se encarga de facilitar la aplicación de la metodología “mantenimiento centrado en confiabilidad” (RCM), el cual realiza una serie de preguntas muy bien estructuradas a un grupo de personas con conocimientos sobre los equipos de un proceso y que finalmente asegura que se alcance el consenso en las respuestas y registrarlas.

Recursos: Según UNE-EN 13306:2018. “*Terminología de Mantenimiento*”, en mantenimiento los recursos incluyen la descripción de cómo realizar el trabajo, referencia a las instrucciones y/o los documentos aplicables, permisos necesarios, piezas de repuesto, conocimientos y habilidades de los mantenedores, herramientas, instrumentos, etc.

Mantenibilidad: Según UNE-EN 13306:2018. “*Terminología de Mantenimiento*”, el concepto de mantenibilidad se refiere a la capacidad de un elemento bajo condiciones de utilización dadas, de ser preservado, o ser devuelto a un estado en el que pueda realizar una función requerida, cuando el mantenimiento se ejecuta bajo condiciones dadas y utilizando procedimientos y recursos establecidos.

Falla: La norma SAE JA1012 (2011). “Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)”, define la falla como la incapacidad de un activo físico de cumplir una función de acuerdo con el parámetro de funcionamiento que el usuario considera aceptable.

Capítulo III. Hipótesis y operacionalización de variable

3.1 Hipótesis General

Un adecuado sistema de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad permitirá incrementar la disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno en Industrias de Plástico.

3.2 Operacionalización de Variables

V.I (x): Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

V.D (y): Disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno.

Variable Independiente: Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

Indicadores: Tiempo medio entre fallas (Hrs); Tiempo medio de reparación de fallos de equipos (Hrs), Horas Disponibles (Hrs); Horas de Operación (Hrs); Horas de falla (Hrs); Tiempo de Inactividad (Hrs); Confiabilidad (%); Costo de Indisponibilidad por fallo (PEN/mes).

Variable Dependiente: Disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno.

Capítulo IV. Metodología de la investigación

4.1 Tipo y diseño de la investigación

4.1.1 Tipo de investigación

El presente trabajo de suficiencia profesional con respecto al enfoque es de tipo aplicada porque utiliza como referencia la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para incrementar la disponibilidad de la línea de extrusión en una empresa dedicada a la fabricación de techos de polipropileno; por lo tanto, esta metodología se contextualizó en la presente investigación. Los temas abarcados son: Análisis de modos y efecto de fallas (AMEF); Análisis de criticidad de equipos; Evaluación de las consecuencias de falla; Diagrama de decisiones; Fundamentos sobre la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad de equipos; Ciclo óptimo para el mantenimiento preventivo de los equipos críticos basada en el análisis de confiabilidad; Distribución Probabilística de Weibull; Mantenimiento Proactivo (tareas preventivas).

El alcance de la investigación del presente trabajo es un estudio del tipo explicativo, el cual tiene relación causal; donde no solo se describe el problema, sino que intenta encontrar las causas del mismo. Dicho esto, se analiza el efecto de la variable independiente (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad) sobre la variable dependiente (Disponibilidad de una línea de extrusión de Polipropileno). Por lo tanto, pondrá en evidencia las repercusiones de una ineficiente gestión y buscará determinar el efecto del programa de mantenimiento centrado en confiabilidad sobre la disponibilidad de máquina de una línea de extrusión en una empresa que se dedica a la fabricación de techos de polipropileno. De manera que, se podrá concluir si la metodología que se propone aplicar logra incrementar la disponibilidad de las maquinas.

4.1.2 Diseño de Investigación

La presente investigación tiene un diseño experimental porque únicamente a través del manejo de diversas estrategias de la variable independiente (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad), se confirma el cambio que genera en la variable dependiente (Disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno).

4.2 Unidad de Análisis

La empresa en estudio se fundó en 1993 con el nombre de Industrias Fibraforte S.A, y desde entonces ha experimentado un fuerte crecimiento en el mercado Interno y también a nivel de Latinoamérica, el cual se ha consolidado en los últimos años; actualmente se ubica en el distrito de Chilca, Provincia de Cañete, Departamento de Lima a la altura del Km 57.5 de la carretera panamericana sur, teniendo una extensión total de terreno 40,000m². Actualmente se dedica a la fabricación y comercialización productos innovadores para el sector construcción como son las planchas de polipropileno, de esta manera brinda una nueva alternativa en techos ligeros. La figura 4.1 muestra una vista satelital de la empresa en estudio.

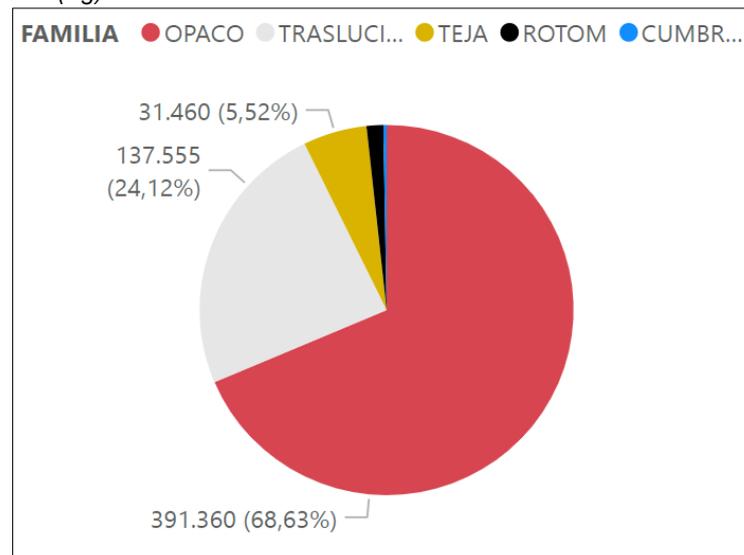
Figura 4.1:
Vista Satelital de la empresa Industrias Fibraforte.



Fuente: Google Earth (2023). "Industrias Fibraforte S.A – Planta Chilca"

La empresa cuenta con tres principales procesos de fabricación: Extrusión (Techos de polipropileno Opaco y Traslucido); Termoformado (tejas y cumbres) y Rotomoldeo (tanques de agua), en la figura 4.2 se observa la producción promedio mensual, donde el proceso de Extrusión representa más del 90% del volumen de producción, luego continúa el proceso Termoformado que supera ligeramente el 5% y finalmente el proceso de Rotomoldeo.

Figura 4.2:
Volumen de producción (Kg).



Fuente: Tomado de la plataforma Power BI de la empresa Industrias Fibraforte S.A (2022), "OEE_YTD_2022-2023".

En la presente investigación se tomó en estudio el proceso de Extrusión de la línea Leader Machinery N°2 de procedencia Taiwanés con una capacidad de 420 kilogramos por hora (Kg/hr), debido a que tiene el mayor volumen de producción y criticidad en toda la planta, los cuales están formadas por cinco etapas:

1. Dosificación y Alimentación: Esta etapa ha sido diseñada para incorporar ingredientes en la entrada de la máquina de procesamiento. La dosificación exacta es muy importante durante la extrusión de plástico. Las piezas que se fabrican con la extrusora deben cumplir con los más altos requisitos de calidad. Por lo tanto, los sistemas de dosificación asignan cantidades predefinidas de material en un tiempo definido en una cantidad específica. La dosificación es influenciada por el tipo y las propiedades del

material de entrada, las condiciones medioambientales (temperatura, humedad, etc.) y el tipo de dispositivo de dosificación.

2. Extrusión: Luego de la alimentación de la materia prima con algunos aditivos como colorantes e inhibidores de UV para mejorar las propiedades y la calidad, empieza la etapa de extrusión, donde la materia prima es sometida a la compactación, cizallamiento, reducción del tamaño de la partícula, transición de fase y degradación molecular, el cual se genera por la acción de los husillos. Por lo tanto, una vez que el material ingresa al segmento de barril y se aprieta, generalmente, cambia a una forma fundida gracias a la alta presión, alta temperatura y el cizallamiento. Finalmente, este fundido se empuja a través del troquel al final del husillo y el cilindro, para tener la forma deseada.

3. Laminado: También llamado Calandra, es un conjunto de rodillos refrigerados por agua, su función es formar de manera definitiva al producto para conseguir las características superficiales en longitud y espesor. La lámina plana pasa en los espacios entre los rodillos y se apoya sobre las superficies, para lograr una formación final tipo plancha plana al mismo tiempo que el producto termina de enfriarse, de esa forma se obtiene las características dimensionales finales.

4. Corrugado: En esta etapa, las planchas planas con ciertas características de espesor y longitud ingresan a un conjunto hornos reblandecedores con resistencias eléctricas para volver a elevarle la temperatura, que posteriormente ingresan a un tren formador compuesto por un conjunto de rodillos de silicona con ciertas medidas de longitud de onda, que permite darle la forma ondeada al producto. Finalmente, el producto vuelve a ser enfriado mediante un conjunto de ventiladores sopladores para lograr que el plástico no retorne a su estado inicial, de cómo ingresó a esta etapa.

5. Corte y Apilado: En esta etapa se utilizan cuchillas circulares para realizar el control y corte de bordes, los cuales poseen una forma irregular debido a que anteriormente el producto estuvo en proceso de plastificación o fundición al momento de la formación de las láminas. A la vez, es necesario el corte de bordes para darle el ancho requerido al

producto final. Asimismo, estos bordes que fueron cortados se transportan mediante unos extractores centrífugos hacia un molino de bordes para posteriormente ser recuperados y regresar a la primera etapa de alimentación y dosificación. Finalmente, el producto es cortado a la medida requerida mediante una cizalla en movimiento accionado con un sistema oleohidráulico que permite apertura y cierre de la cuchilla, luego se realiza el apilado manual del producto final.

Los plásticos de mayor consumo a nivel nacional se denominan “Comodities”, donde se incluyen el Polietileno, PVC, Poliestireno, PET y el Polipropileno, este último posee una gran resistencia al impacto, flexión, altas temperaturas, nivel bajo de conductividad térmica, menor temperatura de fusión y tiene un excelente rango de elongación en comparación con los otros materiales, que permite obtener películas biorientadas.

La empresa Industrias Fibraforte S.A tiene una amplia diversidad en techos de polipropileno que ofrece a los consumidores (opaca y traslucido), además de ser un producto económico, fácil de traslado, ligero, resistente y libre de asbesto.

Plancha Opaca; este producto está formado por un porcentaje de polipropileno reprocesado proveniente de la planta de refiles de la empresa, carbonato de calcio natural obtenido a partir de una caliza de alta pureza, óxido de hierro sintético, copolímero polipropileno clarificado y finalmente un porcentaje de aditivo T-770 para bloqueo óptico y rayos UV, el cual ayudan a mitigar los efectos dañinos de la radiación UV, asimismo reduce las fallas de campo y las devoluciones, mejoran la resistencia a la intemperie y la durabilidad en el exterior, así como también protegen contra el desteñido prematuro del color.

Plancha Traslucido; este producto permite pasar los rayos solares permitiendo una iluminación natural y está formado mayormente con un alto porcentaje de polipropileno virgen importado, aditivo T-770 contra efectos dañinos de los rayos UV, carbonato de calcio en pellets, pigmentos para obtener el color deseado (gris, amarillo, azul y verde) y

finalmente un copolímero, el cual ofrece una alta flexibilidad, maleabilidad y resistencia al impacto.

En el Anexo A, se muestra una fotografía de los productos fabricados por la empresa Industrias Fibraforte S.A en la línea de extrusión de polipropileno en estudio y en el Anexo D se muestra las cinco (05) etapas que conforman el proceso productivo de la línea de extrusión.

4.3 Matriz de consistencia

Título: “Mantenimiento Centrado en la confiabilidad para incrementar la disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno en una industria de plásticos”.

Tabla 4.1:
Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
¿Como impactan negativamente las paradas de maquina no planificadas en la disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno?	Proponer un sistema mantenimiento centrado en la confiabilidad para incrementar la disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno en una industria de plásticos.	Un adecuado sistema de mantenimiento centrado en la confiabilidad permitirá incrementar la disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno en una industria de plásticos.	Disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno.	Mantenimiento centrado en la confiabilidad.	MTBF (hrs) MTTR (hrs) Costo de Indisponibilidad por fallos (PEN/mes) Tiempo de Operación (Hrs) Tiempo de Reparación (Hrs) Confiabilidad (%)	Histórico de Fallos. Histórico de Tiempos de Reparación Revisión de documentación fuente de información de la empresa Revisión de indicadores mensuales de mantenimiento en PowerBi Juicio de expertos del personal operativo

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo V. Desarrollo del trabajo de investigación

5.1 Recolección de Datos

La empresa en estudio, que pertenece a la industria del plástico donde se propone el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) cuenta con una amplia gama de equipos de extrusión, termoformado, peletizado, rotomoldeo y equipos auxiliares. Para el proceso de extrusión se cuenta con un total de cuatro (04) líneas de extrusión de polipropileno, dos (02) modelos Leader Machinery, un (01) modelo Bausano y uno (01) del modelo Casplast. El modelo de mayor volumen de producción y productos de mejor calidad adquirido por la empresa son las dos líneas de extrusión Leader Machinery, los cuales debido a su importancia y criticidad serán modelo de estudio en el desarrollo del presente trabajo de investigación. La línea de extrusión Bausano utiliza en su proceso productivo polipropileno reciclado provenientes de las líneas de paletizado para la producción de planchas opacas y además se tiene la línea de extrusión Casplast para la producción de planchas translúcidas que utiliza polipropileno virgen; por otro lado, la empresa cuenta con tres (03) máquinas termoformadoras para la producción de tejas y dos (02) máquinas de rotomoldeo para la fabricación de tanques de almacenamiento de agua.

Para comenzar con el desarrollo del presente trabajo de suficiencia profesional, primero se determina la línea de extrusión de polipropileno más crítico dentro de la planta de extrusión, por lo que se realizó un análisis de criticidad de las cuatro (04) líneas que la conforman. La tabla 5.1 muestra la evaluación de la criticidad de las líneas productivas correspondientes al proceso de extrusión.

Tabla 5.1:
Evaluación de criticidad proceso de extrusión.

CRITERIOS JERARQUIZACIÓN	LEADER N°1	LEADER N°2	BAUSANO	CASPLAST
FRECUENCIA DE FALLA	4	5	4	4
IMP. OPERACIONAL	3	5	2	2
COSTOS MANT.	3	4	4	3
MANTENIBILIDAD	1	5	5	1
FLEXIBILIDAD	5	5	1	1
IMP. SEGURIDAD	3	3	2	1
IMP. MEDIOAMB.	1	5	5	4
IMP. CALIDAD	3	5	5	5
IMPACTO	3	4.6	2.9	2.35
CRITICIDAD	2	3	2	2

Fuente: Elaboración Propia.

Del análisis realizado por juicio de expertos de los responsables de la operación, se determina que la línea de Extrusión Leader N°2 es la línea más crítica en el proceso de extrusión de la empresa. El procedimiento de evaluación de los criterios de jerarquización se describe en el apartado 2.1.16. Con este resultado se justifica el análisis y la propuesta de incrementar la disponibilidad en la línea, el cual se indica como prioridad para realizar la estrategia de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

Para identificar los factores relacionados a los principales indicadores de mantenimiento como la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, el presente trabajo de suficiencia profesional se realizó fundamentalmente con datos primarios, provenientes de la información proporcionada en forma directa por el personal encargado de la supervisión que trabajan en el área de mantenimiento de la planta de extrusión de polipropileno de la empresa en estudio y revisión de los indicadores productivos de la plataforma Power Bi. Esta información consistió en el historial de fallas y tiempos de reparación de los equipos críticos de la línea de extrusión de polipropileno durante todo el año 2023, el periodo de análisis comprende desde enero hasta setiembre.

En ese sentido, de la plataforma PowerBi de la empresa se obtuvo el historial de los tiempos de reparación de las cinco (05) etapas que conforman la línea de extrusión en

estudio desde el 01.01.2023 al 30.09.2023, la tabla 5.2 muestra los tiempos de paradas no planificadas de la línea de extrusión de polipropileno.

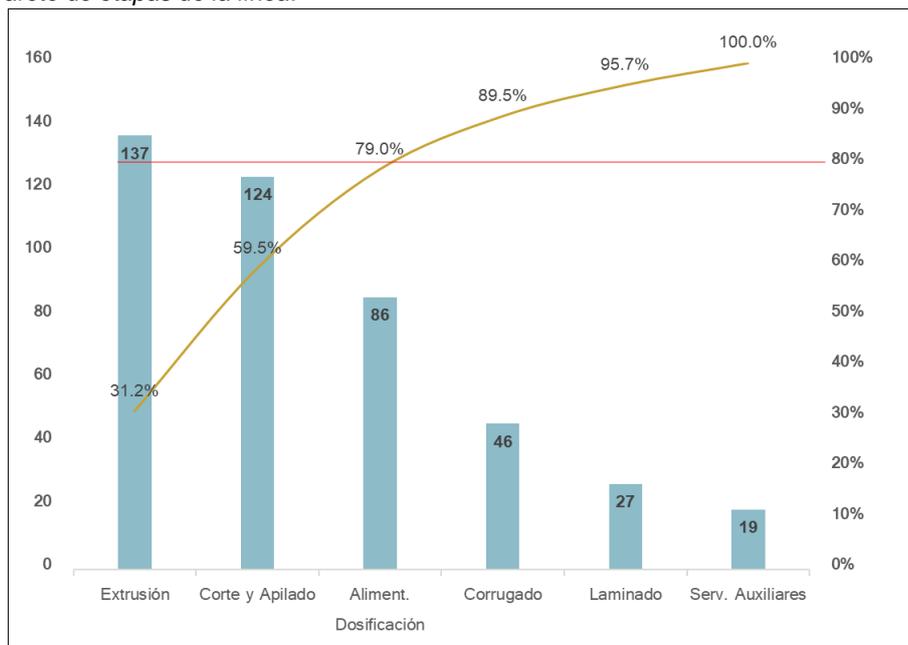
Tabla 5.2:
Tiempos de parada de la línea Leader N°2.

Unidad	Tiempos de Reparación (Hrs)	Porcentaje del total	Porcentaje acumulado
Extrusión	137	31.21%	31.2%
Corte y Apilado	124	28.25%	59.5%
Aliment. Dosificación	86	19.59%	79.0%
Corrugado	46	10.48%	89.5%
Laminado	27	6.15%	95.7%
Serv. Auxiliares	19	4.33%	100.0%
Total	439	100.00%	

Fuente: Tomado de la plataforma Power BI de Fibraforte S.A (2022), "OEE_YTD_2022-2023".

