

UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL

Sede Central

Ingeniería Electromecánica

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MANTENIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y  
DISPONIBILIDAD SOBRE LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO EN UNA  
EMPRESA MANUFACTURERA DE CABLE ELÉCTRICO EN COSTA RICA.

Proyecto de graduación como requisito para optar por el grado académico de  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

José Daniel Gómez Barrantes

Alajuela, 2024

## Actas de aprobación

### UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL



#### Acta de Aprobación 02-2025

En la ciudad de Alajuela, a los veinte días del mes de marzo del año 2025 el Tribunal evaluador conformado por las personas: ING MARVIN SEGURA TREJOS, ING LUIS ENRIQUE VARELA GONZÁLEZ, CHARLIE ESPINOZA MATARRITA, proceden a evaluar la presentación del proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Electromecánica del estudiante José Daniel Gómez Barrantes, identificación 208000194 , titulado "Análisis del efecto de la mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad sobre los costos de mantenimiento en una empresa manufacturera de cable eléctrico en Costa Rica " modalidad proyecto de graduación. El Tribunal Evaluador apegado a las regulaciones y requisitos establecidos en el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad Técnica Nacional, realizó la revisión del proyecto del estudiante otorgando una calificación de 39 dando como resultado aprobado.

Ing. Marvin Segura Trejos

Director Licenciatura en Ingeniería Electromecánica y Lector

Charlie Espinoza Matarrita (Tutor)

José Daniel Gómez Barrantes (Estudiante)

Jonathan Vega Brenes (sector Industrial)

Luis Varela González (Lector)

Ing. Marvin Segura Trejos (Lector)

Carta de aprobación por parte del tutor del trabajo final de graduación

Fecha: 14 de febrero de 2025.

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

**Estimados señores:**

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: "ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MANTENIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD SOBRE LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE CABLE ELÉCTRICO EN COSTA RICA" elaborado por el estudiante: José Daniel Gómez Barrantes, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.

**Suscribe cordialmente,**

  
Nombre del tutor

Carta de aprobación por parte del lector del trabajo final de graduación

Fecha: 17 de febrero de 2025.

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

**Estimados señores:**

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: "ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MANTENIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD SOBRE LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE CABLE ELÉCTRICO EN COSTA RICA" elaborado por el estudiante: José Daniel Gómez Barrantes, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.

**Suscribe cordialmente,**

  
Nombre del lector

Carta de aprobación por parte del lector del trabajo final de graduación

Fecha:

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

**Estimados señores:**

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: "ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MANTENIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD SOBRE LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE CABLE ELÉCTRICO EN COSTA RICA" elaborado por el estudiante: José Daniel Gómez Barrantes, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.

**Suscribe cordialmente,**

VEGA JONATHAN [vejajo001]  
cn=VEGA JONATHAN [vejajo001],  
ou=Privileged GUI Users,  
email=JONATHAN.VEGA@prysmian.com  
2025.02.28 18:22:44 -06'00'

---

**Nombre del lector**

Carta de aprobación por parte del filólogo del trabajo final de graduación

Heredia, 14 de febrero del 2024

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

**Estimados señores:**

Leí y corregí el Trabajo Final de Graduación, denominado: “**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MANTENIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD SOBRE LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE CABLE ELÉCTRICO EN COSTA RICA**”, elaborado por el estudiante: **José Daniel Gómez Barrantes**, con cédula de identidad número 208000194, para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Corregí el trabajo en aspectos, tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, y desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Trabajo Final de Graduación; por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

**Suscribe cordialmente,**

Firmado por EDITH RAISSA PIZARRO ALFARO (FIRMA)  
PERSONA FISICA, CPF-04-0178-0133. Fecha declarada: 14/02/2025 08:13 PM  
Esta representación visual no es una fuente de confianza, valide siempre la firma.

---

**Lcda. Edith Raissa Pizarro Alfaro**

**Código 35554**

## **Declaración jurada**

### **DECLARACIÓN JURADA**

El suscrito, **José Daniel Gómez Barrantes** con cédula de identidad número 208000194, declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: Que soy el autor (a) del presente trabajo final de graduación, modalidad memoria; para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica Nacional y que el contenido de dicho trabajo es obra original del suscrito.

Fecha: 8 de febrero de 2025

JOSE DANIEL GÓMEZ BARRANTES

Nombre del estudiante

## **Dedicatoria y agradecimientos**

Mi profundo agradecimiento, en primer lugar, a Dios, a mis padres y a todos aquellos seres queridos que estuvieron a mi lado durante toda la carrera, brindándome su apoyo incondicional. Mi gratitud también se extiende al personal de Prysmian Centroamérica & Caribe por brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo final de graduación en su empresa, una experiencia invaluable en mi formación profesional. Finalmente, agradezco a todos los profesores de Ingeniería Electromecánica por compartir su conocimiento y ser parte fundamental de este proceso de aprendizaje.

## Tabla de contenidos

Capítulo 1. Introducción .....	13
1.1 Resumen.....	13
1.2 Objeto de estudio.....	14
1.2.1 Línea de investigación .....	14
1.2.2 Área de investigación.....	14
1.2.3 Tema de investigación .....	14
1.2.4 Variables de estudio.....	15
1.3 Delimitación del problema y justificación.....	15
1.3.1 Situación problemática.....	15
1.3.2 Definición del problema.....	17
1.4 Objetivos .....	20
1.4.1 Objetivo general.....	20
1.4.2 Objetivos específicos .....	20
1.5 Alcance .....	21
Capítulo 2. Marco teórico .....	26
2.1 Historia del mantenimiento.....	26
2.2 Objetivos del mantenimiento.....	26
2.2.1 Tipos de averías.....	27
2.2.2 Clasificación de fallas .....	28

2.3	Tipos de mantenimiento .....	29
2.3.1	Mantenimiento correctivo .....	29
2.3.2	Mantenimiento preventivo .....	30
2.3.3	Mantenimiento predictivo .....	31
2.4	Gestión del mantenimiento .....	32
2.4.1	Indicadores de mantenimiento .....	33
2.4.2	Confiabilidad .....	36
2.4.3	Disponibilidad.....	42
2.5	Análisis de falla .....	42
2.5.1	Metodologías de análisis de falla .....	43
2.5.2	Proceso Analítico Jerárquico AHP .....	44
2.6	Costos de mantenimiento .....	47
2.6.1	Costos fijos .....	47
2.6.2	Costos variables .....	48
2.6.3	Costos de fallas .....	48
Capítulo 3.	Marco metodológico.....	50
3.1	Hipótesis .....	50
3.2	Tipo de investigación.....	50
3.3	Definición de variables .....	50
3.4	Muestra .....	51

3.5	Proceso metodológico.....	52
Capítulo 4.	Desarrollo de la propuesta .....	55
4.1	Priorización de áreas mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) ..	55
4.1.1	Definición de las alternativas .....	55
4.1.2	Definición de criterios.....	55
4.1.3	Esquematización del modelo AHP .....	56
4.1.4	Cálculo de consistencia .....	56
4.1.5	Cálculo del vector propio.....	60
4.1.6	Alternativas evaluadas en criterios .....	64
4.1.7	Resultado final de ponderación.....	67
4.2	Cálculo de correlaciones.....	69
4.2.1	Relación entre el costo de reparación y el tiempo de averías en horas 69	
4.2.2	Relación entre el costo de reparación y la cantidad de averías .....	71
4.3	Clasificación de la información.....	74
4.3.1	Identificación de repuestos más utilizados para atender averías.....	78
4.4	Análisis de equipos .....	79
4.4.1	Caso 1- Máquina 503.....	80
4.4.2	Caso 2- Máquina 512.....	106

4.5	El efecto de la confiabilidad sobre la variabilidad en los costos de mantenimiento .....	109
4.5.1	Análisis de costos .....	113
4.6	Propuestas de solución.....	115
4.6.1	Mejoras en la recolección de datos.....	115
4.6.2	Mejoras en el plan de mantenimiento preventivo de 503.....	119
Capítulo 5.	Conclusiones y recomendaciones .....	121
5.1	Conclusiones.....	121
5.2	Recomendaciones .....	123
Capítulo 6.	Bibliografía .....	125
Capítulo 7.	Anexos.....	130
7.1	Plan de mantenimiento actual de máquina 503 .....	130
7.2	Propuesta de formulario para recopilación de información .....	140

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Resumen

La reducción de costos y optimización de procesos es crucial para cualquier empresa que busque mantenerse competitiva en el mercado. El sector industrial, en particular, se ve desafiado por la necesidad de mantener la confiabilidad y disponibilidad de sus equipos de producción para garantizar la continuidad operativa y la rentabilidad. Es por lo que la gestión eficiente del mantenimiento se convierte en un factor clave para el éxito de cualquier empresa industrial.

El proyecto de graduación propuesto pretende evaluar el efecto de la mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad sobre la variabilidad de los costos de mantenimiento en una empresa manufacturera de cable eléctrico analizando información histórica recopilada entre 2021 y 2023 para identificar los principales factores que afectan la variabilidad de los costos de mantenimiento, durante el año 2024.

La investigación se inicia con la documentación de la situación actual, recopilando datos de bitácoras diarias de técnicos y vales de salida del almacén de repuestos y entrevistas con el personal técnico del área. La documentación abarca un período de tres años (2021-2023). Esta información, que comprende más de 28000 datos, será fundamental para comprender los patrones históricos de mantenimiento, identificar los equipos más críticos y establecer una base sólida para el análisis posterior.

Esta información será analizada mediante herramientas como Excel y Power BI, además que se utilizarán métodos matemáticos y estadísticos para determinar la variación de los costos de mantenimiento y demostrar cómo esto está afectando en la planeación del presupuesto de mantenimiento. Se buscan encontrar mejoras que se puedan aplicar para disminuir esta variabilidad, pero sin afectar la mantenibilidad, disponibilidad y confiabilidad de los equipos de producción.

Para evaluar la efectividad de los métodos matemáticos utilizados se realizará una prueba de la hipótesis en la cual se medirá la diferencia de lo calculado con respecto a lo sucedido. Además, se logrará realizar una proyección de los resultados obtenidos para los próximos 3 años y que se logre demostrar la efectividad de las mejoras propuestas.

## **1.2 Objeto de estudio**

El efecto de la mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad sobre los costos de mantenimiento en una empresa de manufactura de cable eléctrico en Costa Rica durante el segundo y tercer cuatrimestre del 2024.

### **1.2.1 Línea de investigación**

Maquinaria y mantenimiento industrial

### **1.2.2 Área de investigación**

Evaluación económica del mantenimiento

### **1.2.3 Tema de investigación**

Costos de mantenimiento

#### **1.2.4 Variables de estudio**

Mantenibilidad, confiabilidad, disponibilidad y costos de mantenimiento.

### **1.3 Delimitación del problema y justificación**

#### **1.3.1 Situación problemática**

El cable eléctrico es un elemento fundamental para los avances tecnológicos, la industrialización y la urbanización de los tiempos modernos. Estos cables permiten que todo el mundo se encuentre conectado, al permitir el paso de corriente eléctrica y transferencia de datos por distancia que atraviesan países y continentes. El cable eléctrico también se utiliza a pequeñas y medianas escalas con funciones importantes para el desarrollo humano a nivel mundial, todo hospital, centro de salud, centro de educación, centro de información y cualquier otro recinto que requiera de electricidad posee sin duda cables de cobre o aluminio que alimentan de corriente eléctrica. Según Sergio Molinos Riera (2017), en su trabajo de Fin de Grado para la Universidad Politécnica de Valencia, se estima que por cada metro cuadrado industrial se requiere unos 6 metros de cable eléctrico. Esta estimación se puede acercar bastante en instalaciones residenciales, comerciales o industriales y esto demuestra la demanda real que poseen los conductores eléctricos.

Los conductores eléctricos se pueden clasificar de diferentes maneras. Según su material: acero, cobre o aluminio. Según su tipo de aislamiento: PVC, EPR, desnudo. Según su tensión: alta, media, baja tensión. Según su uso: transferencia eléctrica, transferencia de datos, control eléctrico, entre otros.

Prysmian es la empresa líder a nivel mundial en la industria manufacturera de cables y esta posee la planta más grande de Centroamérica en Costa Rica. 7 (Revista SUMMA, 2022). Esta empresa aporta un gran valor social y económico del país, ya que genera más de 300 empleos directos y 800 empleos indirecto siendo de suma importancia la permanencia y crecimiento de Prysmian en Costa Rica, para que de esta manera se contribuya a la reducción del desempleo que afecta a más de 163,884 adultos desempleados en Costa Rica en el IV trimestre del 2023 (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS, 2023). Por otra parte, la empresa factura más de \$200 millones anuales, lo que representa un gran aporte de dinero al país al momento de cobrar los impuestos sobre las ganancias de la empresa. Es de suma importancia para el país que Prysmian continúe creciendo, en Costa Rica se manufacturó más de 33,838 toneladas de conductores eléctricos entre el año 2021 y 2022. (Revista SUMMA, 2022)

Los cables eléctricos manufacturados en Prysmian deben cumplir las normativas nacionales e internacionales que regulan la calidad del cable eléctrico, es por esta razón que esta empresa posee compromisos políticos con contratos de por medio que todo el cable manufacturado en la empresa cumple con certificación UL y es apto para ser utilizado en cualquier instalación electromecánica, siempre y cuando se posea una buena selección del cable por parte del diseñador. Prysmian posee la responsabilidad política y debe garantizar la calidad de cada cable manufacturado en la planta.

Una buena calidad del cable no es necesaria únicamente para que sea segura su instalación y su uso por años, sino que también es importante que la

resistencia eléctrica sea lo más baja posible, para evitar consumos inusuales poniendo en peligro la instalación eléctrica del recinto y las personas que se encuentran dentro de esta.

La fabricación del cable eléctrico bajo estos estándares de calidad y seguridad, requieren consumir recursos no renovables como lo es el cobre, aluminio y agua, además del consumo eléctrico y emisión de gases que se generan en el proceso de manufactura. Es por esta razón que se vuelve de suma importancia que el proceso de manufactura sea lo más eficiente posible y que no se desperdicie material por no cumplir los estándares de calidad. Para evitar esto y disminuir el impacto al medio ambiente los equipos de manufactura deben tener un mantenimiento electromecánico adecuado de manera que todo el proceso se logre de manera eficiente y con bajo impacto ambiental.

### **1.3.2 Definición del problema**

Prysmian es una empresa internacional dedicada a la manufactura de cable eléctrico de media y baja tensión en cobre y aluminio, esta empresa tiene una de sus sedes en Costa Rica. Actualmente existe un desconocimiento y falta de control en la confiabilidad, mantenibilidad y costos de mantenimiento preventivo y correctivo en la empresa. Se cuentan con 50 máquinas de producción que solo se controla su disponibilidad y se desconoce su mantenibilidad, confiabilidad y costos de mantenimiento, se desconoce si esta tendencia es alta o baja, además no se aplican análisis de causa raíz para atacar el mantenimiento.

La empresa cuenta con información valiosa para realizar este análisis, sin embargo, no se ha realizado un análisis exhaustivo de la situación para encontrar

puntos de mejora. La empresa tiene la problemática que las variaciones en los costos de mantenimiento son excesivamente inestables, lo que impide una correcta planeación del presupuesto de mantenimiento. Se tiene que para realizar el mismo mantenimiento en la misma máquina los costos varían considerablemente y esta problemática no ha sido objeto de estudio para la empresa.

Para realizar este análisis se cuenta con dos bases de datos recopiladas entre enero de 2021 y diciembre de 2023.

La primera base de datos recopila bitácoras diarias de los técnicos donde se registran datos como fecha, turno, área afectada, número de máquina, descripción de la falla, acciones correctivas, tiempo de reparación y técnico responsable. 10

Por otra parte, la segunda base de datos muestra los repuestos utilizados durante ese periodo, incluyendo detalles como fecha de retiro, código, descripción, cantidad, máquina destino, tipo de mantenimiento y costos.

Esta carencia impide conocer la eficacia de los mantenimientos correctivos y preventivos, dificulta determinar el tiempo promedio entre fallas, desconocimiento de equipos propensos a fallos, escasez de análisis de causa raíz y desconocimiento del comportamiento de los costos de mantenimiento y su relación con la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de los equipos de producción.

Los antecedentes indican que este problema ha sido recurrente en la empresa y es muy probable que se agrave a medida que se adquieran más máquinas de manufactura. La falta de un enfoque en el análisis de datos ha llevado a que nuevas integraciones a la flota de equipos sigan enfrentándose a la misma dinámica de

reparación sin un estudio profundo de las causas raíz y sin un control de los costos históricos de los mantenimientos preventivos y correctivos. Toda esta situación afecta al área de mantenimiento, ya que la falta de análisis de datos impide realizar una correcta planeación del presupuesto de mantenimiento.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto de la mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad sobre los costos de mantenimiento en una empresa manufacturera de cable eléctrico mediante el análisis de información histórica recopilada entre 2021 y 2023 para la identificación de los principales factores que provocan variaciones de los costos de mantenimiento, durante el año 2024.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Analizar las bitácoras diarias de mantenimiento y el control de salida de repuestos mediante Excel y Power BI para la medición de la variabilidad de la mantenibilidad, confiabilidad, disponibilidad y costos de mantenimiento a través del tiempo.
2. Identificar las áreas con mayor grado de criticidad mediante un proceso analítico jerárquico que examine las alternativas y criterios más importantes para la priorización de las áreas de estudio.
3. Determinar la causa raíz de los problemas que afecta la variabilidad en los costos de mantenimiento mediante el diagrama de Ishikawa para la propuesta de acciones correctivas que mejoren la situación actual.
4. Implementar un plan piloto que disminuya la variabilidad de los costos de mantenimiento sin afectar negativamente la disponibilidad de los equipos.

## 1.5 Alcance

Este estudio busca evaluar el efecto de la mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad sobre los costos de mantenimiento en la empresa manufacturera de cable eléctrico Prysmian, ubicada en Heredia, Costa Rica. El proyecto busca identificar la o las razones de la variabilidad de los costos de mantenimiento con el fin de mejorar su control. Esta fluctuación impide una correcta proyección del presupuesto de mantenimiento, generando inestabilidad financiera y dificultando la toma de decisiones estratégicas.

El proyecto toma en cuenta 50 máquinas de producción indicadas a continuación:

Tabla 1. Listado de máquinas de producción

ID	Material	Área
151	Aluminio	Horno
152	Aluminio	Horno
201	Cobre	Estirado grueso
202	Cobre	Estirado grueso
251	Aluminio	Estirado grueso
252	Aluminio	Estirado grueso
301	Cobre	Estirado fino
302	Cobre	Estirado fino
304	Cobre	Estirado fino
305	Cobre	Estirado fino
306	Cobre	Estirado fino
351	Aluminio	Estirado fino
401	Cobre	Bunchado
451	Aluminio	Bunchado
452	Aluminio	Bunchado
503	Cobre	Bunchado
504	Cobre	Bunchado
505	Cobre	Bunchado
507	Cobre	Bunchado
508	Cobre	Bunchado
509	Cobre	Bunchado
510	Cobre	Bunchado
513	Cobre	Bunchado
514	Cobre	Bunchado
551	Aluminio	Bunchado
552	Aluminio	Bunchado
553	Aluminio	Bunchado
601	Cobre	Extrusión
602	Cobre	Extrusión
603	Cobre	Extrusión
604	Cobre	Extrusión
605	Cobre	Extrusión
651	Aluminio	Extrusión
751	Aluminio	Bunchado
752	Aluminio	Bunchado
901	Cobre	Corte y empaque
902	Cobre	Corte y empaque
903	Cobre	Corte y empaque
904	Cobre	Corte y empaque
906	Cobre	Corte y empaque
909	Cobre	Corte y empaque
910	Cobre	Corte y empaque
911	Cobre	Corte y empaque
912	Cobre	Corte y empaque

511	Cobre	Bunchado
512	Cobre	Bunchado
513	Cobre	Bunchado
514	Cobre	Bunchado

913	Aluminio	Corte y empaque
914	Aluminio	Corte y empaque
915	Aluminio	Corte y empaque
951	Aluminio	Corte y empaque

Fuente: Elaboración propia.

El análisis inicial se basará en toda la maquinaria, sin embargo, en la investigación se realizará una matriz de criterio en la cual se contemplarán las diferentes áreas de manufactura para determinar la línea de producción más crítica para la empresa y de esta manera llevar a cabo la investigación en los equipos involucrados. La matriz de criterio toma en cuenta el impacto en producción, obsolescencia, riesgos de seguridad, costos de mantenimiento y frecuencia de fallos.

El análisis de la información se realiza mediante Excel y Power BI. Por una parte, Excel será utilizado para el manejo primario de la información, de forma que se puedan depurar errores y clasificar la información con una mayor facilidad. Seguidamente se utilizará Power BI para convertir toda la información tabulada a gráficas. El fin de estas gráficas es determinar tendencias en el comportamiento de la información.

La información que se analizará es:

1. Bitácoras diarias de mantenimiento: Estas bitácoras son realizadas por los técnicos de mantenimiento en Excel al finalizar cada turno, en estas se indica información de todas las fallas que se atendieron durante el turno, la información suministrada es: fecha, número de máquina de falla, área de la máquina, turno, descripción de la falla por parte de producción, acciones realizadas para la

corrección de la falla, tiempo que se tardó en reparar y el nombre del técnico que lo realizó. A continuación, se muestra un ejemplo de la bitácora:

Tabla 2. Ejemplo formato de bitácora

Fecha	Turno	Zona	Maquina	Descripción Avería	Tiempo Avería / Horas	COMENTARIOS MANTENIMIENTO	Técnico
5/1/2021	6am- 2pm	Estirado	302	problemas con roles de rodillo y polea	1	Se cambian rodamientos de polea de salida de último capstan de recocido de 2h	Nelson

Fuente: Elaboración propia.

2. Control de vales de salida del almacén de repuestos: Esta es una base de datos que se maneja en Excel, que indica información acerca de los repuestos que se retiran de la bodega diariamente. En esta base se indica la fecha de salida, el código del repuesto, la descripción, la cantidad, la máquina destino, el tipo de mantenimiento y el costo unitario aproximado. A continuación, se muestra un ejemplo del control de vales:

Tabla 3. Ejemplo formato salida de repuestos

FECHA	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANT	MÁQUINA	TIPO MTTO.	COSTO UNI	COSTO TOTAL
5/1/2021	103- 0230	ROL SKF 6007-2Z (N)	2	302	CORRECTIVO	¢2 416,95	¢4 833,90

Fuente: Elaboración propia

Se espera que con análisis de esta información se encuentren tendencias en el comportamiento a lo largo del tiempo, mediante Power BI se graficarán líneas de tendencia a través el tiempo, se analizará el comportamiento por turno, por mes, por año, por técnico, entre otros.

Con esta información se calcula la disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad histórica de los equipos desde enero del 2021 hasta diciembre del 2023 para establecer condiciones iniciales de la investigación para que luego se pueda analizar un antes y un después del trabajo realizado. Además, se calculará la varianza y desviación estándar del costo de mantenimiento de las máquinas que pertenecen al área más crítica para la empresa para determinar el comportamiento que se tiene en el tiempo. Además, se aplicará un análisis causa raíz para encontrar las razones por las cuales existe esta variabilidad en los costos de mantenimiento.

Se aplicará un plan de acción que atenderá las causas encontradas y la duración de éste dependerá de los resultados obtenidos. Las estrategias utilizadas para el control de la variabilidad de los costos se definirán más a detalle en el desarrollo de la investigación, ya que se debe encontrar la causa raíz del problema mediante el análisis de datos.

Finalmente, se calculará la variabilidad después de aplicar el plan para medir el impacto económico obtenido. Este impacto se proyectará a las demás máquinas para obtener un resultado general de mejora si se aplicase a toda la planta de producción. La importancia de la disminución de la variabilidad de los costos de mantenimiento se refleja en un mejor control del presupuesto de mantenimiento ya que al disminuir la variabilidad se pueden estimar con mayor precisión los costos

que se van a tener a futuro y evitar inversiones extraordinarias de dinero en periodos determinados. Además, la disminución de la variabilidad mitiga riesgos de falta de repuestos y falta de mano de obra para cubrir paros inesperados.

## Capítulo 2. Marco teórico

### **2.1 Historia del mantenimiento**

La historia del mantenimiento industrial inicia desde principios del siglo XX, desde esta época las averías en las fábricas eran atendidas por los mismos operadores de las máquinas, estos eran los encargados de poner en marcha el equipo y garantizar su correcto funcionamiento durante todo el proceso productivo.

En los años 30 surgen las primeras empresas que deciden asignar las fallas de las máquinas a un grupo de personas que se dedican únicamente al diagnóstico y reparación de fallas en las máquinas de producción, siendo este el inicio del mantenimiento correctivo. Años más tarde con la llegada de la Segunda Guerra Mundial, nace la necesidad de no únicamente reparar las máquinas cuando fallan, sino de anticipar esas fallas. Esto generó que el sector productivo se diferenciara del sector de mantenimiento, ya que el personal técnico encargado de prevenir y solucionar las paradas tenía un perfil más profesional y cargaban con mayor responsabilidad que los operarios de las máquinas; esta necesidad de la industria por la anticipación de fallas resulta en la aparición del mantenimiento preventivo y por tanto la consolidación de un departamento de mantenimiento en las empresas de manufactura. (Sarmiento, 2020)

### **2.2 Objetivos del mantenimiento**

El mantenimiento industrial es una necesidad para la industria, independientemente del producto que se esté manufacturando. Toda maquinaria sufre un desgaste inevitable en sus piezas eléctricas, mecánicas y electrónicas,

estos desgastes deben ser tratados a tiempo para evitar que ocasionen un contratiempo en el proceso de producción.

