

# UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



## **ESTUDIO DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM) CON PROPUESTA DE PLAN PREVENTIVO, APLICADO A MAQUINA PAPELERA NUMERO UNO DE EMPRESA PAPELES BÍO-BÍO S.A. SAN PEDRO DE LA PAZ – CHILE.**

Informe de Habilitación Profesional  
presentado en conformidad a los requisitos  
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
**Sr. OSVALDO AMIGO RIQUELME.**

**OSCAR GUILLERMO HIDALGO GARRIDO  
CONCEPCION – CHILE**

**2016**

## **Agradecimientos**

A Dios, mi familia, especialmente a mi madre Lorena, padre Oscar Hernán, abuelo Oscar Guillermo, abuela Cristina y hermanos Yerko, Octavio, Yasmina y Cristian, a mi pareja Romina y su familia, Miguel y María, todos ellos aceptaron este desafío como suyo y pavimentaron mi vereda para poder caminar hacia el futuro.

Agradezco a mis compañeros: Mauricio, Herno, Jonathan, José y un largo etcétera, así como también a todos mis profesores, especialmente a los Señores Osvaldo Amigo, Federico Grossmann y Reinaldo Sánchez, a mi universidad en general, por formarme como persona y profesional, también a Don Sergio Gatica quien me apoyó en la empresa Papeles Bío-Bío S.A. para el desarrollo de esta memoria.

**Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.**

**Filipense 4:13**

## Sumario

En el presente informe de habilitación profesional se presenta un estudio basado en la confiabilidad aplicado a la máquina papelera número uno (MP-01) de la empresa Papeles Bío-Bío S.A. a petición de la jefatura de planificación de la mantención de dicha empresa. La máquina produce papeles de impresión para rotativas (papeles para periódico) a base de pulpa mecánica con madera proveniente de bosques renovables de pino radiata.

Debido a que la mantención de la máquina se realiza en base a paradas programadas versus paradas imprevistas (fuera de servicio), con un gran número de estas últimas, es que la disponibilidad de la máquina es relativamente baja, lo que se traduce en un alto costo y recursos para la mantención. Esta conclusión lleva a desarrollar el estudio de confiabilidad apoyándose en la información disponible en la base de datos proporcionada.

El estudio de confiabilidad se basó principalmente en diagramas de Pareto y Jackknife. Primero se procedió a realizar análisis de Pareto para la máquina con base a los sistemas que la componen (Formación, Prensas, Secador, Calandria-Pope), según división de ubicaciones técnicas actuales de la empresa, con la finalidad de obtener el sistema que se detiene mayormente, obteniendo como resultado el Sistema Prensas como crítico tanto para el equipo como para el proceso. También se aplicó el método de Pareto para las fallas presentes en la máquina, es decir, fallas que provocan detenciones, determinando que las fallas presentes en Sistema Prensas son las que se repiten con mayor frecuencia, esto con la finalidad de saber los modos de falla de los componentes, para posteriormente buscar las causas de estas y proponer soluciones. Después del análisis de Pareto de primer orden, se realizó análisis de Pareto de segundo orden, tanto de sistemas como fallas, con el fin de determinar que sub-sistema del Sistema Prensas es el que contribuye con mayores detenciones no programadas, determinando a Cuarta Prensa como sub-sistema crítico. Posteriormente se aplica el mismo procedimiento para el sub-sistema Prensas (por sistemas y por fallas). Todos estos diagramas dieron como resultado principalmente al Paño y Raspadores de la Cuarta Prensa como crítico, ambos presentando fallas por suciedad las cuales afectan directamente a la confiabilidad de la máquina.

Luego de realizar los análisis de Pareto y a modo de corroborar la información, se procede a realizar los diagramas de Jackknife para la máquina, tanto por sistemas como por fallas (al igual que análisis de Pareto), obteniendo los mismos resultados que por el método de Pareto realizados en primera instancia.

El siguiente paso fue realizar un análisis de modos y efectos de falla (FMEA), el que tiene como objetivo implementar una mantención preventiva o monitoreo de condiciones para los componentes críticos dilucidados por los diagramas, determinando así, un método para solucionar el problema.

Como las condiciones operacionales fueron identificadas como principal causante de las fallas de estos componentes, se llegó a la conclusión que se necesita implementar un mantenimiento preventivo o bien monitorear el estado de estos componentes, ya que no se pueden modificar dichas condiciones de operación en la producción del papel.

Luego de realizar el análisis de modos y efectos de falla (FMEA) se realiza un análisis de Weibull, el cual permitirá implementar un mantenimiento preventivo al Paño de Cuarta Prensa, con una confiabilidad asociada de 23.4% adaptada a las frecuencias de Parada Largas de mantención de la máquina, con una frecuencia de cada seis semanas o 1008 Hrs.

Finalmente, mediante el análisis anterior, se obtienen los resultados para elaborar el plan de mantención a seguir, el cual consiste en realizar un cambio preventivo del componente identificado, estrategia que mejora notablemente la disponibilidad de la máquina y con ello su confiabilidad.

## Índice de Contenidos

1. Introducción: .....	1
2. Antecedentes de la empresa .....	2
2.1. Historia y ubicación .....	2
2.2. Gestión de calidad .....	2
2.3. Productos y equipos .....	3
2.4. Personal y clientes .....	4
2.5. Materia prima .....	4
2.6. Medioambiente .....	5
2.7. Certificaciones .....	5
2.8. Proceso de generación de papel .....	6
3. Descripción del problema .....	8
4. Objetivos .....	9
4.1. Objetivo general .....	9
4.2. Objetivos específicos .....	9
5. Marco Teórico .....	10
5.1. Diagrama de Pareto .....	10
5.2. Distribución de Weibull .....	11
5.2.1. La función distribución acumulada $F(t)$ de Weibull .....	13
5.2.2. La función confiabilidad $R(t)$ de Weibull .....	13
5.2.3. Métodos para determinar parámetros de Weibull .....	14
5.2.3.1. Método gráfico de mínimos cuadrados .....	14
5.2.4. Curva de la bañera .....	17
5.2.4.1. Relación entre Parámetro de Forma ( $\beta$ ) y tipo de falla .....	17
5.3. Criterios e indicadores de eficiencia en mantenimiento .....	19
5.3.1. Confiabilidad .....	19
5.3.2. Disponibilidad .....	19
5.3.3. Mantenibilidad .....	20
5.3.4. Tiempo promedio entre fallas (MTBF) .....	20
5.3.5. Tiempo promedio de reparación (MTTR) .....	21
5.3.6. Tiempo entre fallas (TBF) .....	21
5.4. Método de Jackknife .....	22
6. Toma de datos .....	24
6.1. Diagrama Máquina Papelera N°1 (MP-01) .....	25
6.1.1. Diagrama Sistema Formación y Prensas .....	25

6.1.2.	Diagrama Sistema Secador y Calandria-Pope.....	26
6.2.	Criterios para agrupar datos.....	27
6.3.	Modelo de utilización de tiempos.....	29
7.	Análisis de la base de datos .....	32
7.1.	Análisis del tipo de detenciones .....	32
7.2.	Análisis del tiempo disponible o disponibilidad.....	33
7.2.1.	Disponibilidad MP-01 desde año 2010 hasta año 2015 .....	33
7.2.2.	Disponibilidad MP-01 desde año 2011 hasta año 2015 .....	34
7.3.	Análisis de Indicadores de eficiencia en mantenimiento.....	35
7.3.1.	Tiempo promedio de buen funcionamiento entre paradas (MTBF).....	36
7.3.2.	Tiempo promedio de reparación (MTTR).....	37
7.4.	Aplicación método de Pareto.....	38
7.4.1.	Detenciones MP-01 por sistemas .....	39
7.4.2.	Detenciones MP-01 por fallas .....	41
7.4.3.	Detenciones Prensas por sub-sistemas .....	42
7.4.4.	Detenciones Prensas por falla .....	44
7.4.5.	Detenciones Cuarta Prensa por componentes .....	46
7.4.6.	Detenciones Cuarta Prensa por fallas .....	48
7.4.7.	Detenciones Paño Cuarta Prensa por fallas.....	50
7.4.8.	Detenciones Raspadores Cuarta Prensas por fallas.....	51
7.4.9.	Conclusiones de análisis de Pareto.....	52
7.5.	Aplicación método de Jackknife.....	53
7.5.1.	Detenciones MP-01 por sistemas .....	53
7.5.2.	Detenciones MP-01 por fallas .....	55
7.5.3.	Detenciones Prensas por Sub-sistemas .....	56
7.5.4.	Detenciones Prensas por fallas .....	57
7.5.5.	Detenciones Cuarta Prensa por componente.....	58
7.5.6.	Detenciones Cuarta Prensa por fallas .....	60
7.5.7.	Detenciones Paño de Cuarta Prensa por fallas .....	62
7.5.8.	Detenciones Raspadores de Cuarta Prensa por fallas.....	63
7.5.9.	Conclusiones análisis de Jackknife .....	65
8.	Características y funciones de elementos críticos.....	66
8.1.	Características y funciones de Paños del Sistema Prensas .....	66
8.2.	Características y funciones de Raspadores de Sistema Prensas .....	70
8.2.1.	Características de Porta lámina .....	71