Luego, se utilizó un diagrama de Pareto para ilustrar el impacto de las fallas en cada etapa, lo que permite la visualización gráfica de los datos obtenidos durante la recolección como se muestra en la Figura 5.1. Este tipo de diagrama permite mostrar las etapas "más importantes" en el lado izquierdo del diagrama y las etapas "menos importantes" en el lado derecho del diagrama para que podamos priorizar el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) y la frecuencia óptima de mantenimiento, que son muy importantes en el proceso de RCM.

Figura 5.1:
Diagrama Pareto de etapas de la línea.



Fuente: Elaboración propia.

La información de la imagen anterior muestra gráficamente los tiempos de paradas no planificadas más significativos y prolongados; así como también, las etapas de mayor relevancia que fueron objeto de estudio para el análisis de confiabilidad y proceso de RCM, el Anexo B muestra el historial de falla de estas tres (03) etapas importantes descargados de la plataforma Power Bi de la empresa en estudio.

Asimismo, de la plataforma Power Bi de la empresa se recolectaron el número de paradas no planificadas de la línea de extrusión, el cual se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.3:
Numero de paradas no planificadas por etapa.

Etapa	Ene-23	Feb-23	Mar-23	Abr-23	May-23	Jun-23	Jul-23	Ago-23	Set-23	#Total Paradas
Aliment. y Dosific	3	3	6	5	3	2	1	3	1	27
Corrugado	1	4			3		1		2	11
Corte y Apilado	5	9	4	3	5	2	3	4	6	41
Extrusión	2	3	5	3	2	1	4	3	1	24
Laminado	1	2			1		1		2	7
Serv. Auxiliares				1			1		2	4
Total	12	21	15	12	14	5	11	10	14	114

Fuente: Tomado de la plataforma Power BI de Fibraforte S.A (2022), "OEE_YTD_2022-2023".

Finalmente, de la plataforma PowerBi el Tiempo de Operación es 3482 horas en el periodo de estudio de nueve (09) comprendidos entre enero y setiembre 2023, además se presenta el cálculo de disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno Leader N°2 actualmente antes del RCM, cuyo valor es de 88.80% como se muestra en la tabla 5.4. Este valor de disponibilidad se encuentra por debajo del objetivo establecido de 93% por la empresa en estudio.

Tabla 5.4:
Disponibilidad de la línea antes del RCM.

Sistema	Leader N°2
Tiempo de Reparación (Hrs)	439
Tiempo de Operación (Hrs)	3482
# Total Paradas	114
MTTR	3.85
MTBF	30.54
Disponibilidad	88.80%

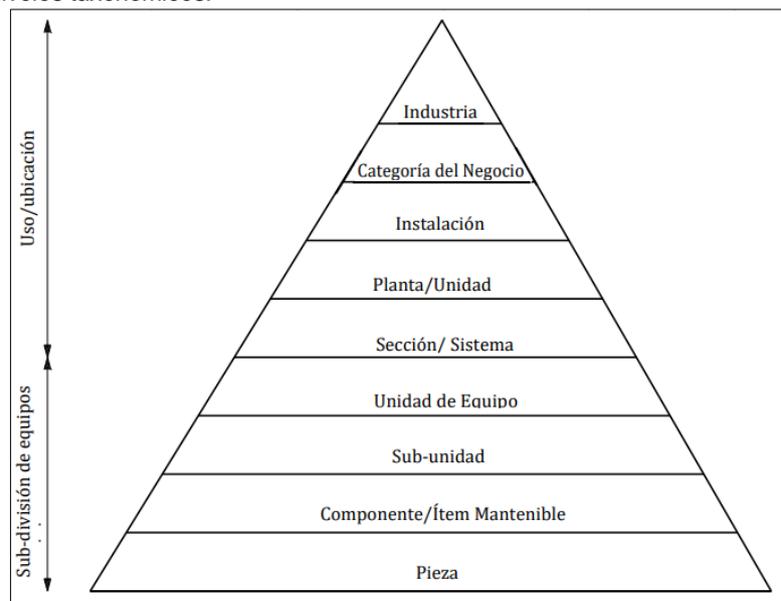
Fuente: Elaboración Propia.

5.2 Procesamiento de la Información

Antes de iniciar con el proceso del RCM se realizó la taxonomía de la línea de extrusión y se clasificó por equipo, sistemas y sub-sistemas para luego continuar con el análisis de confiabilidad de los sistemas críticos, cabe precisar que la confiabilidad de los sistemas combinados representa la confiabilidad del equipo.

Norma ISO 14224:2016, “Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural-recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos”, describe que la taxonomía es una clasificación de ítems en grupos generales basados en factores comunes entre sí, los cuales se jerarquizan en función a la siguiente pirámide descrita en la figura 5.2.

Figura 5.2:
Clasificación de niveles taxonómicos.



Fuente: Tomado de la Norma ISO 14224:2016. “Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural-recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos”.

Para el presente trabajo de suficiencia profesional se realizó la división del equipo: “Línea de Extrusión de Polipropileno” de las tres (03) etapas de mayor relevancia en los tiempos de inactividad evaluados en la figura 5.1, por sistemas y sub-sistemas críticos como muestra el Anexo C.

5.2.1 Análisis de Criticidad

Todos los equipos o sub-sistemas de cada etapa no representan el mismo nivel en la empresa, algunos son sin duda más importantes que otros, y como los recursos de la empresa en estudio no son ilimitados, esos recursos deben distribuirse inteligentemente entre los equipos más importantes de la fábrica. En ese sentido, para determinar el nivel de criticidad de los sus-sistemas de la línea de extrusión de polipropileno “Leader N°2” se consideraron los criterios de jerarquización expuestos en el apartado 2.1.16 y validación por juicio de expertos del personal operativo de la empresa. En la tabla 5.5 muestra los resultados de la evaluación de criticidad de los sub-sistemas de la etapa “Extrusión”.

Tabla 5.5:
Análisis de Criticidad de la etapa “Extrusión”.

CRITERIOS JERARQUIZACIÓN	Extrusor	Cabezal Plano	Bomba de Vacío	Caja Reductora	Motor Eléctrico	Bomba Melt	Unidad Oleohidráulica	Chiller de agua enfriamiento	Tablero de Mando
FRECUENCIA DE FALLA	5	4	3	2	2	4	3	2	3
IMP. OPERACIONAL	5	5	5	5	5	5	5	1	5
COSTOS MANT.	5	4	2	5	3	3	2	5	5
MANTENIBILIDAD	5	5	3	5	5	5	1	5	1
FLEXIBILIDAD	5	3	3	5	5	5	3	3	1
IMP. SEGURIDAD	3	4	2	1	5	2	1	1	5
IMP. MEDIOAMB.	4	1	4	5	1	5	4	5	1
IMP. CALIDAD	5	5	5	5	1	5	1	1	1
IMPACTO	4.8	4.3	3.8	4.6	4.0	4.3	3.2	2.4	3.8
CRITICIDAD	3	3	2	1	1	3	1	0	2

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla anterior muestra que los sub-sistemas de la etapa “Extrusión” con mayor criticidad son: Extrusor, Cabezal Plano y Bomba Melt, los cuales fueron evaluados en el proceso de implementación de RCM. De igual manera, la tabla 5.6 evalúa la criticidad de los sub-sistemas de la etapa “Corte y Apilado”.

Tabla 5.6:
Análisis de Criticidad de la etapa “Corte y Apilado”.

CRITERIOS JERARQUIZACIÓN	Cizalla	Cortador de Bordes	Unidad Oleohidráulica	Consola de Mando	Molino de Bordes	Ventilador. Extractor Molino	Chiller Enfriamiento	Apilador	Tabl. Elect. Variadores
FRECUENCIA DE FALLA	5	3	5	4	3	3	2	2	3
IMP. OPERACIONAL	5	4	5	5	5	2	1	1	5
COSTOS MANT.	2	2	2	5	3	2	3	1	5
MANTENIBILIDAD	1	1	3	1	5	3	5	3	1
FLEXIBILIDAD	5	3	3	1	5	5	3	1	1
IMP. SEGURIDAD	1	4	2	1	2	3	1	1	5
IMP. MEDIOAMB.	2	1	4	2	2	1	1	1	1
IMP. CALIDAD	5	5	5	5	1	5	5	5	1
IMPACTO	3.7	3.3	3.8	3.9	3.8	2.7	2.2	1.5	3.8
CRITICIDAD	3	1	3	2	2	1	0	0	2

Fuente: Elaboración Propia.

Asimismo, la tabla anterior indica que los sub-sistemas de la etapa “Corte y Apilado” con mayor criticidad son: Cizalla y Unidad Oleohidráulica, los cuales fueron evaluados en el proceso de implementación de RCM. Por otro lado, la tabla 5.7 evalúa la criticidad de los sub-sistemas de la etapa “Alimentación y Dosificación”.

Tabla 5.7:
Análisis de Criticidad de la etapa “Alimentación y Dosificación”.

CRITERIOS JERARQUIZACIÓN	Dosificador Ktron PP	Dosificador Ktron CaCO3	Dosificador Ktron Oxido	Ventilador Aspirador aire	Mezclador Gravimétrico	Tablero de Automatismo	Tolva de Aliment. CaCO3	Motorreductor Tolva de CaCO3	Tecle Eléctrico de CaCO3
FRECUENCIA DE FALLA	5	2	3	3	2	3	1	2	3
IMP. OPERACIONAL	5	5	5	1	5	5	2	1	1
COSTOS MANT.	3	3	3	2	1	1	1	2	3
MANTENIBILIDAD	3	3	3	1	1	1	1	3	5
FLEXIBILIDAD	3	3	3	3	5	5	3	3	5
IMP. SEGURIDAD	3	3	3	1	1	5	1	1	5
IMP. MEDIOAMB.	4	4	4	1	1	1	4	4	5
IMP. CALIDAD	5	5	5	1	1	5	1	1	1
IMPACTO	4.1	4.1	4.1	1.4	3.0	3.8	1.8	1.7	2.6
CRITICIDAD	3	1	2	1	0	2	0	0	1

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente los resultados de la tabla anterior, indica que el sub-sistema de la etapa “Alimentación y Dosificación” con mayor criticidad es: Dosificador Ktron PP.

Por lo tanto, en función de su impacto global en la línea de extrusión “Leader N°2” los sub-sistemas seleccionados para la optimización del mantenimiento son: Extrusor, Cabezal Plano, Bomba Melt, Cizalla, Unidad Oleohidráulica y Dosificador Ktron PP.

El Anexo E muestra fotografías de estos seis (06) sub-sistemas críticos.

5.2.2 Análisis de Modos y Efectos de Fallas

En este apartado se desarrolló la hoja de información de los seis (06) sub-sistemas críticos de la línea de extrusión de polipropileno “Leader N°2”, el cual responde a las cuatro (04) primeras preguntas del RCM, se consideró la función principal de cada sus-sistema ubicada en la primera columna, se determinó las fallas funcionales que impide a cada sub-sistema realizar lo que los usuarios quieren que haga ubicado en la segunda columna y fueron codificados alfabéticamente, en las siguientes columnas se describió los principales modos de fallo y los efectos que explican lo que ocurre cuando se presentan. La tabla 5.8 muestra la hoja de información de la Cizalla de Corte.

Tabla 5.8:
Hoja de Información de Cizalla.

FUNCIONES		FALLAS FUNCIONALES		MODO DE FALLA		EFECTOS DE FALLA		
HOJA DE INFORMACION RCM II © 1998 ALADON LTD		PLANTA: IFFSA CHILCA		MAQUINA: LEADER N°2		FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.	FECHA: 20/10/2023	HOJA N°: 1
		SECCIÓN: EXTRUSIÓN		SUB-SISTEMA: CIZALLA		AUDITOR: LOPEZ OTERO	FECHA: 22/10/2023	de: 1
1 Realizar corte de planchas a la medida requerida de acuerdo a los parametros ingresados en el tablero de control.		A Incapaz de realizar el corte de plancha a medida según programado		1	Rotura de cuchilla	Se detiene proceso con un tiempo muerto de 20 horas y un costo de reparación de 8,000 USD.		
				2	Baja presión de aceite en circuito oleohidráulico	Funcionamiento errático de cizalla que paraliza la operación.		
				3	Rotura de Manguera	Contaminación del suelo con aceite y riesgo de incendio.		
				4	Servorreductor trabado	Merma de producto rechazado por Calidad y tres (03) horas de tiempo muerto por revisión.		
				5	Rotura de Vástago de pistón oleohidráulico	Pérdida de la producción por paralización de cizalla tres (08) por reposición por emergencia de pistón.		
				6	Rozamiento de cuchilla	Desgaste prematuro de cuchilla y detiene proceso para realizar calibración por ocho (04) horas.		
				7	Circuito abierto tablero de control	Cizalla de corte se paraliza y se tiene pérdida de producción.		
				8	Servorreductor de avance no transmite	Cizalla de corte se paraliza y se tiene pérdida de producción.		
				9	Rotura de piñón y cremallera	Cizalla de corte se paraliza y se tiene pérdida de producción por cuatro (04) horas por rectificación.		
				10	Cortocircuito de servomotor	Sobrecosto incurrido de 7,000 USD por adquisición de servomotor.		
				11	Conector de manguera con soldadura	Contaminación del suelo con aceite y riesgo de incendio.		
				12	Rotura de sellos en pistón	Cizalla de corte se paraliza y contaminación de aceite.		
				13	Cortocircuito en Tablero de Mando	Riesgo de electrocución de personal operativo y un tiempo muerto de tres (03) horas.		
		B Corte de plancha fuera de medida		1	Encoder atascado y envía señal errónea	Merma de producto rechazado por Calidad.		
				2	Cremallera desgastada	Merma de producto rechazado por Calidad.		
				3	Desgaste de Piñón motriz de motorreductor de avance	Merma de producto rechazado por Calidad.		
				4	Soltura de pernos de anclaje de motorreductor de avance	Merma de producto rechazado por Calidad.		
		C Realiza corte de mala calidad, con rebaba e imperfecciones		1	Desgaste de cuchilla	Producto rechazado por calidad.		
				2	Error en calibración de cuchilla	Producto rechazado por calidad y riesgo de golpe al operador.		
				3	Soltura en Pistón oleohidráulico	Funcionamiento errático de cizalla que paraliza la operación.		

Fuente: Elaboración Propia.

De la misma forma, La tabla 5.9 muestra la hoja de información de la Unidad Oleohidráulica de la cizalla de corte, el cual suministra la potencia hidráulica necesaria para efectuar el corte a 20 bares de presión.

Tabla 5.9:
Hoja de Información de Unidad Oleohidráulica.

HOJA DE INFORMACION RCM II © 1998 ALADON LTD		PLANTA: IFFSA CHILCA		MAQUINA: LEADER N°2		FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1	
		SECCIÓN: EXTRUSIÓN		SUB-SISTEMA: UNIDAD OLEOHIDRÁULICA		AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1	
FUNCIONES		FALLAS FUNCIONALES		MODO DE FALLA		EFECTOS DE FALLA					
1	Suministra potencia Oleohidráulica a cizalla para realizar el corte a una presión de 150 bares.	A	Incapaz de suministrar potencia hidráulica a cizalla.	1	Alto amperaje Motor Eléctrico de bomba de lubricación.	Sobrecalentamiento de motor y protección térmica se acciona.					
				2	Cortocircuito en Motor Eléctrico de bomba de aceite.	Incremento de niveles de ruido y derrame de aceite.					
				3	Soltura en bornera de motor eléctrico.	Falso contacto y sobrecorriente en motor eléctrico.					
				4	Caída de Presión de bomba.	Se detiene cizalla por pérdida de presión en circuito oleohidráulico y tiempo muerto de seis (06) horas por cambio.					
				5	Filtros bloqueados o restringidos.	Aumento de temperatura de aceite y el sensor de temperatura detiene cizalla.					
				6	Obstrucción en línea de succión de bomba.	Bomba Oleohidráulica no succiona, contaminación de aceite, circuito pierde presión y paraliza cizalla de corte.					
				7	Electroválvula bloqueada.	Pérdida de la producción por paralización de cizalla tres (03) por reposición por emergencia de electroválvula.					
				8	OilCooler obstruido.	Aumenta temperatura de aceite y degradación prematura.					
				9	Rotura de impulsor de bomba.	Se detiene proceso, con tiempo muerto de ocho (08) horas.					
		B	Pérdida de contención (fuga de aceite).	1	Fuga de aceite en el tanque.	Sobrecalentamiento de bomba y derrame de aceite en el suelo, el cual representa dos (02) de tiempo muerto por reparación.					
				2	Rotura de Manguera.	Contaminación del suelo con aceite y riesgo de incendio.					
				3	Conector de manguera con soltura.	Contaminación del suelo con aceite y riesgo de incendio.					
		C	Realiza corte de mala calidad, con rebaba e imperfecciones.	1	Baja presión de aceite en circuito oleohidráulico.	Funcionamiento errático de cizalla que paraliza la operación.					
				2	Mangueras obstruidas.	Funcionamiento errático de cizalla que paraliza la operación.					

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se muestra la hoja de información del Extrusor, el cual permite realizar el transporte, compresión y homogenización de la materia prima fundido hacia la bomba Melt. Este sub-sistema se divide en dos (02) partes: Husillo Doble y Segmentos de Barril. La tabla 5.10 muestra la hoja de información del Husillo Doble.

Tabla 5.10:
Hoja de Información de Husillo Doble.

HOJA DE INFORMACION RCM II © 1998 ALADON LTD		PLANTA: IFFSA CHILCA		MAQUINA: LEADER N°2		FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1	
		SECCIÓN: EXTRUSIÓN		SUB-SISTEMA: HUSILLO DOBLE		AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1	
FUNCIONES		FALLAS FUNCIONALES		MODO DE FALLA		EFECTOS DE FALLA					
1	Realizar el transporte, compresión, fusión y homogenización de la materia prima (Polipropileno virgen + aditivos).	A	Incapaz de homogenizar la materia prima.	1	Atascamiento de segmento de husillo.	Pérdida de la producción por paralización de extrusor.					
				2	Segmento de husillo desgastado.	Pérdida de la producción por paralización de extrusor y compresión deficiente.					
				3	Rotura de segmento de husillo.	Pérdida de la producción por paralización y sobre costo incurrido de 2,000 USD por cambio de segmentos.					
				4	Rotura de eje central.	Sobre costo incurrido de 10,000 USD por reparación de eje.					
				5	Material solidificado en superficie de husillo.	Tiempo muerto para limpieza y reinicio de proceso aprox. 8 horas.					
				6	Incustración por elementos extraño.	Cambio prematuro de husillo y sobre costo incurrido mayores a 5,000 USD.					
				7	Temperatura de Agua de enfriamiento se incrementa.	Paraliza la producción y se incrementa el riesgo de rotura.					
				8	Sonda de presión dañado.	Incremento de la presión y pérdida de producción por paralización.					
		B	No gira a la velocidad correcta.	1	Acumulación de materia prima.	Tiempo muerto para desatoro y reinicio de proceso aprox. cuatro (04) horas.					
				2	No se distribuye el calor a lo largo del husillo.	Husillo no mezcla adecuadamente la materia prima.					
				3	Superficie de husillo carbonizado.	Tiempo muerto para extracción carbón impregnado en superficie del husillo y reinicio de proceso aprox. 8 horas.					