De acuerdo con el libro Tecnología del mantenimiento industrial, la función principal del departamento de mantenimiento se basa en el “cumplimiento de todos los trabajos necesarios para establecer y mantener el equipo de producción de modo que cumpla los requisitos normales del proceso” (Casáreo, 1998). Estos trabajos no siempre son de fácil ejecución e involucran muchos factores y actividades adicional para que el buen mantenimiento destaque entre los departamentos de una organización. Entre los factores más importantes se encuentra el tiempo de reparación y su costo asociado para que se pueda considerar que se realiza un eficaz y eficiente. (Sarmiento, 2020)

### **2.2.1 Tipos de averías**

Para clasificar los diferentes tipos de averías, primero se debe entender la diferencia entre avería, falla y defecto.

- Un defecto se define como “cualquier desviación que cambie una característica del activo en relación con su objetivo, clasificándose en diferentes niveles de criticidad. Los defectos pueden o no afectar la capacidad productiva del activo.” (Engeman, S.F).
- Una falla sucede “cuando el activo alcanza la incapacidad para desempeñar su papel funcional. La falla es un evento que impide que el activo funcione, no el estado en el que se encuentra” (Engeman, S.F).

- Una avería es el “estado en que se encuentra el bien después de la falla, por lo que descartamos el mantenimiento preventivo u otras acciones planificadas.” (Engeman, S.F).

Las fallas se pueden clasificar en diferentes tipos según su origen.

- a) Fallas mecánicas: En esta categoría los componentes que fallan son piezas fijas o móviles que, debido a temas de corrosión, fatiga, desgaste y/o deformación dejan de cumplir su función e impiden el correcto funcionamiento de la máquina.
- b) Fallas eléctricas: Todos los componentes alimentados por corriente eléctrica están expuestos a una falla eléctrica, que puede deber desde una interrupción de fluido hasta cortocircuitos y sobrecargas.
- c) Fallas de proceso: Las máquinas están diseñadas para trabajar en condiciones específicas definidas por el fabricante, si el equipo no se utiliza para lo que es diseñado es muy probable que falle por procesos inadecuados.
- d) Fallas de calidad: una máquina de producción pretende transformar la materia prima en un producto final, que debe cumplir estándares de calidad, si un equipo produce producto defectuoso se dice que tiene una falla de calidad.
- e) Fallas operacionales: Este tipo de falla ocurre cuando el equipo es operado incorrectamente. “Algunos ejemplos de fallas operacionales en el mantenimiento industrial son error de diagnóstico, errores de instalación, falta de seguimiento, falta de capacitación, falta de atención”. (MINT, 2023)

### **2.2.2 Clasificación de fallas**

Para las organizaciones es importante identificar las principales averías que afectan su proceso productivo para poder mitigarlas. Con el fin de estandarizarlas y

trabajar de una manera ordenada, las fallas se clasifican en diferentes categorías, esta clasificación se realiza en los llamados “Catálogos de fallas”.

Según Medina,

“catálogo de fallas es la mejor manera y la más ordenada que tiene una empresa de presentarle a la organización de una manera proactiva y en un mismo documento los elementos que causan deterioros de sus equipos, así como las acciones de mitigación que permitirán su continuidad operacional.” (Medina, 2014)

La categorización de las fallas va a depender directamente de los equipos de producción y de sus componentes, ninguno catálogo de fallas será idéntico en dos industrias, aunque manufacturen el mismo producto.

### **2.3 Tipos de mantenimiento**

El mantenimiento se divide en diferentes áreas, todas estas cumplen el mismo objetivo de aumentar la disponibilidad de las máquinas de producción el mayor tiempo posible al menor costo, sin embargo, entre estas diferentes áreas se atacan las averías de diferentes maneras. Las principales divisiones que se encuentran en los departamentos de mantenimiento son: mantenimientos correctivos, preventivos, predictivos y mantenimiento productivo total.

#### **2.3.1 Mantenimiento correctivo**

Este tipo de mantenimiento, “sólo se interviene en los equipos cuando el fallo ya se ha producido. Se trata, por tanto, de una actitud pasiva, frente a la evolución del estado de los equipos, a la espera de la avería o fallo”. (Casáreo, 1998). Por

tanto, este tipo de mantenimiento es el que más se debe evitar, ya que un bajo mantenimiento correctivo indica que los equipos se encuentran trabajando sin mostrar fallos.

Además, este tipo de mantenimiento es costoso para la empresa, ya que, por la urgencia de reparación del equipo, se repara a como dé lugar, pasando el gasto de reparación a segundo plano. De acuerdo con Antonio Creus, “el mantenimiento correctivo es 10 veces más caro que el mantenimiento preventivo. Dentro del coste de mantenimiento del lazo de control, el mantenimiento correctivo representa el 60%, mientras que el objetivo de las compañías debería ser 10%” (Creus, 2009).

### **2.3.2 Mantenimiento preventivo**

Este tipo de mantenimiento debe ser el pilar fundamental para cualquier empresa que busque aumentar la disponibilidad de sus máquinas de producción. Este mantenimiento se planea con anticipación y es ejecutado por un equipo multidisciplinario de técnicos que conocen el equipo.

El mantenimiento preventivo se basa en realizar rutinas de trabajo a todos aquellos equipos que estén dentro del alcance del mantenimiento, estas rutinas se realizan mediante manuales de los equipos, recomendaciones del fabricante o experiencia de la compañía. Asimismo, la frecuencia de aplicación se determina según el uso, la disponibilidad de paro y entre otros factores únicos de cada situación.

La correcta planeación del mantenimiento preventivo es vital para cumplir con el tiempo destinado por producción para el mantenimiento de la máquina, si no se

cuentan con todos los repuestos, herramientas y recurso humano suficiente para aplicar la rutina de mantenimiento en el tiempo establecido, si este tiempo no se cumple se tendrá un impacto negativo en el proceso de producción.

Este mantenimiento también se usa para realizar mantenimientos correctivos fuera de las rutinas, pero que por diversas razones no se pueden resolver antes y no es hasta la fecha de mantenimiento preventivo que se interviene la máquina para repararlo.

Debido a la organización requerida para este mantenimiento se dice que el mantenimiento preventivo “requiere una estructura técnica, humana y administrativa y solamente pueden implementarse en aquellas empresas cuya tecnología de procesos, niveles productivos y recursos lo permitan” (Sarmiento, 2020). Sin embargo, las empresas que logran implementarlo se ven beneficiados al aumentar la disponibilidad de los equipos.

### **2.3.3 Mantenimiento predictivo**

El mantenimiento predictivo se basa en el análisis de datos, los cuales buscan la predicción de fallas para que sean controladas antes de que causen una avería. La información analizada surge de mediciones tomadas en las máquinas mientras se encuentran operando. Algunos ejemplos de mediciones tomadas son: consumos eléctricos, análisis de vibraciones, termografías, monitoreo acústico y entre otros.

La importancia del mantenimiento predictivo es que permite determinar el momento oportuno para intervenir una máquina:

“Cuando simplemente se programa el mantenimiento cada cierto tiempo (preventivo), pueden ocurrir dos cosas: o bien se realiza cuando no es necesario —antes de tiempo o tarde—, incurriendo en costes evitables, o bien no es lo bastante frecuente, con el riesgo de que los equipos den fallos. Así pues, el objetivo del mantenimiento predictivo es optimizar el uso de los recursos de mantenimiento.” (Iberdrola, S.F)

Así se mejora el rendimiento de los equipos y optimizar mantenimientos, pero la desventaja de este mantenimiento es que requiere una inversión inicial alta, ya que se deben adquirir herramientas e instrumentos de medición con costos muy elevados, además se capacitará al personal que tome y analice los datos obtenidos en el piso de producción.

## **2.4 Gestión del mantenimiento**

La gestión del mantenimiento es la coordinación de las diferentes secciones del departamento de mantenimiento para lograr que la empresa alcance la mayor productividad posible.

“Por lo tanto, la gestión del mantenimiento está asociada a la dirección y organización de diversos recursos para controlar la disponibilidad y el rendimiento de la unidad industrial a un nivel determinado.

A su vez, ayuda a las empresas a mantener sus recursos al tiempo que controlan el tiempo y los costes para garantizar la máxima eficiencia del proceso de fabricación y las instalaciones relacionadas.” (Centro de formación técnica para la industria, S.F)

Por lo general, el departamento de mantenimiento controla cantidades considerables de dinero, que debe utilizarse inteligente para evitar que la empresa pierda dinero. Es por esta razón que la gestión del mantenimiento puede condicionar el éxito o el fracaso en una empresa.

Pero ¿Cómo se puede medir la correcta gestión del mantenimiento en una empresa? Esto se logra mediante la implementación de indicadores de mantenimiento, los cuales muestren el camino que está tomando el departamento y se logre expresar en resultados tangibles.

#### **2.4.1 Indicadores de mantenimiento**

Los indicadores son parte fundamental del desarrollo de una organización, un indicador

“es un valor que permite conocer el comportamiento de una función o tarea, así como una empresa ante determinado valor crítico o ante una variable que queremos revisar más adelante, o en su defecto, hacer un seguimiento y monitoreo dentro de la organización.” (Getnet, 2022)

Una característica de un indicar es que este siempre será un cociente, es decir, será el resultado de una división entre dos valores relevantes en una empresa. Esto sucede debido a que siempre se debe medir el comportamiento de una variable con respecto a la otra. Por ejemplo, si se habla que el costo de producción de una empresa es de \$20,000 es muy difícil interpretar este dato porque no se está relacionado con la cantidad de unidades producidas. Por otro lado, si se habla que el costo de producción es de 15\$/unidad producida, es más fácil llevar una métrica

coherente que sea medible y mejorable. En el ejemplo anterior el indicador sería costo de producción por unidad producida.

Cuando el objetivo de una empresa es crecer, es inevitable el uso de todo tipo de indicadores, estos permiten resaltar la posición en la que se encuentra la empresa y permite que la mejora continua de la organización sea algo medible.

“Debemos ser conscientes de que sólo podemos mejorar de forma objetiva aquello que se pueda medir. Por tanto, cualquier responsable técnico de una empresa o un departamento que afronte un proceso de mejora serio y riguroso, debe plantearse profundamente la necesidad de medir en qué situación se encuentra ahora y cuál va a ser la forma de medir el éxito o fracaso de las nuevas medidas adoptadas.” (González, 2004)

Por tanto, en todo departamento de mantenimiento que tenga dentro de sus objetivos, mejorar y ofrecer un mejor servicio, debe considerar el uso de indicadores de mantenimiento. Entre los indicadores más utilizados se encuentra: MTTF, MTTR, MTBF, Backlog y Down time.

#### **2.4.1.1 MTTF**

El MTTF por sus siglas en inglés Medium Time To Failure se define como “el tiempo promedio hasta que se produzca un fallo para un número de muestras de un producto”. (Bolton, 1996). Este es uno de los indicadores más utilizados en la industria del mantenimiento, se calcula de la siguiente manera:

$$MTTF = \frac{(T1 + T2 + T3 + TN)}{N}$$

Donde TN representa los tiempos de operación de los equipos y N la cantidad de averías que tuvo.

Este indicador se espera que sea lo más alto posible, ya que esto indicaría que pasa tiempo hasta que se produzca una avería.

#### **2.4.1.2 MTTR**

El MTTR por sus siglas en inglés Medium Time To Repair se define como “la medida del tiempo que se tarda en reparar un sistema incluye tanto el tiempo de reparación como el tiempo de prueba.” (ATLASSSIAN, S.F.). El cálculo de este indicador se realiza de la siguiente manera:

$$MTTR = \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_x)}{R_N}$$

Donde  $R_x$  hace referencia a los tiempos que se tarda en reparar el equipo y  $R_N$  la cantidad de intervenciones que realizadas.

El valor de este indicador se busca que sea lo más bajo posible, ya que esto supondría que las averías se atienden rápido y por ende su disponibilidad no se ve impactada de gran manera.

#### **2.4.1.3 MTBF**

El MTBF se define como el tiempo medio entre fallos (Mean Time Between Failures). Este indicador muestra el tiempo medio entre cada ocurrencia de una parada específica, por tanto, entre mayor sea este indicador, mayor será la disponibilidad del sistema. El cálculo matemático de este indicador se realiza según la siguiente ecuación:

$$MTBF = \frac{\textit{Tiempo total de operacion}}{\textit{Cantidad de fallos}}$$

#### **2.4.1.4 Backlog**

Este indicador tiene como objetivo dirigir el trabajo de los equipos siendo una forma de conocer la demanda y la capacidad de ejecución del personal. Este indicador mide los trabajos planificados, programados, ejecutados y pendientes. (Tractian MX, 2023). El cálculo de este indicador se realiza de la siguiente manera:

*Backlog*

$$= \frac{\sum \textit{HH Planificadas} + \sum \textit{HH Pendientes} + \sum \textit{HH Programadas} + \sum \textit{HH Ejecutadas}}{\textit{HH Disponible}}$$

Donde HH se refiere a las horas hombre, es decir, si por cada turno de trabajo de 8 horas se encuentran 2 técnicos de mantenimiento en total la sumatoria de horas hombre por turno serían de 16 horas.

El valor numérico obtenido del cálculo se espera que sea lo más cercano a uno posible, en caso de que el resultado sea muy elevado significa que no hay suficientes personas para realizar las tareas y por ende existe un atraso muy grande en tareas por realizar, por otro lado, los valores menores a uno indican cantidad excesiva de personal para realizar las actividades.

#### **2.4.2 Confiabilidad**

De acuerdo con (Arata, 2013), la confiabilidad “permite calcular de forma robusta e intrínseca la probabilidad de no funcionamiento del sistema productivo, debido a acciones operacionales o de mantenimiento”. Entre más confiable es un sistema, menor será su probabilidad de falla y por tanto su disponibilidad será mayor.

La probabilidad de falla es la diferencia de la confiabilidad con respecto a la disponibilidad para alcanzar el 100% del tiempo. Al analizarlo de forma matemática se tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Confiabilidad} = 1 - \text{Probabilidad de falla}$$

O visto de manera algebraica:

$$C(t) = F(t) - 1$$

Por tanto, si se dice que un componente posee una probabilidad de falla de 90%, significa que su confiabilidad es de tan solo 10%.

El cálculo de la confiabilidad de un sistema dependerá de su comportamiento, es por ello que el primer paso para determinar la confiabilidad de un componente se debe determinar su distribución. De acuerdo con Medina, Vega, & Chourio (2007):

“Para estimar confiabilidad con estadística paramétrica, es necesario caracterizar probabilísticamente la variable tiempo para fallar, es decir; encontrar la distribución paramétrica  $f(t)$  que mejor se ajusta a los datos. Los datos para analizar deben ser tiempos de operación de  $n$  equipos similares con los cuales se definirá la distribución de densidad de probabilidades  $f(t)$ . Una vez definida  $f(t)$ , se obtienen la distribución acumulada directa  $F(t)$  que corresponde a la probabilidad de fallas y la distribución acumulada inversa  $C(t)$  que corresponde a la confiabilidad.”

Para encontrar la distribución paramétrica que mejor se ajusta a los datos se plantean hipótesis las cuales deben ser validadas mediante pruebas de ajuste de

bondad las cuales son las responsables de indicar si la hipótesis se rechaza o se acepta. Las distribuciones más comunes para la confiabilidad de un sistema son: Normal, Weibull y Gamma, en caso de que la muestra no se ajuste a ninguno de esas distribuciones se continúa realizando ajustes con otras distribuciones como lognormal, bañera y entre otros hasta encontrar una distribución que pueda ser utilizada según el resultado obtenido en las pruebas de bondad.

Las ecuaciones matemáticas para el cálculo de la confiabilidad se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4. Ecuaciones para diversas distribuciones de probabilidad

Distribución	$f(t)$	$F(t)$	$C(t)$	$h(t)$	TPPF
Exponencial	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	$C(t) = e^{-\lambda t}$	$h(t) = \lambda$	$TPPF = \frac{1}{\lambda}$
Weibull	$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$C(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$	$TPPF = \alpha I \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$
Gamma	$f(t) = \frac{t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{t}{\beta}}$	$F(t) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^t \mu^{\alpha-1} e^{-\frac{\mu}{\beta}} d\mu$	$C(t) = 1 - F(t)$	$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	$TPPF = \beta \alpha$
Normal	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu-\mu}{\sigma}\right)^2} d\mu$	$C(t) = 1 - F(t)$	$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	$TPPF = \mu$
Log- Normal	$f(t) = \frac{1}{\alpha t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\alpha}\right)^2}$	$F(t) = \int_0^t f(t) dt$	$C(t) = 1 - F(t)$	$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	$TPPF = e^{\left[\mu + \frac{1}{2}\alpha^2\right]}$

Fuente: (Medina, Vega, & Chourio, 2007)

Como se observa, cada distribución posee diferentes parámetros, como lo son: Beta, Alpha, Lambda y entre otros. Estos parámetros se calculan de diferente forma según la distribución en estudio.

Tabla 5. Ecuaciones de parámetros según las diferentes distribuciones

Distribución	Parámetros	Todos los "n" equipos de la muestra han fallado ( $t_i:1,2,\dots,n$ )	Solo "m" equipos han fallado ( $t_i:1,2,\dots,m$ ) y "w" equipos no han fallado ( $t_j:1,2,\dots,w$ ) (datos censados)
Exponencial	$\lambda$	$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i}$	$\lambda = \frac{m}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{j=1}^w t_j}$
Weibull	$\alpha$	$\alpha = \left( \frac{\sum_{i=1}^n t_i^\beta}{n} \right)^{1/\beta}$	$\alpha = \left( \frac{\left( \sum_{i=1}^m t_i^\beta \right) + \left( \sum_{j=1}^w t_j^\beta \right)}{m} \right)^{1/\beta}$
	$\beta$	$\frac{\sum_{i=1}^n [t_i^\beta \ln(t_i)]}{\sum_{i=1}^n t_i^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i)$	$\frac{\sum_{i=1}^m [t_i^\beta \ln(t_i)] + \sum_{j=1}^w [t_j^\beta \ln(t_j)]}{\left( \sum_{i=1}^m t_i^\beta \right) + \left( \sum_{j=1}^w t_j^\beta \right)} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \ln(t_i)$
Gamma	$\alpha$	$\alpha = \frac{(n-1) \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2}{n^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \mu_x)^2}$	Solución numérica
	$\beta$	$\beta = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \mu_x)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n t_i}$	Solución numérica
Normal	$\mu$	$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$	Solución numérica
	$\sigma$	$\sigma^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2$	Solución numérica
Log- Normal	$\mu_r$	$\mu_t = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(t_i)}{n}$	Solución numérica
	$\sigma_r$	$\sigma_t^2 = \frac{1}{(n)} \sum_{i=1}^n (\ln(t_i) - \mu_r)^2$	Solución numérica

Fuente: (Medina, Vega, & Chourio, 2007)

Una vez calculados los parámetros y las probabilidades de falla se aplican pruebas de bondad. Estas pruebas son un análisis estadístico que permite aceptar o rechazar cada una de las hipótesis planteadas y determinar cuál de ellas es la más apropiada. Un ejemplo de una prueba de bondad es la llamada Prueba de Kolmogórov-Smirnov.

De acuerdo con Marques (S.F) “Si las funciones de distribución acumulada teórica y muestral no son significativamente diferentes, entonces decimos que la muestra proviene de la distribución cuya función acumulada es  $F(X)$ . Sin embargo, si las diferencias entre las funciones distribución acumuladas son muy grandes como para que no sean debidas solamente al azar, rechazamos  $H_0$ ”. Para determinar la diferencia máxima que permita entre las probabilidad acumuladas se utiliza la siguiente escala:

Tabla 6. Valores críticos para la prueba de Kolmogórov-Smirnov

TAMAÑO DE MUESTRA	NIVEL DE SIGNIFICANCIA $\alpha$				
	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
n					
1	0.9	0.1	0.975	0.99	0.995
2	0.684	0.776	0.842	0.9	0.929
3	0.565	0.636	0.708	0.689	0.829
4	0.493	0.565	0.624	0.689	0.829
5	0.477	0.509	0.563	0.627	0.669
6	0.41	0.468	0.519	0.577	0.617
7	0.381	0.436	0.483	0.538	0.576
8	0.359	0.41	0.454	0.507	0.542
9	0.339	0.387	0.43	0.48	0.513
10	0.323	0.369	0.409	0.457	0.486
11	0.308	0.352	0.391	0.437	0.468
12	0.295	0.338	0.375	0.419	0.449
13	0.285	0.325	0.361	0.404	0.432
14	0.275	0.314	0.349	0.39	0.418
15	0.266	0.304	0.338	0.377	0.404
20	0.232	0.265	0.294	0.329	0.352
25	0.208	0.238	0.264	0.295	0.317
30	0.19	0.218	0.242	0.27	0.29
40	0.165	0.189	0.21	0.235	0.252
n grande	$1.07/n^{1/2}$	$1.22/n^{1/2}$	$1.36/n^{1/2}$	$1.52/n^{1/2}$	$1.63/n^{1/2}$

Fuente: *Fundamentos de hidrología de superficie. Aparicio F., 1992*

Fuente: (Aparicio, 1992)

Según el grado de significancia que se utilice existe un valor de diferencia máximo para aceptar la hipótesis. Por ejemplo si se establece un grado de significancia de 5% significa que el modelo esta dispuesto a aceptar un 5% de probabilidad de equivocarse y aceptar una hipótesis nula. Es decir, el nivel de significancia indica el criterio que se utiliza para decidir si una hipótesis es aceptada basándose en la probabilidad de cometer un error.

### **2.4.3 Disponibilidad**

La disponibilidad es el porcentaje del tiempo que un equipo de producción se encuentra preparada y lista para ser utilizada en el proceso productivo de una planta de manufactura. Este tiempo se calcula de la siguiente manera:

$$Disponibilidad = \frac{Tiempo\ productivo}{Tiempo\ disponible} * 100$$

Se busca que este valor sea lo más cercano al 100%, ya que esto demuestra que la máquina no estuvo detenida por averías en el sistema.

### **2.5 Análisis de falla**

En la industria, una falla es cualquier desperfecto que impida el correcto funcionamiento de máquinas o equipos de producción. Estas fallas deben ser atendidas en el menor tiempo posible por parte del equipo responsable para causar el menor impacto posible en el desarrollo del negocio. Las consecuencias de las fallas dependerán de su tipo de falla y del componente que causa la avería, sin embargo, se puede mencionar que una falla por lo general genera imprevistos en producción, calidad, seguridad o el medio ambiente.

La importancia de solventar una falla no se centra únicamente en la reparación temporal de la avería, sino debe ser un análisis lo suficientemente profundo que permita determinar la causa raíz de esta para que al ser atacada no se repita nuevamente a lo largo del tiempo (Torres, 2015). Es por esta razón que se aplican diferentes metodologías que facilitan la visualización de estas causas para generar planes de acción que erradiquen el problema de una vez por todas.

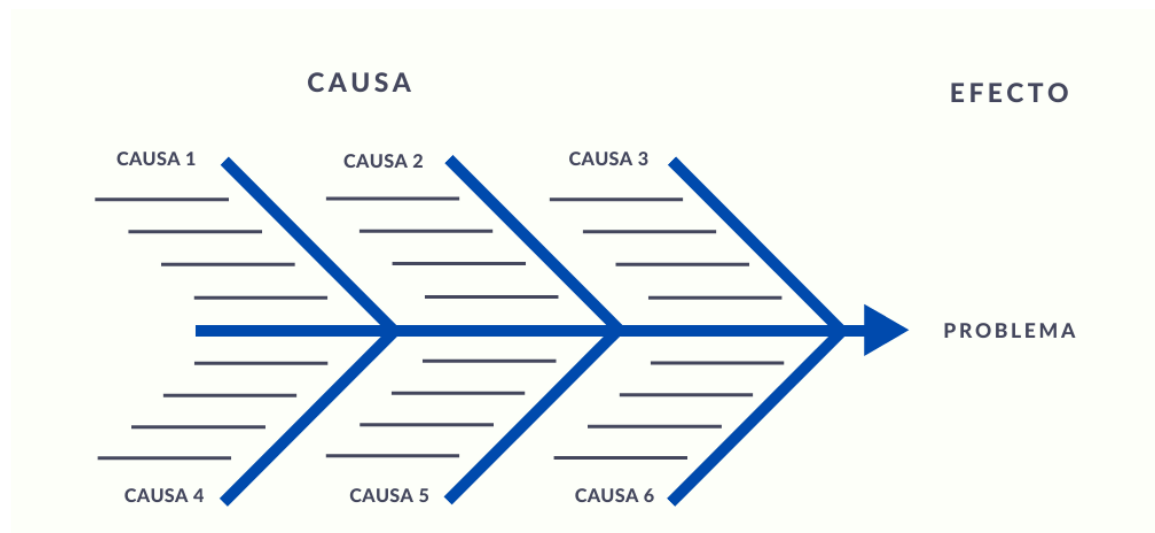
## 2.5.1 Metodologías de análisis de falla

Como se menciona anteriormente, esta metodología permite hallar la causa raíz de un problema. Existe gran cantidad de metodologías, sin embargo, entre las más destacadas se encuentran:

### 2.5.1.1 Ishikawa

Esta metodología también conocida como Causa/Efecto consiste en desarrollar un diagrama en el cual se anotan todas las posibles causas que causan el efecto que se busca resolver. Las causas deben ser categorizadas en seis diferentes categorías: máquina, medio ambiente, material, personas, método y medición.

Figura 1. Ejemplo diagrama de Ishikawa



Fuente: (Medina L. , 2023)

De esta forma se permite observar cada una de las posibles causas que están ocasionando un efecto no deseado. La finalidad de este diagrama es que al final se

obtenga una lista de las causas más relevantes y poder resolver con un plan de acción.