8.2.2.	Características de Láminas.....	72
9.	Análisis de Weibull.....	74
9.1.	Aplicación a Paño Cuarta Prensa.....	74
9.1.1.	Parámetros de Weibull Paño Cuarta Prensa.....	76
9.1.2.	Análisis de curva de la bañera, Paño de Cuarta Prensa.....	77
9.1.3.	Función Confiabilidad Paño de Cuarta Prensa.....	78
9.1.4.	Función de distribución acumulada Paño de Cuarta Prensa .....	80
9.2.	Aplicación a Raspadores Cuarta Prensa .....	81
9.2.1.	Parámetros de Weibull Raspadores Cuarta Prensa .....	83
9.2.2.	Análisis de curva de la bañera, Raspadores Cuarta Prensa .....	84
9.2.3.	Función Confiabilidad de Raspadores Cuarta Prensa .....	85
9.2.4.	Función distribución acumulada Raspadores Cuarta Prensa.....	86
10.	Análisis funcional.....	87
10.1.	Diagrama entrada – función – salida (EFS).....	88
11.	Análisis de modos y efectos de fallas (FMEA).....	90
11.1.	Análisis modos y efectos de falla (FMEA) Paño Cuarta Prensa .....	91
11.1.1.	Diagrama de Ishikawa Paño de Cuarta Prensa.....	91
11.1.2.	Cuadro resumen FMEA para Paño de Cuarta Prensa: .....	92
11.2.	Análisis modos y efectos de falla (FMEA) Raspadores Cuarta Prensa .....	93
11.2.2.	Cuadro resumen FMEA para Raspadores de Cuarta Prensa .....	94
12.	Mantenimiento preventiva.....	95
12.1.	Análisis de mantenimiento preventiva Paño Cuarta Prensa.....	95
12.2.	Estrategia de mantenimiento preventiva Paño Cuarta Prensa.....	96
13.	Conclusiones .....	99
14.	Bibliografía.....	102

## Índice de Figuras

Figura 2.6 Diagrama de procesos de generación de papel (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.) .....	6
Figura 5.1 Ejemplo diagrama de Pareto (Fuente: Elaboración propia).....	11
Figura 5.2.2 Ejemplo confiabilidad y distribución acumulada (Fuente: Elaboración propia) .....	13
Figura 5.2.4.1 Ejemplo Curva De La Bañera (Fuente: Elaboración propia).....	17
Figura 5.4 Ejemplo diagrama de Jackknife (Fuente: Elaboración propia).....	22
Figura 6 Ejemplo planilla de cortaduras (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.).....	24
Figura 6.1.1 Sistemas Formación y Prensas MP-01 (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.).....	25
Figura 6.1.2 Sistemas Secador y Calandria-Pope MP-01 (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.) .....	26
Figura 6.2.1 Diagrama Sistemas y Sub-sistemas de MP-01 (Fuente: Elaboración propia) .....	27
Figura 6.2.2 Diagrama de niveles de estudio (Fuente: Elaboración propia) .....	28
Figura 6.2.3 Ejemplo de datos clasificados para estudio (Fuente: Elaboración propia) .....	29
Figura 6.3 Diagrama de modelo de utilización de tiempos (Fuente: Elaboración propia).....	30
Figura 7.1 Detenciones programadas v/s detenciones imprevistas .....	32
Figura 7.2.1 Disponibilidad MP-01 (2010-2015).....	33
Figura 7.2.2 Disponibilidad MP-01 (2011-2015).....	34
Figura 7.3.1 Tiempo promedio de buen funcionamiento entre paradas MP-01 (2011-2015).....	36
Figura 7.3.2 Tiempo promedio de reparación (MTTR) en MP-01 (2011-2015) .....	37
Figura 7.4.1 Diagrama de Pareto detenciones en MP-01 por sistema.....	40
Figura 7.4.2 Diagrama de Pareto detenciones en MP-01 por fallas .....	41
Figura 7.4.3 Diagrama de Pareto detenciones en Prensas por Sub-sistemas .....	43
Figura 7.4.4 Diagrama de Pareto detenciones en Prensas por fallas .....	45
Figura 7.4.5 Diagrama de Pareto detenciones Cuarta Prensas por componente .....	47
Figura 7.4.6 Diagrama de Pareto detenciones Cuarta Prensa por fallas .....	49
Figura 7.4.7 Diagrama de Pareto detenciones Paño Cuarta Prensas por fallas .....	50
Figura 7.4.8 Diagrama de Pareto detenciones Raspadores Cuarta Prensas por fallas .....	51
Figura 7.5.1 Diagrama de Jackknife detenciones en MP-01 por sistemas .....	53
Figura 7.5.2 Diagrama de Jackknife detenciones en MP-01 por fallas.....	55
Figura 7.5.3 Diagrama de Jackknife detenciones en Prensas por Sub-sistemas .....	56
Figura 7.5.4 Diagrama de Jackknife detenciones en Prensas por fallas.....	57
Figura 7.5.5 Diagrama de Jackknife detenciones en Cuarta Prensa por componente.....	59
Figura 7.5.6 Diagrama de Jackknife detenciones en Cuarta Prensa por fallas.....	61

Figura 7.5.7 Diagrama de Jackknife detenciones Paño Cuarta Prensa por fallas .....	62
Figura 7.5.8 Diagrama de Jackknife detenciones Raspadores Cuarta Prensa por fallas .....	64
Figura 8.1.1 Paños del Sistema Prensas (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A. Editado).....	66
Figura 8.1.2 Diagrama de proceso en Nip (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.).....	67
Figura 8.1.3 Paño MP-01 en operación (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.).....	68
Figura 8.2 Diagrama Raspadores de Sistema Prensas (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A).....	70
Figura 8.2.1 Porta lámina autoajustable DST (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.).....	71
Figura 8.2.2 Láminas utilizadas en Sistema Prensas (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A).....	72
Figura 9.1.1 Ajuste de curva para determinar parámetros de Weibull, Paño.....	76
Figura 9.1.3 Función confiabilidad Paño de Cuarta Prensa .....	78
Figura 9.1.4 Función distribución acumulada Paño de Cuarta Prensa.....	80
Figura 9.2.1 Ajustes de curva para determinar parámetros de Weibull, Raspadores.....	83
Figura 9.2.3 Función confiabilidad Raspadores de Cuarta Prensa.....	85
Figura 9.2.4 Función distribución acumulada Raspadores de Cuarta Prensa .....	86
Figura 10.1 Diagrama Entrada–Función-Salida, MP-01.....	89
Figura 11.1.1 Diagrama de Ishikawa Paño de Cuarta Prensa .....	91
Figura 11.2.1 Diagrama de Ishikawa Raspadores de Cuarta Prensa.....	93
Figura 12.1 Porcentaje de mantención programada v/s no programada .....	95
Figura 12.2.1 Ejemplo frecuencia de paradas programadas.....	96
Figura 12.2.2 Ejemplo frecuencia de cambio de Paño de Cuarta Prensa.....	97

## Índice de Tablas

Tabla 5.2.3.1.1 Ejemplo tabla de cálculo de parámetros de Weibull .....	15
Tabla 5.2.3.1.2 Ejemplo de obtención de parámetros de Weibull .....	16
Tabla 6.3 Motivos de detención MP-01 (Proceso y Equipo) .....	31
Tabla 7.3 Resumen indicadores de eficiencia en mantenimiento .....	35
Tabla 7.4.1 Resumen de base de datos detenciones MP-01 por sistemas .....	39
Tabla 7.4.3 Resumen base de datos detenciones en Prensas por sub-sistemas .....	43
Tabla 7.4.4 Resumen base de datos detenciones en Prensas por fallas .....	44
Tabla 7.4.5 Resumen base de datos detenciones en Cuarta Prensas por componentes .....	46
Tabla 7.4.6 Resumen base de datos detenciones en Cuarta Prensas por fallas .....	48
Tabla 7.4.7 Resumen base de datos detenciones Paño Cuarta Prensas por fallas .....	50
Tabla 7.4.8 Resumen base de datos detenciones Raspadores Cuarta Prensas por fallas .....	51
Tabla 7.5.1 Resumen base de datos detenciones MP-01 por sistemas .....	53
Tabla 7.5.3 Resumen base de datos detenciones Prensas por Sub-sistemas .....	56
Tabla 7.5.5 Resumen base de datos detenciones Cuarta Prensa por componentes .....	58
Tabla 7.5.6 Resumen base de datos detenciones Cuarta Prensas por fallas .....	60
Tabla 7.5.7 Resumen base de datos detenciones Paño por fallas .....	62
Tabla 7.5.8 Resumen base de datos detenciones Raspadores Cuarta Prensa por fallas .....	63
Tabla 8.1 Factores que favorecen la remoción de agua en los Nip .....	69
Tabla 9.1 Resumen base de datos de análisis de Weibull para Paño .....	74
Tabla 9.1.1.1 Resumen valores obtenidos de ajuste de curva, Paño .....	76
Tabla 9.1.1.2 Resumen de obtención de parámetros de Weibull, Paño .....	76
Tabla 9.2 Resumen base de datos de análisis de Weibull para Raspadores .....	81
Tabla 9.2.1.1 Resumen valores obtenidos de ajuste de curva, Raspadores .....	83
Tabla 9.2.1.2 Resumen de obtención de parámetros de Weibull, Raspadores .....	83
Tabla 11.1.2 Resumen FMEA Paño Cuarta Prensa .....	92
Tabla 11.2.2 Resumen FMEA Raspadores Cuarta Prensa .....	94
Tabla 12.1 Porcentaje de mantención programada v/s no programada, Paño .....	95

## Índice de Anexos

ANEXOS.....	103
ANEXO N°1 .....	104
Diagrama de Sistema Prensas MP-01 .....	105
ANEXO N°2 .....	106
Base de datos fallas MP-01 utilizada para diagrama de Pareto.....	107
Base de datos detenciones MP-01 por fallas utilizada para diagrama de Jackknife .....	109
Base de datos fallas Sistema Prensas utilizada para diagrama de Jackknife.....	112
ANEXO N°3 .....	113
Medidas de Seguridad en procedimiento de cambio de Paño en Cuarta prensa .....	114
Diagrama Procedimiento de cambio de Paño de Cuarta Prensa .....	115
ANEXO N°4 .....	116
Imagen Máquina papelera N°1.....	117

## **1. Introducción:**

En la actualidad la gran competitividad existente en el sector productivo industrial exige ser lo más eficiente posible para llegar a las metas de producción que mantengan posicionada a la empresa en un lugar estable en el mercado, por este motivo, no se puede pasar por alto las inversiones que se inyectan a la mantención de los activos, a estos, se les exige que sean lo más confiable posible, es decir, que tengan el mayor tiempo de operación y producción dentro de su disponibilidad.