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla 5.11 muestra la hoja de información del Segmento Barril, el cual permite la transmisión de energía eléctrica térmica entre 170°C a 180°C para fundir la materia prima.

Tabla 5.11:
Hoja de Información de Segmento Barril.

HOJA DE INFORMACION RCM II © 1998 ALADON LTD		PLANTA: IFFSA CHILCA		MAQUINA: LEADER N°2		FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1			
		SECCIÓN: EXTRUSIÓN		SUB-SISTEMA: BARRIL CALEFACTOR		AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1			
FUNCIONES		FALLAS FUNCIONALES		MODO DE FALLA		EFECTOS DE FALLA							
1	Contener el material plastico.	A	Perdida de material por la tapa de salida de gases.	1	Cabezal obstruido.	El material no fluye, barril se llena de materia prima incrementando la presión.							
				2	Alta velocidad de husillo.	Material no se funde adecuadamente y paraliza producción.							
				3	Resistencia electrica de banda abierta.	No fluye el material, se estanca en barril y se incrementa la presión en el interior.							
				4	Resistencia electrica de banda con bajo aislamiento.	Paraliza toda la linea productiva y el cambio genera sobre costo.							
				5	Sobrecalentamiento de cable eléctrico de resistencia.	Tiempo muerto por revisión y cambio de resistencia aprox 2horas.							
				6	Desgaste de segmentos de husillos.	Perdida de compresión en barril y sobre costo por cambio de segmentos aprox 2,000 USD							
		B	Caída de presión de material.	1	Barril corroído en la superficie interior.	Material se contamina y no se funde adecuadamente.							
				2	Fisuras en superficie interior.	Barril es incapaz de soportar altas presiones que provoca fugas de material y con ello paralización de la extrusora aprox. 20horas.							
				3	Incrustación de particulas abrasivas en superficie interior de barril.	Acumulación de material fundido que genera obstrucción y paraliza la producción por siete (07) días.							
				4	Erosión de barril por contacto con materia prima.	La holgura presentada por la erosión no favorece la fricción necesaria para fundir y homogenizar el material, paralizando la producción por veinte (20) días.							
				1	Resistencia electrica con bajo aislamiento.	No se logra alcanzar la temperatura de fusión requerida, se paraliza la producción para corregir el problema de seis (06) horas.							
				2	Cable eléctrico expuesto.	La resistencia eléctrica no caliente y se paraliza la producción por ocho (08) horas.							
				3	Soltura de terminales.	No se logra alcanzar la temperatura de fusión requerida y se requiere dos (02) para corregir el problema.							
				4	Bornera de conexión quemados.	No se logra alcanzar la temperatura de fusión requerida y se requiere dos (02) horas para cambio de bornera ceramica.							
2	Transferir energia eléctrica termica generada por resistencias electricas a la materia prima entre 180 - 250°C.	A	Incapaz de transferir energia termica.	5	Fuga en Tubería de agua de enfriamiento.	Paraliza la producción y se incrementa el riesgo de cortocircuito en resistencias eléctricas.							
				B	No caliente a la temperatura programada 250°C.	1	Termocupla no envía señal.	No se logra monitorear la temperatura del material y tampoco homogenizar el material.					
						2	Termocupla bloqueada.	Se paraliza la producción por dos (02) para sustitución.					
						3	Cable de termocupla dañado	Material no logra fundirse y se paraliza la producción por doce (12) horas.					
						4	Controlador no envía señal.	Cabezal pierde temperatura y no permite flujo de material, se paraliza la producción por dos (02) horas para sustitución.					

Fuente: Elaboración Propia.

Asimismo, la tabla 5.12 muestra la hoja de información de la Bomba Melt, el cual permite estabilizar la presión de trabajo del flujo de material fundido a una presión constante.

Tabla 5.12:
Hoja de Información de Bomba Melt.

HOJA DE INFORMACION RCM II © 1998 ALADON LTD	PLANTA: IFFSA CHILCA	MAQUINA: LEADER N°2	FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.	FECHA: 20/10/2023	HOJA N°: 1
	SECCIÓN: EXTRUSIÓN	SUB-SISTEMA: BOMBA MELT	AUDITOR: LOPEZ OTERO	FECHA: 22/10/2023	de: 1
FUNCIONES		FALLAS FUNCIONALES	MODO DE FALLA	EFECTOS DE FALLA	
1	Transfiere y homogeniza material fundido del Husillo hacia el cabezal plano a una presión constante.	A Incapaz de transferir material al cabezal plano.	1 Rodamientos agarrotados.	Producción se paraliza ocasionando una parada de cuatro (04) días.	
			2 Soltura de engranajes.	Producción se paraliza ocasionando una parada de dos (02) días.	
			3 Atascamiento de engranajes.	Cardan no gira y paraliza la bomba melt, ocasionando una parada de cuatro (04) horas para revisión.	
			4 Trabamiento de eje cardan.	Bomba Melt se detiene y se paraliza la producción.	
			5 Motorreductor trabado.	Ruido interno en la caja reductora y aumenta la vibración.	
			6 Motor Eléctrico cortocircuitado.	Se paraliza la producción y ocasiona una parada de tres (03) días para reparación de motor eléctrico, el cual representa un costo de 2,500 USD.	
	Transfiere pero no estabiliza la presión.	B	1 Engranajes desgastados.	Genera ruido y sonido extraño, bomba melt pierde eficiencia ocasionando una reducción de la presión de trabajo.	
			2 Entrada de bomba obstruido.	El producto presenta variación de espesor y se detiene el proceso.	
			3 Material solidificado en engranajes.	No ingresa material con la presión adecuada.	
			4 Fugas de material por carcasa.	Contaminación del suelo y aumento de merma.	
			5 Bajo nivel de aceite en reductor.	La temperatura del motorreductor se incrementa y los dientes de engranajes se desgastan hasta la rotura, el cual ocasiona una parada de la bomba de ocho (08) de reparación.	
			6 Engranajes de reductor desgastados.	No hay transmisión de potencia hacia el eje cardan.	
			7 Sobrecarga de motor eléctrico.	Motor Eléctrico pierde fuerza y no transmite la potencia requerida.	

Fuente: Elaboración Propia.

También, la tabla 5.13 muestra la hoja de información del Cabezal Plano, el cual permite convertir el flujo de materia prima a una lámina con espesor y ancho especificado por producción.

Tabla 5.13:
Hoja de Información de Cabezal Plano.

HOJA DE INFORMACION RCM II © 1998 ALADON LTD		PLANTA: IFFSA CHILCA		MAQUINA: LEADER N°2		FACILITADOR:		FECHA:		HOJA N°: 1	
		SECCIÓN: EXTRUSIÓN		SUB-SISTEMA: CABEZAL PLANO		ZAVALA ROMERO E.		20/10/2023			
FUNCIONES		FALLAS FUNCIONALES		MODO DE FALLA		EFECTOS DE FALLA					
1	Permite homogenizar el material plastificado proveniente de la extrusora, formando una lamina de plastico espesor y ancho definido.	A	Incapaz de homogenizar el material plastificado.	1	Calibración inadecuado.	Incremento de merma y producción rechazados por calidad.					
				2	Conducto distribuidor obstruido.	Material no es homogenizado y presenta rugosidad.					
				3	Incrustación de carbon en superficie interna de cabezal.	El producto presenta variación de espesor y rayaduras.					
				4	Rotura de pernos de regulación.	Lamina plástica que sale del cabezal comienza a abrirse por los extremos, abultamientos y detención de la producción.					
				5	Resistencia eléctrica abierto con conexión corroída.	La temperatura no alcanza el valor establecido, Producto se enfría y se adelgaza con un tiempo de paro de maquina de cuatro (04) horas.					
				6	Desgaste de cabezal por abrasión.	El producto presenta variación de espesor y rayaduras.					
				7	Controlador bloqueado.	El espesor del producto varía y sale fuera de sus límites de especificación, menor temperatura el espesor es mas delgado, mayor temperatura el producto se quema. Tiempo muerto 3 horas.					
				8	Termocupla no envia señal.	El espesor del producto varía y sale fuera de sus límites de especificación, menor temperatura el espesor es mas delgado, mayor temperatura el producto se quema. Tiempo muerto 3 horas.					
2	Transferir al material una temperatura entre 180°C y 240°C.	A	Incapaz de transferir temperatura al material.	1	Rele de estado solido abierto.	Corriente de motor principal se eleva, la máquina se detiene por alarma en el variador de frecuencia principal. El producto saliente del cabezal no tiene la forma requerida. Tiempo muerto 3 horas.					
				2	Resistencia eléctrica no emite calor.	Material se forma protuberancias a la salida del cabezal por no tener la temperatura adecuada, tiempo muerto por parada de cuatro (04) horas.					
				3	Conector de Cable de resistencia eléctrica abierto.	Material se forma protuberancias a la salida del cabezal por no tener la temperatura adecuada, tiempo muerto por parada de cuatro (04) horas.					
		B	Transfiere temperatura fuera de los rangos establecidos.	1	Resistencia eléctrica con fuga a tierra.	La temperatura no alcanza su valor preestablecido, el material se adelgaza. Tiempo muerto 4 horas por cambio de resistencia.					
				2	Señal de Termocupla fuera de rango.	Si la temperatura del cabezal es menor que lo establecido el material será demasiado delgado. Por el contrario, si la temperatura de eleva demasiado la lámina tendrá espesor mayor y se quemará.					
				3	Controlador de temperatura dañado por desgaste de vida util.	Si la temperatura del cabezal es muy superior al establecido el material adquiere forma liquida, el cual pierde sus propiedades mecanicas y genera merma.					
		C	Transfiere temperatura de forma discontinua.	1	Terminales de Rele de estado solido hacen falsos contactos.	El espesor del producto varía y sale fuera de sus límites de especificación. Tiempo muerto 3 horas.					
				2	Termocupla no envia señal a controlador.	El espesor del producto varía y sale fuera de sus límites de especificación y es rechazado por Calidad. Tiempo muerto 3 horas.					

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, la tabla 5.14 muestra la hoja de información del dosificador Ktron PP, el cual permite suministrar la materia prima al extrusor a una proporción constante controlador por el módulo de control Ktron (KCM por sus siglas en ingles).

Tabla 5.14:
Hoja de Información de Dosificador Ktron PP.

FUNCIONES		FALLAS FUNCIONALES		MODO DE FALLA		EFECTOS DE FALLA	
HOJA DE INFORMACION RCM II © 1998 ALADON LTD	PLANTA: IFFSA CHILCA	MAQUINA: LEADER N°2		FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.	FECHA: 20/10/2023	HOJA N°: 1	
	SECCIÓN: EXTRUSIÓN	SUB-SISTEMA: DOSIFICADOR KTRON PP		AUDITOR: LOPEZ OTERO	FECHA: 22/10/2023	de: 1	
1	Dosificar Materia Prima a una determinada formula de porcentaje (%) de polipropileno según sea el tipo de plancha hacia el extrusor.	A	Incapaz de dosificar materia prima hacia el extrusor.	1	KCM quemado.	Se paraliza la producción por una (01) semana para adquisición de KCM con un costo superior a 10,000 USD.	
				2	Circuito de control abierto.	Dosificación de PP se paraliza y producto no tiene el porcentaje adecuado de mezcla.	
				3	Tornillo alimentador trabado.	Dosificación de PP se paraliza.	
				4	Rotura de faja de alimentador de tornillo.	Dosificador de PP se paraliza y se tiene un tiempo muerto de tres (03) horas.	
				5	Rodamientos agarrotados.	Alimentación de material fuera de los parametros estableciendo que ocasiona mala calidad en el producto.	
				6	Válvula compuerta no acciona.	Tolva de dosificador Ktron queda sin material y se paraliza producción.	
				7	Electroválvula bloqueada.	Dosificador de PP se paraliza por falta de accionamiento en los sistemas neumaticos de apertura/ cierre.	
		B	Dosificar materia prima al extrusor a una fórmula de porcentaje (%) menor al programado.	1	Error de configuración de KCM.	Producto rechazado por calidad.	
				2	Tornillo alimentador obstruido.	Alimentación de materia prima al extrusor queda restringido que ocasiona error de formulación %.	
				3	Señal de sensor de nivel errónea.	Tolva de dosificador Ktron queda sin material y se paraliza producción.	
				4	Pistón neumático de apertura no acciona.	Ocasiona que el llenado de la tolva no sea constante, lo que ocasiona que la mezcla de materia prima al extrusor este fuera de los valores establecidos.	
				5	Válvula compuerta no acciona completamente.	La mezcla de materia prima esta fuera de los valores establecidos, lo que ocasiona una parada del dosificador Ktron.	

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.3 Cálculo de la frecuencia optima de Mantenimiento

La optimización de la gestión mantenimiento se fundamenta en determinar el tiempo o ciclo óptimo para la planificación y programación del mantenimiento preventivo de los sub-sistemas críticos de la línea de extrusión, en base a una confiabilidad de clase mundial proyectada de 85% y en proponer tareas proactivas para cada sub-sistema crítico de la línea de extrusión.

En esta sección, se evaluó el nivel de confiabilidad de los equipos críticos de la línea de extrusión, para lo cual se utilizó la Distribución probabilística de Weibull y el historial de falla durante el periodo de estudio desde el 01.01.2023 al 30.09.2023 descrito en el Anexo N°2.

1. Sub-Sistema Cizalla de Corte

La Tabla 5.15 muestra el ajuste de parámetros de Distribución de Weibull modelo de ranking ajustado para el historial de fallas de la Cizalla de Corte, el cual forma parte de la etapa Corte y Apilado.

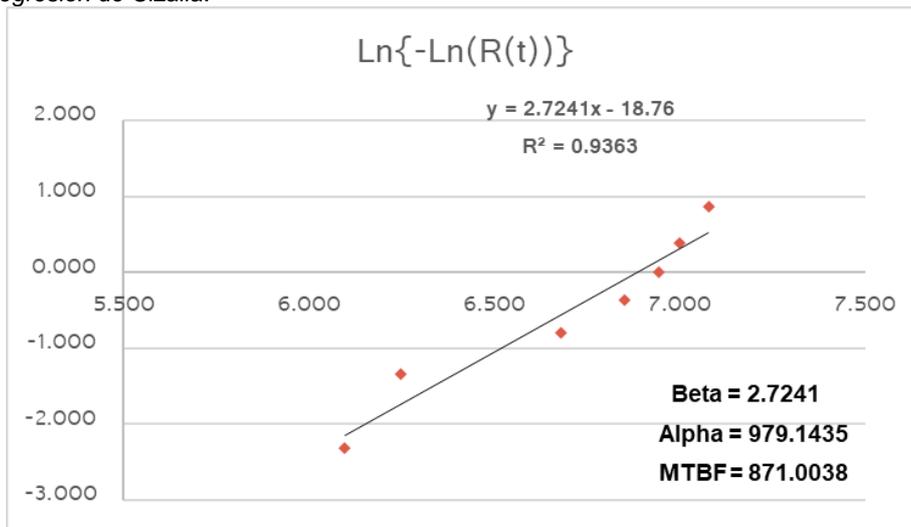
Tabla 5.15:
Distribución de Weibull de Cizalla.

TiempoFunción Evento Hrs	ParoFibraForte	Ranking global de eventos Kj	Ranking Ajustado de falla rj	F(t)	R(t)	Ln(t)	Ln{-Ln(R(t))}
445	PARO MECANICO	1	1.0000	0.0946	0.9054	6.098	-2.309
518	PARO MECANICO	2	2.0000	0.2297	0.7703	6.250	-1.343
797	PARO MECANICO	3	3.0000	0.3649	0.6351	6.681	-0.790
944	PARO MECANICO	4	4.0000	0.5000	0.5000	6.850	-0.367
1037	PARO MECANICO	5	5.0000	0.6351	0.3649	6.944	0.008
1095	PARO MECANICO	6	6.0000	0.7703	0.2297	6.999	0.386
1186	PARO ELECTRICO	7	7.0000	0.9054	0.0946	7.078	0.858

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a graficar los puntos correspondientes a $\ln(t)$ y $\ln\{-\ln(R(t))\}$ como muestra la figura 5.3.

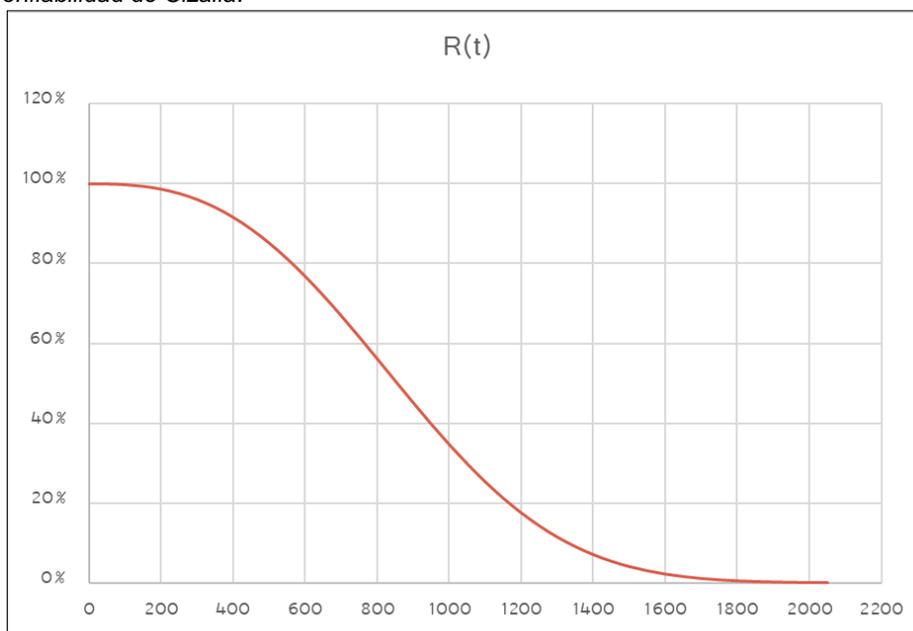
Figura 5.3:
Recta de Regresión de Cizalla.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtiene un $\text{MTBF} = 871.0038$ horas y con los valores de Beta (β) y Alpha (α) calculados se obtiene se graficó la curva de la Función de Supervivencia de la Distribución de Weibull (confiabilidad) con relación al tiempo expresado en horas, como se muestra en la figura 5.4.