#### **2.5.1.2 Técnica de los 5 por qué**

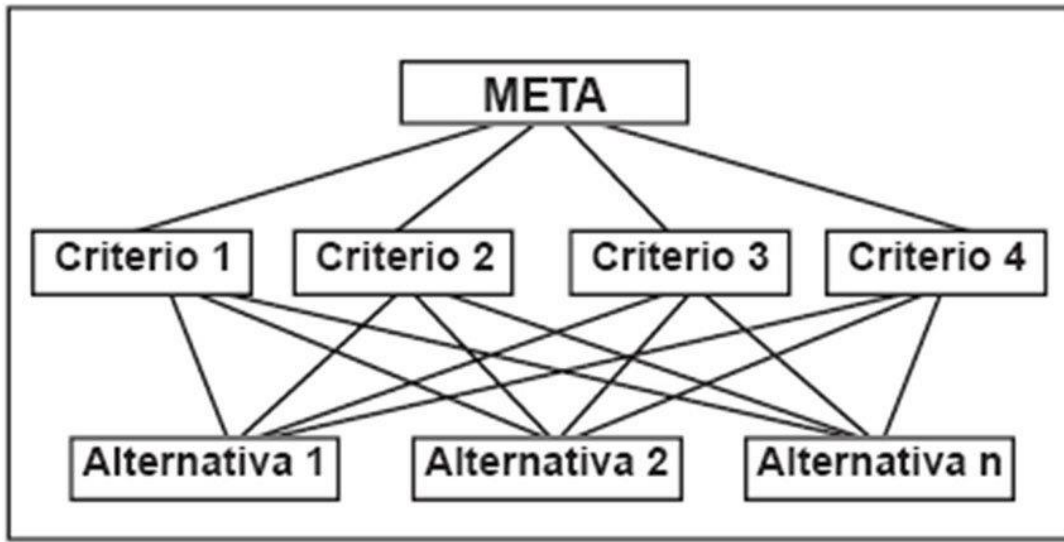
Esta técnica consiste en preguntar 5 veces el porqué de una situación, de manera tal que la primera pregunta hace referencia al problema en general, la segunda pregunta se realiza a la primera respuesta y así sucesivamente hasta llegar a la quinta respuesta. En este punto ya se puede detener el análisis y se selecciona la última causa que salió a la luz como la posible causa raíz del efecto que se encuentra en estudio.

#### **2.5.2 Proceso Analítico Jerárquico AHP**

Para enfocar el trabajo final de graduación, se deben priorizar las áreas en las que se realiza el estudio. De acuerdo con (Leyva, Gatell, & Álvarez, 2019), entre las herramientas utilizadas para determinar la intensidad de interrelación entre diferentes alternativas y criterios se encuentra el Proceso Analítico Jerárquico el cual resulta de gran utilidad para la toma de decisiones debido a que permite medir cuantitativamente los diferentes escenarios mediante matrices de comparación pareadas para determinar la mejor opción.

Esta metodología posee la ventaja que es capaz de analizar grandes cantidades de criterios y alternativas a la misma vez, a continuación, se muestra un ejemplo de una estructura jerárquica:

Figura 2. Esquematización del Proceso Analítico Jerárquico



Fuente: (Vargas, 2010)

En la figura anterior se muestra cómo cada alternativa es evaluada según los diferentes criterios tomados en cuenta para la toma de decisión.

#### Pasos para realizar Proceso Analítico Jerárquico

1. Primeramente se deben definir cuáles serán los criterios y las alternativas. Para una mayor facilidad en el análisis se debe realizar una esquematización del panorama, tal como se muestra en la Figura.

2. Como siguiente paso se debe construir una matriz en donde se colocarán los criterios en las filas y en las columnas. Estos criterios son evaluados entre sí con una ponderación de números impares del 1 al 9. Entre mayor sea la calificación mayor será la importancia de un criterio sobre otro. Por ejemplo, si se tiene la siguiente matriz 2x2 con las siguientes evaluaciones:

CRITERIOS	A	B
-----------	---	---

A	1 / 1	5 / 1
B	1 / 5	1 / 1

En este caso, el criterio A tiene un peso 5 veces mayor sobre el criterio B. Este procedimiento se debe realizar entre todos los criterios evaluados en la matriz.

3. Se debe calcular el índice de consistencia, se aconseja que este no supere el 10%. Este índice se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{CI}{\text{Índice de consistencia}}$$

Donde el índice de consistencia depende del tamaño de la matriz.

Tabla 7. Índice aleatorio según el tamaño de la matriz

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Y el CI corresponde al índice de consistencia. Dado según la siguiente ecuación:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1}$$

Donde n es el tamaño de la matriz y  $\lambda_{max}$  es el máximo valor propio de la matriz de evaluación por pares.

El valor propio de una matriz se obtiene al dividir el resultado de la multiplicación de la matriz de criterios por el promedio de sus filas entre el promedio de sus filas.

4. De acuerdo con Leyva, Gatell, & Álvarez (2019) el valor de RC debe ser menor a 0.10. Si no es inferior a 0.10, se revisan los juicios hasta reducir el IC. Una consistencia del 10 por ciento o menos implica que el ajuste es pequeño en comparación con los valores reales de las entradas del vector propio. Este paso se repite con cada matriz de comparación por pares, respecto a cada criterio y alternativa.

## **2.6 Costos de mantenimiento**

Los costos de mantenimiento en la industria se relacionan con la reparación, conservación, mejora y puesta en marcha de activos industriales en la empresa. La cantidad de dinero invertida es acorde con un presupuesto establecido por la alta gerencia de la empresa, de acuerdo con la revista Nacional Financiera (2004) “Un presupuesto es un plan de las operaciones y recursos de una empresa, que se formula para lograr en un cierto periodo los objetivos propuestos y se expresa en términos monetarios”. Este presupuesto es variable entre las empresas y está sujeta a la planeación y proyección que se tenga. Parte de este presupuesto es destinado al departamento de mantenimiento y debe ser invertido inteligentemente para sacarle el mayor provecho posible. Los costos de mantenimiento se clasifican de la siguiente manera: costos fijos, costos variables, costos de fallas, costos directos y costos indirectos.

### **2.6.1 Costos fijos**

Un costo fijo representa una cantidad de dinero invariable que se debe pagar para darle continuidad a un negocio. De acuerdo con Araya (S.F) “los costos fijos no guardan una relación directa con la producción de la empresa en sí mismos, es

decir, estos no son susceptibles de fluctuar según se incremente o disminuya la productividad”. Entre algunos ejemplos de costos que son categorizados como costos fijos, se puede mencionar: pago de servicio de internet, pago de salarios (sin contemplar horas extras), pago de seguros, pagos de cuotas fijas al estado, entre otros.

### **2.6.2 Costos variables**

Los costos variables son todas las cuentas que deba cancelar un negocio que estén sujetas a variables como la producción, ventas, uso y entre otros. Estos costos se consideran dependientes, ya que por sí solos no se puede estimar su cantidad sin tomar en consideración la variable de la que dependen. Algunos ejemplos de estos costos pueden ser: materias primas, mano de obra, comisiones, facturación eléctrica, entre otros.

Si los costos variables no se controlan de manera adecuada ocasionan que la planificación del presupuesto se vuelva una tarea sumamente difícil, ya que la variabilidad es muy alta. Un ejemplo de esto se puede obtener con el uso de los repuestos en una empresa de manufactura, si el consumo de repuestos se realiza de manera descontrolada, la variabilidad de los costos de mantenimiento será muy elevada.

### **2.6.3 Costos de fallas**

Los costos asociados a las fallas representan una categoría clave en la gestión de operaciones, ya que se refieren a los gastos incurridos debido a la interrupción del proceso productivo provocada por una avería en el equipo o maquinaria. Estos costos incluyen no solo la pérdida directa de producción durante el tiempo de

inactividad, sino también los costos indirectos relacionados con la reparación o sustitución de la maquinaria, la mano de obra necesaria para resolver el incidente, y las posibles penalizaciones por retrasos en la entrega de productos (Fastercapital, 2024).

El cálculo de los costos por fallas puede realizarse de diferentes maneras, dependiendo de la naturaleza del proceso productivo. Una de las formas más comunes es la estimación basada en unidades de tiempo, donde se determina el costo por hora o minuto que la línea de producción permanece detenida. Alternativamente, el costo puede evaluarse en función de la cantidad de unidades de producción perdidas, asignando un valor monetario a cada unidad no producida durante la interrupción.

Es importante destacar que la identificación y análisis de estos costos son fundamentales para la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo, lo cual puede minimizar la recurrencia de fallas y optimizar la eficiencia operativa.

## Capítulo 3. Marco metodológico

### 3.1 Hipótesis

La mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad afectan la variabilidad de los costos de mantenimiento en la empresa de estudio, por tanto, al lograr controlar algunas de estas tres variables, se disminuye la variabilidad de los costos de mantenimiento en la empresa.

### 3.2 Tipo de investigación

El tipo de investigación se categoriza de carácter cuantitativo, ya que se centra en la recolección y análisis de datos numéricos correspondiente a costos de mantenimiento y registros históricos de averías.

### 3.3 Definición de variables

En la siguiente tabla se muestran los indicadores y variables de estudio para cada objetivo.

Tabla 8. Indicadores de las variables de estudio.

Objetivos	Variables	Indicadores
General	Mantenibilidad Confiabilidad Disponibilidad Costos de mantenimiento	Probabilidad de fallas, varianza y desviación estándar de los costos de mantenimiento.
Específico 1	Mantenibilidad Confiabilidad Disponibilidad Costos de mantenimiento	MTTR, probabilidad de fallas, tasa de fallas $\lambda$ , horas avería, costo de mantenimiento por máquina.
Específico 2	Impacto en producción Costos de mantenimiento	Índice de criticidad por área

	Frecuencia de fallos	
Específico 3	Causas raíz	Cantidad de causas raíz identificadas Frecuencia de cada causa raíz Efectividad de las acciones correctivas
Específico 4	Mantenibilidad Confiabilidad Disponibilidad Costos de mantenimiento	Porcentaje de disminución o aumento de los indicadores del objetivo general

### 3.4 Muestra

La investigación se realiza mediante el análisis de dos fuentes principales de información, la primera corresponde se recopila de las bitácoras diarias de los técnicos, en la que especifican fecha de avería, turno, máquina, descripción de la falla, tiempo en solucionar la falla y el nombre del técnico que solucionó el problema. Se cuenta con información desde enero del 2021 hasta diciembre del 2023 sumando un total de 18281 datos.

Por otro lado, la segunda fuente de información se recopila de los vales de salida del almacén de repuestos desde enero del 2021 hasta diciembre del 2023, en esta base de datos se recopila, el tipo de repuesto que se utiliza, su descripción, su máquina destino y un precio promedio en el mercado. Se cuenta con un total de 9720 datos recopilados en el periodo de tiempo mencionado anteriormente.

La muestra que se utiliza para el desarrollo de la investigación corresponde a una muestra no estadística, ya que los datos a utilizar se verán marcados por los resultados obtenidos en el proceso analítico jerárquico y sus resultados. De esta

manera se utilizan los criterios de seguridad, medio ambiente, costos de mantenimiento, calidad, frecuencia de fallos y tiempo programado para determinar el área de estudio y por consiguiente los datos que serán útiles para la investigación.

### **3.5 Proceso metodológico**

El desarrollo de esta investigación cumple la secuencia descrita a continuación:

1. Documentación de la situación actual.
  - 1.1- Se recopilan datos de bitácoras diarias de los técnicos, se unifican todos los datos para obtener una sola de base de datos estandarizada que permita un análisis exhaustivo de la información.
  - 1.2- Se recopilan datos de vales de salida del almacén de repuestos, se unifican en una base de datos histórica que permita observar el comportamiento de los costos de mantenimiento en el periodo de estudio.
2. Análisis de la situación actual.
  - 2.1- Con toda la información recopilada se utiliza Excel para filtrar todos los datos que resulten importantes para la investigación y depurar errores en la información recopilada para evitar alteraciones en el análisis.
  - 2.2- Se estandariza la información y se unifican las dos bases de datos para lograr relacionar las averías con los costos de mantenimiento y su variabilidad en el tiempo.
  - 2.3- Se realiza un Proceso Analítico jerárquico para determinar cuál es el área más crítica para la empresa y por ende enfocar la investigación en esta.

- 2.4- Se grafica la información obtenida en Power BI en busca de tendencias y comportamientos en costos de mantenimiento y disponibilidad de los equipos.
  - 2.5- Se realizan diagramas de dispersión para determinar la relación entre la disponibilidad de los equipos y los costos de mantenimiento.
3. Identificación de causas raíz
- 3.1- Se analiza cada una de las filas en la base de datos de costos de mantenimiento, para determinar la varianza, variabilidad y desviación estándar de los datos no agrupados.
  - 3.2- Aplicar las técnicas de Ishikawa para determinar la causa raíz que afecta la variabilidad de los costos de mantenimiento en los equipos de producción.
4. Búsqueda y predicción de mejoras
- 4.1- Con las causas raíz encontradas, se realizará una búsqueda de mejoras según el problema encontrado.
  - 4.2- Se propondrán mejoras que busquen estandarizar la cantidad de repuestos que se utilizarán en un mantenimiento para disminuir la variabilidad en los costos, siempre buscando mantener o aumentar la disponibilidad de los equipos de producción.
  - 4.3- Con los resultados de varianza y desviación estándar obtenidos, se proyectará su efecto a largo plazo.
  - 4.4- Según la relación encontrada entre el efecto de la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad sobre los costos de mantenimiento y su

planeación, se calculará cuál sería el impacto económico si se aplican las mejoras propuestas.

## Capítulo 4. Desarrollo de la propuesta

### **4.1 Priorización de áreas mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**

Para realizar un análisis efectivo de la búsqueda de las razones por las cuales existen altas variaciones en los costos de mantenimiento, primeramente, se debe de realizar una priorización de las áreas más críticas para la empresa. El estudio se centra en analizar el comportamiento del área categorizada como crítica. El estudio busca que, al culminar, la metodología se pueda aplicar a las demás áreas para lograr dar una respuesta general al problema. Para la priorización de las áreas se realizará un Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

#### **4.1.1 Definición de las alternativas**

Para este proceso de análisis, las alternativas serán las áreas de manufactura en las que se clasifican los diferentes equipos de manufactura. Estas áreas se enlistan a continuación:

1. Estirado
2. Bunchado
3. Extrusión
4. Corte y empaque

Estas cuatro áreas son las alternativas que se evalúan para determinar cuál es la crítica para el estudio considerando al analizarlas con los diferentes criterios.

#### **4.1.2 Definición de criterios**

Tomando en consideración los criterios recomendados por los autores Carlos Parra y Adolfo Crespo (Parra & Crespo, 2020) en su nota técnica “Método de

Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos” se enlistan a continuación los criterios tomados en cuenta para el análisis:

1. Medio ambiente
2. Seguridad
3. Calidad
4. Tiempo programado de producción
5. Frecuencia de Fallos
6. Costos de mantenimiento

Estos criterios cumplen tanto con el objetivo de este estudio como con los objetivos de la empresa, por tanto, son los que se toman en cuenta para realizar el AHP.

#### **4.1.3 Esquematización del modelo AHP**

La esquematización del AHP se realiza tomando en consideración los criterios y alternativas planteados en los puntos anteriores, de esta manera se evalúan cuatro alternativas según seis criterios.

#### **4.1.4 Cálculo de consistencia**

1. Los criterios son evaluados entre sí en relaciones de 1,3,5,7,9. En cada uno de los componentes de la matriz se asigna el peso que tiene el primer componente de la columna 1 contra el primer componente de la fila 1 y así sucesivamente se avanza hasta tener completa la matriz. En ese caso se evalúan seis criterios, por lo que la matriz es de 6x6.

Tabla 9. Evaluación cruzada de los criterios en fracción

CRITERIOS	MEDIO AMBIENTE	SEGURIDAD	CALIDAD	TIEMPO PROGRAMADO	FRECUENCIA DE FALLOS	COSTOS DE MANTENIMIENTO
MEDIO AMBIENTE	1/1	1/3	3/1	5/1	5/1	3/1
SEGURIDAD	3/1	1/1	3/1	7/1	7/1	5/1
CALIDAD	1/3	1/3	1/1	3/1	3/1	1/1
TIEMPO PROGRAMADO	1/5	1/7	1/3	1/1	1/3	1/5
FRECUENCIA DE FALLOS	1/5	1/7	1/3	3/1	1/1	1/3
COSTOS DE MANTENIMIENTO	1/3	1/5	1/1	5/1	3/1	1/1

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la celda de la fila uno y columna tres tiene un valor de 1/3, esto significa que el medio ambiente (calificación 1) se encuentra un escalón por debajo de la seguridad (calificación), en la celda consecutiva de la misma fila se observa que se tiene un valor de 3/1, esto significa que el medio ambiente (calificación 3) es más importante que la calidad (calificación 1). Este proceso se repite en todas las celdas.

En las celdas que se evalúan dos veces el mismo criterio se obtiene un valor 1/1 y en las celdas de amarillo son el inverso de su celda blanca equivalente. Por ejemplo, en la última celda de la segunda columna se obtiene un valor 1/3 ya que se está evaluando el peso de los costos de mantenimiento con respecto al medio ambiente; por otro lado, si se observa la última celda de la prima fila, se observa su

valor inverso 3/1 ya que se está evaluando el peso del medio ambiente con respecto a los costos de mantenimiento.

2. Seguidamente se sustituyen los valores fraccionarios por número enteros.

Tabla 10. Evaluación cruzada de los criterios en decimales

CRITERIOS	MEDIO AMBIENTE	SEGURIDAD	CALIDAD	TIEMPO PROGRAMADO	FRECUENCIA DE FALLOS	COSTOS DE MANTENIMIENTO
MEDIO AMBIENTE	1,00	0,33	3,00	5,00	5,00	3,00
SEGURIDAD	3,00	1,00	3,00	7,00	7,00	5,00
CALIDAD	0,33	0,33	1,00	3,00	3,00	1,00
TIEMPO PROGRAMADO	0,20	0,14	0,33	1,00	0,33	0,20
FRECUENCIA DE FALLOS	0,20	0,14	0,33	3,00	1,00	0,33
COSTOS DE MANTENIMIENTO	0,33	0,20	1,00	5,00	3,00	1,00
SUMA	5,07	2,15	8,67	24,00	19,33	10,53

Fuente: Elaboración propia

3. Se calcula el peso que tiene cada uno de los componentes al dividir los valores individuales de cada componente de la matriz, entre la sumatoria de cada columna.

Tabla 11. Cálculo de peso relativo de los criterios

0,20	0,15	0,35	0,21	0,26	0,28
0,59	0,46	0,35	0,29	0,36	0,47

0,07	0,15	0,12	0,13	0,16	0,09
0,04	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02
0,04	0,07	0,04	0,13	0,05	0,03
0,07	0,09	0,12	0,21	0,16	0,09

Fuente: Elaboración propia.

- Se obtienen las sumatorias y los promedios de las filas.

Tabla 12. Sumatoria y promedio de filas del cálculo de peso relativo de los criterios

SUM FILAS	PROMEDIO
1,45	0,24
2,53	0,42
0,71	0,12
0,22	0,04
0,35	0,06
0,73	0,12

Fuente: Elaboración propia.

- Se obtiene el vector fila total al multiplicar la matriz inicial por el promedio de las filas.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.33 & 3 & 5 & 5 & 3 \\ 3 & 1 & 3 & 7 & 7 & 5 \\ 0.33 & 0.33 & 1 & 3 & 3 & 1 \\ 0.2 & 0.143 & 3 & 1 & 0.33 & 0.2 \\ 0.2 & 0.143 & 0.33 & 3 & 1 & 0.33 \\ 0.33 & 0.2 & 1 & 5 & 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.24 \\ 0.42 \\ 0.12 \\ 0.04 \\ 0.06 \\ 0.12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.58 \\ 2.78 \\ 0.75 \\ 0.23 \\ 0.36 \\ 0.77 \end{pmatrix}$$

- Se divide el vector fila entre el vector promedio para obtener el coeficiente.

$$\begin{pmatrix} 1.58 \\ 2.78 \\ 0.75 \\ 0.23 \\ 0.36 \\ 0.77 \end{pmatrix} \div \begin{pmatrix} 0.24 \\ 0.42 \\ 0.11 \\ 0.04 \\ 0.06 \\ 0.12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.55 \\ 6.6 \\ 6.32 \\ 6.19 \\ 6.10 \\ 6.28 \end{pmatrix}$$

7. Se obtiene el promedio de los coeficientes de cada una de las filas, obteniendo de esta manera un  $\Lambda \max = 6.34$

8. Se calcula el índice de consistencia:

$$IC = \frac{(\Lambda \max - n)}{n - 1} = \frac{(6.34 - 6)}{6 - 1} = 6.81\%$$

9. Se calcula el índice de consistencia, tomando en consideración que el tamaño de la matriz es de 6x6, por lo que se toma 1.24 como el índice aleatorio.

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0.0681}{1.24} = 5.49\%$$

Tomando en consideración que el índice de consistencia máximo para una matriz de 6x6 es de 10%, el análisis cumple y se determina que no existen inconsistencias en el planteamiento de la matriz.

#### 4.1.5 Cálculo del vector propio

Para el cálculo del vector propio, se multiplica la matriz por ella misma, seguidamente se obtiene una sumatoria por cada fila y se calculan los vectores propios de cada fila al dividir la sumatoria de la fila entre la sumatoria total. Este procedimiento se repite hasta que el vector propio entre dos aproximaciones no varíe en más de 4 decimales.

## Primera aproximación

Tabla 13. Primera aproximación para el cálculo de los vectores propios de los criterios

APROX 1							SUM FILAS	VEC PROPIO
<b>MEDIO AMBIENTE</b>	6,00	3,70	13,33	51,33	32,00	13,33	119,70	0,2495
<b>SEGURIDAD</b>	11,47	6,00	24,67	84,00	55,33	25,73	207,20	0,4319
<b>CALIDAD</b>	3,20	1,83	6,00	24,00	14,00	6,27	55,30	0,1153
<b>TIEMPO PROGRAMADO</b>	1,07	0,55	2,01	6,00	4,27	2,16	16,06	0,0335
<b>FRECUENCIA DE FALLOS</b>	1,65	0,96	3,03	10,67	6,00	2,91	25,22	0,0526
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	3,20	1,99	6,27	25,07	13,73	6,00	56,25	0,1173
							<b>479,73</b>	<b>1,00</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Segunda aproximación para el cálculo de los vectores propios de los criterios.

APROX 2							SUM FILAS	VEC PROPIO
<b>MEDIO AMBIENTE</b>	271,61	154,28	534,61	1921,96	1177,27	542,72	4602,44	0,2433
<b>SEGURIDAD</b>	480,36	274,12	946,27	3423,89	2088,07	958,86	8171,56	0,4320

<b>CALIDAD</b>	128,36	72,95	253,75	912,82	560,39	257,69
<b>TIEMPO PROGRAMADO</b>	39,57	22,64	78,43	285,15	173,77	79,40
<b>FRECUENCIA DE FALLOS</b>	61,27	34,83	121,67	439,01	269,81	123,66
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	130,81	74,15	258,77	928,89	571,85	263,21

2185,96	0,1156
678,95	0,0359
1050,24	0,0555
2227,68	0,1178
<b>18916,84</b>	<b>1,00</b>

**APROX 3**

<b>MEDIO AMBIENTE</b>	435666,8	247955,26	861258,4	3107258,99	1903455,45	874139,13
<b>SEGURIDAD</b>	772432,7	439625,94	1527006,09	5509221,68	3374827,03	1549837,11
<b>CALIDAD</b>	206633,9	117603,52	408492,5	1473766,46	902808,79	414602,41
<b>TIEMPO PROGRAMADO</b>	64004,06	36427,75	126529,78	456505,82	279645,27	128421,49
<b>FRECUENCIA DE FALLOS</b>	99065,22	56381,99	195843,04	706568,92	432835,68	198772,46
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	210582,8	119850,48	416299,98	1501926,13	920064,55	422527,67

SUM FILAS	VEC PROPIO
7429734,19	0,2436
13172950,59	0,4319
3523907,71	0,1155
1091534,17	0,0358
1689467,30	0,0554
3591251,68	0,1178
<b>30498845,65</b>	<b>1,00</b>

APROX 4

							SUM FILAS	VEC PROPIO
<b>MEDIO AMBIENTE</b>	1130821 820886,8 2	643597523121, 88	2235512 073041,1 4	8065360896 879,21	4940708479 794,08	226894 492306 9,15	1928494571 6792,30	0,2436
<b>SEGURIDAD</b>	2004945 872701,5 2	114109771661 2,45	3963560 502191,4 6	1429987620 0144,60	8759870823 259,74	402283 690928 6,08	3419218802 4195,90	0,4319
<b>CALIDAD</b>	5363449 86276,85	305256140559, 88	1060295 857427,1 8	3825373546 735,01	2343361414 668,85	107615 294575 6,91	9146784891 424,68	0,1155
<b>TIEMPO PROGRAMADO</b>	1661325 00393,29	94552885161,5 7	3284259 31934,93	1184906894 984,33	7258546292 59,09	333337 654420, 50	2833210496 153,70	0,0358
<b>FRECUENCIA DE FALLOS</b>	2571388 72391,12	146348379834, 73	5083356 57397,95	1833991676 070,36	1123473374 848,43	515937 991564, 63	4385225952 107,21	0,0554
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	5465949 98805,78	311089847114, 85	1080559 020325,5 4	3898479714 870,65	2388145060 426,85	109671 915121 9,95	9321587792 763,62	0,1178
							<b>7916394287</b> <b>3437,40</b>	<b>1,00</b>

Fuente: Elaboración propia.

Después de la cuarta aproximación se determina que los resultados de vectores propios dejan de variar en más de 4 decimales por lo que se obtiene la calificación final del peso de cada uno de los criterios. Se obtiene la siguiente calificación:

Tabla 15. Peso porcentual de los criterios

POSICION	CRITERIO	VEC PROPIO
1	SEGURIDAD	0,4319
2	MEDIO AMBIENTE	0,2436
3	COSTOS DE MANTENIMIENTO	0,1178
4	CALIDAD	0,1155
5	FRECUENCIA DE FALLOS	0,0554
6	TIEMPO PROGRAMADO	0,0358

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.6 Alternativas evaluadas en criterios

Se debe realizar una evaluación de cada una de las alternativas (bunchado, estirado, extrusión y corte de empaque) con respecto a los criterios (medio ambiente, seguridad, calidad, tiempo programado, frecuencia de fallos y costos de mantenimiento).