Este estudio se desarrolló en la empresa papelera Papeles Bío-Bío S.A. ubicada en San Pedro de la Paz, Concepción, Chile. La empresa, ex Norske Skog S.A. también posee una fábrica de papel denominada Pisa S.A. en la ciudad de Jaguariaíva al sur de Brasil.

Papeles Bío-Bío S.A. está establecida en San Pedro de la Paz desde el año 1957, en la actualidad posee un circuito de generación de energía eléctrica por medio termo-eléctrico, usando como combustible la biomasa disponible del procesamiento de madera utilizada en la fabricación del papel y compra a distribuidores externos, posee dos máquinas para elaboración de papel, siendo la máquina papelera número uno (MP-01) la más antigua e importante en términos de producción. Trabajando a altas revoluciones y con diversos componentes mecánicos, la convierten en el equipo crítico para la empresa.

El área de planificación de la mantención de la empresa, tiene como objetivo primordial eliminar los tiempos por fallas imprevistas ocurridas en el equipo, para poder disponer de este el mayor tiempo posible y de esta manera ahorrar recursos.

El desarrollo de este trabajo contempló realizar un ordenamiento y clasificación de la base de datos facilitada por el área de planificación de la mantención, para posteriormente extraer la información necesaria para la formulación del estudio, tal como datos de fecha y hora de inicio y término de detención imprevistas asociadas a algún componente específico de la máquina, los que fueron clasificados por sistema, subsistema y causa de detención o falla imprevista, para posteriormente realizar gráficas de Pareto y Jackknife, con la finalidad de identificar los componentes críticos, tipos y modos de falla asociados a este componente, para finalmente analizarlo estadísticamente con el fin de predecir los tiempos en que el elemento fallará con cierto grado de confiabilidad, esto, creando gráficas de distribución acumulada y confiabilidad, para así proponer la elaboración o mejoras en los planes de mantenimiento y/o monitoreo actuales, con el fin de aumentar la disponibilidad del elemento y la máquina en general.

## **2. Antecedentes de la empresa**

### **2.1. Historia y ubicación**

Papeles Bío-Bío S.A., inició sus operaciones el 27 de abril del año 1957, produciendo papeles de impresión en base a pulpa mecánica elaborada en la misma planta, la que se ubica cerca de la desembocadura del río Bío-Bío con el Océano Pacífico, al lado de la ciudad de Concepción, 500 Km. al sur de Santiago de Chile. Concepción es una de las ciudades de mayor tamaño del país con más de un millón de habitantes. La empresa cuenta en la actualidad con moderna tecnología y personal altamente calificado para producir y comercializar anualmente más de 125.000 toneladas de papeles de impresión en base a pulpa mecánica elaborada en la misma planta y es reconocida por sus altos estándares de calidad, eficiencia y productividad.

La planta y las oficinas generales se encuentran ubicadas en Pedro Aguirre Cerda N° 1054 de la ciudad de San Pedro de la Paz, 8va. Región, Concepción.

### **2.2. Gestión de calidad**

Una gestión en base al aseguramiento y mejoramiento continuo de sus procesos y productos, permite satisfacer los requerimientos de los clientes, cumpliendo con estándares a nivel internacional de calidad de producto. A través del mejoramiento continuo, ha logrado adaptar sus productos a los nuevos requerimientos de impresión del mercado y sus clientes. La pulpa mecánica producida con la tecnología nórdica de desfibradores presurizados, permite obtener un papel con grandes propiedades de impresión. La empresa también mantiene una cercana relación con sus proveedores de equipos y tecnologías para poder adaptar sus productos y procesos a los requerimientos de sus clientes, la comunidad y demás partes interesadas.

### 2.3. Productos y equipos

El papel para periódico es el principal producto que fabrica y vende Papeles Bío-Bío S.A. a importantes diarios de la región. También se fabrican papeles especiales o mejorados, los cuales son utilizados en la elaboración de insertos/volantes, revistas, guías telefónicas y libros, entre otros. Alrededor del 45% de su producción es destinada al mercado nacional. El otro 55% se exporta a otros países de América del Sur, principalmente Argentina, Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia y Paraguay.

Papeles Bío-Bío S.A. produce 125.000 Ton/año de Papeles de distinto tipo, en base a pulpa mecánica y que se comercializa en forma de bobinas.

Sus productos principales son:

- Papel Estándar para Periódico en 45 g/ m<sup>2</sup> y 48,8 g/m<sup>2</sup>.
- Papeles de alta blancura para Periódico.
- Papeles para Directorio Telefónico 36 g/m<sup>2</sup> y 40 g/m<sup>2</sup>.
- Papeles Impresión Textos y Colores.
- Papeles Base Mural.

La empresa posee dos máquinas papeleras, estas son:

- MP-01: Máquina de 4.6 metros de ancho, que produce papel con una variedad de gramaje entre los 36.0 y los 55.0 gramos por metro cuadrado. Su velocidad es de alrededor de los 1.160 metros por minuto y la capacidad anual de producción es de 120.000 toneladas.
- MP-02: Produce papeles especiales de impresión y papel base para la fabricación de papel mural, la capacidad anual de producción es de 5.000 toneladas. La máquina se caracteriza por su amplio rango de fabricación de papeles de distinto gramaje desde 48 a 110 gramos por metro cuadrado.

## **2.4. Personal y clientes**

En forma directa, la empresa emplea a 230 personas y a su vez genera una cantidad importante de empleos indirectos en el sector forestal y servicios de la región. Sus trabajadores tienen una alta calificación en sus especialidades y cuentan con oportunidades para su actualización técnica a través de programas de entrenamiento y capacitación.

Sus clientes nacionales son los principales diarios e impresores del país y sus clientes internacionales son los principales periódicos e impresores de los países latinoamericanos, principalmente Argentina, Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia y Paraguay.

## **2.5. Materia prima**

La pulpa mecánica fabricada en la planta es la materia prima principal para la producción del papel, esta pulpa es producida a partir de madera de pino radiata proveniente de plantaciones y a través de un proceso de desfibrado mecánico presurizado, de alto rendimiento en el uso de la madera y alta eficiencia en el uso de la energía. A su vez, el papel obtenido a través de este proceso de desfibrado, permite una impresión de alta calidad.

Los insumos/materias primas principales son:

- Madera de Pino Radiata
- Celulosa Kraft Blanqueada y Cruda
- Energía Eléctrica
- Productos Químicos
- Productos para Embalaje
- Subproductos de Madera como combustible
- Agua

## **2.6. Medioambiente**

La madera que utiliza Papeles Bío-Bío S.A. proviene de plantaciones forestales que cumplen íntegramente los requerimientos legales del país. A su vez, un alto porcentaje de esta madera proviene de bosques certificados ambientalmente. La planta es operada bajo los conceptos de mejoramiento continuo del desempeño ambiental y con una clara visión de reducir el impacto ambiental al mínimo. Los subproductos de la madera originados por la Planta, son utilizados junto a la biomasa forestal comprada a terceros, en la producción de energía térmica y eléctrica. El 19% de la electricidad que consumen los procesos es generada internamente. Como resultado de acciones realizadas en materia de gestión y medidas tecnológicas, la empresa ha mejorado en el uso de los recursos naturales, manejo y control de los residuos y uso eficiente de la energía. Además, las inversiones realizadas en el área ambiental, le permiten cumplir y superar los estándares exigidos por la legislación ambiental chilena, destacándose su moderna tecnología para el tratamiento de los residuos líquidos industriales y emisiones áreas.

## **2.7. Certificaciones**

Con el objeto de lograr un aseguramiento y mejoramiento de sus procesos, medio ambiente y personas, la empresa se certificó en ISO 9001 (norma internacional para gestión de la calidad) en 1994, hacia fines del 2003 certificó en ISO 14001 (norma internacional para la gestión ambiental), en 2004 en OHSAS 18001 (norma internacional para la gestión de la salud y seguridad ocupacional) y en 2008 certificó en el estándar CERTFOR de Cadena Custodia (Certfor CoC 2007 -PEC, que relaciona el uso de madera certificada con el producto obtenido). A mediados del año 2012 se certificó en ISO 50.001 (norma internacional para la gestión de la energía). Estas certificaciones contribuyen a tener un sistema de gestión integrado, formalizado y estructurado, que permite cumplir con las expectativas de los clientes.