Figura 5.4:
Curva de Confiabilidad de Cizalla.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior, se observa que para obtener una confiabilidad de 85% para industria de clase mundial, el ciclo óptimo de mantenimiento de la Cizalla corresponde a

503 horas o **cada 21 días** y se encuentra en la etapa de desgaste de la curva de la bañera ($\beta > 1$), debido a ello requiere efectuar un mantenimiento proactivo.

2. Sub-Sistema Unidad Oleohidráulica

La Tabla 5.16 muestra el ajuste de parámetros de Distribución de Weibull modelo de ranking ajustado para el historial de fallas de la Unidad Oleohidráulica, el cual forma parte de la etapa Corte y Apilado.

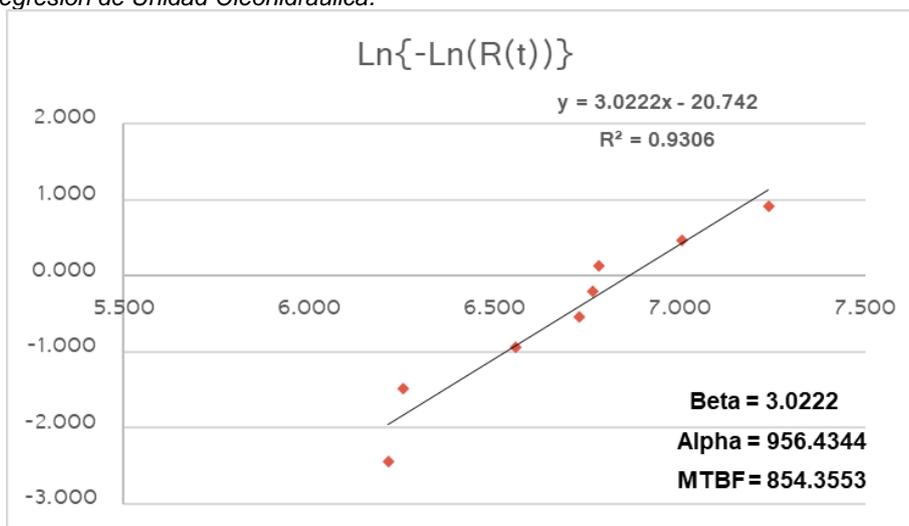
Tabla 5.16
Distribución de Weibull de Unidad Oleohidráulica.

TiempoFunción Evento Hrs	ParoFibraForte	Ranking global de eventos Kj	Ranking Ajustado de falla rj	F(t)	R(t)	Ln(t)	Ln{-Ln(R(t))}
500	PARO MECANICO	1	1.0000	0.0833	0.9167	6.215	-2.442
520	PARO MECANICO	2	2.0000	0.2024	0.7976	6.254	-1.487
704	PARO MECANICO	3	3.0000	0.3214	0.6786	6.557	-0.947
836	PARO ELECTRICO	4	4.0000	0.4405	0.5595	6.729	-0.544
867	PARO ELECTRICO	5	5.0000	0.5595	0.4405	6.765	-0.199
881	PARO MECANICO	6	6.0000	0.6786	0.3214	6.781	0.127
1104	PARO ELECTRICO	7	7.0000	0.7976	0.2024	7.007	0.469
1393	PARO MECANICO	8	8.0000	0.9167	0.0833	7.2392	0.910

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a graficar los puntos correspondientes a $\ln(t)$ y $\ln\{-\ln(R(t))\}$ como muestra la figura 5.5.

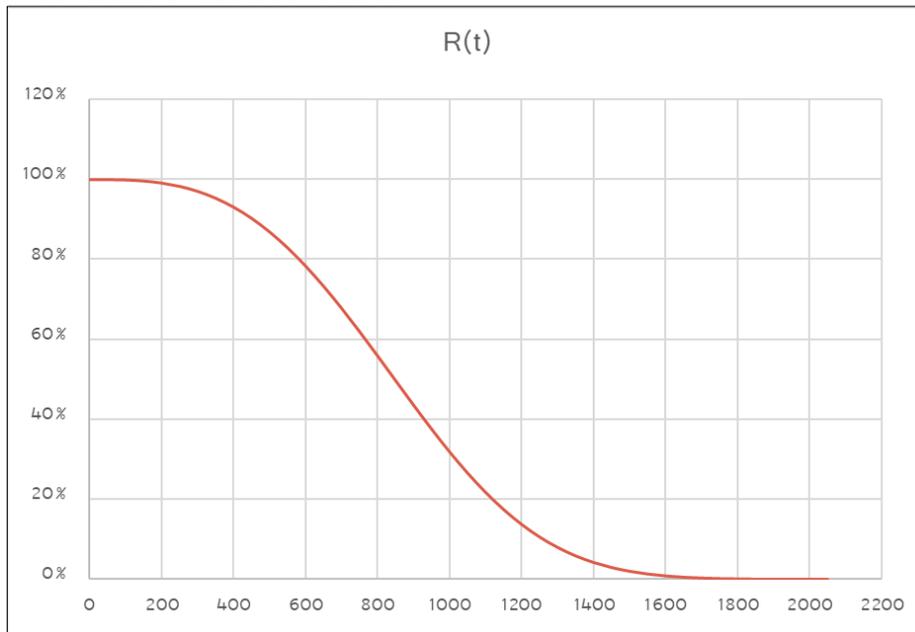
Figura 5.5:
Recta de Regresión de Unidad Oleohidráulica.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtiene un MTBF = 854.3553 horas y con los valores de Beta (β) y Alpha (α) calculados se realizó la curva de la Función de Supervivencia de la Distribución de Weibull (confiabilidad) con relación al tiempo expresado en horas, como se muestra en la figura 5.6.

Figura 5.6:
Curva de Confiabilidad de Unidad Oleohidráulica.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior, se observa que para obtener una confiabilidad de 85% de clase mundial, el ciclo óptimo de mantenimiento de la Unidad Oleohidráulica corresponde a 524 horas o **cada 22 días** y se encuentra en la etapa de desgaste de la curva de la bañera ($\beta > 1$), debido a ello requiere efectuar un mantenimiento proactivo.

3. Sub-Sistema Extrusor

La Tabla 5.17 muestra el ajuste de parámetros de Distribución de Weibull modelo de ranking ajustado para el historial de fallas del Extrusor, el cual forma parte de la etapa Extrusión.

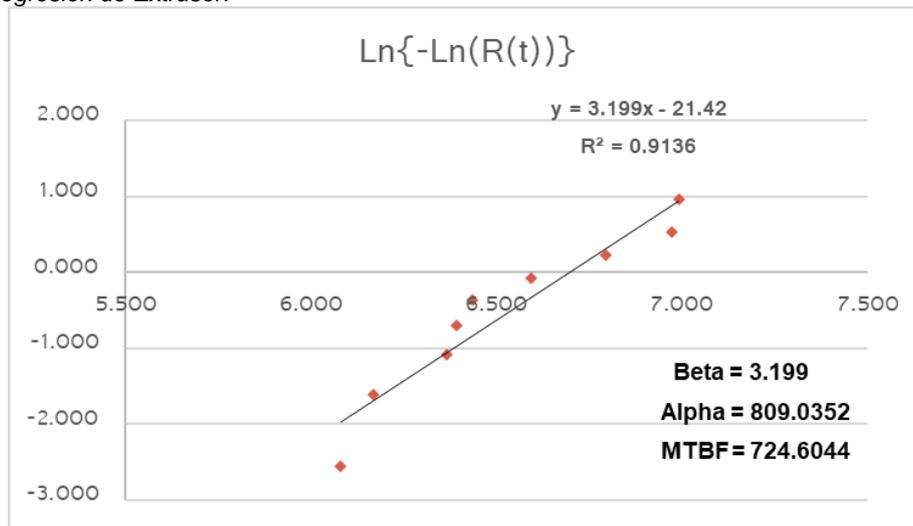
Tabla 5.17:
Distribución de Weibull de Extrusor.

TiempoFuncion Evento Hrs	ParoFibraForte	Ranking global de eventos Kj	Ranking Ajustado de falla rj	F(t)	R(t)	Ln(t)	Ln{-Ln(R(t))}
437	PARO MECANICO	1	1.0000	0.0745	0.9255	6.080	-2.559
478	PARO ELECTRICO	2	2.0000	0.1809	0.8191	6.170	-1.612
582	PARO ELECTRICO	3	3.0000	0.2872	0.7128	6.366	-1.083
598	PARO MECANICO	4	4.0000	0.3936	0.6064	6.394	-0.693
624	PARO MECANICO	5	5.0000	0.5000	0.5000	6.436	-0.367
731	PARO MECANICO	6	6.0000	0.6064	0.3936	6.594	-0.070
894	PARO MECANICO	7	7.0000	0.7128	0.2872	6.796	0.221
1069	PARO ELECTRICO	8	8.0000	0.8191	0.1809	6.974	0.537
1087	PARO ELECTRICO	9	9.0000	0.9255	0.0745	6.991	0.955

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a graficar los puntos correspondientes a $\text{Ln}(t)$ y $\text{Ln}\{-\text{Ln}(R(t))\}$ como muestra la figura 5.7.

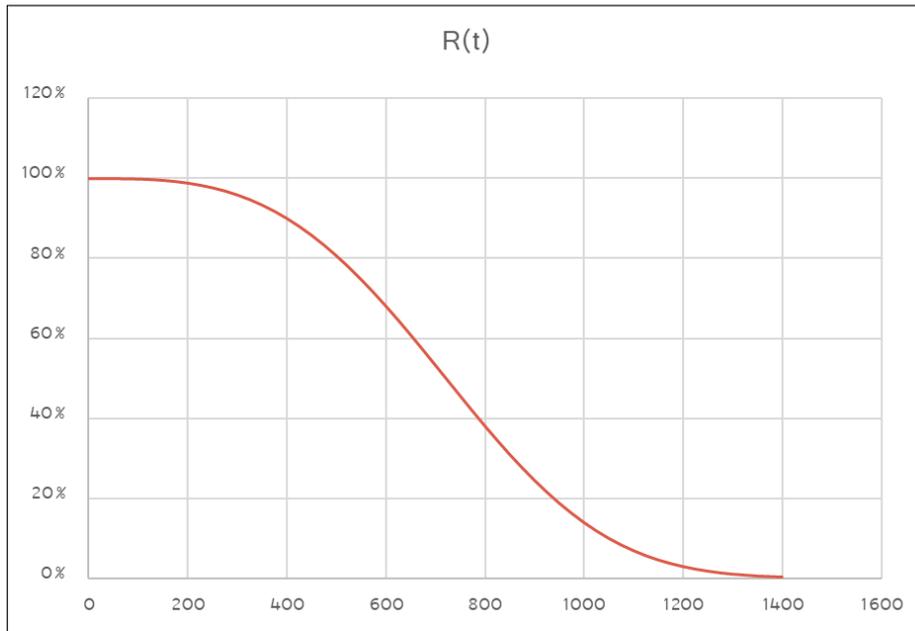
Figura 5.7:
Recta de Regresión de Extrusor.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtiene un $\text{MTBF} = 724.6044$ horas y con los valores de Beta (β) y Alpha (α) calculados se realizó la curva de la Función de Supervivencia de la Distribución de Weibull (confiabilidad) con relación al tiempo expresado en horas, como se muestra en la figura 5.8.

Figura 5.8:
Curva de Confiabilidad de Extrusor.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior, se observa que para obtener una confiabilidad de 85% de clase mundial, el ciclo óptimo de mantenimiento de Extrusor corresponde a 458 horas o **cada 19 días** y se encuentra en la etapa de desgaste de la curva de la bañera ($\beta > 1$), debido a ello requiere efectuar un mantenimiento proactivo.

4. Sub-Sistema Bomba Melt

La Tabla 5.18 muestra el ajuste de parámetros de Distribución de Weibull modelo de ranking ajustado para el historial de fallas de Bomba Melt, el cual forma parte de la etapa Extrusión.

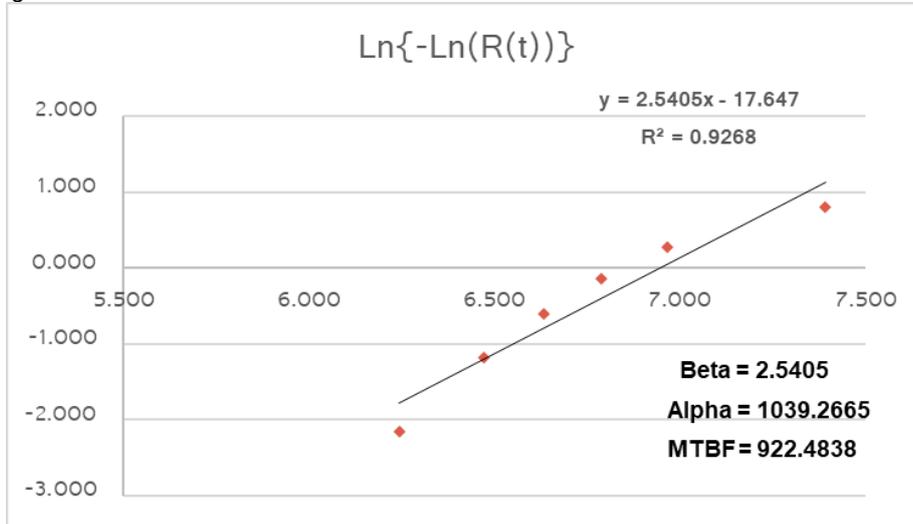
Tabla 5.18:
Distribución de Weibull de Bomba Melt.

TiempoFuncion Evento Hrs	ParoFibraForte	Ranking global de eventos Kj	Ranking Ajustado de falla rj	F(t)	R(t)	Ln(t)	Ln{-Ln(R(t))}
515	PARO MECANICO	1	1.0000	0.1094	0.8906	6.244	-2.156
647	PARO ELECTRICO	2	2.0000	0.2656	0.7344	6.472	-1.175
760	PARO ELECTRICO	3	3.0000	0.4219	0.5781	6.633	-0.602
886	PARO MECANICO	4	4.0000	0.5781	0.4219	6.787	-0.147
1060	PARO MECANICO	5	5.0000	0.7344	0.2656	6.966	0.282
1623	PARO MECANICO	6	6.0000	0.8906	0.1094	7.392	0.794

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a graficar los puntos correspondientes a $\ln(t)$ y $\ln\{-\ln(R(t))\}$ como muestra la figura 5.9.

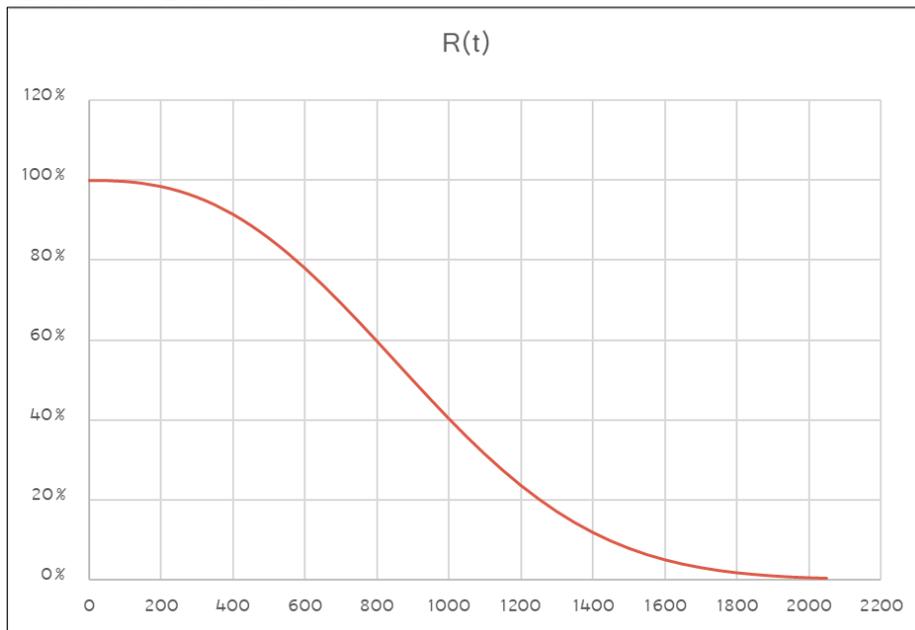
Figura 5.9:
Recta de Regresión de Bomba Melt.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtiene un $MTBF = 922.4838$ horas y con los valores de Beta (β) y Alpha (α) calculados se realizó la curva de la Función de Supervivencia de la Distribución de Weibull (confiabilidad) con relación al tiempo expresado en horas, como se muestra en la figura 5.10.

Figura 5.10:
Curva de Confiabilidad de Bomba Melt.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior, se observa que para obtener una confiabilidad de 85% de clase mundial, el ciclo óptimo de mantenimiento de Bomba Melt corresponde a 508 horas o **cada 21 días** y se encuentra en la etapa de desgaste de la curva de la bañera ($\beta > 1$), debido a ello requiere efectuar un mantenimiento proactivo.

5. Sub-Sistema Cabezal Plano

La Tabla 5.19 muestra el ajuste de parámetros de Distribución de Weibull modelo de ranking ajustado para el historial de fallas de Cabezal Plano, el cual forma parte de la etapa Extrusión.