Por ejemplo, para la variable ambiente se basa en las siguientes relaciones para la asignación de ponderaciones:

- Si la alternativa no afecta el medio ambiente es 1
- Si la alternativa genera un impacto ambiental bajo control es 3
- Si la alternativa genera contaminación notable en los alrededores es 5
- Si la alternativa genera contaminación extrema es 7
- Si la alternativa genera daños irreversibles al ambiente es 9

De esta manera, se realiza la evaluación para el resto de las variables.

Se comienza por el planteamiento de la matriz:

Tabla 16. Evaluación cruzada de las alternativas evaluando el medio ambiente

CRITERIOS	ESTIRADO	BUNCHADO	CORTE Y	
			EMPAQUE	EXTRUSIÓN
ESTIRADO	1,00	5,00	5,00	1,00
BUNCHADO	0,20	1,00	1,00	0,20
CORTE Y EMPAQUE	0,20	1,00	1,00	0,20
EXTRUSIÓN	1,00	5,00	5,00	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Se multiplica la matriz por ella misma, para realizar la sumatoria de filas y el cálculo de vector propio.

Tabla 17. Aproximaciones para el cálculo de los vectores propios de las alternativas evaluando el medio ambiente

APROX 1

CRITERIOS	ESTIRADO	BUNCHADO	CORTE Y EMPAQUE	EXTRUSIÓN
ESTIRADO	4,00	20,00	20,00	4,00
BUNCHADO	0,80	4,00	4,00	0,80
CORTE Y EMPAQUE	0,80	4,00	4,00	0,80
EXTRUSIÓN	4,00	20,00	20,00	4,00

SUM FILAS VEC PROPIO	
48,00	0,4167
9,60	0,0833
9,60	0,0833
48,00	0,4167
<b>115,20</b>	<b>1,00</b>

APROX 2

CRITERIOS	ESTIRADO	BUNCHADO	CORTE Y EMPAQUE	EXTRUSIÓN
ESTIRADO	64,00	320,00	320,00	64,00
BUNCHADO	12,80	64,00	64,00	12,80
CORTE Y EMPAQUE	12,80	64,00	64,00	12,80
EXTRUSIÓN	64,00	320,00	320,00	64,00

SUM FILAS VEC PROPIO	
768,00	0,4167
153,60	0,0833
153,60	0,0833
768,00	0,4167
<b>1843,20</b>	<b>1,00</b>

Fuente: Elaboración propia.

En la segunda aproximación se determina que el cálculo de vector propio no varía en más de 4 decimales por lo que se detienen las aproximaciones. Se obtiene la siguiente calificación del peso de las alternativas con respecto al medio ambiente.

Tabla 18. Clasificación de criterios según resultados del AHP para medio ambiente

POSICION	CRITERIO	VEC PROPIO
1	ESTIRADO	0,4167
1	EXTRUSIÓN	0,4167
2	BUNCHADO	0,0833
3	CORTE Y EMPAQUE	0,0833

Fuente: Elaboración propia.

Este procedimiento se realiza de igual manera, para los demás criterios, siguiendo la siguiente tabla escalas de clasificación según criterios.

Tabla 19. Escala de calificaciones para los diferentes criterios.

Criterios	Calificación 1	Calificación 3	Calificación 5	Calificación 7	Calificación 9
<b>Seguridad</b>	No representa riesgo	Accidente sin incapacidad	Accidente con incapacidad	Accidente múltiple con incapacidad	Accidente mortal
<b>Calidad</b>	No genera producto mal estado	Problema fácil detección	Problema de media detección	Problema difícil detección	Problema indetectable
<b>Tiempo programado</b>	No tiene tiempo programado	Menos de 95k horas	Más de 96k horas y menos de 120k horas	Más de 121k horas y menos de 200k horas	Más de 201k horas
<b>Cantidad de averías</b>	No tiene averías	Menos de 2k fallos	Más de 2,1k fallos y menos de 3k fallos	Más de 3,1k fallos y menos de 3,6k fallos	Más de 3,7k fallos
<b>Costos de mantenimiento</b>	No tiene costos de mantenimiento	Menos de \$100M en costos	Más de \$101M y menos de \$150M	Más de \$151M y menos de \$180M	Más de \$181M

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se realiza el mismo procedimiento realizado en *Cálculo del vector propio*, para conocer la calificación de cada uno de los criterios en las diferentes alternativas evaluadas.

#### 4.1.7 Resultado final de ponderación

Una vez obtenida todas las calificaciones, se procede a colocar estas calificaciones la siguiente matriz:

Tabla 20. Calificación general de criterios según resultados del AHP

	MEDIO AMBIENTE	SEGURIDAD	CALIDAD	TIEMPO PROGRAMADO	FRECUENCIA DE FALLOS	COSTOS DE MANTENIMIENTO
ESTIRADO	0,4167	0,1354	0,3571	0,2089	0,1250	0,2083

BUNCHADO	0,0833	0,4061	0,2143	0,3537	0,3750	0,3750
CORTE Y EMPAQUE	0,0833	0,1999	0,2143	0,3120	0,2917	0,1250
EXTRUSIÓN	0,4167	0,2586	0,2143	0,1253	0,2083	0,2917

Fuente: Elaboración propia.

Se multiplica por el vector propio de las alternativas obtenidas en *Tabla 15. Peso porcentual de los criterios.*

$$\begin{pmatrix} 0.4167 & 0.1354 & 0.3571 & 0.2089 & 0.1250 & 0.2083 \\ 0.0833 & 0.4061 & 0.2143 & 0.3537 & 0.3750 & 0.3750 \\ 0.0833 & 0.1999 & 0.2143 & 0.3120 & 0.2917 & 0.1250 \\ 0.4167 & 0.2586 & 0.5143 & 0.1253 & 0.2083 & 0.2917 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0.2436 \\ 0.4319 \\ 0.1155 \\ 0.0358 \\ 0.0554 \\ 0.1178 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2402 \\ 0.2980 \\ 0.1735 \\ 0.2883 \end{pmatrix}$$

Con esto se obtiene el resultado final del área más crítica para el desarrollo de este estudio.

Tabla 21. Clasificación de criterios según resultados del AHP

Posición	Área	Puntaje
1	BUNCHADO	0,2980
2	EXTRUSIÓN	0,2883
3	ESTIRADO	0,2402
4	CORTE Y EMPAQUE	0,1735

Fuente: Elaboración propia.

Es por esta razón que el estudio se centra en el análisis de las variaciones de los costos de mantenimiento en el área de bunchado.

#### 4.2 Cálculo de correlaciones

Un análisis de correlaciones permite determinar si una variable se encuentra en función de otra, así se puede aplicar un plan de acción que controle la variable X y si existe una relación esta controla la variable Y.

El objetivo de este trabajo final de graduación es determinar las razones por la cuales existe gran variabilidad en los costos de mantenimiento, es por esta razón que se analiza si los costos de mantenimiento dependen de las siguientes variables:

- a) Tiempo en averías en horas.
- b) Cantidad de averías.

Se realiza el análisis para cada caso en específico.

##### 4.2.1 Relación entre el costo de reparación y el tiempo de averías en horas

Según la información analizada, se obtiene la siguiente tabla de datos:

Tabla 22. Costos de mantenimiento y tiempo de averías en horas según máquinas de producción desde enero 2021 hasta diciembre 2023

Máquina	Costo total	Tiempo de avería en horas
401	₡ 2 803 315,28	224,53
451	₡ 165 145,78	199,85
503	₡ 17 308 492,61	540,3
504	₡ 10 968 391,00	229,72
507	₡ 13 686 152,19	669,15
508	₡ 13 122 788,46	397,87
509	₡ 18 370 314,36	462,54

510	₡ 17 775 655,47	796,25
511	₡ 18 449 076,00	562,13
512	₡ 16 132 069,18	337,55
513	₡ 16 131 105,42	554,83
514	₡ 15 681 577,66	168,81
551	₡ 6 367 453,48	295,86
552	₡ 9 363 350,01	347,55
553	₡ 1 309 061,62	292,43
751	₡ 2 833 324,26	222,05

Fuente: Elaboración propia.

En esta tabla se obtienen los costos de mantenimiento y el tiempo de averías en horas clasificado para cada una de las máquinas. Esta información es indispensable para el cálculo de correlaciones entre variables. Se toma el costo total de mantenimiento como variable X para determinar su correlación con el tiempo de avería total en horas como variable Y.

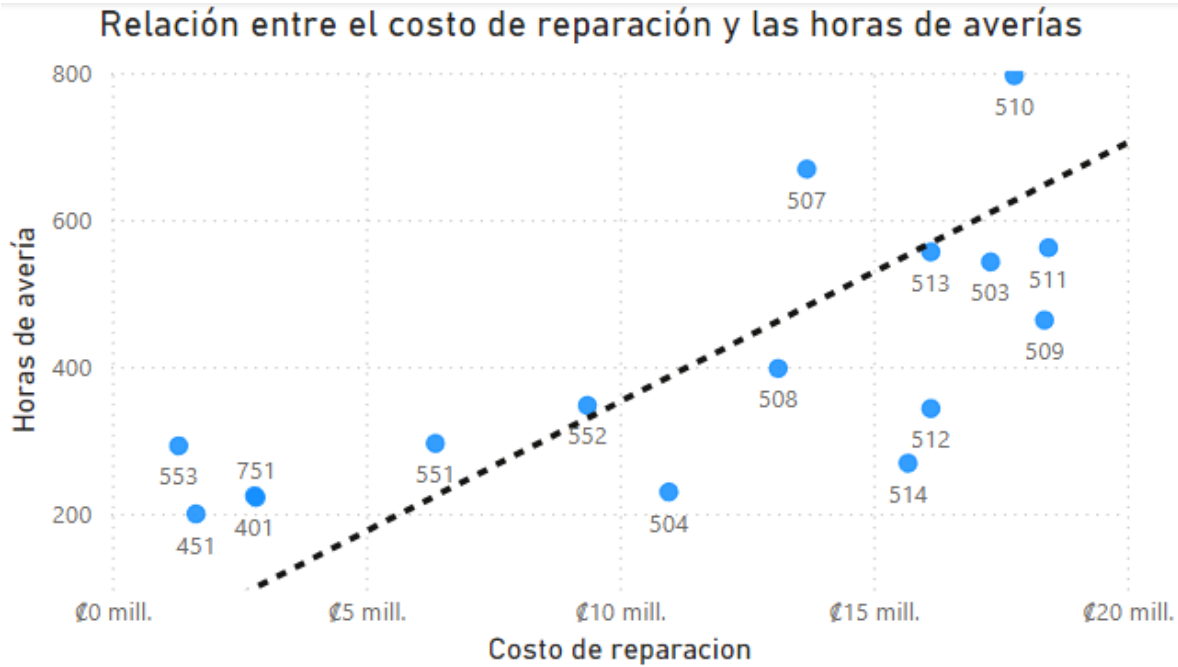
Para calcular se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Sin embargo, por efectos prácticos se utiliza la función de Excel “Correl (X, Y)” la cual calcula el coeficiente de correlación entre 2 conjuntos de datos. De esta manera se obtiene que la relación entre el costo de reparación y el tiempo de averías en horas poseen un índice de correlación  $r = 0.658$

Visto mediante un diagrama de dispersión se observa de la siguiente manera:

Figura 3. Diagrama de dispersión relacionando costo de reparación y horas de averías por máquina de producción



Fuente: Elaboración propia.

La línea de guiones color negra representa el valor del índice de correlación. Se observa que esta se comporta de manera ascendente y su valor es de 0.658 por lo que se determina que si existe una relación directa entre el costo de reparación y las horas de averías. Esta relación se comporta de manera ascendente, es decir, entre mayor sea el tiempo de avería en horas, mayor es su costo de reparación.

**4.2.2 Relación entre el costo de reparación y la cantidad de averías**

Se replica el mismo procedimiento que el punto anterior, tomando en consideración la siguiente toma de datos:

Tabla 23. Costos de mantenimiento y cantidad de averías según máquinas de producción desde enero 2021 hasta 2023

Máquina	Costo total	Cantidad averías
---------	-------------	------------------

401	₺	2 803 315,28	120
451	₺	165 145,78	121
503	₺	17 308 492,61	333
504	₺	10 968 391,00	144
507	₺	13 686 152,19	365
508	₺	13 122 788,46	200
509	₺	18 370 314,36	277
510	₺	17 775 655,47	243
511	₺	18 449 076,00	307
512	₺	16 132 069,18	211
513	₺	16 131 105,42	353
514	₺	15 681 577,66	165
551	₺	6 367 453,48	167
552	₺	9 363 350,01	160
553	₺	1 309 061,62	151
751	₺	2 833 324,26	149

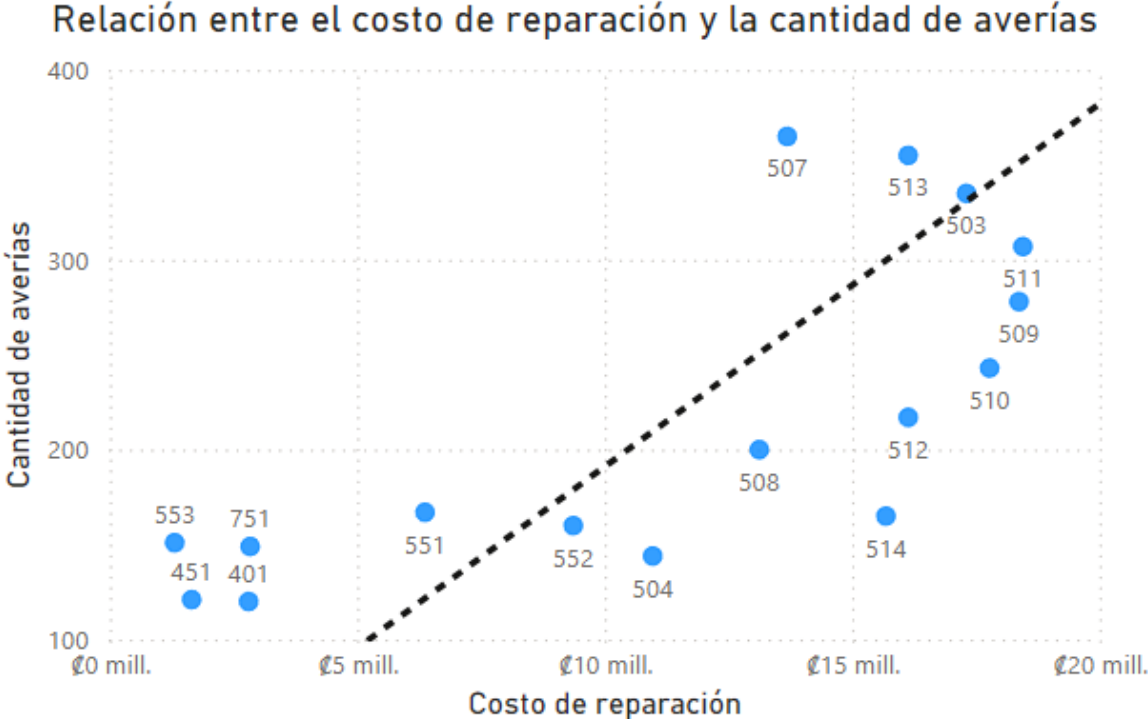
Fuente: Elaboración propia.

En esta tabla se obtienen los costos de mantenimiento y la cantidad de averías clasificado para cada una de las máquinas. Se toma el costo total de mantenimiento como variable X para determinar su correlación con la cantidad de averías como variable Y.

Se replica el cálculo del índice de correlaciones en Excel mediante la función “Correl (X, Y)” y se obtiene un índice de correlación  $r = 0.736$

Visto mediante una gráfica de dispersión se observa de la siguiente manera:

Figura 4. Diagrama de dispersión relacionando costo de reparación y cantidad de averías por máquina de producción



Fuente: Elaboración propia.

La línea de guiones color negra representa el valor del índice de correlación. Se observa que esta se comporta de manera ascendente y su valor es de 0.736 por lo que se determina que sí existe una relación directa entre el costo de reparación y la cantidad de averías. Esta relación se comporta de manera ascendente, es decir, cuanto mayor cantidad de veces se presente una avería en horas, mayor es su costo de reparación.

Con este análisis se determina que la cantidad de averías es la variable que afecta con una mayor magnitud al costo de reparación total por máquina. Esto quiere decir que si se controlan la cantidad de averías en las máquinas se estará controlando indirectamente los costos de mantenimiento.

Por eso se deben analizar las fallas más recurrentes y determinar planes de acción para disminuir su variabilidad y, por ende, se logrará el control en los costos de mantenimiento.

#### 4.3 Clasificación de la información

La base de datos utilizada se obtiene de bitácoras diarias de los técnicos de mantenimiento de la empresa, se recopila la información desde enero del 2021 hasta diciembre del 2023. Al filtrar los datos de máquinas que únicamente pertenezcan al área de Bunchado se obtiene un total de 4982 fallas en este periodo. Aunque hay bastantes datos para analizar, la información no es lo suficientemente completa para realizar un análisis porque no existe una estandarización en la recopilación de las fallas.

Es difícil observar tendencias de fallas, modos de fallas, repuestos utilizados y demás datos que son útiles para la investigación. Por eso, antes de cualquier análisis de datos se realiza una estandarización para posibilitar el análisis de la información.

Primeramente, se deben clasificar todas las fallas en diferentes categorías, tomando en consideración la composición mecánica de las máquinas de Bunchado, se identifica el siguiente catálogo de averías:

Tabla 24. Catálogo de averías para equipos de bunchado

Descripción Avería	N°
Problema con desenrollador	F1
Problema con desenrollador freno	F2
Problema con anillos	F3
Problemas con clutch	F4

Problema con la pantalla	F5
Problema con hilo roto	F6
Problema con enrollador	F7
Problemas con enrollador guía	F8
Problemas con enrolladora tensión	F9
Problemas con enrollador acople	F10
Problemas con enrolladores sensores	F11
Problemas con enrolladora polea	F12
Problemas con enrolladora faja	F13
Problemas con transmisión	F14
Problemas con caja	F15
Problemas eléctricos	F16
Problemas interlock	F17
Problemas productímetro	F18
Problemas con aire	F19
Problemas aspas, anillos cinta	F20
Problemas con rampa	F21
Problemas con el teclé	F22
Problema con el perno de arrastre	F23
Problemas en la bancada	F24
Problemas con fajas	F25
Máquina disparada	F26
Problemas en la cuna	F27
Problemas con el controlador	F28
Problemas en las pistas y carbones	F29
Problema en el plato giratorio	F30
Problemas en la puerta	F31
Problemas con el probador de chispa	F32

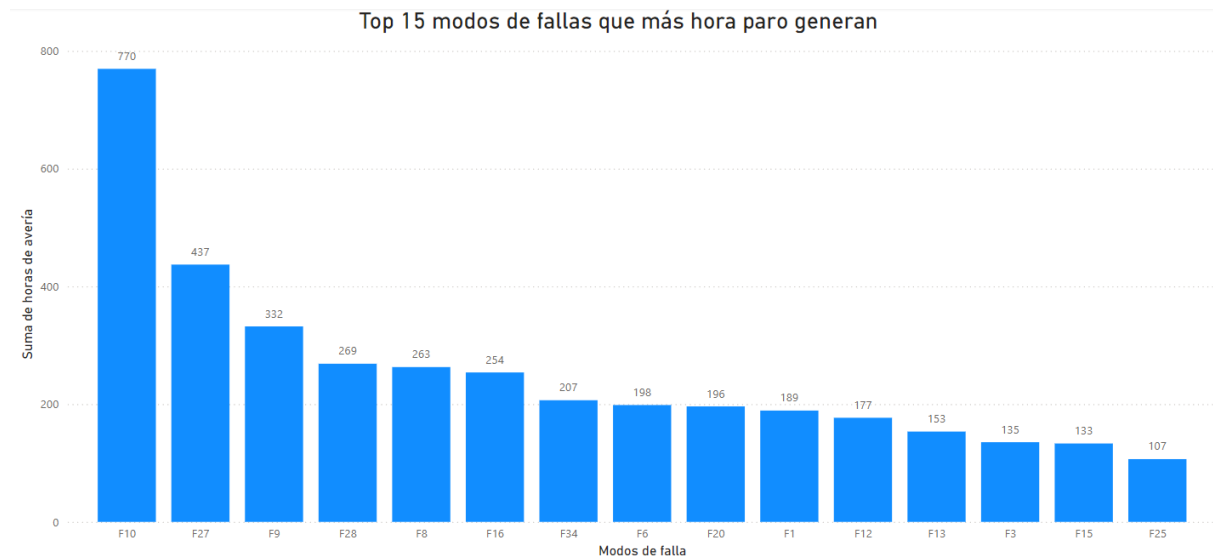
Fuente: Elaboración propia.

Este catálogo de fallas contempla las 32 posibles causas que genera un paro en los equipos de bunchado de esta manera se puede clasificar cada una de las

fallas. Este trabajo se debe realizar de manera manual, ya que la empresa carece de un sistema automático que permita estandarizar los paros.

Una vez que se cuenta con los datos clasificados se muestran en un gráfico de barras obteniendo el siguiente resultado:

Figura 5. 15 modos de falla que más hora paro generan



Fuente: Elaboración propia.

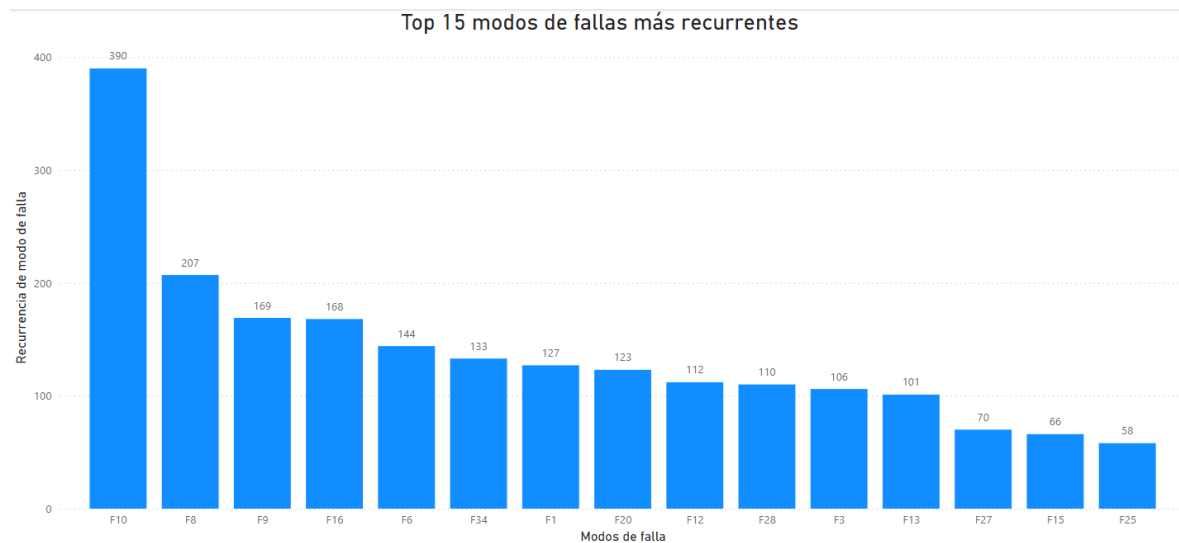
Debido a la gran cantidad de datos, se grafican los 15 modos de falla que más hora de paro generan en el área específica de estudio. De esta manera se determina que F10 encabeza la lista con 770 horas de paro en los últimos 3 años, representando así el 20,15% del tiempo total de paro en los equipos de bunchado.

El modo de falla F10 se refiere a problemas en los acoples del enrollador. Estos acoples son componentes mecánicos que se insertan en las bobinas para asegurar su correcta fijación durante el proceso de trabajo. Por eso generan tanto tiempo de fallo porque, cuando se presenta un desgaste, se necesitan fabricar y

mecanizar piezas con desgaste mecánico. Esto implica que el equipo esté detenido durante considerables cantidades de tiempo.

Adicionalmente de analizar cuáles son los modos de falla que más tiempo de paro generan, se analizan cuáles son los fallos más recurrentes, por lo que se obtiene el siguiente histograma:

Figura 6. 15 modos de falla más recurrentes



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico de barras obtenido anteriormente, se determina que el modo de falla F10 vuelve a repetirse la mayor cantidad de veces con 390 fallas en los acoples de los enrolladores en el periodo de estudio.