## 2.8. Proceso de generación de papel

Proceso de generación de papel en Papeles Bío-Bío S.A.:

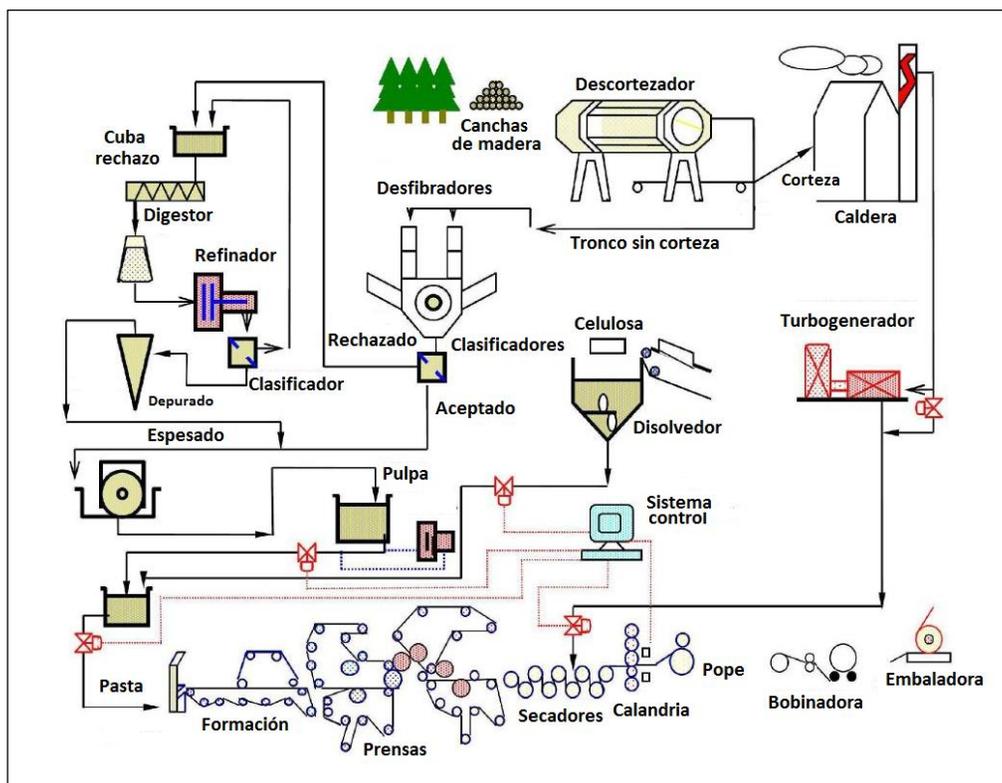


Figura 2.6 Diagrama de procesos de generación de papel (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.)

En la Figura 2.6 se puede ver los siguientes procesos y sus funciones asociadas:

- **Preparación Maderas:** La función del proceso es entregar troncos de 1.2 metros, proveniente de las canchas de madera, los que se introducen posteriormente en el descortezador, después de esto, la madera sin corteza ingresa al siguiente proceso de Fábrica De Pulpa.
- **Fábrica de Pulpa:** La función de la fábrica de pulpa es producir pulpa mecánica a partir de los troncos sin corteza provenientes del área Preparación Maderas. La pulpa mecánica se envía a las máquinas papeleras, donde se realiza el proceso para la formación del papel. En la Fábrica de Pulpa, se tiene los siguientes sub procesos:

- \* Desfibrado: Transforma los troncos en fibras, mezclándolos con agua para obtener una pulpa de baja consistencia, esto se produce en los desfibradores.
  - \* Clasificación y espesado: Su función es disminuir el contenido de astillas e impurezas de la pulpa proveniente del proceso de desfibrado, por otra parte, el sub proceso de espesado se encarga de aumentar la consistencia de la pulpa, para finalmente enviarla a las máquinas papeleras.
  - \* Refinación de rechazos: la función de este subproceso es recibir la pulpa rechazada por la etapa de clasificación, generando rechazos refinados que cumplan con las condiciones para continuar con el proceso de elaboración de pulpa mecánica.
- 
- Preparación de pasta: La función del área de preparación pasta es preparar y dosificar las distintas pastas que participan en la fabricación del papel (pulpa mecánica, celulosa y recorte), en proporciones adecuadas y acorde a los requerimientos de los papeles fabricados. Por otro lado, se realiza la depuración y clasificación de la pasta, antes que esta sea enviada a las máquinas.
  - Máquina papelera número uno (MP-01): Su función, en conjunto con sus procesos asociados, es producir papel periódico acorde con las especificaciones determinadas para cada subproducto, para esto, se debe realizar una serie de funciones específicas, que van desde preparar la pasta, hasta el embalaje de las bobinas de papel producido, las cuales son finalmente enviadas a las bodegas.
  - Bobinadora: Su función es separar el papel que se encuentra enrollado en los tambores, disponiéndolo en bobinas de tamaño reducido para permitir su manejo, transporte y almacenamiento.
  - Embaladora: Su función consiste en envolver las bobinas de papel provenientes de las máquinas papeleras N°1 y N°2, con papel de embalaje, con el objetivo de proteger las bobinas de papel durante su almacenamiento y transporte.

### 3. Descripción del problema

La empresa papelera Papeles Bío-Bío S.A., produce papeles de impresión en base a pulpa mecánica elaborada en la misma planta, por medio de dos máquinas papeleras siendo la principal, la máquina número uno (MP-01)

La empresa inició sus operaciones el 27 de Abril de 1957, por esto, actualmente las tareas principales del departamento de mantención, se enfocan en mantener sus activos en buen estado para asegurar un óptimo funcionamiento, para esto, se han implementado mejoras al proceso de producción del papel, como por ejemplo, mejoras a la MP-01 para lograr un aumento de disponibilidad, no obstante, durante el tiempo de funcionamiento de la máquina, los esfuerzos no se han enfocado en aumentar su confiabilidad, que a medida que pasa el tiempo es menor, esto por el deterioro normal provocado por el uso del activo.

Por este motivo, el área de mantención posee diversos mecanismos de planificación, mantenciones programadas, disponibilidad de repuestos, análisis sintomático y sub-contratación de empresas colaboradoras para servicios específicos, entre otros.

Analizando la base de datos disponible se determina que existen mayor porcentaje de fallas imprevistas, lo cual genera muchas horas de mantención y a la vez horas de producción perdidas. Lo anterior se traduce en costos elevados y una disminución en las utilidades de la empresa, por ello, se decide estudiar qué tipos de fallas está teniendo la MP-01 y cuáles son las que se consideran de mayor criticidad, para así determinar específicamente un sistema a analizar, el cual podría ser Formación, Prensas, Secador o Calandria-Pope.

Este análisis podrá dar paso a próximos estudios para implementar planes de mantención preventiva en la máquina, principalmente para fallas que afecten directamente a su confiabilidad y de este modo concientizar al personal de planta de la importancia que tiene la toma de datos para el logro de objetivos de planificación, ya que a medida que se miden y registran parámetros, se puede mejorar la situación actual.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo de habilitación profesional es desarrollar un estudio de mantenimiento basado en la confiabilidad aplicado a la máquina papelera N°1, perteneciente a la empresa Papeles Bío-Bío S.A. ubicada en San Pedro de la Paz, Concepción, Chile.

### **4.2. Objetivos específicos**

- Analizar el tipo de detenciones presentes (programadas versus imprevistas) para determinar situación actual.
- Identificar los problemas actuales mediante indicadores de eficiencia en mantenimiento (MTBF, TBF, MTTR, TTR).
- Analizar la base de datos proporcionada, ordenar y clasificar su contenido para cumplir con el objetivo general.
- Identificar mediante técnicas y/o métodos de priorización (Pareto y Jackknife) los sistemas o componentes de la máquina que son críticos para el proceso productivo de la empresa, detienen su funcionamiento y disminuyen su disponibilidad.
- Determinar características de elementos críticos identificados.
- Realizar análisis funcional del sistema analizado.
- Realizar un FMEA (análisis de modos y efectos de falla) para elementos críticos identificados.
- Realizar un análisis estadístico mediante el método de Weibull para las fallas más críticas del sistema.
- Realizar diagramas de función confiabilidad y distribución acumulada (entendida como probabilidad de falla) para elementos críticos identificados.
- Mediante el análisis de los diagramas de confiabilidad para los componentes críticos, proponer una solución preventiva para las fallas de estos, en conjunto con la jefatura de planificación de la mantención de la empresa.

## **5. Marco Teórico**

### **5.1. Diagrama de Pareto**

Los diagramas de Pareto se relacionan con el llamado principio de Pareto o también llamada la regla del 80:20, la que se traduce en que: La menor parte de los aportes produce la mayoría de los resultados.

Está basado en la teoría del economista y sociólogo italiano del siglo XIX Wilfredo Pareto, que estudio la distribución de la riqueza en varios países. Pareto descubrió que, en la mayoría de los países, el 80% de las riquezas estaba en manos del 20% de la población, conclusión que finalmente llamaría la regla del 80:20 o principio de Pareto.

El principio de Pareto se expandió más allá de su uso económico y actualmente tiene gran uso en gestión empresarial, industrial y social, entre otros. Si bien originalmente la regla es 80:20, también es válido el uso de otros criterios como 90:10 o 60:40, dependiendo del caso de estudio.