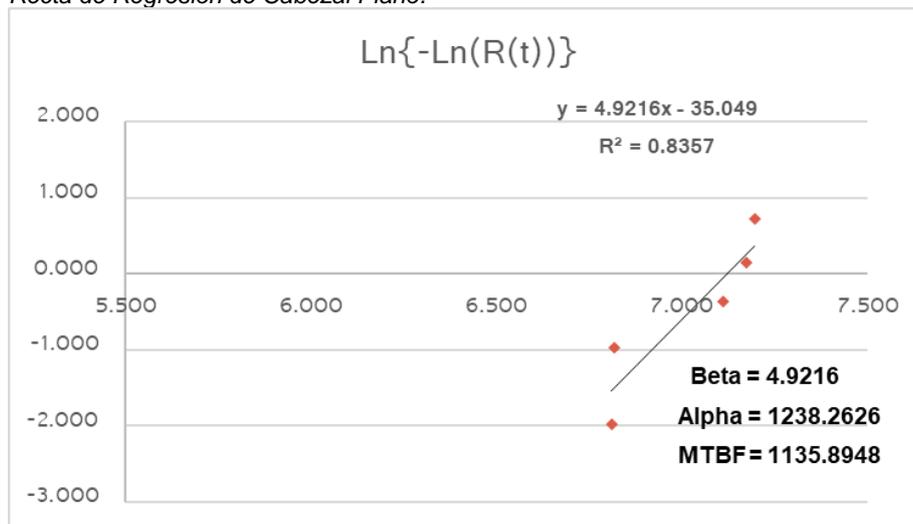
Tabla 5.19:
Distribución de Weibull de Cabezal Plano.

TiempoFuncion Evento Hrs	ParoFibraForte	Ranking global de eventos Kj	Ranking Ajustado de falla rj	F(t)	R(t)	Ln(t)	Ln{-Ln(R(t))}
907	PARO MECANICO	1	1.0000	0.1296	0.8704	6.810	-1.974
913	PARO ELECTRICO	2	2.0000	0.3148	0.6852	6.817	-0.973
1227	PARO ELECTRICO	3	3.0000	0.5000	0.5000	7.112	-0.367
1304	PARO MECANICO	4	4.0000	0.6852	0.3148	7.173	0.145
1335	PARO MECANICO	5	5.0000	0.8704	0.1296	7.197	0.714

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a graficar los puntos correspondientes a Ln(t) y Ln{-Ln(R(t))} como muestra la figura 5.11.

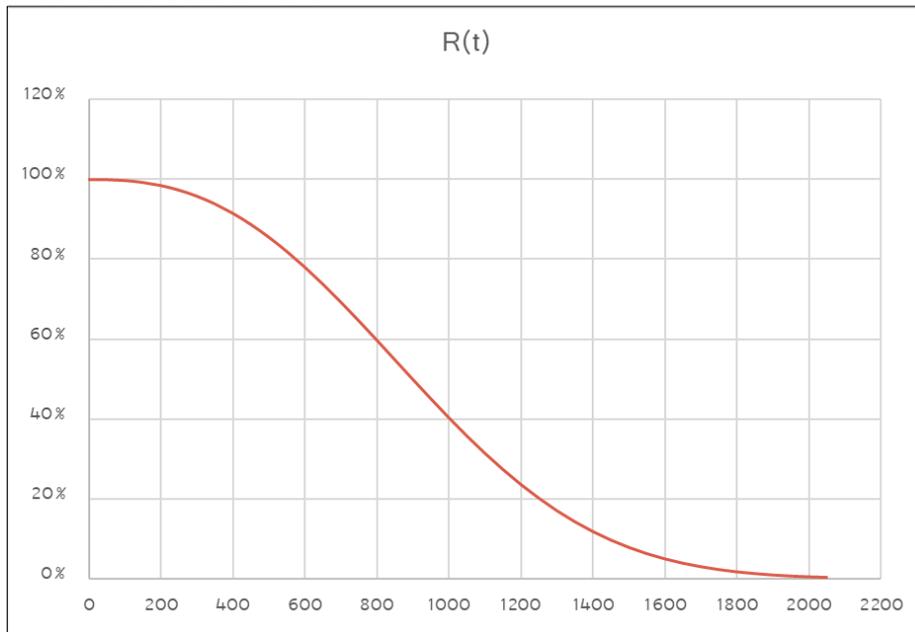
Figura 5.11:
Recta de Regresión de Cabezal Plano.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtiene un MTBF = 1135.8948 horas y con los valores de Beta (β) y Alpha (α) calculados se realizó la curva de la Función de Supervivencia de la Distribución de Weibull (confiabilidad) con relación al tiempo expresado en horas, como se muestra en la figura 5.12.

Figura 5.12:
Curva de Confiabilidad de Cabezal Plano.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior, se observa que para obtener una confiabilidad de 85% de clase mundial, el ciclo óptimo de mantenimiento de Cabezal Plano corresponde a 856 horas o **cada 35 días** y se encuentra en la etapa de desgaste de la curva de la bañera ($\beta > 1$), debido a ello requiere efectuar un mantenimiento proactivo.

6. Sub-Sistema Dosificador Ktron PP

La Tabla 5.20 muestra el ajuste de parámetros de Distribución de Weibull modelo de ranking ajustado para el historial de fallas de Dosificador Ktron PP, el cual forma parte de la etapa Alimentación y Dosificación.

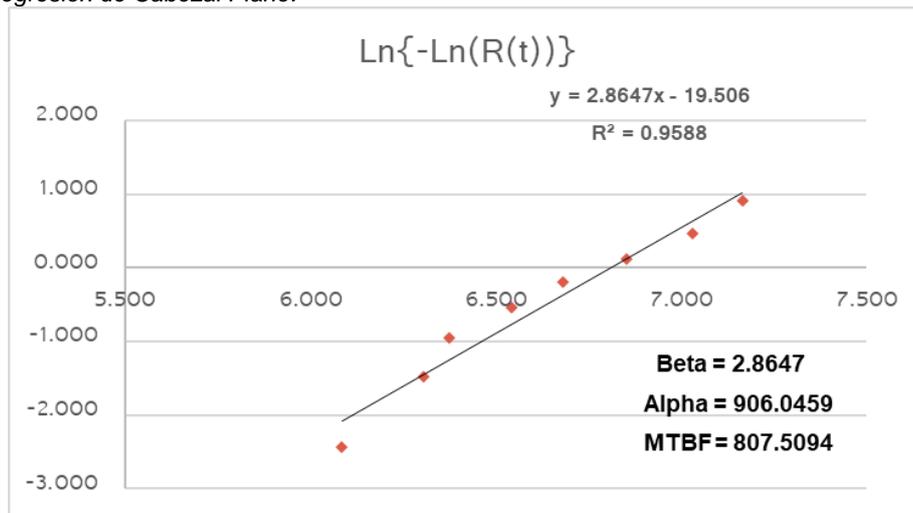
Tabla 5.20:
Distribución de Weibull de Dosificador Ktron PP.

TiempoFuncion Evento Hrs	ParoFibraForte	Ranking global de eventos Kj	Ranking Ajustado de falla rj	F(t)	R(t)	Ln(t)	Ln{-Ln(R(t))}
439	PARO ELECTRICO	1	1.0000	0.0833	0.9167	6.084	-2.442
548	PARO ELECTRICO	2	2.0000	0.2024	0.7976	6.306	-1.487
586	PARO MECANICO	3	3.0000	0.3214	0.6786	6.373	-0.947
695	PARO MECANICO	4	4.0000	0.4405	0.5595	6.544	-0.544
796	PARO ELECTRICO	5	5.0000	0.5595	0.4405	6.680	-0.199
947	PARO ELECTRICO	6	6.0000	0.6786	0.3214	6.853	0.127
1132	PARO ELECTRICO	7	7.0000	0.7976	0.2024	7.032	0.469
1294	PARO ELECTRICO	8	8.0000	0.9167	0.0833	7.165	0.910

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a graficar los puntos correspondientes a Ln(t) y Ln{-Ln(R(t))} como muestra la figura 5.13.

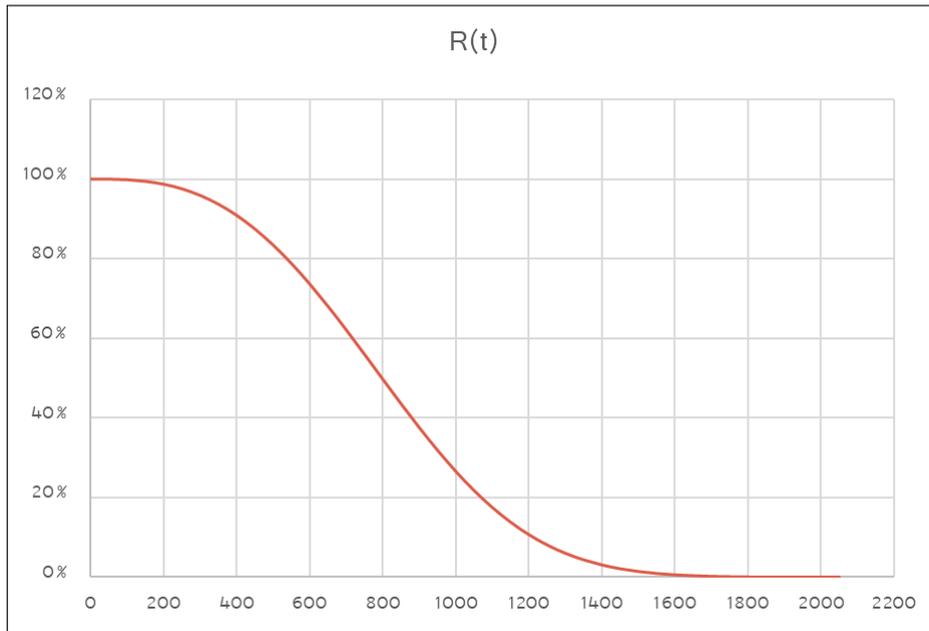
Figura 5.13:
Recta de Regresión de Cabezal Plano.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtiene un MTBF = 807.5094 horas y con los valores de Beta (β) y Alpha (α) calculados se realizó la curva de la Función de Supervivencia de la Distribución de Weibull (confiabilidad) con relación al tiempo expresado en horas, como se muestra en la figura 5.14.

Figura 5.14:
Curva de Confiabilidad de Dosificador Ktron PP.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior, se observa que para obtener una confiabilidad de 85% de clase mundial, el ciclo óptimo de mantenimiento de Cabezal Plano corresponde a 481 horas o **cada 20 días** y se encuentra en la etapa de desgaste de la curva de la bañera ($\beta > 1$), debido a ello requiere efectuar un mantenimiento proactivo.

5.2.4 Proceso de Decisión del RCM

Una vez completado la Hoja de Información RCM de los seis (06) sub-sistemas críticos de la línea y determinar el ciclo óptimo de mantenimiento, se realizó la Hoja de Decisión de RCM descrito en el apartado 2.1.15, cual está dividida en dieciséis columnas (tabla 2.2). Las columnas tituladas F, FF y FM guardan relación con la Hoja de Información desarrollado en la sección 5.2.2.

1. Sub-Sistema Cizalla

La tabla 5.21 muestra la Hoja de decisión de la cizalla de corte y las tareas propuestas con cada frecuencia de mantenimiento.

Tabla 5.21:
Hoja de Decisión de Cizalla.

HOJA DE DECISION RCM II © 1990 ALADON LTD							PLANTA: IFFSA CHILCA			MAQUINA: LEADER N°2			FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1	
							SECCIÓN: EXTRUSIÓN			SUB SISTEMA: CIZALLA			AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1	
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			TAREA PROPUESTA	INTERVALO INICIAL	A REALIZARSE POR			
F	FF	FM	H	S	E	O			H4	H5	S4							
1	A	1	S	S			S					Verificar estado de cuchilla y afilar de ser necesario.	21 días	1mecánico				
1	A	2	S	N	N	S	S					Verificar obstrucción en succión de bomba y mangueras.	21 días	1mecánico				
1	A	3	S	N	S		S					Verificar estado de manguera y cambiar de ser necesario.	21 días	1mecánico				
1	A	4	N				N	N	S			Realizar cambio de rodamientos, retenes y sellos.	12 meses	1mecánico				
1	A	5	N				N	S				Cambio de kit de reparación de pistón.	12 meses	1mecánico				
1	A	6	S	N	N	S	S					Monitorear desgaste y calibración de cuchilla.	21 días	Supervisor Mantto				
1	A	7	S	N	N	S	N	S				Limpieza y pruebas de circuito de fuerza y control de tablero eléctrico.	21 días	1 Electricista				
1	A	8	N	N	N		S					Verificar aislamiento de servomotor y nivel de aceite reductor.	21 días	1 Electricista				
1	A	9	S	N	N	S	N	S				Lubricar y revisar desgaste de piñón y cremallera.	21 días	1 mecánco/ 1 operador				
1	A	10	N				S					Verificar el aislamiento del bobinado de motor eléctrico.	21 días	1 Electricista				
1	A	11	S	N	S		S					Verificar ajuste de conectores de manguera.	21 días	1mecánico				
1	A	12	N				N	N	N	N	N	Ningún Mantenimiento Proactivo, reemplazar cuando falle	21 días	1mecánico				
1	A	13	S	N	N	S	N	S				Limpieza y pruebas de circuito de fuerza y control de tablero eléctrico.	21 días	1 Electricista				
1	B	1	S	N	N	S	N	N	S			Realizar el cambio de encoder.	3 meses	1 Electricista				
1	B	2	S	N	N	S	S					Monitorear desgaste de cremallera.	21 días	1 mecánco/ 1 operador				
1	B	3	S	N	N	S	S					Monitorear desgaste de piñón.	21 días	1 mecánco/ 1 operador				
1	B	4	N				N	S				Realizar ajuste de pernos de base y cambiar de ser necesario.	21 días	1mecánico				
1	C	1	S	N	N	S	N	S				Realizar afilado de cuchilla.	21 días	Servicio Externo				
1	C	2	N				N	S				Monitorear desgaste y calibración de cuchilla.	21 días	Supervisor Mantto				
1	C	3	S	N	N	N	N	S				Realizar ajuste de pernos de pistón.	21 días	1mecánico				

Fuente: Elaboración propia.

2. Sub-Sistema Unidad Oleohidráulica

La tabla 5.22 muestra la Hoja de decisión de la Unidad Oleohidráulica y las tareas propuestas con cada frecuencia de mantenimiento.

Tabla 5.22:

Hoja de Decisión de Unidad Oleohidráulica.

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			TAREA PROPUESTA	INTERVALO INICIAL	A REALIZARSE POR
1	A	1	S	N	N	S	S					Verificar el aislamiento del bobinado de motor eléctrico.	21 días	1 Electricista	
1	A	2	N				N	N	S			Realizar cambio de rodamientos de motor eléctrico y pernos de anclaje.	3 meses	1mecánico	
1	A	3	N				N	S				Verificar el ajuste de bornera y terminales de conexión.	21 días	1 Electricista	
1	A	4	S	N	N	S	N	N	S			Realizar cambio de rodamientos, retenes y sellos.	3 meses	1mecánico	
1	A	5	S	N	N	N	N	N	S			Realizar cambio de filtros.	3 meses	1mecánico	
1	A	6	N				S					Realizar análisis de aceite.	3 meses	Servicio Externo	
1	A	7	S	N	N	S	N	S				Verificar funcionamiento y realizar limpieza de electroválvula.	21 días	1 Electricista	
1	A	8	N	N	N		N	S				Realizar limpieza de intercambiador de calor.	21 días	1 mecánico/ 1 operador	
1	A	9	N				S					Verificar estado de impulsor y sellos de bomba.	21 días	1mecánico	
1	B	1	S	N	S		S					Verificar nivel de aceite de tanque de almacenamiento.	21 días	1mecánico	
1	B	2	N				N	N	S			Realizar cambio de manguera.	6 meses	1mecánico	
1	B	3	S	N	S		S					Verificar ajuste de conectores de manguera.	21 días	1mecánico	
1	C	1	S	N	N	S	N	N	S			Verificar presión de trabajo de aceite.	21 días	1mecánico	
1	C	2	N				N	S				Verificar estado de mangueras.	21 días	1mecánico	

Fuente: Elaboración propia.

3. Sub-Sistema Extrusor

La tabla 5.23 y 5.24 muestra la Hoja de decisión del Extrusor y las tareas propuestas con cada frecuencia de mantenimiento, el cual se divide en dos (02) partes.

Tabla 5.23:

Hoja de Decisión de Husillo Doble.

Referencia de Información		Evaluación de las consecuencias						H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			TAREA PROPUESTA	INTERVALO INICIAL	A REALIZARSE POR
HOJA DE DECISION RCM II © 1990 ALADON LTD		PLANTA: IFFSA CHILCA						MAQUINA: LEADER N°2			FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1	
		SECCIÓN: EXTRUSIÓN						SUB SISTEMA: HUSILLO DOBLE			AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1	
1	A	1	S	N	N	S	N	S				Realizar limpieza de segmentos de husillo.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador		
1	A	2	N				S					Verificar medidas de segmentos de husillo.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador		
1	A	3	S	N	N	S	S					Verificar estado de segmentos de husillo.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador		
1		4	N				S					Verificar estado de eje.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador		
1	A	5	N				S					Realizar limpieza de carbón solidificado.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador		
1	A	6	N				S					Verificar fisuras con liquido penetrante.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador		
1	A	7	S	N	N	S	N	S				Realizar limpieza de tuberías de agua de enfriamiento y verificar operación de bomba.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador		
1	A	8	S	N	N	S	S					Verificar operatividad de sonda de presión.	19 días	1 electricista		
1	B	1	N				N	S				Realizar limpieza de husillos.	3 meses	2 mecánico		
1	B	2	S	N	N	S	S					Retirar carbón impregnado.	3 meses	2 mecánico		
1	B	3	N				S					Monitorear el desgaste y diametro nominal de husillo.	3 meses	Supervisor Mantto		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.24:
Hoja de Decisión de Segmento Barril.

HOJA DE DECISION RCM II © 1990 ALADON LTD			PLANTA: IFFSA CHILCA			MAQUINA: LEADER N°2			FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1		
			SECCIÓN: EXTRUSIÓN			SUB SISTEMA: BARRIL CALEFACTORA			AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1		
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1	H2 S2	H3 S3	Acción a falta de			TAREA PROPUESTA	INTERVALO INICIAL	A REALIZARSE POR
F	FF	FM	H	S	E	O	O1 N1	O2 N2	O3 N3	H4	H5	S4			
1	A	1	S	N	N	S	N	S					Realizar limpieza cabezal.	1 mes	1 operador
1	A	2	S	N	N	S	S						Revisar potenciómetro y la configuración del variador de frecuencia.	19 días	1 electricista
1	A	3	S	N	N	S	N	N	S				Cambio de resistencias eléctricas.	1 año	1 electricista
1	A	4	S	N	N	S	N	N	S				Cambio de resistencias eléctricas.	1 año	1 electricista
1	A	5	N				S						Revisar estado de cables eléctricos de resistencias.	19 días	1 electricista
1	A	6	N				S						Monitorear desgaste del husillo.	6 meses	Supervisor Mantto
1	B	1	N				S						Realizar análisis químico de barril.	6 meses	Servicio Externo
1	B	2	N				S						Realizar prueba de tintes penetrantes para determinar fisura.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador
1	B	3	N				S						Desmontar y verificar incrustaciones.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador
1	B	4	N				S						Verificar estado de superficie de barril.	6 meses	2 mecánico/ 1 operador
2	A	1	N				S						Realizar inspección visual de resistencias eléctricas.	19 días	1 electricista
2	A	2	N				S						Realizar inspección visual de cables de alimentación.	19 días	1 electricista
2	A	3	N				N	S					Realizar ajuste y/o cambio de terminales de conexionado.	19 días	1 electricista
2	A	4	N				N	N	N	N	N		Reemplazar cuando falle.	al fallo	1 electricista
2	A	5	S	S			N	S					Realizar ajuste y/o cambio de conectores de tuberías de agua.	19 días	1 mecánico
2	B	1	S	N	N	S	S						Verificar funcionamiento de termocupla y realice contacto con barril.	19 días	1 electricista
2	B	2	N				S						Verificar estado de termocupla y cambiar de ser necesario.	19 días	1 electricista
2	B	3	N				S						Verificar estado de cables de termocupla y cambiar de ser necesario.	19 días	1 electricista
2	B	4	N				N	N	N	N	N		Reemplazar cuando falle.	al fallo	1 electricista

Fuente: Elaboración propia.