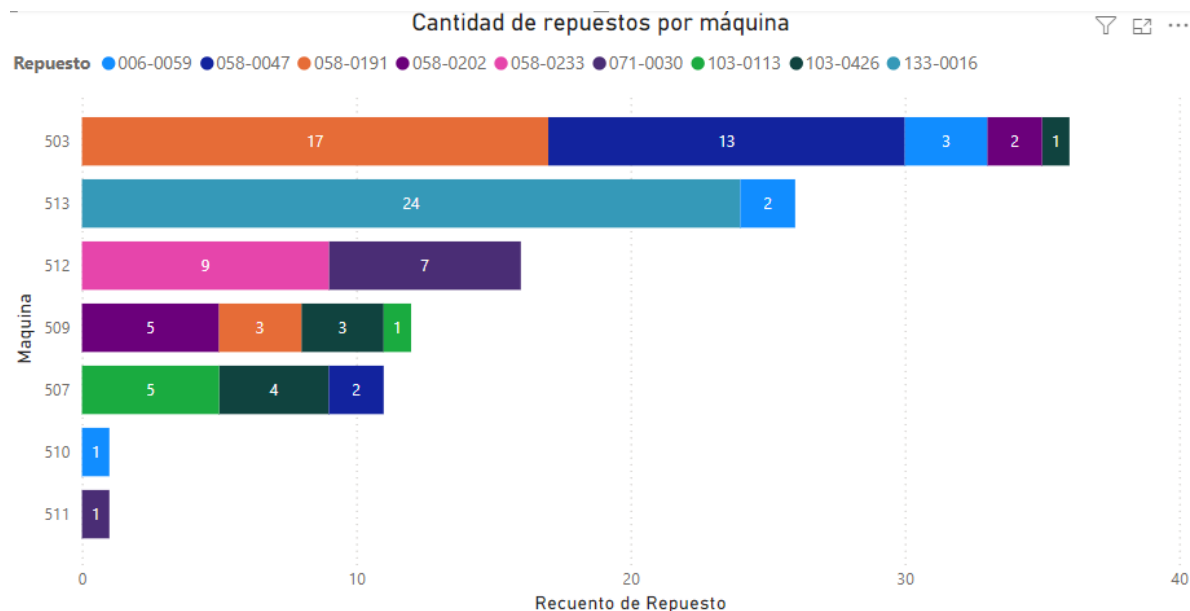
Según el análisis realizado en el *Cálculo de correlaciones*, la variable más importante por analizar es la cantidad de averías por lo que se analizan las 15 fallas más recurrentes mostradas en la figura anterior.

### 4.3.1 Identificación de repuestos más utilizados para atender averías

Para lograr encontrar el modo de falla que más variabilidad en el costo está generando se debe analizar cada uno de los modos de falla e indicar cuales son los repuestos que más se han consumido en sus reparaciones. La finalidad de este análisis es descartar fallas que sean muy recurrentes, pero no generen variabilidad en los costos de mantenimiento. Por ejemplo, si se tiene una falla que se repite muchas veces, pero se resuelve con ajustes mecánicos o electrónicos y sin usar repuestos, estos no deben estudiarse para esta investigación, ya que no causan excesiva variabilidad en los costos de mantenimiento.

Según los datos analizados, se grafica la información según máquina con los 8 repuestos más utilizados.

Figura 7. 8 repuestos más utilizados por máquina para mantenimientos correctivos



Fuente: Elaboración propia.

La codificación de los repuestos se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 25. Descripciones de los repuestos más utilizados según su codificación

Repuestos	Descripción repuestos
006-0059	ANILLO BUSHING DE CERAMICA 3/8" DIA.EXT.
058-0047	FAJA H.T.D. N°. 2100-14M-55 FENNER
058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
058-0202	FAJA 1000 8M/ 40 A OBTIBELT OMEGA
058-0233	FAJA DENTADA 2000 8M 20
071-0030	MICRO SWITCH TIPO RODILLO Z-15GQ21-B7-K
103-0113	ROL TORRINGTON NKJ50/35A
103-0426	ROL AGUJA NK 25/20 NTN
133-0016	CINTA DEL ASPA SAMP 513

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la información graficada, en la máquina 503 y en la 512 hay una cantidad considerable de fajas sustituidas en el periodo de análisis.

#### 4.4 Análisis de equipos

Tras realizar el análisis y la representación gráfica de los ocho repuestos con mayor frecuencia de cambio durante el periodo estudiado, se identifican tendencias o comportamientos repetitivos entre los distintos equipos de producción. Este análisis tiene como objetivo no solo detectar patrones de reemplazo de componentes, sino también determinar qué factores podrían estar contribuyendo a un mayor consumo de ciertos repuestos. Así, se pretende optimizar los procesos de mantenimiento para estandarizar el cambio de repuestos y disminuir la variabilidad en los costos de mantenimiento.

De los ocho repuestos más usados, cuatro corresponden a fajas (058-0047, 058-0191, 058-0202, 058-0233). Esto sugiere que las fajas son un componente crítico en el funcionamiento de los equipos de producción y, por lo tanto, su reemplazo

frecuente puede estar relacionado con una serie de factores como el desgaste natural, la alta carga de trabajo de las máquinas o posibles deficiencias en el mantenimiento preventivo.

A partir de este punto, el análisis se centrará específicamente en el estudio de las fajas, con el objetivo de exponer los casos particulares que se presentan. Este enfoque permitirá no solo comprender a fondo los pasos y técnicas aplicados en estos casos, sino también demostrar la flexibilidad y aplicabilidad del método a otros componentes y repuestos en distintos equipos. La adaptabilidad del proceso asegura que cualquier equipo, independientemente de su tipo o complejidad, pueda beneficiarse de las mismas prácticas, disminuyendo así la variabilidad de los costos de mantenimiento.

#### **4.4.1 Caso 1- Máquina 503**

El primer caso de análisis se centra en la máquina de producción identificada como 503, la que registra el mayor consumo de fajas, acumulando 17 unidades reemplazadas entre 2021 y 2023. Este dato es de particular interés, ya que señala la necesidad de una revisión detallada de las condiciones de operación de esta máquina, así como de sus procedimientos de mantenimiento. Este análisis resulta crucial para determinar la razón del acelerado consumo de fajas.

Al enlistar todos los 17 eventos de cambios de faja en este equipo se tiene la siguiente tabla.

Tabla 26. Paros en equipo de producción 503 por rotura de faja 058-0191

N	Fecha	Tiempo de paro	Repuesto	Descripción repuestos
1	5/4/2021	1	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP

2	13/4/2021	3	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
3	2/6/2021	1	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
4	10/11/2021	0.6	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
5	1/2/2022	4	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
6	2/2/2022	6	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
7	19/7/2022	1.5	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
8	12/9/2022	1.5	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
9	3/10/2022	0.75	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
10	28/10/2022	2.6	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
11	8/11/2022	0.5	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
12	24/11/2022	0.6	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
13	1/6/2023	1	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
14	28/6/2023	3	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
15	26/7/2023	0.75	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
16	28/7/2023	3	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP
17	23/11/2023	2	058-0191	FAJA DENTADA 960 8M 20 GATES POWER GRIP

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observa el cambio de faja ocurre sin una estandarización y sin ningún patrón claro. Por ejemplo, entre el evento uno y el evento dos transcurre ocho días, pero entre el evento siete y el ocho transcurre 55 días. Al realizar este cambio con frecuencias diferentes ocasiona que se tenga que el repuesto deba ser comprado nuevamente para mantenerlo en stock, al requerirse sin una estandarización provoca que los costos de mantenimiento varíen a través del tiempo.

#### **4.4.1.1 Faja 058-0191**

##### **4.4.1.1.1 Cálculo de probabilidad de falla**

Para estandarizar de manera eficiente el cambio de esta faja, es fundamental realizar un análisis de la probabilidad de falla. Esto permite establecer un intervalo de tiempo adecuado para su sustitución preventiva, evitando así la rotura

inesperada de la faja, que genera fluctuaciones en los costos de mantenimiento y afectar la continuidad operativa.

Primero se deben ordenar los eventos de cambio de faja, de más antiguo a más reciente, además de mostrar las horas de funcionamiento acumulativas del equipo al momento de cada evento. Esto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 27. Horas en funcionamiento acumulativas antes de cada evento de falla para faja 058-0191 en 503

Fecha	Horas en funcionamiento	Número de evento
5/4/2021	2280	1
13/4/2021	2472	2
2/6/2021	3672	3
10/11/2021	7536	4
1/2/2022	9072	5
2/2/2022	9096	6
19/7/2022	13104	7
12/9/2022	14424	8
3/10/2022	14928	9
28/10/2022	15528	10
8/11/2022	15792	11
24/11/2022	16176	12
1/6/2023	20256	13
28/6/2023	20904	14
26/7/2023	21576	15
28/7/2023	21624	16
23/11/2023	24456	17

Fuente: Elaboración propia.

Una vez con este listado, se necesita conocer el tiempo que cada faja funcionó antes del fallo. Esto se puede calcular fácilmente al restar las horas de funcionamiento de cada evento, menos las horas de funcionamiento del evento anterior. Por ejemplo, entre el evento siete y el evento ocho se calcularían de la siguiente manera:

$$Evento_{7 \text{ y } 8} = Horas_{evento \ 8} - Horas_{evento \ 7}$$

$$Evento_{7y8} = 14424 - 13104$$

$$Evento_{7y8} = 1320 \text{ horas}$$

Esto significa que la faja 058-0191 tardó 1320 horas para fallar. Este procedimiento debe repetirse para cada uno de los eventos, de esta manera se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 28. Determinación de tiempo entre cambios de faja 058-0191 en 503

Fecha	Horas de funcionamiento acumulada	Horas de funcionamiento desde último cambio
5/4/2021	2280	2280
13/4/2021	2472	192
2/6/2021	3672	1200
10/11/2021	7536	3864
1/2/2022	9072	1536
2/2/2022	9096	24
19/7/2022	13104	4008
12/9/2022	14424	1320
3/10/2022	14928	504
28/10/2022	15528	600
8/11/2022	15792	264
24/11/2022	16716	924
1/6/2023	20256	3540
28/6/2023	20904	648
26/7/2023	21576	672
28/7/2023	21624	48
23/11/2023	24456	2832

Fuente: Elaboración propia.

Los datos necesarios para realizar el cálculo de probabilidad de falla se muestran en la columna “Horas de funcionamiento desde último cambio”, ya que estos muestran el tiempo real que estuvo la faja en funcionamiento antes de que falle.

Para el cálculo de probabilidad de falla, se tomarán 3 hipótesis posibles de los modelos paramétricos que se puede ajustar bien a los de la muestra. Las hipótesis que se comprobarán son las siguientes:

1. Distribución exponencial
2. Distribución Weibull
3. Distribución Gamma
4. Probabilidad empírica

Se trabaja con la siguiente muestra de datos, TI corresponde a las horas de funcionamiento desde el último cambio calculadas anteriormente:

Tabla 29. Horas de funcionamiento desde último cambio ordenado de manera ascendente para faja 058-0191 en 503

Falla NO	TI [Horas]
1	24
2	48
3	192
4	264
5	504
6	600
7	648
8	672
9	924
10	1200
11	1320
12	1536
13	2280
14	2832
15	3540
16	3864
17	4008

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.1.1.2 Distribución exponencial

El cálculo de la distribución exponencial viene dado según la siguiente ecuación:

$$F(t_i)_{058-0191} = 1 - e^{-\lambda t_i}$$

Donde el parámetro lambda ( $\lambda$ ) es una constante que se calcula de la siguiente mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_{058-0191} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

$$\lambda_{058-0191} = \frac{17}{24456}$$

$$\lambda_{058-0191} = 0.0006951$$

Una vez calculado el parámetro lambda se calculan las probabilidades acumuladas  $F(t_i)$  en cada valor de  $T_i$  de la muestra, es decir, en cada caso de falla. Por ejemplo, para la primera falla se calcula de la siguiente manera:

$$F(t_i) = 1 - e^{-0.0006951 \cdot 24}$$

$$F(t_i) = 0.0165$$

Este procedimiento se repite para cada uno de los valores de la muestra, obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 30. Probabilidad exponencial acumulada para muestra en faja 058-0191

Falla NO	TI [Horas]	Probabilidad
1	24	0,016544632
2	48	0,032815538
3	192	0,124941187
4	264	0,167659151

5	504	0,295553911
6	600	0,341028877
7	648	0,362653369
8	672	0,373198034
9	924	0,473917045
10	1200	0,565757059
11	1320	0,600509879
12	1536	0,656206277
13	2280	0,795029076
14	2832	0,860347301
15	3540	0,914628745
16	3864	0,931844719
17	4008	0,938336603

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se obtienen las probabilidades acumuladas según una distribución exponencial para que la faja 058-0191 falle en la máquina 503 de acuerdo con la muestra de datos tomada de las bitácoras diaria de los técnicos en el periodo de estudio enero 2021-diciembre 2023.

#### 4.4.1.1.3 Distribución Weibull

El cálculo de la distribución Weibull viene dado según la siguiente ecuación:

$$F(t_i)_{058-0191} = 1 - e^{\left[-\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta\right]}$$

Donde el parámetro Beta ( $\beta$ ) para la distribución exponencial se obtiene al resolver la siguiente ecuación con respecto a  $\beta$ :

$$\frac{\sum_{i=1}^n [x_i^\beta \ln(t_i)]}{\sum_{i=0}^n t_i^\beta} = \frac{1}{\beta}$$

$$\beta = 0.4242$$

El parámetro Alpha ( $\alpha$ ) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \left( \frac{\sum_{i=1}^n t_i^\beta}{n} \right)^{1/\beta}$$

$$\alpha = 1057.44$$

Una vez calculados los parámetros Alpha y Beta se calculan las probabilidades acumuladas  $F(t_i)$  en cada valor de  $T_i$  de la muestra. Por ejemplo, para la primera falla se calcula de la siguiente manera:

$$F(t_i)_{058-0191} = 1 - e^{\left[ -\left( \frac{t_i}{\alpha} \right)^\beta \right]}$$

$$F(t_i)_{058-0191} = 1 - e^{\left[ -\left( \frac{24}{1057.44} \right)^{0.4242} \right]}$$

$$F(t_i)_{058-0191} = 0.1819$$

Este procedimiento se repite para cada uno de los valores de la muestra, obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 31. Probabilidad Weibull acumulada para muestra en faja 058-0191

Falla NO	TI [Horas]	Weibull
1	24	0,1818652
2	48	0,2361175
3	192	0,3842687
4	264	0,4259762
5	504	0,5182212
6	600	0,5444856
7	648	0,5562182
8	672	0,561788
9	924	0,6110809
10	1200	0,6518463
11	1320	0,666677

12	1536	0,6901264
13	2280	0,7497509
14	2832	0,7810133
15	3540	0,8116636
16	3864	0,823196
17	4008	0,8279236

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se obtienen las probabilidades acumuladas según una distribución Weibull para que la faja 058-0191 falle en la máquina 503 de acuerdo con la muestra de datos tomada de las bitácoras diaria de los técnicos en el periodo de estudio enero 2021-diciembre 2023.

#### 4.4.1.1.4 Distribución Gamma

El cálculo de la distribución Gamma viene dado según la siguiente ecuación:

$$F(t_i)_{058-0191} = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^t t_i^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt$$

Donde el parámetro Beta ( $\beta$ ) para la distribución Gamma se obtiene al resolver la siguiente ecuación con respecto a  $\beta$ :

$$\beta = \frac{n \sum_{i=1}^n (t_i - \mu_x)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n t_i}$$

$$\beta = 1.12$$

El parámetro Alpha ( $\alpha$ ) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{(n-1) (\sum_{i=1}^n t_i)^2}{n^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \mu_x)^2}$$

$$\alpha = 1283.95$$

Una vez calculados los parámetros Alpha y Beta se calculan las probabilidades acumuladas  $F(t_i)$  en cada valor de  $T_i$  de la muestra. Por ejemplo, para la primera falla se calcula de la siguiente manera:

$$F(t_i)_{058-0191} = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^t t_i^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt$$

$$F(t_i)_{058-0191} = \frac{1}{1.12^{1283.95} \Gamma(1283.95)} \int_0^t 24^{1283.95-1} e^{-\frac{t}{1.12}} dt$$

$$F(t_i)_{058-0191} = 0.0108$$

Este procedimiento se repite para cada uno de los valores de la muestra, obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 32. Probabilidad Gamma acumulada para muestra en faja 058-0191

Falla NO	TI [Horas]	Gamma
1	24	0,0108422
2	48	0,0233417
3	192	0,1040719
4	264	0,1444679
5	504	0,2713128
6	600	0,3178858
7	648	0,3402307
8	672	0,3511679
9	924	0,4567473
10	1200	0,5542391
11	1320	0,5912944
12	1536	0,650737
13	2280	0,7981149
14	2832	0,8661883
15	3540	0,9213342

16	3864	0,9383762
17	4008	0,9447231

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se obtienen las probabilidades acumuladas según una distribución Gamma para que la faja 058-0191 falle en la máquina 503 de acuerdo con la muestra de datos tomada de las bitácoras diaria de los técnicos en el periodo de estudio enero 2021-diciembre 2023.

#### 4.4.1.1.5 Probabilidad empírica

Esta probabilidad corresponde al resultado de dividir el número de falla entre la cantidad de fallas totales de la muestra. Por ejemplo, para la primera falla se calcula de la siguiente manera:

$$F(t_i)_{058-0191} = 1/n$$

$$F(t_i)_{058-0191} = 1/17$$

$$F(t_i)_{058-0191} = 0.0589$$

Al realizar este procedimiento en todas las fallas se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 33. Probabilidad Empírica acumulada para muestra en faja 058-0191

Falla NO	TI [Horas]	Empírica
1	24	0,0588235
2	48	0,1176471
3	192	0,1764706
4	264	0,2352941
5	504	0,2941176
6	600	0,3529412
7	648	0,4117647

8	672	0,4705882
9	924	0,5294118
10	1200	0,5882353
11	1320	0,6470588
12	1536	0,7058824
13	2280	0,7647059
14	2832	0,8235294
15	3540	0,8823529
16	3864	0,9411765
17	4008	1

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.4.1.1.6 Prueba de ajuste de bondad Kolmogórov-Smirnov (KS)**

Al calcular las cuatro distribuciones de probabilidad de falla, específicamente las exponenciales, Weibull, Gamma y empírica, es esencial realizar una prueba estadística que permita evaluar la adecuación de estas distribuciones a los datos observados. Para ello, se utiliza la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov (KS), herramienta fundamental en la validación de modelos probabilísticos.

La prueba Kolmogórov-Smirnov tiene como objetivo comparar la distribución empírica de la muestra con una distribución teórica propuesta, en este caso, las mencionadas distribuciones de probabilidad de falla. Esta prueba permite evaluar qué tan bien una de las distribuciones teóricas se ajusta a los datos analizados, proporcionando una medida cuantitativa de la diferencia entre la distribución observada y la teórica.

El estadístico de la prueba KS se basa en la máxima diferencia absoluta entre las funciones de distribución acumulada empírica y teórica, lo que facilita la

identificación de la distribución que mejor representa el comportamiento de la muestra. Al comparar los valores obtenidos en la prueba KS para cada distribución, es posible determinar cuál de ellas es la más adecuada para modelar el comportamiento de fallas del sistema o componente en estudio.

Para esto se calculan las diferencias acumuladas para las 3 distribuciones.

Tabla 34. Cálculo de diferencia acumulada entre distribución exponencial y empírica

Falla NO	TI [Horas]	Exponencial	Empírica	Diferencia acumulada
1	24	0,016545	0,058824	0,058824
2	48	0,032816	0,117647	0,026008
3	192	0,124941	0,176471	0,007294
4	264	0,167659	0,235294	0,008811
5	504	0,295554	0,294118	0,06026
6	600	0,341029	0,352941	0,046911
7	648	0,362653	0,411765	0,009712
8	672	0,373198	0,470588	0,038567
9	924	0,473917	0,529412	0,003329
10	1200	0,565757	0,588235	0,036345
11	1320	0,60051	0,647059	0,012275
12	1536	0,656206	0,705882	0,009147
13	2280	0,795029	0,764706	0,089147
14	2832	0,860347	0,823529	0,095641
15	3540	0,914629	0,882353	0,091099
16	3864	0,931845	0,941176	0,049492
17	4008	0,938337	1	0,00284

Fuente: Elaboración propia.

La mayor diferencia de la tabla anterior se encuentra en la falla 14 con un valor de 0.09564

Tabla 35. Cálculo de diferencia acumulada entre distribución Weibull y empírica

Falla NO	TI [Horas]	Weibull	Empírica	Diferencia acumulada
1	24	0,181865	0,058824	0,058824
2	48	0,236118	0,117647	0,177294
3	192	0,384269	0,176471	0,266622
4	264	0,425976	0,235294	0,249506
5	504	0,518221	0,294118	0,282927
6	600	0,544486	0,352941	0,250368
7	648	0,556218	0,411765	0,203277
8	672	0,561788	0,470588	0,150023
9	924	0,611081	0,529412	0,140493
10	1200	0,651846	0,588235	0,122435
11	1320	0,666677	0,647059	0,078442
12	1536	0,690126	0,705882	0,043068
13	2280	0,749751	0,764706	0,043869
14	2832	0,781013	0,823529	0,016307
15	3540	0,811664	0,882353	0,011866
16	3864	0,823196	0,941176	0,059157
17	4008	0,827924	1	0,113253

Fuente: Elaboración propia.

La mayor diferencia de la tabla anterior se encuentra en la falla 5 con un valor de 0.2829

Tabla 36. Cálculo de diferencia acumulada entre distribución Gamma y empírica

Falla NO	TI [Horas]	Weibull	Empírica	Diferencia acumulada
1	24	0,010842	0,058824	0,058824
2	48	0,023342	0,117647	0,035482
3	192	0,104072	0,176471	0,013575
4	264	0,144468	0,235294	0,032003
5	504	0,271313	0,294118	0,036019
6	600	0,317886	0,352941	0,023768
7	648	0,340231	0,411765	0,01271

8	672	0,351168	0,470588	0,060597
9	924	0,456747	0,529412	0,013841
10	1200	0,554239	0,588235	0,024827
11	1320	0,591294	0,647059	0,003059
12	1536	0,650737	0,705882	0,003678
13	2280	0,798115	0,764706	0,092232
14	2832	0,866188	0,823529	0,101482
15	3540	0,921334	0,882353	0,097805
16	3864	0,938376	0,941176	0,056023
17	4008	0,944723	1	0,003547

Fuente: Elaboración propia

La mayor diferencia de la tabla anterior se encuentra en la falla 14 con un valor de 0.1014

Tabla 37. Resumen de diferencias máximas en las diferentes distribuciones para faja 058-0191

Distribución de hipótesis	K-S VALUE (Mayor diferencia)
Exponencial	0,095641419
Weibull	0,282927076
Gamma	0,101482376

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las tres distribuciones se determina que la exponencial es la que mejor representa el comportamiento de la muestra, ya que posee una diferencia menor que las demás.

Para este estudio se utiliza un nivel de significancia del 5%, de acuerdo con la *Tabla 6. Valores críticos para la prueba de Kolmogórov-Smirnov*, para una muestra de 17 datos con un nivel de significancia de 0.05 la diferencia no debe ser mayor a 0.318.

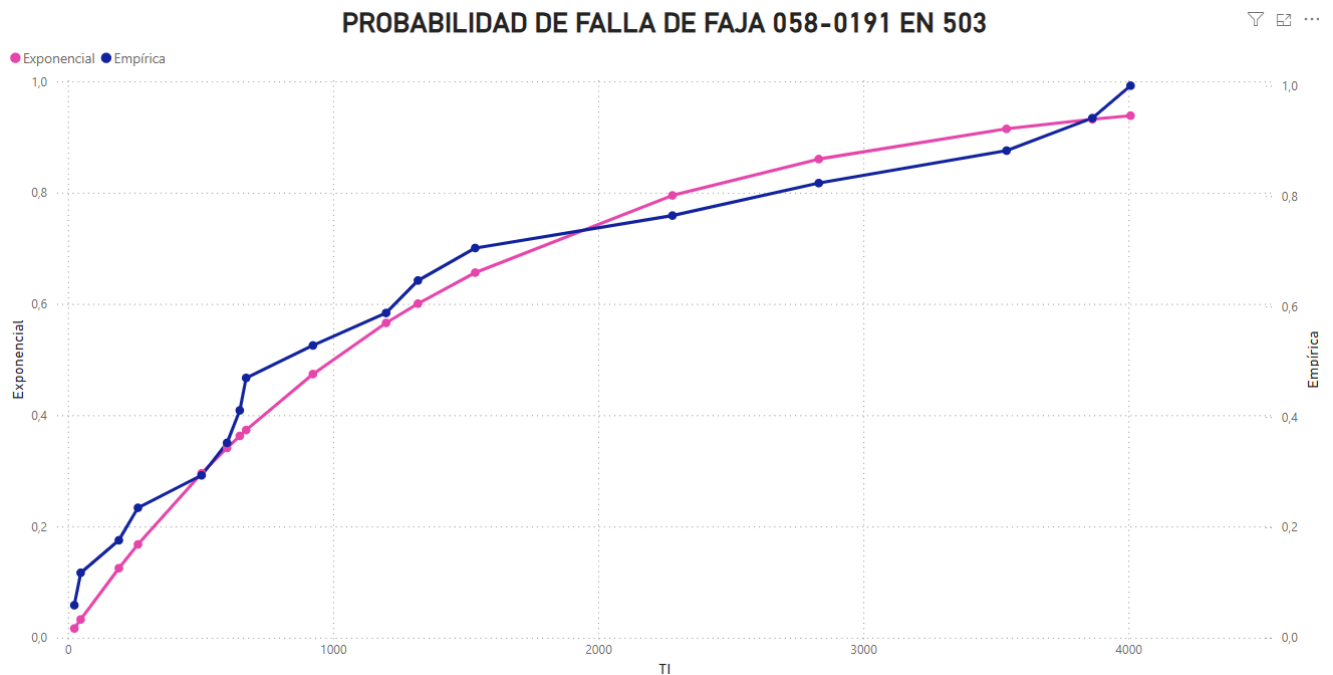
Debido a que esto se cumple:

$$0.318 > 0.0956$$

La hipótesis que afirma que la exponencial representa el comportamiento de la muestra no es rechazada.