La aplicación del diagrama de Pareto para análisis de mantención, consiste en obtener una gráfica del listado de fallas o equipos que generan detenciones del proceso, entre otras variables que se requieran analizar. El registro debe tener detalles de número de fallas, detenciones u otros, así como los tiempos y fechas asociados a cada detención, estos deben ser ordenados de mayor a menor y determinar el porcentaje acumulativo que posee cada factor en el total de elementos.

El diagrama de Pareto es una gráfica en donde se organizan diversas clasificaciones de datos por orden descendente y la línea de frecuencia acumulada representa la suma progresiva de las sucesivas barras verticales de izquierda a derecha.

Como una forma de priorizar y solventar la común escasez de recursos para la gestión del mantenimiento, se usa el análisis de Pareto, que es comúnmente utilizado para identificar aquellos códigos de falla más críticos para las operaciones, ya sea en términos de mantención o disponibilidad de los equipos.

El diagrama de Pareto también es una forma de visualizar y establecer las prioridades de mejoramiento. Este análisis identifica que tan mejorable es un sistema o equipo, basada en la pérdida de valor que está teniendo el ítem en cuestión de tiempos de parada. El diagrama de Pareto supone que el 80% de la magnitud total del evento es contribuida solo por el 20% de los sistemas, dando un criterio de criticidad de estos.

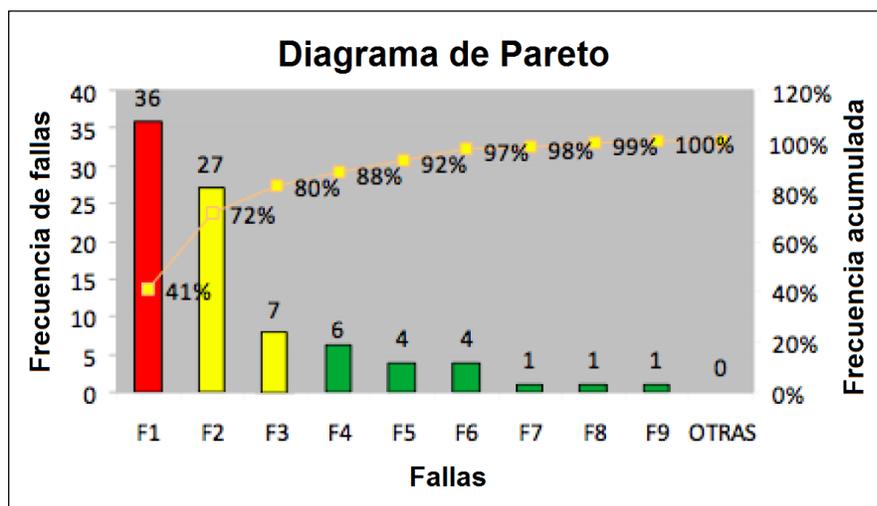


Figura 5.1 Ejemplo diagrama de Pareto (Fuente: Elaboración propia)

En el diagrama, las barras de color rojo y amarillo representan fallas con un alto índice de prioridad de mejoramiento, ya que, según la teoría de Pareto, el 80% de la magnitud total del evento, es contribuida aproximadamente solo por el 20% del total de fallas (F1, F2 y F3).

## 5.2. Distribución de Weibull

Es una función de distribución de probabilidades continua y de tres parámetros (localización, forma y escala) y se emplea ampliamente en el área del mantenimiento basado en la confiabilidad, su nombre se debe al físico sueco Waloddi Weibull (1887-1979) quien la publicó formalmente por primera vez en el año 1939, en el artículo A Statistical Theory of the Strength of Materials.

La distribución de Weibull puede presentar características de fallas de un gran número de equipos o componentes, modelando matemáticamente situaciones en las que el tiempo de detención o falla de estos componentes o equipos influye en la obstrucción a un proceso.

La función de densidad de probabilidad de la distribución de Weibull para la variable aleatoria  $t$  está dada por la siguiente expresión:

$$f(t) = \frac{\beta(t - \delta)^{\beta-1}}{\theta^\beta} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta}, t \geq \delta A = \pi r^2$$

En el caso que los valores sean tomados desde cero en adelante, se puede omitir el parámetro de localización ( $\delta$ ), quedando una función de densidad de probabilidades biparamétrica, definida solamente por los parámetros de forma y escala, tal como sigue:

$$f(t) \begin{cases} \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} & , t > 0 \\ 0 & , t \leq 0 \end{cases}$$

Donde se define:

- $\theta$ : Parámetro de escala ( $0 < \theta < \infty$ ) theta, indica la escala de la distribución, es decir, muestra que tan aguda o plana es la función.
- $\beta$ : Parámetro de forma ( $0 < \beta < \infty$ ) beta, como su nombre indica, determina la forma de la distribución.
- $\delta$ : Parámetro de localización ( $-\infty < \delta < \infty$ ) delta, indica en el tiempo, el momento a partir del cual se genera la distribución.
- $t$ : Variable aleatoria, que, para el caso de la confiabilidad, representa el tiempo entre fallas (TBF).

### 5.2.1. La función distribución acumulada F(t) de Weibull

La función de distribución acumulada se obtiene por la integración de la función de densidad de probabilidades de Weibull y se entiende en el ámbito de la confiabilidad como la probabilidad de falla de un componente específico hasta un tiempo t definido.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta}$$

### 5.2.2. La función confiabilidad R(t) de Weibull

Esta es una función complementaria a la función de distribución acumulada de Weibull. Está determinada por la probabilidad de que el evento ocurra después de un especificado periodo de tiempo. Es decir, es la probabilidad de que el componente se encuentre en buenas condiciones de funcionamiento hasta el instante t y se define como:

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta}$$

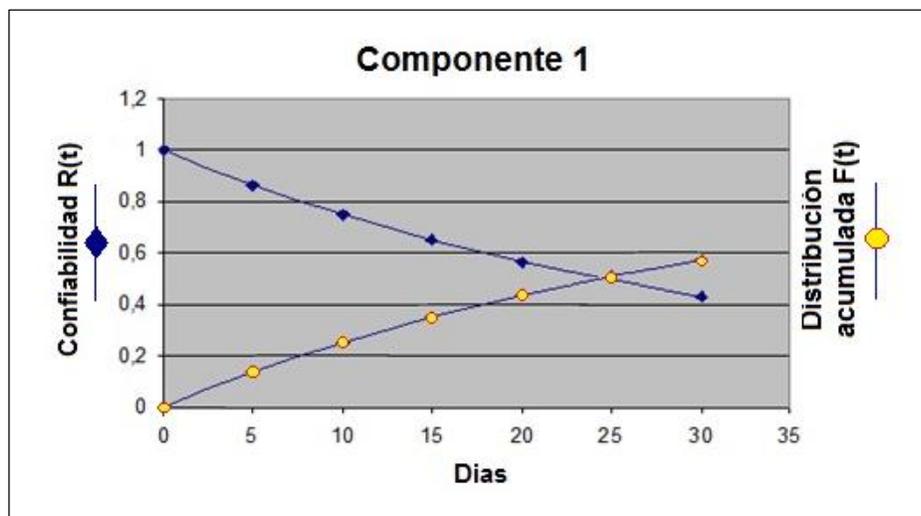


Figura 5.2.2 Ejemplo confiabilidad y distribución acumulada (Fuente: Elaboración propia)

### 5.2.3. Métodos para determinar parámetros de Weibull

Existen cinco métodos para calcular los parámetros de la distribución de Weibull:

- Método gráfico de mínimos cuadrados.
- Gráfico de la función tasa de falla.
- Máxima similitud.
- Estimación de momentos.
- Estimadores lineales.

#### 5.2.3.1. Método gráfico de mínimos cuadrados

El método gráfico de mínimos cuadrados permite calcular los parámetros de forma ( $\beta$ ) y escala ( $\Theta$ ) de la distribución de probabilidades de Weibull, mediante la transformación doble logarítmica de la función de distribución acumulada  $F(t)$ . Este método es ampliamente usado en ajuste de curvas y se puede aplicar en temas de confiabilidad.

Para la aplicación de este método y obtener los parámetros de Weibull se debe obtener de la base de datos del sistema, el tiempo entre fallas (TBF) de todas las fallas existentes para un componente específico, las cuales deberán ser asignadas cada una con un código y ordenadas de menor a mayor, luego de esto se deberá calcular el rango de mediana (RM) para poder trazar la recta de regresión. Este estimador no paramétrico se usa para calcular los parámetros de la distribución de Weibull y definirla completamente a través de su función de densidad de probabilidades.

Si se tiene función de distribución acumulada, entendida como probabilidad de falla:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta}$$

Entonces aplicando doble logaritmo natural a  $F(t)$  y desarrollando matemáticamente se tiene:

$$\ln[-\ln(1 - F(t - \delta))] = \beta * \ln(t - \delta) - \beta * \ln(\theta)$$

Haciendo ajuste de mínimos cuadrados a la recta  $y = \beta x + b$ , se tiene:

$$y = \ln[-\ln(1 - F(t - \delta))]; \quad x = \ln(t - \delta) \quad ; \quad b = -\beta * \ln(\theta)$$

Se obtienen entonces de acá, coordenada xi e yi de la recta ajustada según las fórmulas del método de los mínimos cuadrados, donde:

$$xi = \ln(t - \delta)$$

$$yi = \ln \left[ \ln \left( \frac{t}{1 - F(t - \delta)} \right) \right]$$

Donde se obtiene gráficamente la pendiente de dicha recta que representa el parámetro de forma  $\beta$

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

Luego de esto se procederá a graficar los rangos Xi e Yi para lograr un gráfico de dispersión, el cual tendrá que ser ajustado a una curva mediante comandos de Excel.