4. Sub-Sistema Bomba Melt

La tabla 5.25 muestra la Hoja de decisión de Bomba Melt y las tareas propuestas con cada frecuencia de mantenimiento.

Tabla 5.25:

Hoja de Decisión de Bomba Melt.

HOJA DE DECISION RCM II © 1990 ALADON LTD			PLANTA: IFFSA CHILCA						MAQUINA: LEADER N°2			FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1	
			SECCIÓN: EXTRUSIÓN						SUB SISTEMA: BOMBA MELT			AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1	
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			TAREA PROPUESTA	INTERVALO INICIAL	A REALIZARSE POR		
F	FF	FM	H	S	E	O			H4	H5	S4						
1	A	1	S	N	N	S	N	S				Reemplazar rodamientos y sellos de bomba	6 meses	2 mecánico			
1	A	2	N				S	S				Verificar estado de engranajes y nivel de aceite	21 días	1 mecánico			
1	A	3	N				N	S				Realizar limpieza de material solidificado en engranajes	21 días	1 mecánico			
1	A	4	S	N	N	S	N	S				Realizar limpieza, ajuste de articulaciones y lubricación de eje cardan	21 días	1 mecánico			
1	A	5	S	N	N	N	N	S				Realizar cambio de rodamientos, oring's y retenes a caja reductora	6 meses	2 mecánico			
1	A	6	S	N	N	N	N	S				Reemplazar rodamientos y medición de aislamiento de motor eléctrico	6 meses	1 Electricista			
1	B	1	N				S					Desmontar bomba melt y verificar estado de engranaje	21 días	2 mecánico			
1	B	2	S	N	N	S	N	S				Realizar limpieza de la succion de bomba	21 días	1 mecánico/ 1 operador			
1	B	3	N				N	S				Realizar limpieza de engranajes de bomba melt para remoción de material	21 días	1 mecánico/ 1 operador			
1	B	4	S	N	S		N	N	S			Realizar cambio de pernos de carcaza de bomba	21 días	1 mecánico			
1	B	5	N				S					Verificar nivel de aceite de reductor	21 días	1 mecánico			
1	B	6	N				S					Verificar estado de engranajes de reductor	6 meses	2 mecánico			
1	B	7	N				S					Verificar aislamiento de motor eléctrico	21 días	1 Electricista			

Fuente: Elaboración propia.

5. Sub-Sistema Cabezal Plano

La tabla 5.26 muestra la Hoja de decisión del Cabezal Plano y las tareas propuestas con cada frecuencia de mantenimiento.

Tabla 5.26:

Hoja de Decisión de Cabezal Plano.

HOJA DE DECISION RCM II © 1990 ALADON LTD			PLANTA: IFFSA CHILCA			MAQUINA: LEADER N°2			FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1		
			SECCIÓN: EXTRUSIÓN			SUB SISTEMA: CABEZAL PLANO			AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1		
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1	H2 S2	H3 S3	Acción a falta de			TAREA PROPUESTA	INTERVALO INICIAL	A REALIZARSE POR
F	FF	FM	H	S	E	O	O1 N1	O2 N2	O3 N3	H4	H5	S4			
1	A	1	N				N	N	N	N	N		Ningun mantenimiento programado, retroalimentación a los operadores	al fallo	1 operador
1	A	2	S	N	S		N	S					Realizar limpieza general de cabezal	35 días	1 mecánico/ 1 operador
1	A	3	S	N	N	S	N	S					Retirar material solidificado de cabezal	35 días	1 mecánico/ 1 operador
1	A	4	N				N	N	S				Realizar limpieza, cambio de ser necesario y engrase de pernos de regulación	35 días	1 mecánico/ 1 operador
1	A	5	N				S						Realizar inspección de aislamiento de resistencia mayor a 30MΩ	35 días	1 Electricista
1	A	6	N				N	S					Realizar el cromado de superficies de cabezal	1 año	Servicio Externo
1	A	7	N				N	N	N	N	N		Ningun mantenimiento programado, reemplazar cuando falle	al fallo	1 Electricista
1	A	8	S	N	N	S	S						Verificar funcionamiento de termocuplas	35 días	1 Electricista
2	A	1	N				S						Realizar monitoreo de puntos calientes por termografia	7 días	1 Electricista
2	A	2	N				S						Verificar operatividad de resistencia	35 días	1 Electricista
2	A	3	N				N	S					Realizar ajuste, limpieza y/o cambio de conectores de resistencia	35 días	1 Electricista
2	B	1	S	N	N	N	S						Verificar hermeticidad de la cubierta protectora de los cables	35 días	1 Electricista
2	B	2	N				N	S					Ajustar terminales de conexión y enchufes del cableado	35 días	1 Electricista
2	B	3	N				N	N	N	N	N		Ningun mantenimiento programado, reemplazar cuando falle	al fallo	1 Electricista
2	C	1	N				N	S					Realizar ajuste de terminales de rele	35 días	1 Electricista
2	C	2	S	N	N	N	S						Verificar conexionado y operatividad de termocupla	35 días	1 Electricista

Fuente: Elaboración Propia.

6. Sub-Sistema Dosificador Ktron PP

La tabla 5.27 muestra la Hoja de decisión del Dosificador Ktron PP y las tareas propuestas con cada frecuencia de mantenimiento.

Tabla 5.27:

Hoja de Decisión de Dosificador Ktron PP.

HOJA DE DECISION RCM II © 1990 ALADON LTD							PLANTA: IFFSA CHILCA					MAQUINA: LEADER N°2			FACILITADOR: ZAVALA ROMERO E.		FECHA: 20/10/2023		HOJA N°: 1	
							SECCIÓN: EXTRUSIÓN					SUB SISTEMA: DOSIFICADOR KTRON PP			AUDITOR: LOPEZ OTERO		FECHA: 22/10/2023		de: 1	
Referencia de			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			TAREA PROPUESTA	INTERVALO INICIAL	A REALIZARSE POR					
F	FF	FM	H	S	E	O	H4	H5	S4											
1	A	1	N				S						Revisar funcionamiento de los circuitos de protección y control del KCM	20 días	1 Electricista					
1	A	2	N				N	S					Realizar ajuste y limpieza de dispositivos de control y mando	20 días	1 Electricista					
1	A	3	S	N	N	N	N	S					Realizar limpieza y lubricación de transmisión del tornillo alimentador	20 días	1 mecánico					
1	A	4	N				S						Verificar estado y lubricar fajas	20 días	1 mecánico					
1	A	5	N				N	S					Cambiar rodamientos y evaluar operatividad	20 días	1 mecánico					
1	A	6	N				N	S					Cambio de conectores y kit de reparación de cilindro neumático	3 meses	1 mecánico					
1	A	7	N				N	N	N	N	N		Ningún mantenimiento programado, esperar el fallo	al fallo	1 Electricista					
1	B	1	N				N	N	N	N	N		Ningún mantenimiento programado, revisar instructivo de configuración	al fallo	Supervisor Producción					
1	B	2	S	N	N	N	S						Realizar limpieza de tornillo alimentador	20 días	1 operador					
1	B	3	N				S						Revisar operatividad de sensor de nivel de tolva	20 días	1 Electricista					
1	B	4	N				N	S					Realizar cambio de kit de reparación de cilindro neumático	3 meses	1 mecánico					
1	B	5	S	N	N	N	N	N	N	S			Realizar cambio de válvula mariposa	6 meses	1 mecánico					

Fuente: Elaboración Propia.

5.3 Análisis de la Información

Para el análisis de los resultados, se presentaron los valores de disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno proyectados para los siguientes nueve (09) meses a una simulación eliminando las horas de parada no planificadas ocasionados por los modos de falla de los seis (06) sub-sistemas que se superarían luego de implementadas las tareas proactivas propuestas en la hoja de decisión de la sección anterior.

El tiempo de inactividad por paradas no planificadas que se proyectó evitar luego del proceso del RCM es de 246.1 horas (27.3 horas mensuales) y se obtuvo del historial de fallas recopilados en el Anexo 2, además se proyectó reducir el número de paradas no planificadas a 43 fallas, como se muestra en la tabla 5.28.

Tabla 5.28:
Duración y cantidad de fallas evitados con el RCM.

Sub-Sistema	Tiempo Inactividad evitado (hrs)	#Fallas evitadas
Cizalla	56.9	7
Unidad Oleohidráulica	32.7	8
Extrusor	76.4	9
Bomba Melt	26.7	5
Cabezal Plano	20.1	6
Dosificador Ktron PP	33.3	8
Total	246.1	43

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla 5.29 muestra el incremento de la disponibilidad luego de proponer el mantenimiento centrado en la confiabilidad de la línea de extrusión de polipropileno.

Tabla 5.29:
Disponibilidad proyectada de la línea de extrusión.

Gestión de Mantenimiento	Antes del RCM	Luego del RCM
Tiempo de Reparación (Hrs)	439	193
Tiempo de Operación (Hrs)	3482	3728
# Total Paradas	114	71
MTTR	3.85	2.72
MTBF	30.54	52.51
Disponibilidad	88.80%	95.08%

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla anterior muestra el incremento de la disponibilidad a 95.08% luego del RCM, este valor es proyectado para los próximos nueve (09) meses comprendidos desde octubre 2023 a junio 2024², el cual se encuentra por encima del objetivo requerido por la empresa en estudio de 93%. Asimismo, esta proyección permite calcular los ingresos económicos adicionales por evitar las paradas no planificadas como muestra la tabla 5.30.

Tabla 5.30:

Costo de no disponibilidad de la línea de extrusión.

Sistema	Leader 2
Incremento de horas de producción (mensual)	27.3
Capacidad de producción (Kg/hr)	420
Incremento de producción (Kg)	11,485
Precio Venta (PEN/Kg)	S/ 12.97
Ingreso por ventas adicionales	S/ 148,956

Fuente: Elaboración propia.

Los ingresos económicos debido a la reducción de paradas no planificadas que se proyectó generar por incremento de horas de producción es 148,956 mil soles mensuales, el cual justifica la inversión de recursos para proponer el mantenimiento centrado en la confiabilidad según las tareas proactivas propuestas en la hoja de decisión.

Asimismo, la tabla 5.31 muestra los valores del Tiempo Medio de Reparación (MTTR) para cada sub-sistema o equipo crítico de la línea de extrusión, calculados a partir de los datos obtenidos del historial de falla del Anexo 2.

² El tiempo de estudio o periodo de análisis que se consideró es de nueve (09) meses. Es decir, el tiempo de análisis antes de RCM es desde enero 2023 a setiembre 2023 y el periodo de análisis luego del RCM es desde octubre 2023 a junio 2024.

Tabla 5.31:
Valores de MTTR de sub-sistemas críticos.

Sub-Sistema	Tiempo de Parada (hrs)	# Paradas	MTTR (hrs)
Cizalla	56.9	7	8.13
Unidad Oleohidráulica	32.7	8	4.09
Extrusor	76.4	9	8.49
Bomba Melt	20.1	5	4.02
Cabezal Plano	26.7	6	4.45
Dosificador Ktron PP	33.3	8	4.16

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 5.32 muestra los valores del Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) y la Confiabilidad de los sub-sistemas críticos obtenidos a partir de la distribución probabilística de Weibull, el cual permite indicar que tienen una alta probabilidad de fallas.

Tabla 5.32:
MTBF de sub-sistemas críticos.

Sub-Sistema	MTBF (hrs)	Confiabilidad R(t)
Cizalla	871.0038	48.33%
Unidad Oleohidráulica	854.3553	49.12%
Extrusor	724.6044	49.52%
Bomba Melt	922.4838	47.77%
Cabezal Plano	1135.8948	52.00%
Dosificador Ktron PP	807.5094	48.72%

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores obtenidos de MTBF y MTTR de los equipos o sub-sistemas críticos de la línea de extrusión, la tabla 5.33 muestra altos valores de disponibilidad.

Tabla 5.33
Disponibilidad de sub-sistemas críticos.

Sub-Sistema	MTBF (hrs)	MTTR (hrs)	D (%)
Cizalla	871.0038	8.1	99.08%
Unidad Oleohidráulica	854.3553	4.1	99.52%
Extrusor	724.6044	8.5	98.84%
Bomba Melt	922.4838	4.0	99.57%
Cabezal Plano	1135.8948	4.5	99.61%
Dosificador Ktron PP	807.5094	4.2	99.49%

Fuente: Elaboración Propia.

El ciclo óptimo de mantenimiento para obtener una confiabilidad de 85% de cada sub-sistema crítico se muestra en la tabla 5.34.

Tabla 5.34:
Ciclo Óptimo de Mantenimiento de sub-sistemas críticos.

Sub-Sistema	Ciclo Óptimo
Cizalla	21 días
Unidad Oleohidráulica	22 días
Extrusor	19 días
Bomba Melt	21 días
Cabezal Plano	32 días
Dosificador Ktron PP	20 días

Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo VI. Análisis de Discusión de Resultados

6.1 Contrastación de hipótesis

De la evaluación efectuada en la línea de extrusión de polipropileno “Leader N°2” de la empresa en estudio se proyectó incrementar la disponibilidad de 88.8% a 95.08%, el cual representa un aumento en las horas de operación de 246.1 horas en el tiempo de estudio de nueve (09) meses, el cual comprende entre los meses de octubre 2023 a junio 2024. Asimismo, el ingreso económico proyectado por reducción de paradas no planificadas es S/.148,956 soles mensuales.

También, se proyectó un incremento del Tiempo medio entre fallas (MTBF) de 30.54 horas a 52.51 horas, el cual supera al objetivo definido por la empresa de 48 horas; además esta proyección permitió reducir el Tiempo medio de reparación (MTTR) de 3.85 horas a 2.72 horas, de esta manera se logró optimizar la gestión del mantenimiento de la línea de extrusión de polipropileno.

Por otro lado, se logró determinar que los equipos críticos de la línea de extrusión en estudio pertenecen a la etapa de envejecimiento mediante el cálculo del parámetro de forma de la distribución probabilística de Weibull ($\beta > 1$), entonces se requiere efectuar un análisis de criticidad de equipos en las diferentes líneas de producción de la planta, para identificar a los equipos críticos, luego proponer y programar un mantenimiento con tareas proactivas.

En ese sentido, luego de contrastar la hipótesis general que menciona: *“Al proponer un Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad permitirá incrementar la disponibilidad de una línea de extrusión de polipropileno en Industrias de Plástico”*, se demuestra que dicha hipótesis es verificada.

6.2 Discusión de Resultados

De acuerdo con lo mencionado por Moubray, John (2000). "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad", indica que el desempeño de una planta mejora cuando disminuye la cantidad y la severidad de las fallas que ocasionan o desencadenan consecuencias operacionales y tomando en cuenta que se incrementan las horas hombre del personal de mantenimiento dedicadas a tareas proactivas para reducir las paradas no planificadas; por lo tanto, se validó la hipótesis del presente trabajo de investigación, el cual se logró contrastar que al proponer un mantenimiento centrado en la confiabilidad de la línea de extrusión de polipropileno en una industria de plásticos permitió incrementar su disponibilidad.

Todos los sub-sistemas críticos tienen un valor de $\beta > 1$, esto muestra que las tareas a realizar para este escenario de frecuencia de fallas, es poder identificar los modos fallas recurrentes tanto mecánicos, eléctricas y operacionales que desencadenan cada una en fallas funcionales. Se proyectó corregir estos modos de falla a través de un programa de Mantenimiento Proactivo de sustitución cíclica de componentes mediante una estrategia planificada, reacondicionamiento cíclico y un rediseño de componentes a los cuales no se aplica una estrategia de cambio cíclico.

Existe dos (02) personas en el área de mantenimiento encargados de programar cada quince (15) días el mantenimiento de los equipos de la línea de extrusión de polipropileno sin efectuar una planificación con conocimientos de confiabilidad o proceso de RCM. También, como no se planifica adecuadamente el mantenimiento, la gestión de materiales y repuestos es ineficiente, por lo tanto el lead time de compra de materiales no coincide con la planificación, entonces no se dispone de los repuestos para ejecutar el mantenimiento.

Conclusiones

La proyección de incremento de la disponibilidad de la línea de extrusión de polipropileno Leader N°2 luego de proponer un mantenimiento centrado en la confiabilidad es de 6.28%, es decir, aumenta de 88.8% antes del RCM a 95.08% después del RCM. En ese sentido, esta proyección logra aumentar el tiempo de operación en 246.1 horas durante el periodo de estudio (09 meses) comprendidos entre octubre 2023 a junio 2024, es decir 27.3 horas mensuales. Este incremento trae consigo un ingreso económico de S/.148,956 soles mensuales por la reducción de las paradas no planificadas de la línea de extrusión.

Además, del análisis del Diagrama de Pareto que identifica aquellos sistemas o etapas de la línea de extrusión con mayores tiempos de paradas no planificadas durante el periodo de análisis comprendido entre los meses de enero y setiembre del año 2023, se identificó que el 80% de estas fallas registradas corresponden a tres (03) etapas: Corte y Apilado, Extrusión y Dosificación de materia prima. Asimismo, después de efectuar el análisis de criticidad de cada etapa o sistema de la línea de extrusión de polipropileno Leader N°2 descrito en el punto anterior, se determinó mediante el juicio de expertos que existen seis (06) equipos o sub-sistemas críticos, los cuales son: Cizalla, Unidad Oleohidráulica, Extrusor, Bomba Melt, Cabezal Plano, Dosificador Ktron PP.