Al realizar la representación gráfica del comportamiento de las probabilidades de falla se obtiene la siguiente figura:

Figura 8. Representación gráfica de la probabilidad de falla de la faja 058-0191 en máquina 503



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica presentada se observa el comportamiento de los datos, los cuales indican que, a medida que el tiempo transcurre, la probabilidad de falla aumenta de manera exponencial. Este crecimiento alcanza un límite máximo de 4000 horas, cuando la probabilidad de falla se aproxima al 100%. El análisis de dicha gráfica

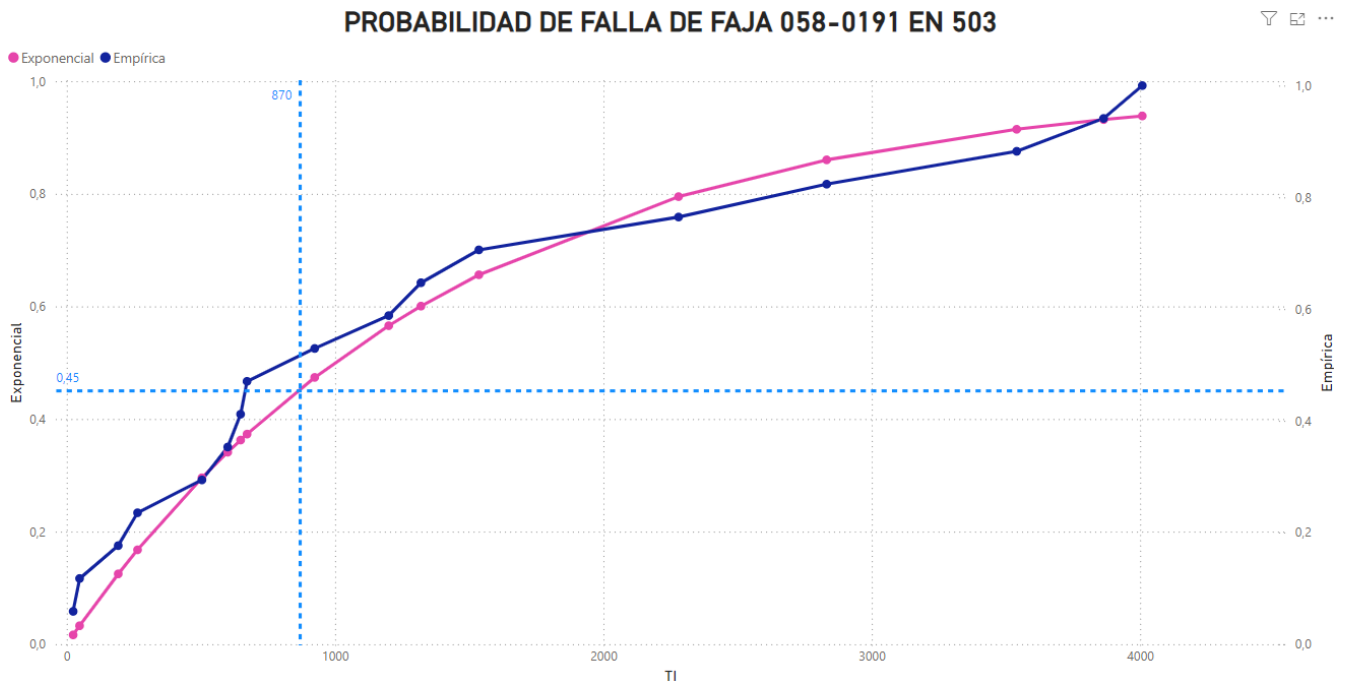
permite establecer una relación directa entre el tiempo y la probabilidad de falla, lo que facilita la predicción del comportamiento futuro de la faja.

Esta gráfica permite de trazar una línea horizontal en el valor de probabilidad de falla deseado y, a partir de la intersección de esta línea con la curva de la distribución exponencial, determinar el tiempo específico en el que se alcanzará dicha probabilidad. Este tiempo, representado en el eje X, indica el momento en el que el sistema o componente tendrá una probabilidad de falla definida, permitiendo estimar con mayor precisión la vida útil o el tiempo esperado de operación antes de que se produzca una falla.

En este caso particular, basado en el criterio de expertos, se ha definido que una probabilidad de falla del 45% es un valor aceptable para la toma de decisiones. En este punto, el sistema aún tiene más probabilidad de seguir funcionando correctamente (55%) en comparación con la probabilidad de falla (45%), lo que lo convierte en un punto adecuado tomar decisiones estratégicas que permitan disminuir el cambio descontrolado de la faja y disminuir la variabilidad en los costos de mantenimiento de la planta.

De esta manera, se traza una línea horizontal en el valor de 0.45 en el eje de las probabilidades de falla (eje Y), permitiendo identificar el punto de intersección con la curva de la distribución exponencial.

Figura 9. Determinación cantidad de horas de operación para alcanzar probabilidad de falla de 45% en faja 058-0191.



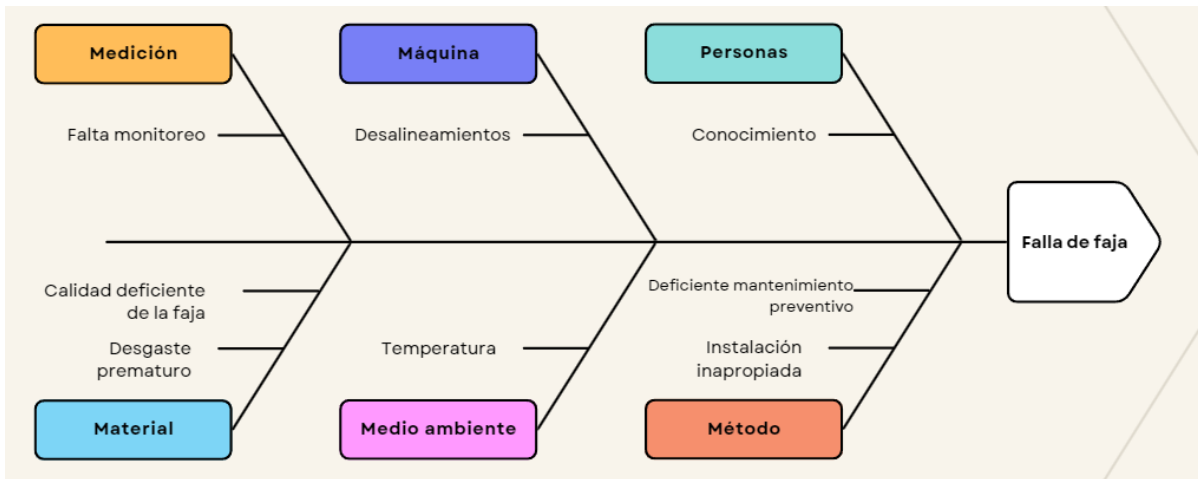
Fuente: Elaboración propia.

Según la gráfica, esta intersección ocurre a las 870 horas de funcionamiento. Esto implica que, según el modelo de distribución exponencial utilizado, el sistema tiene una probabilidad del 45 % de fallar tras operar durante 870 horas, como se muestra en la figura anterior.

#### 4.4.1.1.7 Análisis de causas de avería

Para determinar la razón de las roturas repetitivas de la faja 058-0191 en la máquina de producción 503 se utiliza el método de Ishikawa, con esta metodología se busca encontrar las posibles causas que ocasionan la repetición de este problema que ocasiona el consumo descontrolado de la faja y produce aumento en la variabilidad de los costos de mantenimiento. De esta manera, se obtiene la siguiente figura.

Figura 10. Diagrama de Ishikawa para rotura de faja 058-0191 en 503



Fuente: Elaboración propia.

- **Medición**

Aunque se encuentre mucha información para el análisis, las mediciones de consumos de horas y el registro de salidas de repuestos no son útiles para encontrar tendencias de falla repetitivas que alteran los costos de mantenimiento. La falta de monitoreo genera que este problema sea detectado con dificultad, y por ende se busquen soluciones cuando el problema ha persistido durante mucho tiempo.

El aumento del monitoreo produce que el problema se detecte a tiempo y que las consecuencias no se expandan cada vez más, pero no se puede considerar la causa raíz de las fallas frecuentes en la faja 058-0191 en la máquina 503.

- **Máquina**

El desalineamiento entre las poleas de las fajas causa que la distribución de la fuerza no se homogenea en la faja, provocando así que el área de la faja que sufre mayores esfuerzos se desgaste más rápidamente y ocasionen la rotura de la faja.

Al realizar una inspección en campo se determina que no existe un desalineamiento entre las poleas que puedan estar afectando en el desgaste y rotura prematuros de la faja, tal y como se muestra en la siguiente figura.

Figura 11. Comprobación de alineamiento en faja 058-0191 en 503



Fuente: Elaboración propia.

El desalineamiento no puede considerarse la causa raíz de las fallas frecuentes en la faja 058-0191 en la máquina 503.

- Material

Si el material de la faja no es el adecuado para trabajar en las condiciones en las que se encuentra el sistema, puede ocasionar fallas en la faja. La faja utilizada es una faja dentada HTD 960 8M 20 marca Gates Power Grip.

De acuerdo con el fabricante esta faja posee un revestimiento de nylon en los dientes que en conjunto con fibra de vidrio posee las características para trabajar en la transmisión de potencia de hasta 1000 kW y en un rango de temperaturas de  $-30^{\circ}\text{C}$  y  $+100^{\circ}\text{C}$ . Tomando en consideración que el rango de temperatura de la máquina ronda los  $50^{\circ}\text{C}$  no debe ser razón por considerar.

- Medio ambiente

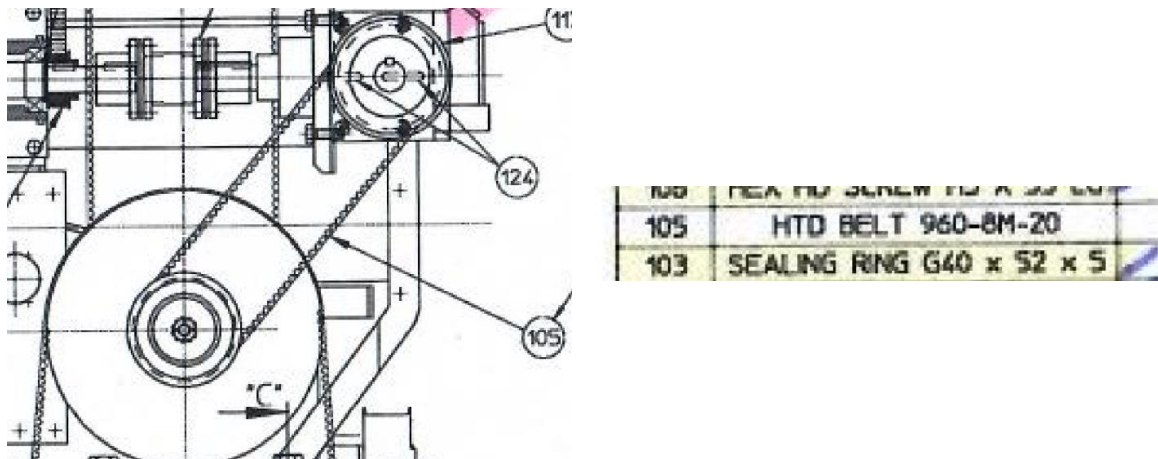
No hay alteración en la temperatura que afecte el funcionamiento de esta, tal como se comprobó anteriormente esta está trabajando bajo sus condiciones de diseño.

- Método

Existe la posibilidad de que la faja se esté instalando incorrectamente o bien, que no sea la recomendada por el fabricante de la máquina.

Al revisar en los planos mecánicos, se encuentra que la faja utilizada si coincide con la que muestra se muestran en los planos tal y como se muestra en la siguiente figura:

Figura 12. Verificación de faja recomendada por el fabricante en máquina 503

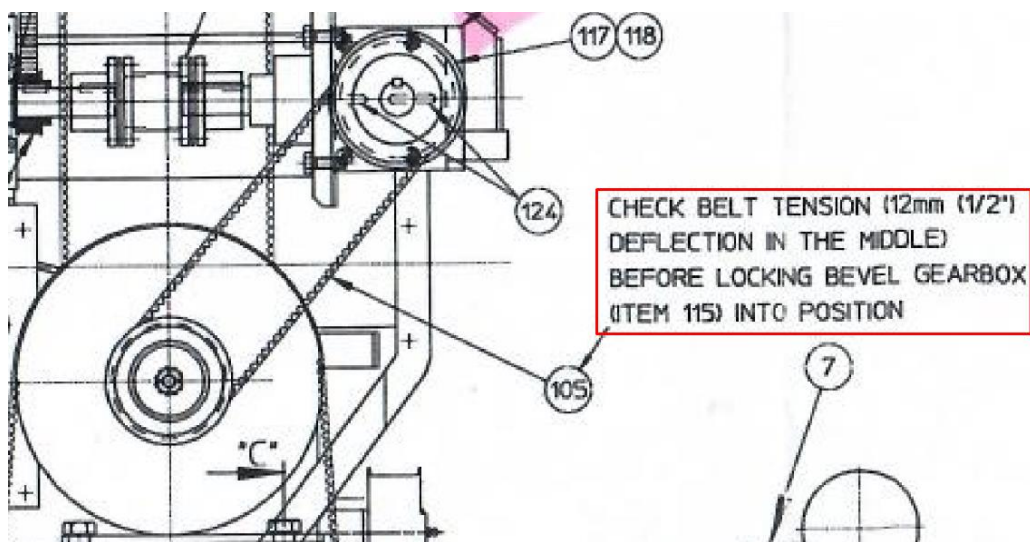


Fuente: (The Northampton Machinery Company, 1999)

Por tanto, el uso de una faja equívoca no puede considerarse la causa raíz de las fallas frecuentes en la faja 058-0191 en la máquina 503.

Sin embargo, al observar detenidamente el plano mecánico se observa la siguiente nota de instalación:

Figura 13. Nota de instalación de faja 058-0191 en 503



Fuente: (The Northampton Machinery Company, 1999)

La nota enmarcada en rojo indica que tensión aplicada a la faja debe permitir una deflexión de 12 mm en el centro. Este requisito técnico es fundamental para garantizar el buen funcionamiento y durabilidad de la faja, y su incumplimiento se identifica como una de las principales causas de fallas recurrentes en la máquina.

Durante una serie de entrevistas verbales con el equipo de mantenimiento, incluidas conversaciones con dos técnicos y el ingeniero a cargo, se evidenció un desconocimiento generalizado sobre esta especificación técnica. Los entrevistados comentaron no estar al tanto de la existencia de esta instrucción en los planos. Esta falta de conocimiento ha ocasionado la aplicación de métodos subjetivos para ajustar la tensión de la faja, basados en la experiencia individual de cada técnico, en lugar de seguir un estándar técnico dado por el fabricante.

Como consecuencia, los ajustes realizados en la faja a lo largo del periodo de análisis han sido inconsistentes, lo que ha resultado en una variabilidad significativa en su vida útil. Esta inconsistencia no solo ha afectado el desempeño operativo de la máquina, sino que también ha provocado fluctuaciones considerables en los costos de mantenimiento, debido a la frecuencia inesperada de los reventones.

- Personas

Tal y como se expresa el desconocimiento técnico del personal respecto a las instrucciones de instalación de la faja se considera una posible causa de los reventones de la faja. Las personas también son una causa del problema, ya que, pese a presentarlo en repetidas ocasiones en el periodo de estudio de tres años, no

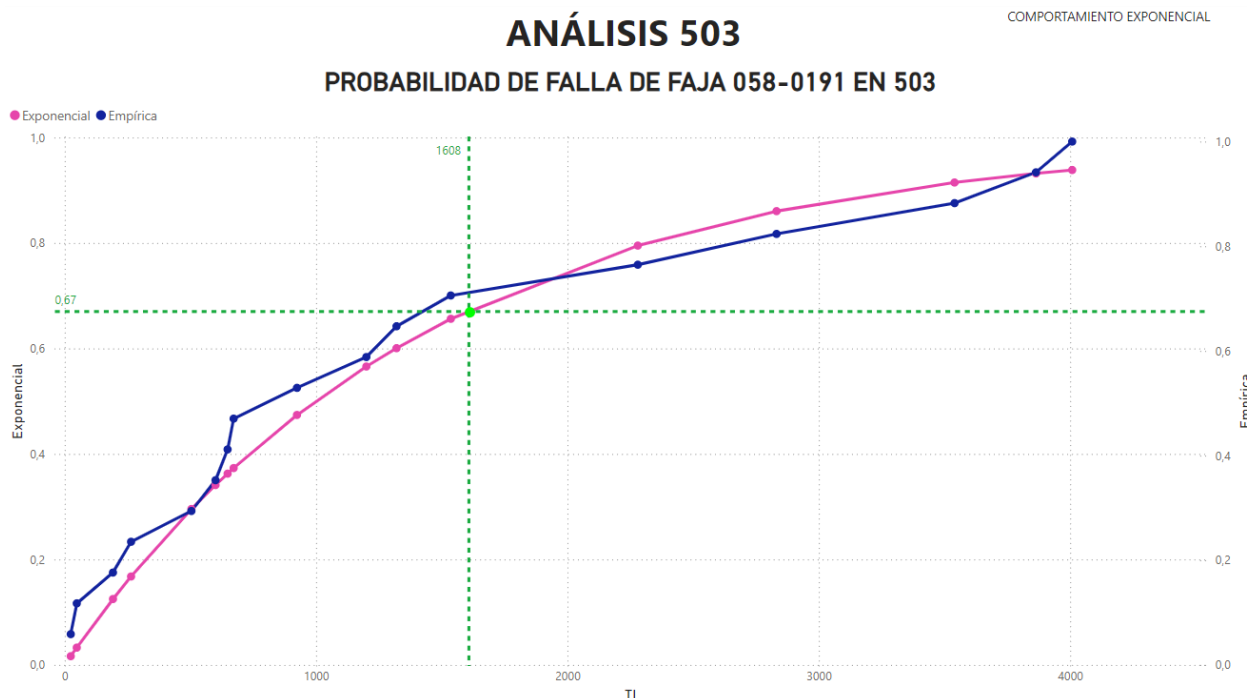
consultaron las recomendaciones del fabricante para atacarlo con mayor anticipación.

#### 4.4.1.1.8 Monitoreo de resultados

Se realiza una prueba de la hipótesis, la cual consiste en realizar un cambio de la faja 058-0191 en la máquina 503 el día viernes 02 de agosto del 2024. En este cambio se instala la faja de acuerdo con las especificaciones del fabricante y se verifica que en efecto se cumpla la tensión que se indica en los planos mecánicos.

La prueba inicia su fase de monitoreo hasta el momento de la falla de la faja. Esta falla ocurre el 08 de octubre del año 2024, de esta manera se puede determinar que el tiempo para la falla es de 1608 horas. Al marcar este punto en la siguiente curva de probabilidad de falla:

Figura 14. Punto de falla en la curva de probabilidad de falla de la faja 058-0191 en la máquina 503 durante el periodo de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el resultado obtenido se coloca en un 67% de probabilidad de falla, por lo que se obtuvo un margen de error de un 22% de lo esperado contra lo real. Sin embargo, esta mejora se debe a que la faja fue colocada de la manera que lo recomienda el fabricante y esto genera que se alargue la vida útil de la faja. Además, estos resultados demuestran que el método de cálculo es correcto y se apega a las condiciones reales de los repuestos utilizado en esta máquina.

#### 4.4.1.2 Faja 058-0047

##### 4.4.1.2.1 Cálculo de probabilidad de falla

Se realiza el mismo cálculo que en la *Faja 058-0191*, partiendo de la siguiente información:

Tabla 38. Horas en funcionamiento acumulativas antes de cada evento de falla para faja 058-0047 en 503

Fecha	Horas en funcionamiento	Número de evento
22/2/2021	1272	1
8/7/2021	4536	2
26/8/2021	5712	3
15/10/2021	6912	4
20/10/2021	7032	5
9/2/2022	9264	6
28/4/2022	11136	7
19/5/2022	11640	8
5/7/2022	12768	9
26/7/2022	13272	10
2/9/2022	14184	11
23/9/2022	14688	12
19/4/2023	19224	13

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el cálculo de las diferentes probabilidades de fallas se obtienen las siguientes diferencias máximas entre el valor de cada distribución y la probabilidad empírica.

Tabla 39. Resumen de diferencias máximas en las diferentes distribuciones para faja 058-0047

Distribución de hipótesis	K-S VALUE (Mayor diferencia)
Exponencial	0,211892836
Weibull	0,206226274
Gamma	0,139698839

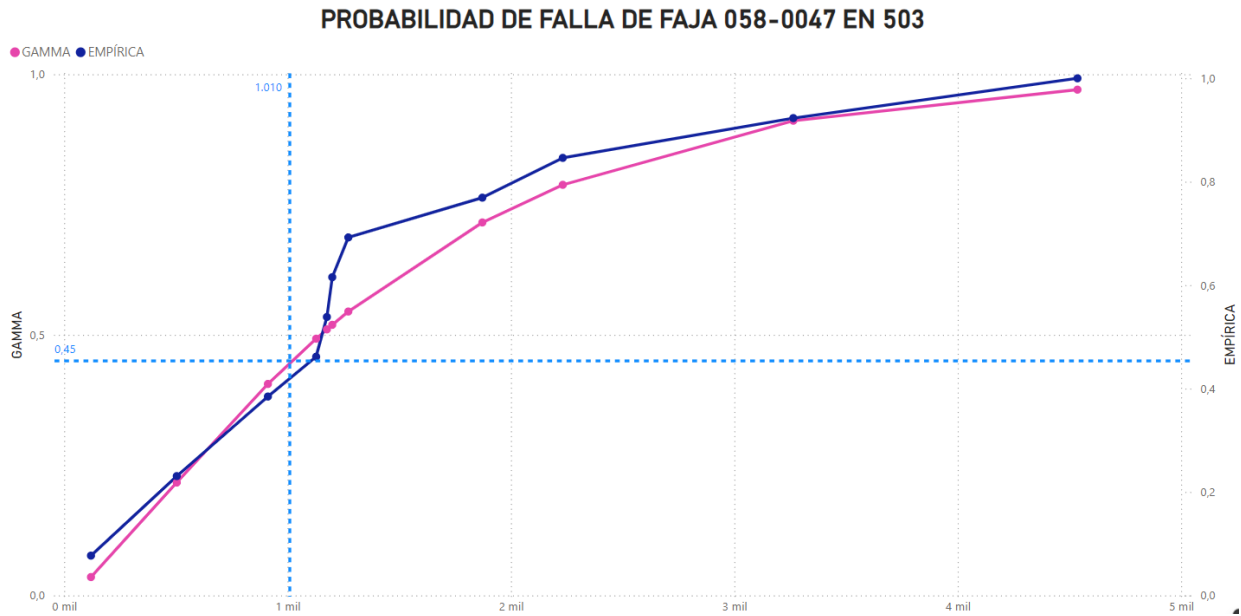
Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las tres distribuciones se determina que la distribución Gamma representa mejor el comportamiento de la muestra, ya que posee una diferencia menor a las demás.

Además, al comparar el valor de la diferencia máxima en la distribución Gamma con la *Tabla 6. Valores críticos para la prueba de Kolmogórov-Smirnov*, se concluye que la hipótesis no puede ser rechazada considerando un 5% de significancia.

De esta manera, se puede graficar el comportamiento de la probabilidad de falla de la faja 058-0047 en 503.

Figura 15. Determinación de cantidad de horas de operación para alcanzar probabilidad de falla de 45% en faja 058-0047 en 503



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, se utiliza el juicio de expertos para definir que una probabilidad de falla del 45% es un valor aceptable para la toma de decisiones. Así se traza una línea horizontal en el valor de probabilidad de falla de 0,45 % y desde la intersección con la curva de la distribución Gamma, se determina que las 1010 horas es el tiempo específico en el que la faja 058-0047 en 503 posee una confiabilidad del 55 %.

#### 4.4.2 Caso 2- Máquina 512

El segundo caso de análisis se centra en la máquina de producción identificada como 512 el cual registra un consumo de 9 fajas en el periodo de estudio, esto de acuerdo con la *Figura 7. 8 repuestos más utilizados por máquina para mantenimientos correctivos.*

#### 4.4.2.1 Faja 058-0233

##### 4.4.2.1.1 Cálculo de probabilidad de falla

Se realiza el mismo cálculo que en la *Faja 058-0191*, partiendo de la siguiente información:

Tabla 40. Horas en funcionamiento acumulativas antes de cada evento de falla para faja 058-0233 en 512

Fecha	Horas en funcionamiento	Número de evento
44327	3144	1
44399	4872	2
44420	5376	3
44477	6744	4
44532	8064	5
44708	11832	6
44772	13368	7
44876	15864	8
45090	20544	9

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el cálculo de las diferentes probabilidades de fallas se obtienen las siguientes diferencias máximas entre el valor de cada distribución y la probabilidad empírica.

Tabla 41. Resumen de diferencias máximas en las diferentes distribuciones para faja 058-0233

Distribución de hipótesis	K-S VALUE (Mayor diferencia)
Exponencial	0,328021636
Weibull	0,157427904
Gamma	0,148569169

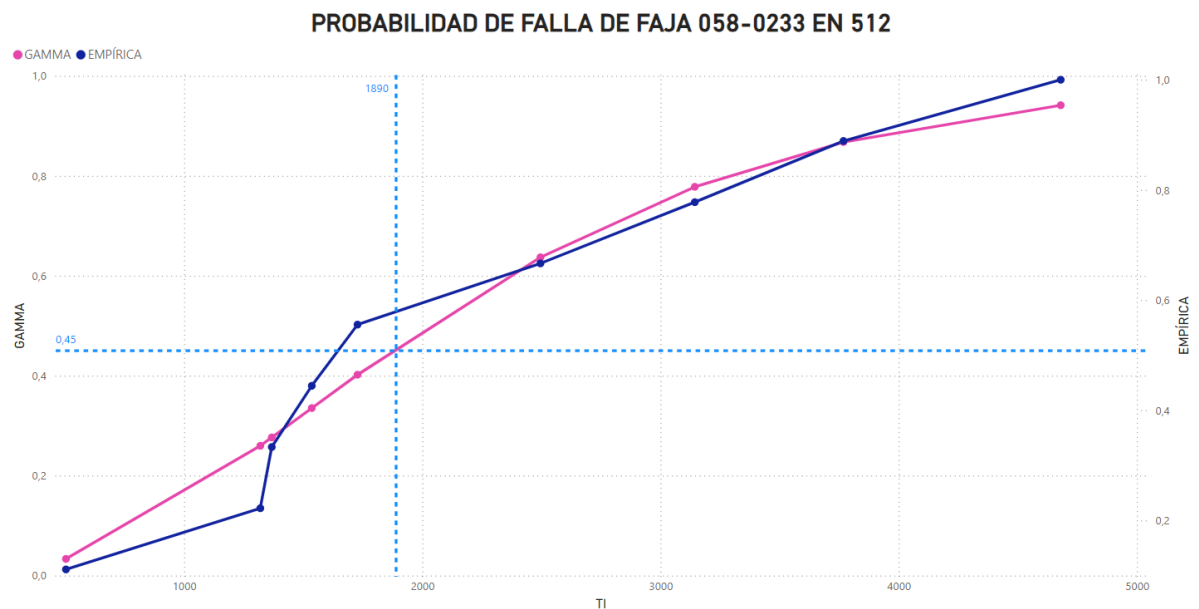
Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las tres distribuciones se determina que la distribución Gamma representa mejor el comportamiento de la muestra, ya que posee una diferencia menor a las demás.