En la Tabla 5.2.3.1.1 se aprecia un ejemplo de cálculo para los parámetros de Weibull.

Tabla 5.2.3.1.1 Ejemplo tabla de cálculo de parámetros de Weibull

Código	TBF	RM	xi[Ln(t-δ)]	yi[Ln[Ln(t/(1-F(t-δ)))]]
1	0,01666667	0,01038576	-4,094345	-4,562104471
2	0,01666667	0,02522255	-4,094345	-3,667270912
3	0,25	0,04005935	-1,386294	-3,197020981
4	0,7	0,05489614	-0,356675	-2,874214791
5	0,83333333	0,06973294	-0,182322	-2,627158419
6	5,98333333	0,08456973	1,7889778	-2,426323598
7	7,91666667	0,09940653	2,0689702	-2,256643555
8	17,75	0,11424332	2,8763855	-2,109381317
9	23,2333333	0,12908012	3,145588	-1,979015083

Luego de determinar la recta ajustada a los datos disponibles por medio del método de mínimos cuadrados, utilizando para ello, algún software dedicado (en este caso Excel), se obtiene los valores de pendiente e intercepto con Eje y (ordenadas) de dicha recta, la pendiente representa el parámetro de forma ( $\beta$ ) de la distribución de Weibull y el valor de intercepción con Eje y en conjunto con la pendiente, es utilizado para el cálculo del parámetro de escala ( $\theta$ ), el cual es definido según Weibull, como la edad al cual el 63.2% de las unidades pueden fallar. Luego de obtener el parámetro de escala y de forma, se procede a obtener el parámetro de localización ( $\delta$ ), el cual, por lo general, es un poco menor al RM más pequeño.

Tabla 5.2.3.1.2 Ejemplo de obtención de parámetros de Weibull

<b>Pendiente (<math>\beta</math>)</b>	<b>Intercepto eje y (b)</b>
0,475528003	-2,915218756

### 5.2.4. Curva de la bañera

El parámetro de forma ( $\beta$ ) está directamente relacionado con la curva de la bañera, con el cual se puede caracterizar el tipo de falla que está ocurriendo; ya sea: mortalidad infantil, fallos aleatorios o envejecimiento.

#### 5.2.4.1. Relación entre Parámetro de Forma ( $\beta$ ) y tipo de falla

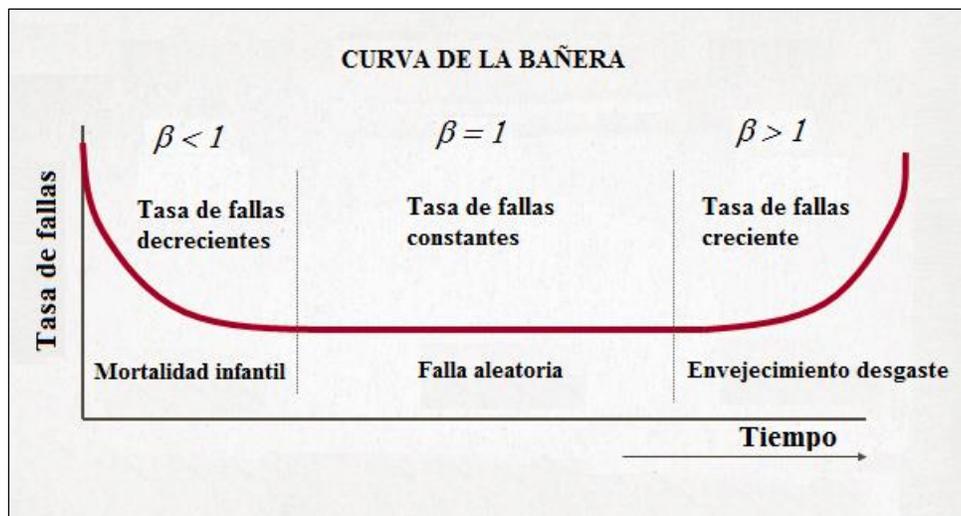


Figura 5.2.4.1 Ejemplo Curva De La Bañera (Fuente: Elaboración propia)

#### $\beta < 1$ Implica Mortalidad Infantil

Corresponde a una alta tasa de fallas al comienzo de su montaje. La curva decrece monótonamente y es convexa. Los modos de fallas más típicos son:

- Carga, inspección o prueba inadecuada.
- Problemas de reparación.
- Inadecuado burn - in o fuerzas, presiones ocultas.
- Problemas de producción.
- Problemas de Desensamble.
- Problemas de overhaul.

Si un elemento sobrevive a la mortalidad infantil, este elemento mejorará su resistencia a fallas.

**$\beta = 1$  Implica Falla Aleatoria**

Falla independiente del tiempo o aleatorias y es igual a una distribución exponencial.

- Errores de mantenimiento / errores humanos.
- Fallas debido a naturaleza, daños u objetos desconocidos.
- Mezcla de datos desde 3 o más modos de falla.
- Intervalos entre fallas.
- Over hauls no apropiados.

 **$1 < \beta < 4$  Implica falla por deterioro temprano**

Si esta falla ocurre dentro del diseño de la vida es una desagradable sorpresa. Estas son muchas fallas de modo mecánicos en esta clase.

- Bajo ciclo de Fatiga.
- Corrosión.
- Erosión.
- Overhaul o partes reemplazadas con un bajo  $\beta$  son de costo no efectivo.

 **$\beta > 4.0$  Implica deterioro rápido por edad de uso**

- Típicos modos de falla con mucha edad.

### 5.3. Criterios e indicadores de eficiencia en mantenimiento

Son indicadores que permiten tener una visión general de lo que está ocurriendo en la empresa en términos de criterios de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad para una máquina o sistema determinado. Al tener presentes estos indicadores se pueden tomar medidas de mitigación de fallas, en caso que los indicadores no sean aceptables, o bien mantenerlos constantes siempre y cuando estén dentro de lo requerido.

Los criterios de eficiencia son:

#### 5.3.1. Confiabilidad

Es la capacidad de un activo o componente para realizar una función requerida bajo condiciones dadas para un intervalo de tiempo dado.

La confiabilidad se puede definir también como la probabilidad de que un producto realizará su función prevista sin incidentes, por un periodo de tiempo especificado y bajo condiciones indicadas.

#### 5.3.2. Disponibilidad

La disponibilidad es el principal parámetro asociado al mantenimiento, dado que limita la capacidad de producción. Se define como la probabilidad de que una máquina o sistema esté preparado para producción en un periodo de tiempo determinado.

$$D = \frac{T_{op}}{T_{op} + T_d} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde:

- Top: tiempo total de operación.
- Td: Tiempo total de detenciones.
- MTBF: Tiempo promedio de buen funcionamiento entre paradas o detenciones.
- MTTR: Tiempo promedio de reparación.

### 5.3.3. Mantenibilidad

Mantenibilidad es definida como la capacidad (o probabilidad si hablamos en términos estadísticos), bajo condiciones dadas, que tiene un activo o componente de ser mantenido o restaurado en un periodo de tiempo dado a un estado donde sea capaz de realizar su función original nuevamente, cuando el mantenimiento ha sido realizado bajo condiciones prescritas, con procedimientos y medios adecuados (Norma ISO 14224, 1999).

Los indicadores de eficiencia son:

### 5.3.4. Tiempo promedio entre fallas (MTBF)

El MTBF es la media del tiempo de buen funcionamiento entre paradas del equipo, corresponde al tiempo promedio que transcurre entre dos fallas consecutivas

$$MTBF = \frac{\text{tiempo de funcionamiento (T.fun)}}{\text{Nº de fallas del equipo (nf)}}$$

Donde:

- T.fun = Horas del período - horas por imprevistos internos - horas por mantención programada - horas Operacionales.
- NF= Número de fallas por imprevistos internos.

### 5.3.5. Tiempo promedio de reparación (MTTR)

El tiempo promedio de reparación se define como el tiempo que se demora en ser reparado algún componente específico que presenta una falla, este tiempo puede ser calculado tomando el número total de detenciones imprevistas y dividiendo por el número de eventos asociados.

$$MTTR = \frac{\text{tiempo de detenciones no programadas (T.Det)}}{\text{número de fallas del equipo (nf)}}$$

Dónde:

- T.Det = Tiempo total de detenciones provocadas por imprevistos internos.

### 5.3.6. Tiempo entre fallas (TBF)

El tiempo entre fallas corresponde al tiempo que transcurre entre dos fallas consecutivas, este tiempo entre fallas es aplicado para el análisis Weibull, el cual tiene como principal función dar una mayor confiabilidad y disponibilidad a la pieza o máquina analizada.

## 5.4. Método de Jackknife

El método de Jackknife es una técnica de jerarquización de criticidad, basada en métodos de dispersión logarítmica de los datos disponibles, que utiliza los tiempos promedios de reparación (MTTR), y el número de detenciones de los equipos o sistemas como base. En general, este método de jerarquización e identificación de criticidad, busca evaluar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de las fallas y sus consecuencias.