Por otro lado, utilizando como herramienta el Historial de Tiempos entre Fallas y la Distribución probabilística de Weibull, se determinó que los seis (06) sub-sistemas críticos mencionados anteriormente, pertenecen a la etapa de desgaste por envejecimiento de la Curva de la Bañera porque tienen el parámetro de forma $\beta > 1$, por lo tanto el tipo mantenimiento utilizado es el Proactivo.

De igual manera, los valores del Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) calculados para los seis (06) sub-sistemas críticos de la línea de extrusión de polipropileno, no son los recomendados para ser considerados como la frecuencia optima de mantenimiento porque la probabilidad de ocurrencia de falla es alta, como muestra la tabla 5.32.

De los resultados obtenidos en la tabla 5.32 y tabla 5.33, se concluye que una alta disponibilidad de los sub-sistemas críticos de la línea de extrusión de polipropileno no necesariamente implica una alta confiabilidad. En ese sentido, de acuerdo con los resultados analizados y obtenidos en este trabajo de suficiencia profesional, se concluye que utilizando una combinación de técnicas cualitativas y cuantitativas del mantenimiento y herramientas como: los datos históricos del tiempo entre fallos de equipos y tiempos de reparación, el proceso de RCM y el Análisis de Confiabilidad mediante la Distribución Probabilística de Weibull, se logra optimizar la Gestión del Mantenimiento.

Finalmente, el actual ciclo de mantenimiento de quince (15) días de la línea de extrusión de polipropileno Leader N°2, el cual incluye sub-sistemas críticos y los demás equipos que se propone, no es el recomendable, porque incide en mayores costos de mantenimiento y no alcanza la confiabilidad requerida para industrias de clase mundial. Por ende, para una confiabilidad de 85% de los sub-sistemas críticos, el ciclo óptimo de mantenimiento debe ejecutarse como muestra la tabla 5.34.

Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis de criticidad a los sub-sistemas de todas las líneas de extrusión de Polipropileno de la Planta Industrias Fibrforte sede Chilca, con la finalidad de determinar los diferentes equipos críticos, para luego determinar en qué etapa de su ciclo de vida se encuentran. Este aspecto es importante porque permitirá definir los planes de mantenimiento preventivo y monitoreo de condición para dichos equipos críticos.

También, así como se determinó la confiabilidad de los seis (06) sub-sistemas críticos de la línea de extrusión de polipropileno, se recomienda utilizar este trabajo de suficiencia profesional para efectuar el cálculo de la confiabilidad de toda la línea, utilizando la metodología de “Confiabilidad de Sistemas”, donde se define la forma en que cada sub-sistema individual afecta el buen funcionamiento del sistema.

Para optimizar la gestión de mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en la empresa Industrias Fibrforte, se recomienda capacitar al personal de mantenimiento conformado por dos (02) supervisores y once (11) mantenedores, sobre técnicas cualitativas y cuantitativas de mantenimiento, análisis de confiabilidad y el proceso de RCM.

Tomando como referencia al análisis de criticidad de los equipos de la línea de extrusión de polipropileno Leader N°2, se deduce que la mayoría de los equipos principales de las otras líneas de extrusión de la empresa Industrias Fibrforte S.A como Leader N°1, Bausano, Casplast pertenecen a la etapa de desgaste por envejecimiento; en ese sentido, es necesario priorizar un análisis de criticidad en los equipos o sub-sistemas de las diferentes líneas de la producción de la planta.

Finalmente, se recomienda utilizar este trabajo de suficiencia profesional para determinar la confiabilidad de los sub-sistemas críticos de las demás líneas de extrusión y otros procesos como: Termoformadoras, Peletizado, Rotomoldeo.

Referencias Bibliográficas

- [1] Arata, A. (2009). "Ingeniería y Gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales" (libro). Primera edición. Chile.
- [2] Becerra Arévalo G. y Paulino Romero M. (2012). "El análisis de confiabilidad como herramienta para optimizar la gestión del mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación en un centro minero". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de ingeniería. Perú.
- [3] Beltrán Rico, Maribel; et al. (2012). "Tecnología de polímeros. Procesado y Materiales". Alicante, España. Universidad Alicante" (libro).
- [4] De Miguel Fernández, E. (1990). Introducción a la Gestión "Management" (libro). Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Vols. I y II. Valencia-España.
- [5] Fierro Quintana, E. (2020). "Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo centrado en la confiabilidad (RCM 2) para incrementar la disponibilidad de las líneas de extrusión en una empresa productora de materiales plásticos". (Tesis de Pregrado). Universidad Tecnológica del Perú.
- [6] González Fernández, Francisco (2009): "Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado" (libro). Edita: Fundación Confederal. 3ra edición. Madrid-España.
- [7] Huerta Mendoza, R (2000): "El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional" (artículo).
- [8] Mora Gutiérrez, Alberto (2009): "Mantenimiento. Planeación, ejecución y control" (libro). Editorial Alfaomega. Colombia.
- [9] Moubray, John (2000). "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad". Madrid (libro), España: Aladon Ltd.
- [10] Parra Márquez C. y Crespo Márquez A. (2012). "ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos".

- [11] Ronquillo Banda, P. (2021). "Gestión de Mantenimiento Basado en Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) de filtros prensa automáticos en minas de cobre para mejorar su disponibilidad". (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de ingeniería. Perú.
- [12] SAE JA1012 (2011). "Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)".
- [13] UNE-EN 13306 (2018). "Terminología de Mantenimiento".
- [14] Villacrés Tapia, L. (2021). "Elaboración de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para las líneas de extrusión y torsión de fibras retorcidas, film y malla en la Empresa HIPLAS". (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- [15] Weibull, W (1951). "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability". (Paper). Stockholm, Sweden.

Anexos

Índice de Anexos

Anexo A: Productos Fabricados.....	1
Anexo B: Historial de Fallas de Etapas Criticas	2
Anexo C: Clasificación Taxonómicos de Etapas Críticos	6
Anexo D: Plano de la Línea de extrusión Leader N°2	9
Anexo E: Fotografías de los Sub-sistemas críticos de la línea de extrusión.....	10

Anexo A: Productos Fabricados

Fotografía de Planchas Traslucidas y Opacas.



Fuente: Industrias Fibraforte (2023). "Planta Chilca".

Anexo B: Historial de Fallas de Etapas Criticas

Historial de Fallas de la Etapa de Extrusión.

item	ParoFibraForte	FechaEvento	Descripción de la Falla	Equipo	Tiempo de reparacion (Hrs)
1	PARO ELECTRICO	22-01-2023 11:00 AM	Termocupla no envía señal en bomba melt, detiene proceso	BOMBA MELT	5
2	PARO ELECTRICO	20-01-2023 10:35 PM	Cortocircuito en resistencia en tornillo se encuentran dañado	EXTRUSOR	7
3	PARO MECANICO	14-02-2023 09:05 PM	Se trava husillo de extrusor, se detiene proceso	EXTRUSOR	9
4	PARO ELECTRICO	23-02-2023 03:50 AM	Trabamiento en eje cardan de bomba melt, se detiene proceso	BOMBA MELT	1
5	PARO ELECTRICO	25-02-2023 03:10 PM	Pernos rotos en cabezal plano, se detiene proceso	CABEZAL	4
6	PARO ELECTRICO	03-03-2023 11:40 AM	Rotura de rodamientos de Bomba de vacío de extrusor	BOMBA VACIO	3
7	PARO ELECTRICO	20-03-2023 12:40 AM	Ventilador de enfriamiento motor principal obstruido	MOTOR ELECT	4
8	PARO MECANICO	22-03-2023 03:15 AM	Atascamiento de material en succión de bomba melt	BOMBA MELT	5
9	PARO ELECTRICO	28-03-2023 10:20 PM	Tablero de mando apagado y acometida en cortocircuito	TABLERO ELECT	3
10	PARO ELECTRICO	31-03-2023 10:14 AM	Cortocircuito en reles de estado sólido de extrusor	EXTRUSOR	5
11	PARO ELECTRICO	04-04-2023 04:20 PM	Disminuye temperatura cabezal por resistencia dañada	CABEZAL	3
12	PARO MECANICO	18-04-2023 03:15 PM	Segmentos de husillo tiene desgaste y no avanza material	EXTRUSOR	11
13	PARO ELECTRICO	28-04-2023 01:35 AM	Sonda de presión de bomba melt no envía señal	BOMBA MELT	2
14	PARO ELECTRICO	12-05-2023 11:25 AM	Plancha con rayaduras por obstrucción cabezal	CABEZAL	5
15	PARO MECANICO	14-05-2023 03:20 PM	Resistencia eléctrica abierta, caída de temperatura	EXTRUSOR	9
16	PARO MECANICO	20-06-2023 09:20 PM	Material atascado en Camiseta de husillo	EXTRUSOR	14
17	PARO MECANICO	04-07-2023 05:28 PM	Sobretemperatura en bomba melt, por rotura de engranajes	BOMBA MELT	9
18	PARO MECANICO	05-07-2023 07:40 PM	Cables de resistencia en cabezal en cortocircuito, se detiene	CABEZAL	4
19	PARO MECANICO	17-07-2023 10:15 AM	Motor eléctrico de bomba de lubricación quemado	REDUCTOR	4
20	PARO MECANICO	21-07-2023 09:10 AM	Atascamiento de material en husillo	EXTRUSOR	8
21	PARO ELECTRICO	14-08-2023 03:21 PM	Sobretemperatura en segmento barril, sistema de Enfriamiento no enfría	EXTRUSOR	2
22	PARO ELECTRICO	17-08-2023 10:13 PM	Motor Eléctrico de bomba Melt cortocircuitado	BOMBA MELT	6
23	PARO ELECTRICO	25-08-2023 11:00 PM	Controlador de temperatura de cabezal no funciona	CABEZAL	5
24	PARO ELECTRICO	28-09-2023 10:23 PM	Falso contacto en Relé de estado sólido en cortocircuito	EXTRUSOR	10

Fuente: Power BI de Fibrforte S.A (2022), "OEE_YTD_2022-2023".

Historial de Fallas de la Etapa de Corte y Apilado.

item	ParoFibraForte	FechaEvento	Descripción de la Falla	Equipo	Tiempo de reparacion (Hrs)
1	PARO MECANICO	11-01-2023 03:20 AM	Atascamiento de material en rodillo tractor de molino bordes	MOL. BORDES	1.8
2	PARO MECANICO	18-01-2023 09:50 AM	Alarma tablero de control de variadores, revisar sobrecorriente	TABLERO ELECT	1.2
3	PARO MECANICO	19-01-2023 01:16 PM	Rotura de cuchilla, se detiene proceso	CIZALLA	18.5
4	PARO MECANICO	22-01-2023 04:09 PM	Succion de Bomba olehidraulica obstruida, cizalla pierde presión	UNID. OLEOHIDRÁULICA	5.0
5	PARO MECANICO	26-01-2023 12:15 PM	Encoder no funciona por soltura de conexión eléctrica	TABLERO ELECT	1.2
6	PARO ELECTRICO	06-02-2023 02:23 PM	Alarma en tablero de control, cuchilla no avanza	TABLERO ELECT	1.5
7	PARO MECANICO	08-02-2023 03:24 PM	Nivel bajo de Tanque de aceite, derrame en el piso	TANQUE ACEITE	0.8
8	PARO MECANICO	09-02-2023 06:00 AM	Ventilador de molino no acciona por obstrucción en la succión	VENTILADOR EXTRACT	1.4
9	PARO ELECTRICO	14-02-2023 01:35 AM	Sobrecorriente en motorreductor de rodillo tractor	MOL. BORDES	0.8
10	PARO MECANICO	17-02-2023 10:46 AM	Rotura de faja en molino de bordes	MOL. BORDES	1.2
11	PARO MECANICO	21-02-2023 12:55 AM	Intercambiador no enfria, se encuentra obstruido	UNID. OLEOHIDRÁULICA	4.5
12	PARO ELECTRICO	24-02-2023 04:40 AM	Potenciómetro de tablero electrico no funciona	TABLERO ELECT	1.4
13	PARO ELECTRICO	25-02-2023 12:05 PM	Motor Elect. de motorreductor de cortador de bordes quemado	TABLERO ELECT	1.6
14	PARO ELECTRICO	27-02-2023 09:48 PM	Parada de cizalla por rotura de manguera olehidraulica	CIZALLA	5.4
15	PARO ELECTRICO	03-03-2023 08:30 AM	Cable de Ventilador extractor de molino cortocircuitado	VENTILADOR EXTRACT	1.8
16	PARO MECANICO	06-03-2023 02:19 AM	Chiller no envía agua de enfriamiento por fuga en válvula	CHILLER	2.2
17	PARO MECANICO	13-03-2023 09:28 PM	Rotura de engranajes Bomba olehidraulica	UNID. OLEOHIDRÁULICA	3.3
18	PARO MECANICO	14-03-2023 05:10 PM	Atascamiento de Ventilador extractor de molino, revisar accionamiento	VENTILADOR EXTRACT	1.6
19	PARO MECANICO	08-04-2023 02:20 PM	Trabamiento de reductor superior de cortador de bordes	CORTADOR BORDES	1.1
20	PARO ELECTRICO	17-04-2023 05:36 PM	Cortocircuito Motor Bomba de lubricación trabada	UNID. OLEOHIDRÁULICA	3.2
21	PARO MECANICO	18-04-2023 08:45 AM	Cuchilla descalibrada y rozamiento, requiere calibración	CIZALLA	7.2
22	PARO MECANICO	14-05-2023 01:45 AM	Trabamiento de molino de bordes, rotura de polea	MOL. BORDES	2.2
23	PARO MECANICO	15-05-2023 04:50 PM	Motor de ventilador extractor de molino con sobrecorriente	VENTILADOR EXTRACT	1.1
24	PARO ELECTRICO	20-05-2023 09:20 PM	Sensor de mesa traslación roto	APILADOR	1.2

25	PARO ELECTRICO	24-05-2023 11:18 AM	Electroválvula de unidad oleohidráulica se bloquea	UNID. OLEOHIDRÁULICA	3.1
26	PARO MECANICO	31-05-2023 02:17 PM	Falla en cizalla de corte, encoder inoperativo	CIZALLA	5.0
27	PARO MECANICO	19-06-2023 03:47 AM	Cizalla pierde medida de corte, revisar encoder	TABLERO ELECT	0.5
28	PARO MECANICO	29-06-2023 02:23 PM	Bomba oleohidraulica pierde presión por desgaste	UNID. OLEOHIDRÁULICA	5.3
29	PARO MECANICO	03-07-2023 07:52 PM	Rotura de Piñones de reductor de cizalla, no transmite potencia	CIZALLA	5.2
30	PARO ELECTRICO	10-07-2023 06:20 PM	Circuito abierto en tablero, no acciona cortador bordes	MOL. BORDES	1.5
31	PARO MECANICO	20-07-2023 04:23 PM	Rodillo tractor de molino bordes con trabamiento	MOL. BORDES	1.4
32	PARO ELECTRICO	09-08-2023 12:40 AM	Corte de planchas fuera de medida por falla en encoder	TABLERO ELECT	1.3
33	PARO ELECTRICO	10-08-2023 10:18 AM	Cortocircuito en tablero de mando, se detiene proceso	TABLERO ELECT	1.6
34	PARO ELECTRICO	14-08-2023 04:21 PM	Cortocircuito de motor eléctrico de bomba oleohidráulica	UNID. OLEOHIDRÁULICA	4.5
35	PARO MECANICO	18-08-2023 11:12 AM	Falla sobrecorriente en servomotor de avance de cizalla	CIZALLA	7.6
36	PARO ELECTRICO	06-09-2023 02:26 AM	Corte de planchas fuera de medida por falla en encoder	TABLERO ELECT	1.4
37	PARO MECANICO	09-09-2023 02:10 AM	Falla en cizalla de corte, no acciona piston oleohidraulico	CIZALLA	8.1
38	PARO ELECTRICO	15-09-2023 06:10 PM	Cortocircuito en tablero de mando por cable dañado	TABLERO ELECT	0.5
39	PARO MECANICO	17-09-2023 02:00 AM	Cuchilla de cortador de bordes no gira	CORTADOR BORDES	0.7
40	PARO MECANICO	21-09-2023 11:00 AM	Ruido extraño en reductor de molino de bordes	MOL. BORDES	1.7
41	PARO MECANICO	29-09-2023 04:46 PM	Rotura de Manguera de aceite de pistón olehidraulico	UNID. OLEOHIDRÁULICA	3.9

Fuente: Power BI de Fibraforte S.A (2022), "OEE_YTD_2022-2023".