Además, al comparar el valor de la diferencia máxima en la distribución Gamma con la *Tabla 6. Valores críticos para la prueba de Kolmogórov-Smirnov*, se concluye que la hipótesis no puede ser rechazada considerando un 5% de significancia.

De esta manera, se puede graficar el comportamiento de la probabilidad de falla de la faja 058-0233 en 512.

Figura 16. Determinación de cantidad de horas de operación para alcanzar probabilidad de falla de 45% en faja 058-0233 en 512



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, se utiliza el juicio de expertos para definir que una probabilidad de falla del 45% es un valor aceptable para la toma de decisiones. Así se traza una línea horizontal en el valor de probabilidad de falla de 0,45 y desde la

intersección con la curva de la distribución Gamma, se determina que las 1890 horas es el tiempo específico en el que la faja 058-0233 en 512 posee una confiabilidad del 55 %.

#### **4.5 El efecto de la confiabilidad sobre la variabilidad en los costos de mantenimiento**

Como se explica en el *Caso 1- Máquina 503* donde se muestra la *Tabla 26. Paros en equipo de producción 503 por rotura de faja 058-0191*”, existe una variación importante en la frecuencia de cambio de la faja 058-0191, esta frecuencia de cambio tan inconsistente genera variaciones en los costos de mantenimiento de la máquina, ya que se debe reponer una faja en bodega en tiempos que pueden ir desde 24 horas hasta tres meses. La causa principal de esto se debe a que la confiabilidad no se encuentra monitoreada y no se tiene una frecuencia de cambio establecida que permita que los cambios se realicen de manera estandarizada sin necesidad de esperar la falla de la faja, generando de esta manera un paro no deseado en el equipo y la necesidad de una solución inmediata.

Al analizar la rutina de mantenimiento de la máquina 503 adjunta en Anexos, se observa que en ninguna de sus actividades se encuentra el cambio periódico de las fajas, esto representa que la faja no se está sustituyendo de manera preventiva, sino hasta que falle.

Al calcular la confiabilidad de la faja 058-0191, se puede realizar un estándar de cambio que se incluya en la rutina de mantenimiento preventivo y que sea sustituida de manera mensual según su mantenimiento.

Tomando como ejemplo el caso 1 de la máquina 503 y sus dos fajas de análisis (058-0191 y 058-0047), se determina que para una confiabilidad de un 55% la faja 058-0191 debe ser sustituida a las 870 horas de operación, es decir aproximadamente a cada 36.25 días de operación y para el caso de la faja 058-0047 debe ser cada 1010 horas, es decir aproximadamente cada 42 días. Con estos datos se puede colocar una frecuencia de cambio establecida en las rutinas de mantenimiento que permita el cambio controlado de fajas.

Con los datos calculados en este punto se puede realizar una tabla que compare la sumatoria de los costos en colones por cambios de las 058-0191 y 058-0047 en la máquina 503 de los mismos meses en los años del periodo de análisis.

Tabla 42. Costos de mantenimiento sin contar mano de obra por cambio de fajas en máquina 503 desde enero 2021 hasta diciembre 2023

MES	PERIODO ESTUDIADO	PERIODO PROYECTADO
Enero	₡78 754,29	₡407 321,57
Febrero	₡304 362,00	₡284 673,43
Marzo	₡0,00	₡304 362,00
Abril	₡284 673,43	₡304 362,00
Mayo	₡122 648,14	₡304 362,00
Junio	₡98 442,86	₡304 362,00
Julio	₡466 387,29	₡407 321,57
Agosto	₡142 336,71	₡284 673,43
Setiembre	₡343 739,14	₡284 673,43
Octubre	₡284 673,43	₡304 362,00
Noviembre	₡78 754,29	₡304 362,00
Diciembre	₡59 065,71	₡427 010,14
<b>TOTAL</b>	<b>₡2 263 837</b>	<b>₡3 921 846</b>

Fuente: Elaboración propia.

La columna nombrada Periodo Proyectado corresponde a los costos de mantenimiento que se tendrán en los siguientes tres años por el cambio de estas

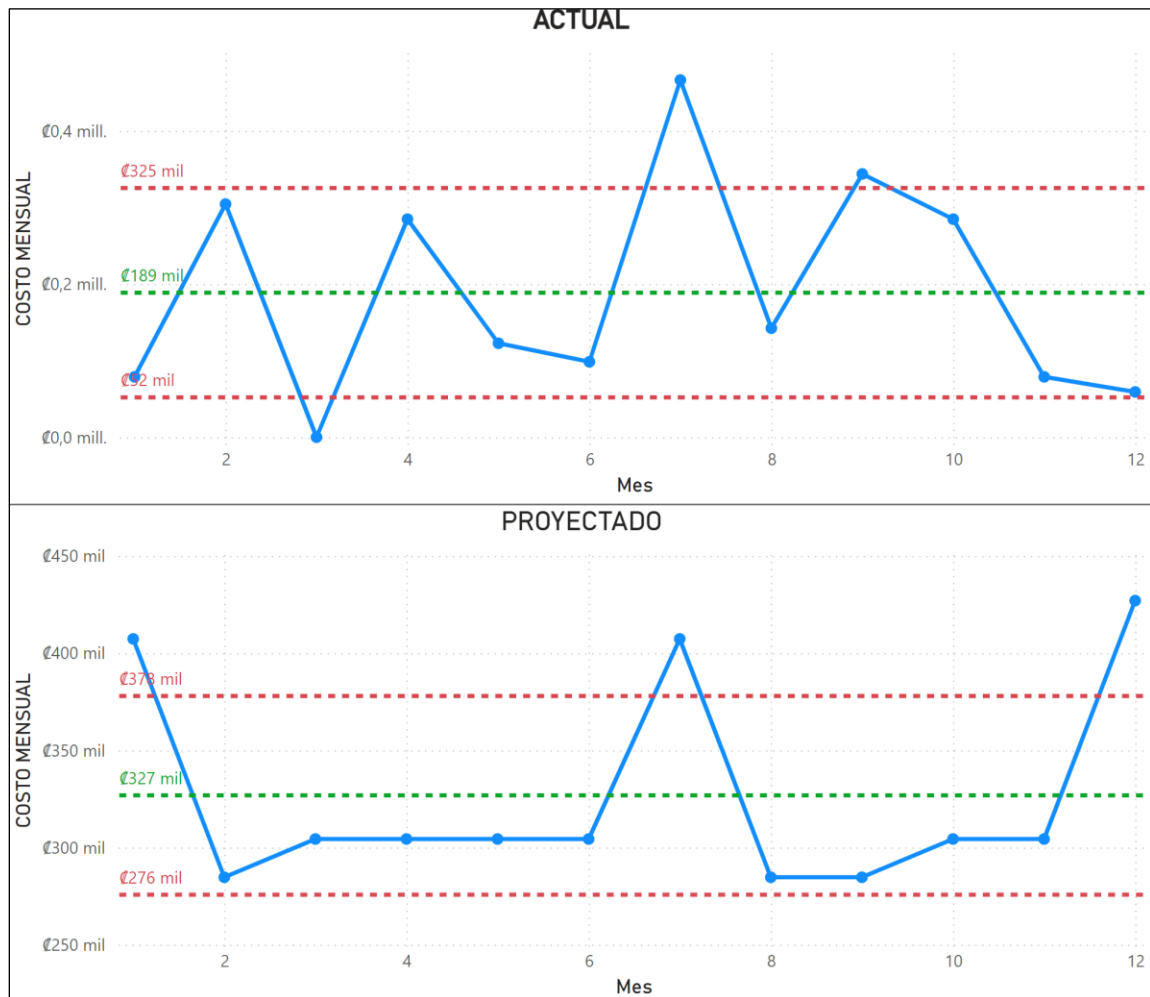
dos fajas. De esta manera se puede calcular la desviación estándar de cada uno de los periodos obteniendo los siguientes resultados:

$$\sigma_{PERIODO\ ESTUDIADO} = \text{€}136,685$$

$$\sigma_{PERIODO\ PROYECTADO} = \text{€}51,116$$

Por tanto, al proyectar en los siguientes tres años la desviación estándar de los datos se muestra que existe una reducción del 62.6% de desviación estándar del periodo proyectado con respecto al periodo estudiado.

Figura 17. Comparativa del periodo actual y periodo proyectado de la variabilidad de los costos de mantenimiento para el cambio de fajas de la máquina 503



Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior observa una comparativa entre la variabilidad de los costos de mantenimiento en el periodo de estudio y en el periodo proyectado. Las líneas rojas indican la mayor y menor desviación que puede tener los datos según su promedio marcado en verde. El rango de desviación es considerablemente más pequeño en el periodo proyectado.

En la siguiente tabla se observa ejemplifica de una mejor manera el menor y mayor valor que se puede tener en un mes en el periodo estudiado y posteriormente en el periodo proyectado.

Tabla 43. Costo en colones máximo y mínimo en recambio de fajas en la máquina 503 según el periodo

<b>Periodo</b>	<b>Menor valor posible</b>	<b>Mayor valor posible</b>
Estudiado	₡51 968	₡325 338
Proyectado	₡275 704	₡377 937

Fuente: Elaboración propia.

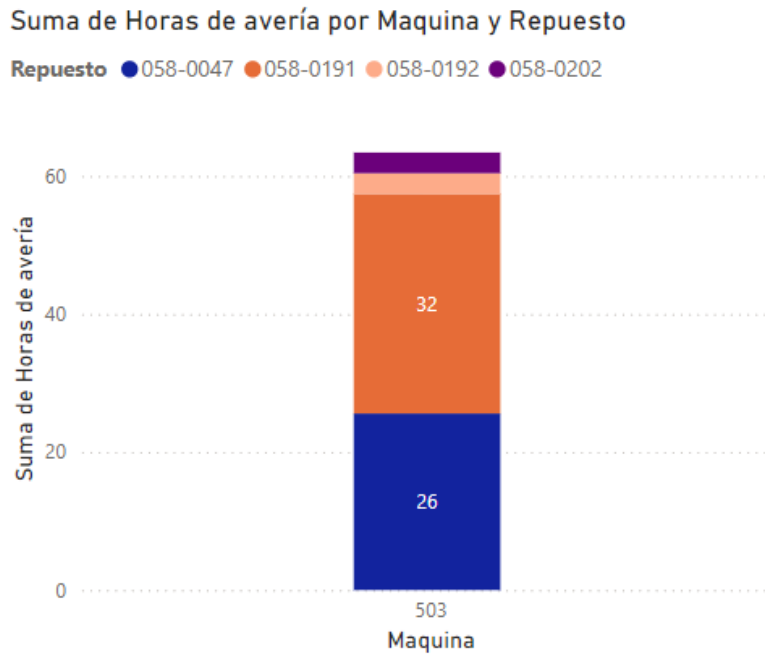
Por tanto, se demuestra que al calcular la confiabilidad de las fajas de manera que permita la implementación de cambios rutinarios provoca una disminución en la variabilidad de los costos de mantenimiento.

Esta metodología permite ser replicada en los demás repuestos de la máquina y posteriormente ser implementado de manera general en toda la planta para observar cambio de mayor impacto.

#### **4.5.1 Análisis de costos**

De la Tabla 42. Costos de mantenimiento sin contar mano de obra por cambio de fajas en máquina 503 desde enero 2021 hasta diciembre 2023”, se observa que la sumatoria total de los costos proyectados excede en ₡1,658,008 la suma de los costos registrados durante el periodo de estudio, lo que equivale a \$3,188.48, tomando un tipo de cambio de ₡520. Este incremento en los costos se debe principalmente a la necesidad de realizar reemplazos de las fajas con mayor frecuencia, con el fin de evitar que estas lleguen a fallar por completo. Aunque esta práctica eleva el costo total de mantenimiento, ya que se deben realizar más sustituciones preventivas, tiene la ventaja de reducir significativamente el tiempo de paro de la máquina. Durante el periodo de estudio, las paradas debido a fallos inesperados fueron más frecuentes, lo que afectaba la productividad del equipo. Con el nuevo enfoque de mantenimiento preventivo, aunque el costo inmediato por repuestos es mayor, se optimiza la operatividad del equipo al minimizar las interrupciones no planificadas.

Figura 18. Tiempo de paro por cambio de fajas en máquina 503 desde 2021 hasta 2023



De acuerdo con la figura anterior se generó un tiempo de paro de 57 horas por el cambio de las fajas 058-0047 y 058-0191. Tomando en consideración que la producción promedio de esta máquina es de dos toneladas cada 12 horas, estas 57 horas de paro generadas por fallas en las fajas 058-0191 y 058-0047, se traducen en una limitante de generación de \$19,000.

De esta manera, aunque se deba realizar una inversión adicional de \$3188 para el cambio controlado de esta faja, sigue siendo rentable ya que la probabilidad de que una de las fajas falle antes de tiempo en los próximos tres años es muy baja, evitando de esta manera las 57 horas de paro producidas en el periodo de estudio.

## 4.6 Propuestas de solución

### 4.6.1 Mejoras en la recolección de datos

A pesar de que la empresa cuenta con gran cantidad de datos, resulta difícil realizar un análisis de la información ya que el sistema carece de la solidez necesaria para observar tendencias y tomar decisiones lo más rápido posible sin tener que tomar horas, días o semanas el recopilar, unificar y estandarizar datos para posteriormente realizar un análisis.

Para este estudio, la información se toma de dos fuentes principales, la primera de ellas corresponde a bitácoras diarias que son completadas por los técnicos tal y cómo se muestra en la *Tabla 2. Ejemplo formato de bitácora*, estas bitácoras se llenan en un Excel desde una computadora fija ubicada en el taller, cada vez que el técnico termina su turno se encarga de enviar por correo electrónico esta bitácora al personal administrativo de mantenimiento. Un receptor de esta bitácora se encarga de agrupar toda la información escrita por los técnicos en un compilado histórico del año.

La segunda fuente principal de información es la información histórica tomada de los vales de salida del almacén de repuestos tal y como se muestra en la *Tabla 3. Ejemplo formato salida de repuestos*”, esta información es alimentada continuamente por el encargado de bodega, sin embargo, no existe ningún proceso que vincule ambas informaciones, por lo que se hace muy difícil la trazabilidad de las averías y los repuestos consumidos, además que representa una gran carga de trabajo para todo el personal la responsabilidad de alimentar la información diariamente.

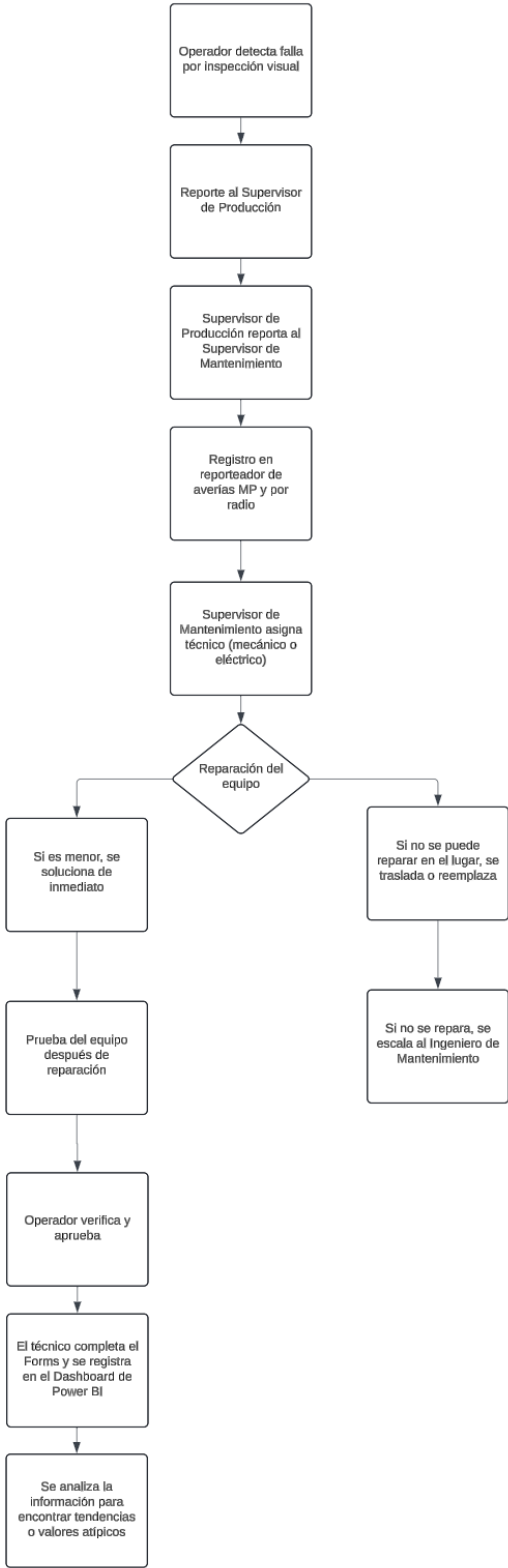
Es por esta razón que se propone como solución la utilización de un Forms de la plataforma Office. De esta manera el técnico de mantenimiento podrá alimentar de manera más eficiente toda la información sin necesidad de tener que ir hasta el taller para completar la información cada vez que termina un mantenimiento. Además, en este formulario en línea se incluye la opción que el técnico indique la cantidad de repuestos que utilizó, así como su código de repuesto respectivo, esto permitiría recopilar una sola base de datos se alimente automáticamente por todo el personal técnico de mantenimiento en tiempo real sin la necesidad de ingresar los datos en repetidas ocasiones por diferentes personas.

Asimismo, en este formulario se añade un catálogo de fallas el cual permite categorizar las fallas según diferentes causas y de esta manera lograr observar tendencias de una manera más rápida como lo pudo haber sido el caso de las roturas descontroladas de las fajas 058-0191 y 058-0047 en la máquina 503.

Los resultados obtenidos de este formulario son almacenados en un Excel, el cual se estaría ligando con Power BI, de manera tal que el Power BI sea la herramienta utilizada para la lectura de datos y por consiguiente la herramienta para el análisis de información, siendo alimentada de manera diaria por el personal técnico de mantenimiento correctivo. Esto permite tomar decisiones en periodos más cortos de tiempo.

El proceso completo desde la detección de la avería hasta su reparación y recopilado de datos se muestra en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de atención de averías y recopilación de datos.

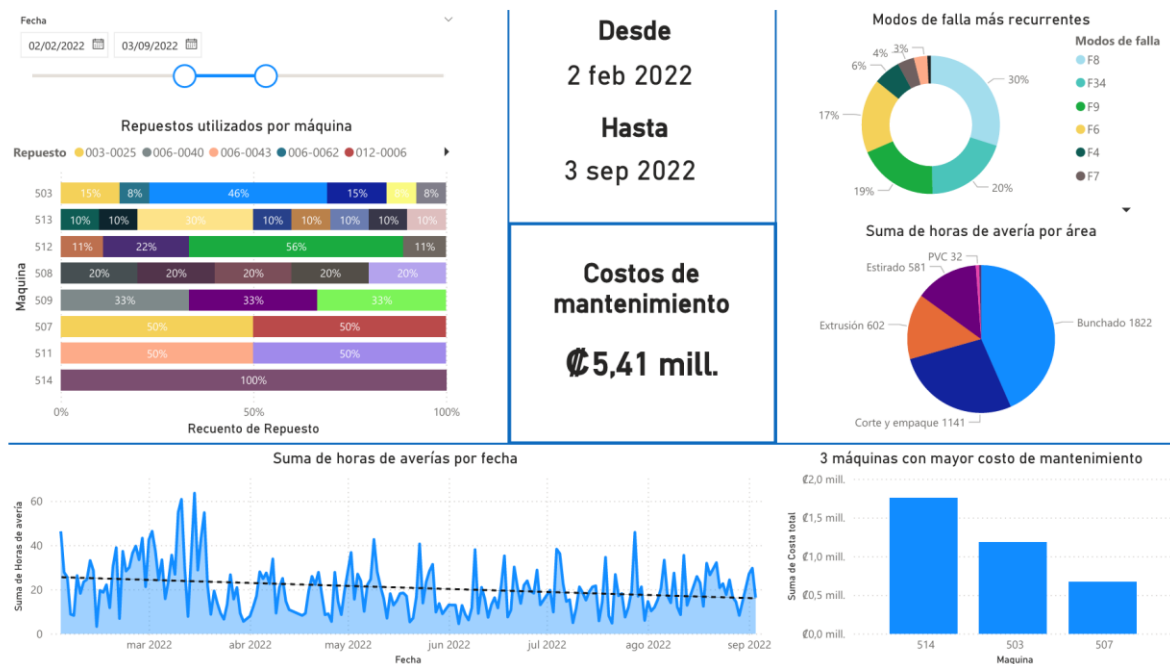


Fuente: Elaboración propia.

El formulario propuesto como solución se adjunta en el capítulo de Anexos; es importante tomar en consideración que la implementación de esta solución está sujeto a la inversión de la compañía por al menos 3 tabletas inteligentes con conexión a red inalámbrica que le permita al personal técnico acceder al formulario durante su jornada laboral.

Los datos recopilados en el Excel se utilizarían para alimentar uno o varios paneles de información en Power BI, estos podrán ser actualizados en tiempo real por el personal administrativo del departamento de mantenimiento. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de panel que se puede utilizar.

Figura 20. Ejemplo de panel de información propuesto para la recolección de datos



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.6.2 Mejoras en el plan de mantenimiento preventivo de 503**

El plan de mantenimiento preventivo de la máquina 503 actual no posee actividades específicas para el cambio de las fajas 058-0191 y 058-0047 por lo que se deben añadir. Esta actividad debe establecerse como dos puntos adicionales en la sección Enrollador / Guía devanadora / Revisión general.

Estas actividades tendrán dos frecuencias diferentes, en el caso de la faja 058-0191 se colocará una frecuencia de 36 días y para el caso de la faja 058-0047 se colocará una frecuencia de 42 días. Cada vez que se realice el cambio de faja se debe marcar la actividad como realizada en el Software de Mantenimiento MP, el cual es el software utilizado en la empresa. En caso de que se haya cumplido el tiempo y no se haya hecho el cambio y la máquina no está próxima a mantenimiento se debe realizar el cambio en un TPM.

De esta manera, el software llevará un control de las fechas que se le ha hecho el cambio y recordará al coordinador de mantenimiento su próximo cambio.

Además, se debe incluir en el plan de mantenimiento preventivo todas aquellas notas importantes que se encuentran en los planos. Se debe aclarar en cada una de las actividades los repuestos a utilizar con su respectivo número de identificación de la bodega de repuestos, se debe validar que el tipo de repuesto sea el recomendado por el fabricante. La propuesta de cambio del plan de mantenimiento preventivo se encuentra en la sección Anexos.

Es importante mencionar que esta metodología se debe ampliar a todas las demás máquinas del área y seguidamente a las demás áreas. De esta manera se reduciría considerablemente las variaciones en los costos de mantenimiento.

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

1- Se determina que la desviación estándar de los cambios de fajas en la máquina 503 posee una desviación estándar de  $\$136,685$  durante el periodo de estudio, esta desviación estándar se puede disminuir a  $\$51,116$  mediante la estandarización de los cambios de faja 058-0191

2- Se determina que la variabilidad de los costos de mantenimiento se ve afectado por reemplazos no controlados de repuestos, esto principalmente en mantenimientos correctivos. Por ejemplo, para este proyecto se toma como muestra la faja identificada como 058-0191 en la máquina 503, la cual se le realizaron un total de 17 cambios con frecuencias desde 48 horas.

3- Power BI ha demostrado ser una herramienta muy útil para el proyecto, especialmente cuando se complementa con Excel, ya que esta combinación permite filtrar la información de manera rápida y eficiente y de esta manera enfocar el proyecto en el área de bunchado. Además, facilita la observación de tendencias y la repetitividad de los datos, revelando cambios irregulares en repuestos de ciertas máquinas. Asimismo, Power BI permite graficar la probabilidad de falla de los repuestos, lo que determina el tiempo de operación con una confiabilidad del 55%, según el criterio de expertos.

4- Se determina que, para realizar análisis de información de manera rápida, es esencial alimentar Excel con datos correctos y detallados según las necesidades del análisis. Por ello, se propone el uso de una encuesta que abarque todos los

puntos de información necesarios para realizar análisis similares al de este proyecto en periodos más cortos de tiempo.

5- El proceso analítico jerárquico resulta ser una metodología muy útil para determinar la criticidad de diferentes áreas ya que permite evaluar los diferentes criterios con respecto a sus alternativas. Para este proyecto se utiliza este procedimiento tomando los criterios de seguridad, medio ambiente, costos de mantenimiento, calidad, frecuencia de fallos y tiempo programado y se evalúan con respecto a las alternativas de corte y empaque, bunchado, estirado o extrusión y de esta manera se determina que el área con mayor prioridad para la realización del proyecto fue bunchado con un puntaje de 29.8%, superando en tan sólo 0,97% la segunda área más crítica que fue extrusión.