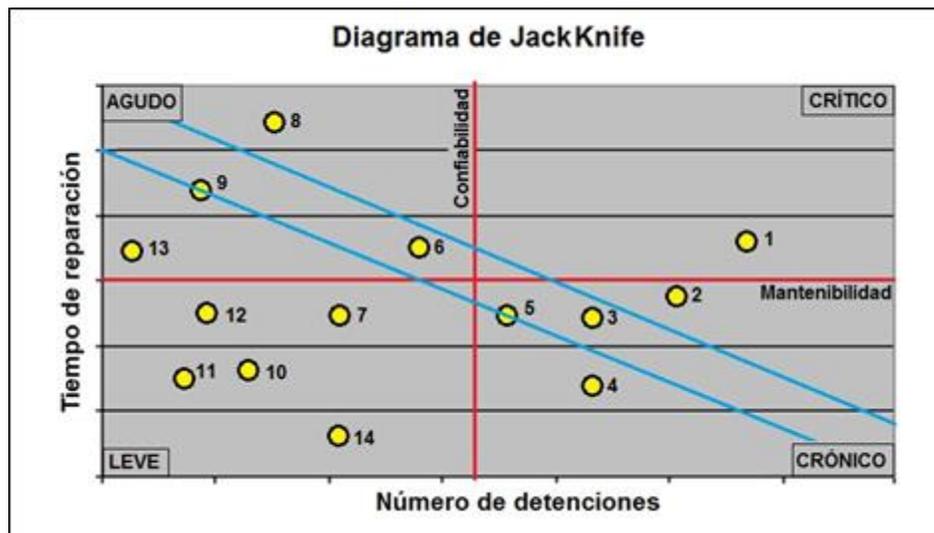


Figura 5.4 Ejemplo diagrama de Jackknife (Fuente: Elaboración propia)

El gráfico de Jackknife de la Figura 5.4, puede ser dividido en 4 niveles de fallas asociados a 4 cuadrantes:

- 1) AGUDO: Detenciones con alto tiempo de reparación y baja frecuencia.
- 2) LEVE: Detenciones con bajo tiempo de reparación y baja frecuencia.
- 3) CRÍTICO: Detenciones con alto tiempo de reparación y alta frecuencia.
- 4) CRÓNICO: Detenciones con bajo tiempo de reparación y alta frecuencia.

También da a conocer indicadores de eficiencia en mantenimiento, tales como:

- Confiabilidad: Aumenta hacia la izquierda.
- Mantenibilidad: Aumenta hacia abajo.

Los sistemas o equipos con mayor confiabilidad se encuentran en los cuadrantes izquierdos y los sistemas con mayor mantenibilidad se encuentran en los cuadrantes inferiores. Estos cuadrantes son formados mediante dos límites, Límite MTTR (línea roja horizontal) y Límite n (línea roja vertical). Estos límites pueden ser establecidos mediante criterios del área de mantenimiento o mediante cálculos dependientes de magnitudes relativas. Un acercamiento que permite determinar valores relativos es utilizar valores promedios como los siguientes:

$$D = \Sigma \text{Tiempo de detenciones}$$

$$N = \Sigma \text{Tiempo de cada falla}$$

Definiciones:

- Tiempo total fuera de servicio (D): Corresponde a la suma de los tiempos de detenciones provocadas por fallas imprevistas.
- Número total de fallas (N): Corresponde a la suma de cada detención provocada por fallas imprevistas.
- Número de códigos distintos (Q): Asignado tanto a un modo de falla o componente para categorizar los datos.

Luego de definir estos parámetros se puede obtener los límites ya mencionados:

$$\text{Límite } n = \frac{N}{Q}$$

$$\text{Límite } MTTR = \frac{D}{N}$$

Las líneas diagonales de color azul trazadas en la figura 5.4 son denominadas líneas de iso-indisponibilidad, ya que todas las fallas ubicadas sobre una de ellas aportan igual indisponibilidad al proceso estudiado.

## 6. Toma de datos

Los datos necesarios para cada componente que origina la detención imprevista del proceso son:

- Fecha y hora de inicio de detención.
- Fecha y hora de finalización de detención.
- Causa o detalle de la detención.

Los tiempos de detención de la máquina debido a imprevistos o fuera de servicio fueron extraídos desde la Planilla de Cortaduras, Informe Diario de Producción, Bitácora de Jefe de Turno y un registro en el Software SAP, utilizada por el personal de planta para registrar todos los imprevistos que ocurren en la máquina y además que obstruyen el proceso de producción, ya sea mantenciones a equipos u otras eventualidades, registrándose el elemento que causa la cortadura, con fecha y hora de inicio y término, esto es necesario para posteriormente realizar el análisis de confiabilidad de dicho elemento.

Fecha evento				Duración evento		Causa	Detalles evento
Mes - Año	Día	Desde	Hasta	Minutos	Horas		
nov-10	8	05:42	06:20	0:38:00	0,63	Cortadura	Falla Robo Cross
nov-10		08:15	08:32	0:17:00	0,28	Cortadura	Aseo parcial.tiempo incrementado por falla de robocross.
nov-10							prensas,demora en normalizar por falla en chorro Robo Cross.
nov-10	27	21:00	00:00	3:00:00	3,00	F/S	Por falta de barras,falla en embaladora.
nov-10	28	00:00	05:46	5:46:00	5,77	F/S	Por falta de barras,falla en embaladora.
ene-11		04:09	08:18	4:09:00	4,15	F/S	Maquina fuera de servicio por falla en motor N°14 de grupo secador.
feb-11	6	00:00	00:22	0:22:00	0,37	Cortadura	Papel Cortado en prensas, falla mini doctor, problemas en pasada de cinta pope.
feb-11	10	01:29	01:59	0:30:00	0,50	Cortadura	Corte en pope seguido lisas, falla robo cross, bbas detenidas se lavan filtro
mar-11		16:17	17:20	1:03:00	1,05	F/S	Maquina fuera de servicio por falla en presión interna de primera prensa.
may-11		6:28	7:21	0:53:00	0,88	F/S	Al detenerse clasificadores por falta de agua falla en v/v LV 412
may-11		15:42	15:55	0:13:00	0,22	Cortadura	DEMORA EN NORMALIZAR POR FALLA EN FIBRON A-B
may-11		13:07	13:22	0:15:00	0,25	Cortadura	Falla de enganche,cambio de tambor,se produce taco en raspador
may-11		16:02	16:15	0:13:00	0,22	Cortadura	falla de enganche , dificultades en normalizar
jun-11	2	16:51	19:16	2:25:00	2,42	F/S	Fuera de servicio por falla eléctrica total

Figura 6 Ejemplo planilla de cortaduras (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.)

En la Figura 6 se puede ver un ejemplo de la Planilla de Cortaduras (principal fuente de información), en el que se aprecia las horas y fechas, así como también el detalle del elemento que falla y ocasiona una cortadura, así se puede tener idea del componente en cuestión y el tiempo de influencia en el proceso.

## 6.1. Diagrama Máquina Papelera N°1 (MP-01)

A continuación, se presenta un diagrama de la máquina papelera N°1, con características funcionales de cada sistema. El diagrama de la máquina fue dividido en dos, debido a su extensión.

### 6.1.1. Diagrama Sistema Formación y Prensas

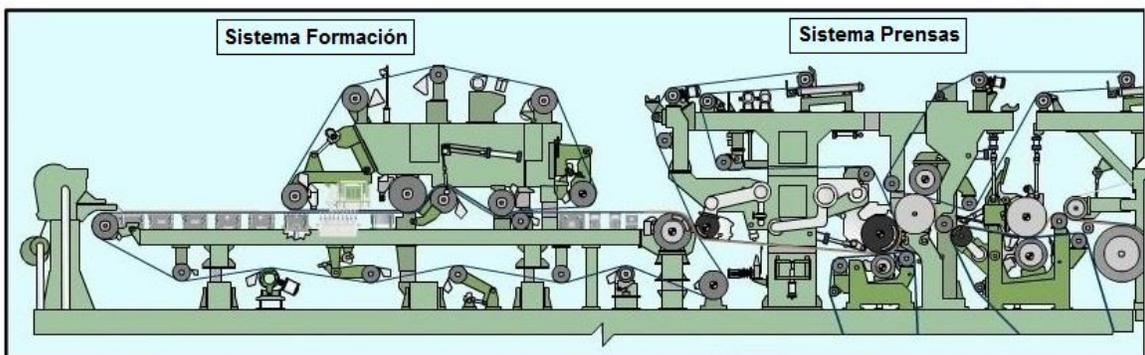


Figura 6.1.1 Sistemas Formación y Prensas MP-01 (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.)

La máquina papelera N°1 consta de diversos sistemas, como se aprecia en la Figura 6.1.1 se puede clasificar (de izquierda a derecha) como sigue:

- Sistema Formación: Sistema encargado de extraer el agua contenida en la pasta proveniente del cajón de entrada, permitiendo que la pasta se transforme en papel, con una distribución de fibras uniforme.
- Sistema Prensas: La función del Sistema Prensas es recibir la hoja del Sistema Formación, distribuir la hoja a lo ancho de la máquina y realizar la extracción de agua por medio del prensado (compresión mecánica) en los puntos de contacto de dos rodillos (NIP).