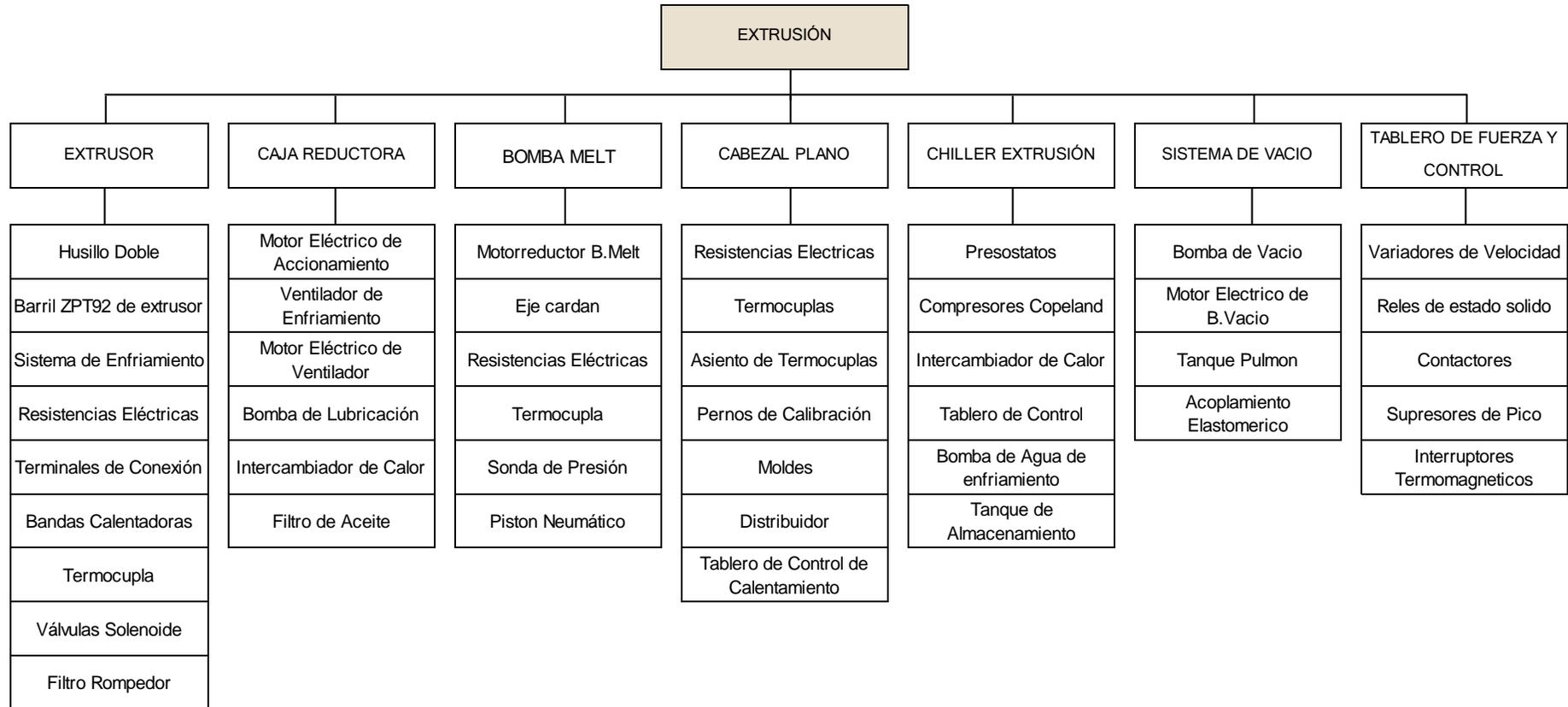
Historial de Fallas de la Etapa de Alimentación y Dosificación.

item	ParoFibraForte	FechaEvento	Descripción de la Falla	Equipo	Tiempo de reparación (Hrs)
1	PARO MECANICO	06-01-2023 11:38 AM	Se detiene proceso, no ingresa CaCO3 material a extrusor	KTRON CaCO3	2.1
2	PARO MECANICO	25-01-2023 10:35 AM	Se detiene proceso, ktron se oxido se traba	KTRON OXIDO	3.1
3	PARO ELECTRICO	29-01-2023 11:20 PM	Sobrecorriente en motor de dosific Ktron PP	KTRON PP	5.0
4	PARO MECANICO	13-02-2023 04:45 AM	Se tiene proceso, no acciona compuerta de tolva Ktron Oxido	KTRON OXIDO	3.5
5	PARO MECANICO	21-02-2023 10:24 PM	Atoro de Dosificador de CaCO3, se detiene proceso	KTRON CaCO3	4.2
6	PARO ELECTRICO	25-02-2023 08:17 PM	Se detiene proceso, Falla en encoder de ktron PP	TABLERO ELECT	2.0
7	PARO ELECTRICO	04-03-2023 04:00 AM	Señal erronea de KCM y varia color de plancha	KTRON PP	3.1
8	PARO MECANICO	05-03-2023 01:25 PM	Aspirador de aire no acciona por trabamiento	VENT. ASPIRADOR	2.0
9	PARO MECANICO	16-03-2023 10:30 AM	Tolva de PP se queda vacio, no acciona pistones	MEZCLADOR	2.5
10	PARO ELECTRICO	22-03-2023 12:30 PM	Sobrecorriente en motor de aspirador	VENT. ASPIRADOR	1.2
11	PARO ELECTRICO	23-03-2023 06:50 PM	Electroválvulas no envia señal de apertura	TABLERO ELECT	1.3
12	PARO MECANICO	28-03-2023 02:42 PM	Tornillo dosificador de ktron PP trabado	KTRON PP	3.8
13	PARO MECANICO	06-04-2023 07:32 PM	Rotura de faja de dosficiador ktron oxido	KTRON OXIDO	2.8
14	PARO ELECTRICO	13-04-2023 10:50 AM	Motor Electrico de Aspirador cortocircuitado	VENT. ASPIRADOR	1.7
15	PARO MECANICO	15-04-2023 10:10 PM	Pistones neumaticos de mezclador no accionan	KTRON PP	2.4
16	PARO ELECTRICO	17-04-2023 09:30 AM	Automatismo de aspiración no succiona material	TABLERO ELECT	2.3
17	PARO ELECTRICO	28-04-2023 09:20 PM	Cortocircuito en relay de tablero aspiración	TABLERO ELECT	2.2
18	PARO MECANICO	03-05-2023 09:36 AM	Filtro de aspiración saturado, ingresa al extractor	VENT. ASPIRADOR	2.0
19	PARO ELECTRICO	08-05-2023 07:00 PM	KCM de PP envia señal de mezcla erronea	KTRON PP	4.8
20	PARO ELECTRICO	21-05-2023 10:50 PM	Sistema de aspiración se detiene por cables a tierra	TABLERO ELECT	4.5
21	PARO ELECTRICO	22-06-2023 01:41 PM	KCM se desconfigura, se detiene proceso	TABLERO ELECT	4.3
22	PARO ELECTRICO	24-06-2023 11:10 PM	Se detiene proceso, Falla en encoder de ktron PP	KTRON PP	4.6
23	PARO ELECTRICO	25-07-2023 05:40 PM	Electroválvulas no envia señal de apertura de compuerta	MEZCLADOR	6.3
24	PARO ELECTRICO	03-08-2023 10:25 AM	Tolva de PP se queda vacio, sensor dañado	KTRON PP	4.3
25	PARO MECANICO	12-08-2023 03:45 AM	Trabamiento en pistones neumaticos de mezclador	MEZCLADOR	2.3
26	PARO MECANICO	21-08-2023 11:35 AM	Automatismo de aspiración no succiona material no responde	TABLERO ELECT	2.5
27	PARO ELECTRICO	26-09-2023 09:12 AM	Sobrecorriente en motor de dosific Ktron PP	KTRON PP	5.3

Fuente: Power BI de Fibraforte S.A (2022), "OEE_YTD_2022-2023".

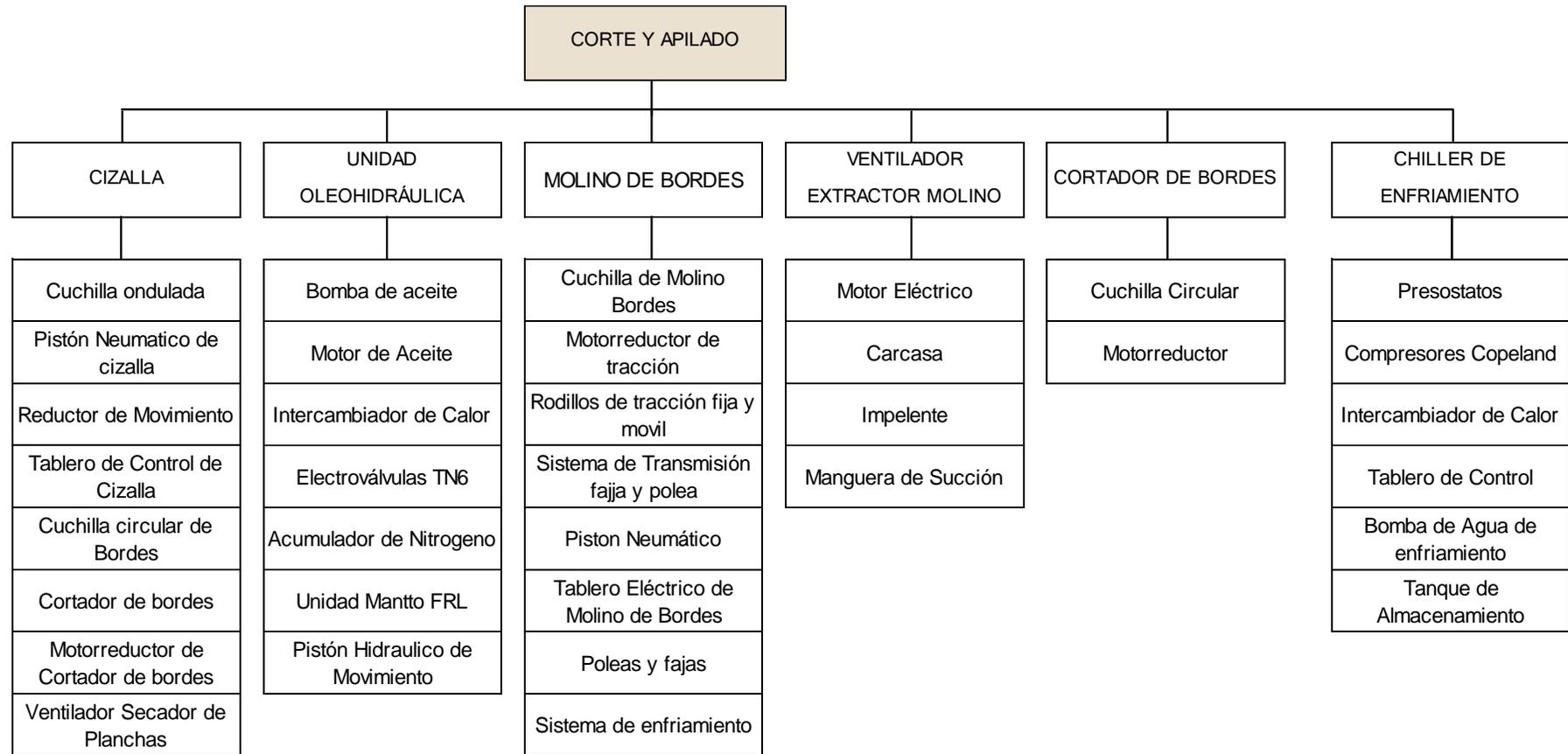
Anexo C: Clasificación Taxonómicos de Etapas Críticas

Clasificación Taxonómica de la etapa Extrusión.



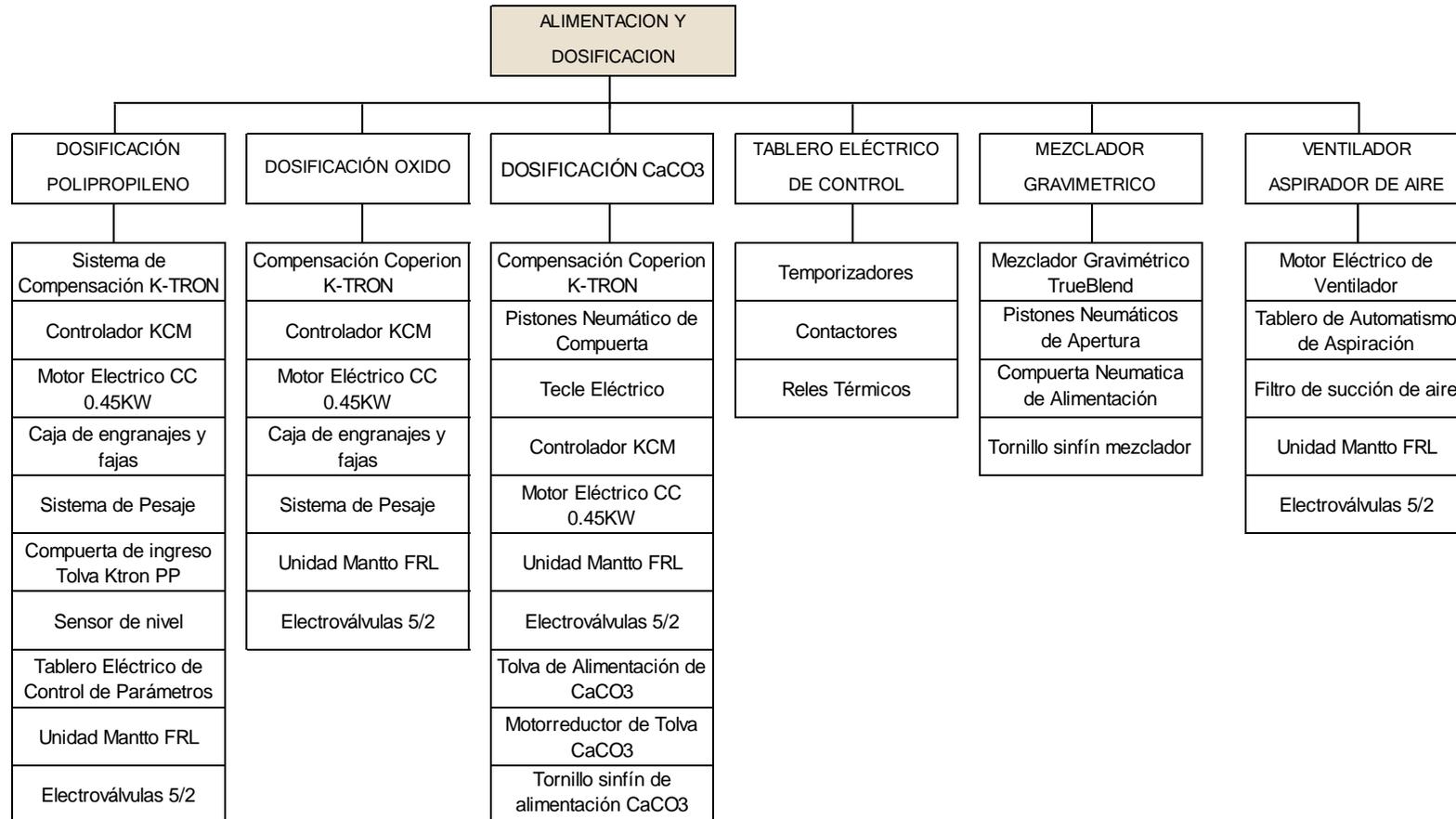
Fuente: Elaboración propia.

Clasificación Taxonómica de la etapa Corte y Apilado.



Fuente: Elaboración propia.

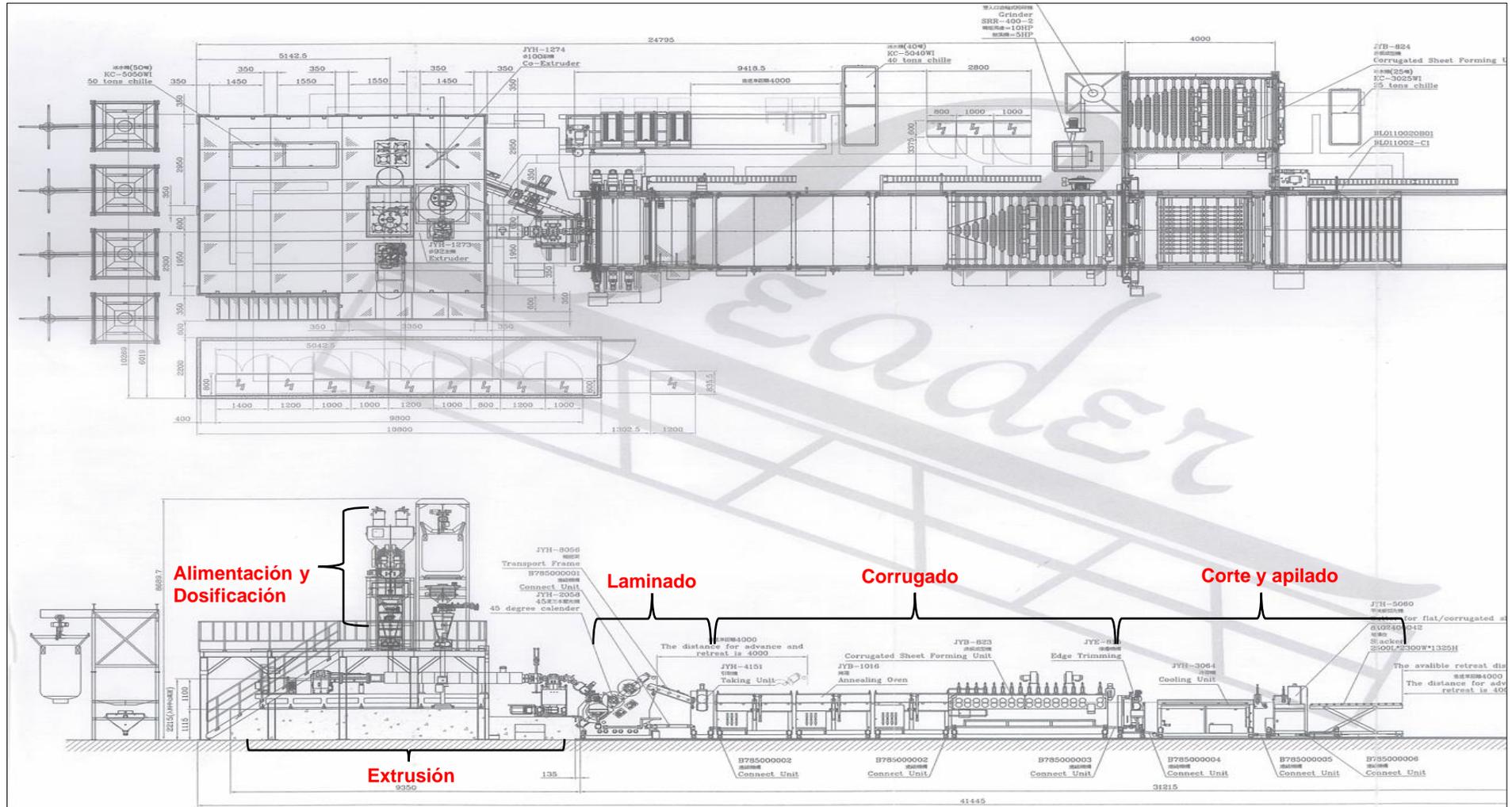
Clasificación Taxonómica de la etapa Alimentación y Dosificación.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo D: Plano de la Línea de extrusión Leader N°2

Distribución de la línea de extrusión Leader N°2.



Fuente: Industrias Fibrforte S.A (2007). Línea de extrusión Leader N°2 Planta Chilca.

Anexo E: Fotografías de los Sub-sistemas críticos de la línea de extrusión

Fotografía de Cizalla de Corte.



Fuente: Industrias Fibraforte (2023). "Planta Chilca".

Fotografía de Unidad Oleohidráulica de Cizalla.



Fuente: Industrias Fibraforte (2023). "Planta Chilca".

Fotografía de Extrusor.



Fuente: Industrias Fibraforte (2023). "Planta Chilca".

Fotografía de Cabezal Plano.



Fuente: Industrias Fibraforte (2023). "Planta Chilca".

Fotografía de Bomba Melt.



Fuente: Industrias Fibraforte (2023). "Planta Chilca".

Fotografía de Dosificador Ktron PP.



Fuente: Industrias Fibraforte (2023). "Planta Chilca".