6- El diagrama de Ishikawa permite ampliar el panorama del problema ya que se analizan todas las posibles causas que pueden estar generando el problema. En este estudio este diagrama muestra que la falla recurrente de la faja 058-0191 en la máquina 503 se da por una mala instalación por falta del personal técnico debido a que no se está siguiendo con las recomendaciones dadas por el fabricante en su plano mecánico. En este plano se indica que debe existir una deflexión de 1/2" en el centro de la faja; mediante una entrevista verbal se determina que no existe conocimiento de esta nota en el plano por parte del personal técnico e ingenieril de la empresa.

7- Se observa que actualmente no se cuenta con un seguimiento detallado y útil que muestre tendencias de consumos en los repuestos, por lo que se tiene una gran variabilidad en los costos de mantenimiento. De esta manera se logra observar el

consumo descontrolado de fajas en la máquina 503; es por esto que se propone un plan piloto que consiste en el cambio de la faja 058-0191 cada 1010 horas, con este cambio controlado se obtiene una confiabilidad del 55% y además permite disminuir la variabilidad de los costos de mantenimiento por fajas en la máquina 503 en un 62,6%. Conjuntamente se logran reducir 19 horas de paro anuales lo cual representa una ganancia de \$6300 extras en los próximos 3 años.

## **5.2 Recomendaciones**

1- Se sugiere aprovechar Power BI y Excel como herramientas fundamentales para el almacenamiento, análisis y visualización de información. Esta integración permite identificar problemas con mayor rapidez y precisión en comparación con los métodos actuales, optimizando así la toma de decisiones y las estrategias de mantenimiento. Asimismo, se recomienda implementar un sistema de captura de datos diario por parte de los técnicos de mantenimiento en sus respectivos turnos, utilizando Microsoft Forms como medio principal. Esta propuesta facilitará la recopilación de información de manera sistemática, asegurando que los datos sean registrados de forma inmediata y en tiempo real.

2- Se recomienda extender a nivel empresarial la metodología de estandarización del consumo de repuestos implementada en este proyecto, ya que esta práctica ha demostrado ser efectiva para optimizar los recursos y controlar la variabilidad en los costos de mantenimiento. El plan de expansión debe iniciarse con la aplicación de esta metodología en las máquinas restantes del área de bunchado y posteriormente, se sugiere continuar con las otras áreas críticas de la empresa, identificadas mediante el Proceso Analítico Jerárquico desarrollado en el presente proyecto.

3- Se recomienda que la empresa incorpore una nueva posición en su organigrama dedicada al análisis de información, cuya función principal sea gestionar y aprovechar los datos generados por el departamento de mantenimiento. Este profesional, especializado en el análisis de tendencias y patrones, desempeñará un papel estratégico al identificar de manera proactiva posibles problemas antes de que incrementen en magnitud, permitiendo así una respuesta temprana y eficiente.

4- Se sugiere establecer acuerdos con los proveedores principales de fajas industriales, con quienes la empresa mantiene una relación comercial frecuente, para que brinden capacitaciones presenciales al menos una vez al año. Estas capacitaciones deben enfocarse en temas clave como el manejo adecuado, almacenamiento, instalación y mantenimiento de fajas en maquinaria industrial. El objetivo de esta iniciativa es fortalecer el conocimiento de los técnicos electromecánicos, proporcionándoles herramientas prácticas y teóricas que les permitan optimizar el desempeño y la vida útil de estos componentes.

5- Se propone llevar a cabo una revisión y actualización de los planes de mantenimiento preventivo de todas las máquinas. Este proceso tiene como objetivo identificar oportunidades de mejora, optimizar la planificación de las tareas de mantenimiento y estandarizar la sustitución de ciertos repuestos clave. La estandarización del cambio de repuestos permitirá reducir la variabilidad en los costos de mantenimiento, asegurando una mayor predictibilidad y estabilidad en el presupuesto asignado a estas actividades. Además, al implementar mejoras en los planes de mantenimiento, se busca incrementar la eficiencia operativa, prolongar la vida útil de los equipos y minimizar tiempos de inactividad.

## Capítulo 6. Bibliografía

Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Distrito Federal de México: Grupo Noriega Editores.

Arata, A. (2013). *Ingeniería de la confiabilidad*. Santiago, Chile: RIL editores.

Araya, S. (S.F). *Nubox*. Obtenido de Costo fijo y costo contable: domínalos y triunfa: <https://blog.nubox.com/empresas/que-es-costo-fijo-y-costo-variable#:~:text=Los%20costos%20fijos%20son%20todo,de%20sus%20niveles%20de%20productividad.>

ATLASSIAN. (S.F.). *GESTIÓN DE INCIDENTES*. Obtenido de MTBF, MTTR, MTTA Y MTF: [https://www.atlassian.com/es/incident-management/kpis/common-metrics#:~:text=El%20MTTR%20\(tiempo%20medio%20de%20reparaci%C3%B3n\)%20es%20la%20media%20de,vuelve%20a%20funcionar%20por%200completo.](https://www.atlassian.com/es/incident-management/kpis/common-metrics#:~:text=El%20MTTR%20(tiempo%20medio%20de%20reparaci%C3%B3n)%20es%20la%20media%20de,vuelve%20a%20funcionar%20por%200completo.)

Bolton. (1996). *Mediciones y pruebas electrónicas*. Barcelona: marcombo Boixareu Editores. Obtenido de Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas.

Casáreo, F. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Murcia: Servicio de publicaciones Universidad de Murcia.

Centro de formación técnica para la industria. (S.F). *AULA21*. Obtenido de Qué es la Gestión del Mantenimiento Industrial: <https://www.cursosaula21.com/que-es-la-gestion-del-mantenimiento->



Getnet. (6 de Julio de 2022). *Blog General MX*. Obtenido de La importancia de los Indicadores en tu empresa: <https://getnet.mx/blog/general/la-importancia-de-los-indicadores-en-tu-empresa.html>

González, F. (2004). *Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión*. España: Fundación Confemetal.

Iberdrola. (S.F). *Mantenimiento predictivo*. Obtenido de Mantenimiento predictivo: la técnica basada en datos clave para anticipar errores: <https://www.iberdrola.com/innovacion/mantenimiento-predictivo>

Leyva, G. A. (Junio de 2019). Proceso Analítico Jerárquico. Herramienta para la gestión del ordenamiento urbano-ambiental en el eje Luaces de Camagüey. Cuba.

Leyva, Gatell, & Álvarez. (01 de Abril de 2019). *Instituto superior politécnico Jose Antonio Echeverría*. Obtenido de Proceso Analítico Jerárquico. Herramienta para la gestión del ordenamiento urbano-ambiental en el eje Luaces de Camagüey: <https://www.redalyc.org/journal/3768/376862224005/html/>

Lyonnet, P. (1989). *Los métodos de la calidad total*. España: Diaz de Santos.

Marques, M. J. (S.F). *Estadística básica un enfoque no paramétrico*. Unam.

Medina, L. (2023). *Padapé*. Obtenido de Diagrama de Ishikawa: identifica fallos en tu empresa: <https://www.pandape.com/blog/diagrama-ishikawa/>

Medina, R. (2014). *EXPERIENCIA EN LA ELABORACIÓN DE UN CATALOGO DE FALLAS PARA LA INDUSTRIA DEL GAS Y PETROLEO*. Venezuela: IAS (integrity assessment services).

Medina, Y., Vega, G. d., & Chourio, V. (2007). *Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo*. Editorial Monte Avila.

MINT. (27 de 2 de 2023). *Mint For People Rethinking the future*. Obtenido de Tipos de fallas en el mantenimiento industrial: <https://mintforpeople.com/noticias/tipos-fallas-mantenimiento-industrial/>

Molinos, S. (2017). *INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE UNA NAVE INDUSTRIAL*. Valencia, España: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/98122/MOLINOS%20-%20Instalaci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica%20de%20una%20nave%20industrial.pdf?sequence=2>).

Nacional Financiera. (2004). *Fundamentos de negocio Contabilidad > El ABC de los presupuestos*. Obtenido de [https://www.nafin.com/portaInf/files/secciones/capacitacion\\_asistencia/pdf/Fundamentos%20de%20negocio/Contabilidad/contabilidad3\\_1.pdf](https://www.nafin.com/portaInf/files/secciones/capacitacion_asistencia/pdf/Fundamentos%20de%20negocio/Contabilidad/contabilidad3_1.pdf)

Parra, C., & Crespo, A. (2020). *Confiabilidad Operacional*. Obtenido de Métodos de Análisis de Criticidad y: <http://www.confiabilidadoperacional.com/>

Sarmiento, J. (2020). *Mantenimiento industrial*. Córdoba: Editorial Científica Universitaria.

The Northampton Machinery Company. (1999). *SLB800M DOUBLE TWIST MACHINE*. Northampton: Mr G Wright.

Torres, L. (2015). *Gestión Integral de Activos Físicos y Mantenimiento*. Buenos Aires: Alfaomega Grupo Editor Argentino.


Tractian MX. (31 de Agosto de 2023). *YouTube*. Obtenido de ¿Cómo calcular el BACKLOG de mantenimiento?: <https://www.youtube.com/watch?v=INygbW0w4wc>

Vargas, R. (10 de Octubre de 2010). *Ricardo-Vargas*. Obtenido de Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select and Prioritize Projects in a Portfolio: <https://rvarg.as/2y/>

Yepes, V. (24 de Enero de 2022). *Universitat Politecnica de Valencia*. Obtenido de Limitaciones de los métodos de toma de decisiones basados en procesos de jerarquía analítica AHP: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/limitaciones/>

# Capítulo 7. Anexos

## 7.1 Plan de mantenimiento actual de máquina 503

**Prysmian Group**  **PRYSMIAN GROUP**  
**MANTENIMIENTO**  
**Plan: BUNCHER 503**  
hoja: 1 de 10

Fecha de impresión: 7/30/2024 5:05:47 PM

Notas del plan:

### Parte: \ ACOPLER

#### Actividad: REVISION MECANICA

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 02 h 30 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECHANICO  
Clasificación 2: MECANICO

#### Procedimiento:

REVISAR SISTEMA DE SEGURO DE LOS ACOPLER  
REVISAR RODAMIENTOS DE LOS EJES DE LOS ACOPLER  
REVISAR ESTADO DE LOS ACOPLER Y LOS PERNOS DE ARRASTRE  
REALIZAR LIMPIEZA Y LUBRICACION (ACEITE SUPER CHAIN OIL) DE ACOPLER  
BAJAR CREMALLERAS EN EJES DE LOS ACOPLER REALIZAR LIMPIEZA DEL SISTEMA.  
REVISAR SISTEMA DE AJUSTE DE LA DISTANCIA DEL ACOPLER LOCO

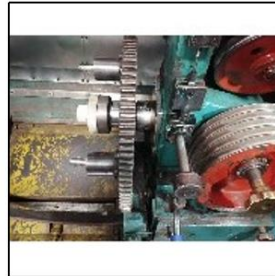
#### Notas:



IMG-20190219-WA0036.jpg



IMG-20190219-WA0019.jpg



IMG-20190621-WA0048.jpg

#### Actividad: TRIMESTRAL ACOPLER

Frecuencia: 3 mes(es)  
Duración aproximada: 03 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECHANICO  
Clasificación 2: MECANICO

#### Procedimiento:

DESMONTAJE Y CAMBIO DE EJES Y ACOPLER DE LA CUNA ENROLLADOR

#### Notas:



IMG-20190219-WA0036.jpg



IMG-20190219-WA0019.jpg



IMG-20200323-WA0082.jpg

### Parte: \ ALUMBRADO

#### Actividad: REVISION GENERAL

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 00 h 30 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: ELECTRICO

#### Procedimiento:

VERIFICAR FUNCIONAMIENTO DE ALUMBRADO INTERNO DEL BUNCHER, LIMPIAR DIFUSORES

#### Notas:

### Parte: \ ASPA

#### Actividad: REVISION ELECTRICA

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 00 h 30 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: ELECTRICO

#### Procedimiento:

REVISAR Y LAVAR SENSOR DE POSICIÓN DEL ASPA Y DE MOVIMIENTO DE LA CUNA

#### Notas:



IMG\_20200818\_144149.jpg

#### Actividad: REVISION MECANICA

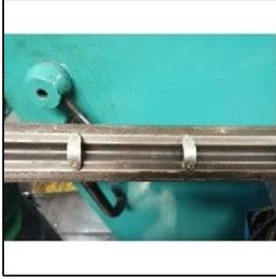
Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 00 h 45 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: MECANICO

#### Procedimiento:

REVISAR ASPAS, ANILLOS Y CINTA CAMBIAR DE SER NECESARIO

#### Notas:



IMG-20190219-WA0026.jpg

**Actividad: TRIMESTRAL ASPAS**

Frecuencia: 3 mes(es)  
Duración aproximada: 03 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**  
CAMBIAR ANILLOS INTERNOS DE LAS ASPAS ENTRADA Y SALIDA

**Notas:**



IMG\_20200323\_111549.jpg



IMG-20200219-WA0021.jpg

**Parte: \ CAJA CAPSTAN**

**Actividad: MANTENIMIENTO ANUAL**

Frecuencia: 1 año(s)  
Duración aproximada: 08 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**  
DESARME COMPLETO DE LA CAJA DE CAPSTAN (OVERHAUL)

**Notas:**

**Actividad: REVISION MECANICA**

Frecuencia: 4 semana(s)  
Duración aproximada: 01 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**  
VERIFICAR NIVEL DE ACEITE DE LA CAJA DE TRANSMISIÓN DEL CAPSTAN. REVISAR LOS EJES Y PIÑONES. VERIFICAR QUE NO PRESENTE FUGAS

**Notas:**

**Parte: \ DESENROLLADORES**

**Actividad: REVISION ELECTRICA**

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 02 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: ELECTRICO

**Procedimiento:**

REVISAR MOTORES DE LOS DESENROLLADORES  
REVISAR SENSORES EN LOS DESENROLLADORES

**Notas:**



IMG\_20201002\_130933.jpg



IMG\_20201002\_130850\_1.jpg

**Actividad: REVISION MECANICA**

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 03 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR RODAMIENTOS DE LOS ACOPLER EN LOS DESENROLLADORES (6206 ZZ - COD 103-0212)  
REVISAR MOTOR, POLEAS, FAJAS (058-0247) EN TRANSMISIONES DE LOS DESENROLLADORES  
REVISAR SISTEMAS DE CIERRE Y APERTURA DE LOS ACOPLER  
REVISAR DANCER, POLEAS Y RODILLOS GUIADORES EN LOS DESENROLLADORES

**Notas:**



IMG\_20200811\_074420\_1.jpg



IMG\_20200811\_074410.jpg



IMG\_20200811\_074325.jpg



IMG\_20200811\_074226\_1.jpg

**Parte: \ ENROLLADOR**

**Actividad: REVISION ELECTRICA**

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 01 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECANICO  
Clasificación 2: ELECTRICO

## Plan: BUNCHER 503

hoja: 5 de 10

### Procedimiento:

REVISAR Y LAVAR BARRAS DE DETECCIÓN DE HILO ROTO. EN LA BARRA INTERNA HACER LIMPIEZA PROFUNDA Y VERIFICAR LOS AISLANTES

### Notas:



barra de hilo roto 509

## Parte: \ ENROLLADOR\ GUIA DEVANADORA

### Actividad: BARRA CALIBRADA

Frecuencia: 1 año(s)

Duración aproximada: 03 h 00 m

Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Media

Clasificación 1: ELECTROMECHANICO

Clasificación 2: MECANICO

### Procedimiento:

CAMBIO DE LA BARRA CALIBRADA DE LA GUIA DEVANADORA

### Notas:

### Actividad: MANTENIMIENTO TRIMESTRAL

Frecuencia: 6 mes(es)

Duración aproximada: 02 h 00 m

Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta

Clasificación 1: ELECTROMECHANICO

Clasificación 2: MECANICO

### Procedimiento:

DESMONTAJE TOTAL DEL SISTEMA DE LA GUIA DEVANADORA, CAMBIO DE BUSHING Y RODAMIENTOS

### Notas:



IMG\_20190826\_105723.jpg

### Actividad: REVISION GENERAL

Frecuencia: 4 semana(s)

Duración aproximada: 00 h 30 m

Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta

Clasificación 1: ELECTROMECHANICO

Clasificación 2: MECANICO

### Procedimiento:

LIMPIEZA Y LUBRICACION GENERAL DE LAS BARRAS Y CAJA DE LA GUIA GUIA

**Parte: \ ESTRELLA DE REUNIDO**

**Actividad: REVISION MECANICA**

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 00 h 30 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECHANICO  
Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR ANILLOS GUIADORES EN LAS ESTRELLAS DE REUNIDO

**Notas:**



IMG\_20190722\_093901.jpg

**Parte: \ FRENO PRINCIPAL**

**Actividad: REVISION MECANICA**

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 01 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECHANICO  
Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR DISCO Y ZAPATAS DEL FRENO PRINCIPAL

**Notas:**

**Parte: \ LUBRICACION GENERAL**

**Actividad: REVISION MECANICA**

Frecuencia: 4 semana(s)  
Duración aproximada: 03 h 00 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECHANICO  
Clasificación 2: LUBRICACION

Procedimiento:

LUBRICAR TODOS LOS PUNTOS SEGUN INDICADO POR EL MANUAL DE LUBRICACION PARA LA MAQUINA.

Notas:

#### Parte: \ MOTOR PRINCIPAL

Actividad: REVISION ELECTRICA

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 01 h 30 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECHANICO  
Clasificación 2: ELECTRICO

Procedimiento:

REVISAR, LAVAR MOTOR DEL BOW (PRINCIPAL)

Notas:

#### Parte: \ PANEL ELECTRICO

Actividad: REVISION ELECTRICA

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 02 h 30 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECHANICO  
Clasificación 2: ELECTRICO

Procedimiento:

REVISAR Y LIMPIAR PANELES ELÉCTRICOS (RESOCAR TERMINALES Y BORNERAS)  
REVISAR ESTADO DE LAS TRANCAS DE LAS PUERTAS DE LOS PANELES ELECTRICOS. VERIFICAR QUE ESTAS QUEDEN CORRECTAMENTE CERRADAS  
REVISAR BOTONERAS DE OPERACIÓN  
REVISAR PAROS DE EMERGENCIA

Notas:



IMG\_20190219\_101438.jpg

#### Parte: \ PLATOS GIRATORIOS

Actividad: REVISION MECANICA

Frecuencia: 1 mes(es)  
Duración aproximada: 01 h 30 m  
Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta  
Clasificación 1: ELECTROMECHANICO  
Clasificación 2: MECANICO

Procedimiento:

LEVANTAR PLATO GIRATORIO. REALIZAR REVISION DE RODAMIENTOS, LIMPIEZA Y LUBRICACION

Notas:



IMG-20191122-WA0043.jpg

**Parte: \ POLEAS ENTRADA Y SALIDA**

Actividad: REVISION MECANICA

Frecuencia: 1 mes(es)

Duración aproximada: 01 h 30 m

Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta

Clasificación 1: ELECTROMECHANICO

Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR POLEAS DE ENTRADA Y SALIDA DEL ASPA CAMBIAR ROLES

**Notas:**



IMG\_20181203\_122701\_1.jpg

**Parte: \ PRODUCTIMETRO**

Actividad: REVISION MECANICA

Frecuencia: 1 mes(es)

Duración aproximada: 00 h 45 m

Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta

Clasificación 1: ELECTROMECHANICO

Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR POLEAS Y RODAMIENTOS DEL PRODUCTIMETRO

**Notas:**

**Parte: \ RAMPA**

Actividad: REVISION MECANICA

Frecuencia: 1 mes(es)

Duración aproximada: 01 h 00 m

Días de paro: 1 día(s)

Prioridad: Alta

Clasificación 1: ELECTROMECHANICO

Clasificación 2: MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR NIVEL DE ACEITE DE LA BOMBA HIDRÁULICA DE LA RAMPA Y VERIFICAR QUE EL SISTEMA NO PRESENTE FUGAS

**Parte: \ SISTEMA DE TRANSMISION**

**Actividad: MANTENIMIENTO ANUAL BARRA DE TRANSMISION**

**Frecuencia:** 1 año(s)

**Duración aproximada:** 16 h 00 m

**Días de paro:** 1 día(s)

**Prioridad:** Alta

**Clasificación 1:** ELECTROMECANICO

**Clasificación 2:** MECANICO

**Procedimiento:**

REALIZAR CAMBIO DE RODAMIENTOS DE LA BARRA DE TRANSMISION 22215 EK/C3 (2 Unj), MANGUITO H315 (2 Unj), 6213-2RS/C3 (2

Unj) Actualizado (Abril 2022 M.A)

REVISAR EL ESTADO DE LOS HAUSING

**Notas:**



IMG-20210222-WA0155 (002).jpg



IMG-20210222-WA0175 (002).jpg

**Actividad: REVISION MECANICA**

**Frecuencia:** 1 mes(es)  
**Duración aproximada:** 02 h 30 m  
**Días de paro:** 1 día(s)

**Prioridad:** Alta  
**Clasificación 1:** ELECTROMECANICO  
**Clasificación 2:** MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR POLEAS DENTADAS Y FAJAS DE LA TRANSMISIÓN PRINCIPAL, TRANSMISION DEL CAPSTAN, TRANSMISION CLUCTH, TRANSMISION DEL ENROLLADOR Y TRANSMISION DE LA GUIA  
REVISAR EJES, ACOPLER Y RODAMIENTOS EN SISTEMA DE TRANSMISION DEL ENROLLADOR Y LA GUIA  
REVISAR PLATOS DEL CLUCTH

**Notas:**



IMG-20190219-WA0016.jpg

**Parte: \ SISTEMA NEUMATICO**

**Actividad: REVISION MECANICA**

**Frecuencia:** 1 mes(es)  
**Duración aproximada:** 01 h 00 m  
**Días de paro:** 1 día(s)

**Prioridad:** Alta  
**Clasificación 1:** ELECTROMECANICO  
**Clasificación 2:** MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR QUE EL SISTEMA NEUMÁTICO NO PRESENTE FUGAS

**Notas:**

**Parte: \ TPM**

**Actividad: REVISION ELECTROMECANICA**

**Frecuencia:** 1 semana(s)  
**Duración aproximada:** 02 h 00 m  
**Días de paro:**

**Prioridad:** Alta  
**Clasificación 1:** ELECTROMECANICO  
**Clasificación 2:** MECANICO

**Procedimiento:**

REVISAR ASPA, CINTA Y ANILLOS  
REVISAR POLEAS GUIADORAS DE ENTRADA, SALIDA DEL ASPA Y DENTRO DE LA BANCADA DE ENTRADA  
REVISION GENERAL DE TORNILLERIA DE LA CUNA  
REVISION DE JUEGOS MECANICOS EN EJES Y PIÑONES EN LA CAJA DEL CAPSTAN  
REVISION DE ANILLOS CERAMICOS EN LAS ESTRELLAS DE REUNIDO  
REVISION DE FAJAS DE TRANSMISION EN MOTOR PRINCIPAL, DE LAS BANCADAS, DE LA GUIA, EL ENROLLADOR Y EL CAPSTAN  
REVISION DE JUEGO MECANICO EN LOS EJES DE LOS ACOPLER DEL ENROLLADOR  
REVISAR ACOPLER DE NYLON DEL ENROLLADOR

**Notas:**

## 7.2 Propuesta de formulario para recopilación de información

### REPORTE DE AVERÍAS MANTENIMIENTO

Este formulario se completa de manera individual para cada una de las averías atendidas durante la jornada de trabajo.

\* Required

\* This form will record your name, please fill your name.

1. INDIQUE SU NOMBRE \*



2. INDIQUE SU HORARIO \*

TURNO 1 (6:00 am - 2:00 pm)

TURNO 2 (2:00 PM - 10:00 pm)

TURNO 3 (10:00 pm - 6:00 am)

3. INDIQUE EL NÚMERO DE LA MÁQUINA LA CUAL PRESENTÓ LA AVERÍA \*

4. INDIQUE UNA BREVE DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA \*

5. EXPLIQUE CÓMO LOGRÓ RESOLVERLA \*

6. INDIQUE EL MODO DE FALLA \*

- PROBLEMAS CON DESEENROLLADORES
- PROBLEMAS CON ANILLOS
- PROBLEMAS CON EL CLUTCH
- PROBLEMAS CON SENSOR HILO ROTO
- PROBLEMAS CON GUÍAS
- PROBLEMAS DE TENSIÓN
- PROBLEMAS EN LOS ACOPLÉS
- PROBLEMAS CON SENSORES EN ENROLLADOR
- PROBLEMAS CON POLEAS
- PROBLEMAS CON FAJAS
- PROBLEMAS CON SISTEMA DE TRANSMISIÓN
- PROBLEMAS CON EL PRODUCTÍMETRO
- FUGAS DE AIRE
- PROBLEMAS CON ASPAS Y CINTAS
- PROBLEMAS CON LA RAMPA
- PROBLEMAS CON EL TECLE
- PROBLEMAS CON EL PERNO DE ARRASTRE
- PROBLEMAS CON RODAMIENTOS DE BANCADA
- MÁQUINA SIN ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA

7. INDIQUE EL TIEMPO EN HORAS QUE TARDÓ EN RESOLVER LA FALLA \*

8. ¿UTILIZÓ REPUESTOS PARA REPARAR LA AVERÍA? \*

- SÍ
- NO

9. INDIQUE LA CANTIDAD DE REPUESTOS \*

10. INDIQUE LOS CÓDIGOS DE LOS REPUESTOS SEPARADOS POR UNA COMA (,) \*

11. COMENTARIOS

---

This content is neither created nor endorsed by Microsoft. The data you submit will be sent to the form owner.

 Microsoft Forms