### 6.1.2. Diagrama Sistema Secador y Calandria-Pope

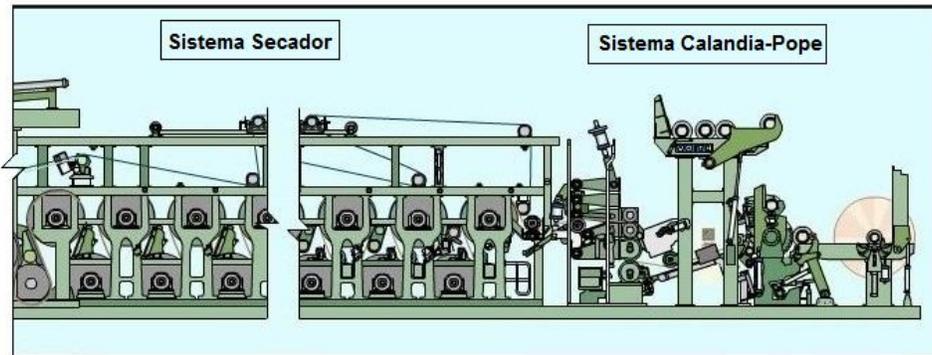


Figura 6.1.2 Sistemas Secador y Calandria-Pope MP-01 (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.)

Los sistemas que están presentes en el diagrama son:

- Sistema Secador: La función del sistema secador es recibir la hoja con un cierto porcentaje de humedad proveniente del Sistema Prensas, transportarla por cilindros, que son calentados desde su interior por vapor a alta temperatura, evaporando el agua contenida en la hoja, manteniendo un perfil de humedad determinado.
- Sistema Calandria-Pope: Su función es, a través de trabajo mecánico directo sobre la hoja, modelar sus propiedades de estructura superficial como rugosidad o grado de lisado, porosidad, brillo, etc. con el fin de mejorar sus propiedades de impresión.

En la Sección 10, de Análisis Funcional se presentan funciones específicas de cada Sistema.

## 6.2. Criterios para agrupar datos

Para agrupar las detenciones se procedió a clasificar la Máquina papelera N°1 por sistemas que la componen, según las ubicaciones técnicas actuales en la empresa, tal como lo muestra el organigrama siguiente:

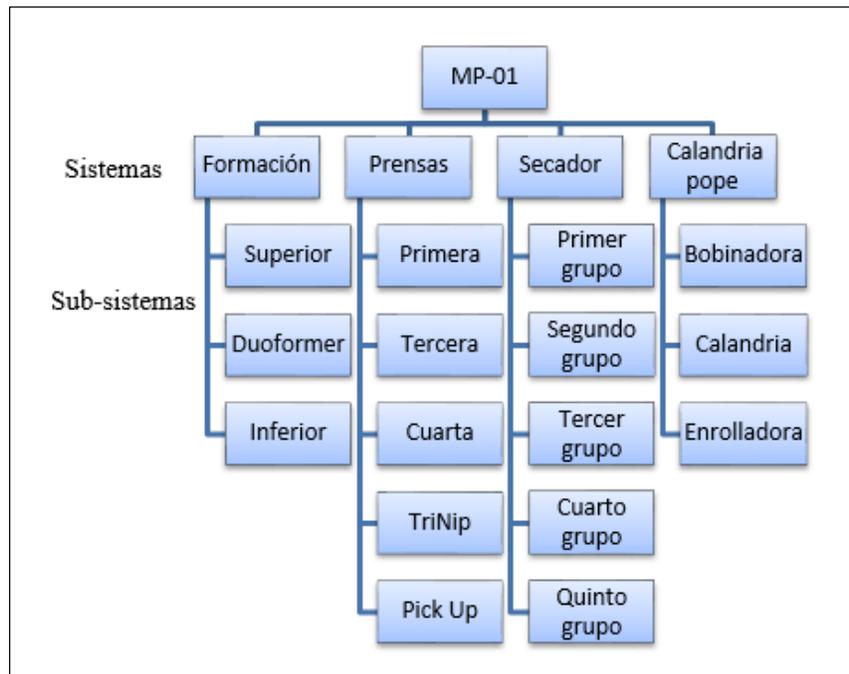


Figura 6.2.1 Diagrama Sistemas y Sub-sistemas de MP-01 (Fuente: Elaboración propia)

Como lo indica el diagrama se divide la máquina papelera N°1 en sistemas de:

- Formación
- Prensas
- Secador
- Calandria-Pope

Y cada uno de estos sistemas en sub-sistemas con el objetivo de poder llegar en detalle al componente que presenta la falla o bien el que causa detención del proceso.

A partir de las detenciones de la MP-01 se identifican componentes a un 3° nivel como lo muestra la Figura 6.2.2 a continuación:

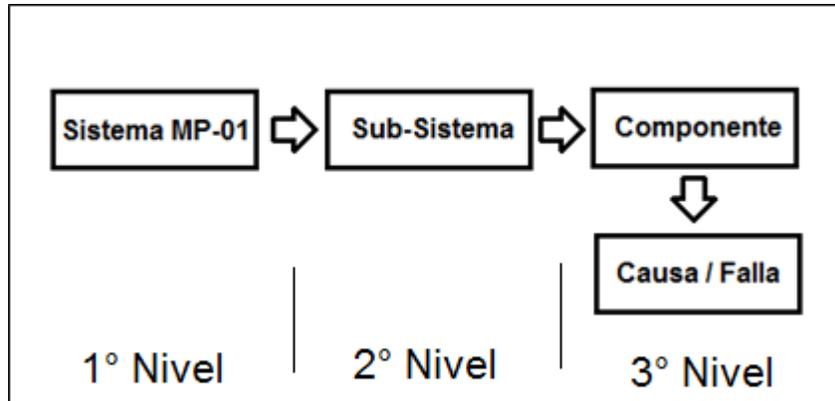


Figura 6.2.2 Diagrama de niveles de estudio (Fuente: Elaboración propia)

### Definiciones:

- Sistema: sector o sección en que se divide la línea de producción que puede ser: Formación, Prensas, Secador o Calandria-pope.
- Sub-sistema: Área en que se divide los distintos sistemas de la máquina, y que pueden ser: Formación superior, Formación inferior, Primera prensa, Tercer prensa, Cuarta prensa, Prensa pick up, TriNip, Primer grupo de secador, Segundo grupo de secador, etc.
- Causa / falla de componente: Pérdida de habilidad de un ítem para realizar una función requerida a causa de una detención no programada o una reducción no programada de la razón de producción.

Utilizando los datos de detenciones documentados en la Planilla de Cortaduras que comienza en enero de 2010 y finaliza en agosto de 2015 (inclusive) y una vez analizadas cada una de las fallas, éstas se agrupan en una base de datos ordenada, filtrada y clasificada en función de las necesidades del estudio de confiabilidad, tal como se muestra a continuación:

Sistema	Sub-sistem	Componente	Falla	HORAS	Mes-Año	Día	inicio	término
Formación	Inferior	Rodillo cabezal 2.10	Desalineamiento	6,92	feb-13	6	8:36:00	15:31:00
Prensas	Tri Nip	Fibrón prensas	Regulación	0,15	feb-13	9	11:15:00	11:24:00
Prensas	Pick up	Paño	Suciedad	0,23	feb-13	13	5:30:00	5:44:00
Formación	Superior	Paño	Sin detalles / cambio	7,25	feb-13	13	11:25:00	18:40:00
Prensas	Tri Nip	Rodillo succión central 3.3	Suciedad	0,18	feb-13	14	11:47:00	11:58:00
Prensas	Cuarta prensa	Raspador abierto	Enclavamiento	0,22	feb-13	14	15:15:00	15:28:00
Prensas	Cuarta prensa	Paño	Suciedad	0,30	feb-13	17	19:09:00	19:27:00
Prensas	Cuarta prensa	Raspador principal	Sin detalles / cambio	0,43	feb-13	17	19:53:00	20:19:00
Prensas	Tri Nip	Rodillo succión central 3.3	Suciedad	0,68	feb-13	21	16:47:00	17:28:00
Prensas	Tri Nip	Rodillo succión central 3.3	Suciedad	0,22	feb-13	21	18:47:00	19:00:00

Figura 6.2.3 Ejemplo de datos clasificados para estudio (Fuente: Elaboración propia)

La tabla anterior presenta gran utilidad para el análisis ya que en ella fueron ordenados los datos con el objetivo de obtener MTBF y MTTR, así como también se obtuvieron los datos que sirven como base al cálculo de disponibilidad y también para la realización de diagramas de Pareto y Jackknife del estudio de confiabilidad.

### 6.3. Modelo de utilización de tiempos

Para realizar la agrupación y orden de las detenciones producidas en la MP-01, es necesario conocer cómo se clasifican los tiempos de detención y que modelo seguirá la utilización del tiempo en el presente estudio, según las Planillas de Cortaduras ocurridas en la MP-01 desde enero de 2010 hasta agosto del año 2015.

Este modelo se enfoca en el Tiempo de producción, siendo éste el tiempo en que el proceso está generando una cantidad de producto medible, a diferencia del tiempo de operación, en el cual la máquina puede estar operando, pero no produciendo.

El propósito es maximizar el tiempo disponible, que consta del tiempo de producción sumado al tiempo de operación, para así aumentar la confiabilidad de la máquina.

Los tiempos se agrupan y ordenan en:



Figura 6.3 Diagrama de modelo de utilización de tiempos (Fuente: Elaboración propia)

La definición de cada uno de estos tiempos se presenta a continuación:

- **Tiempo calendario:** Tiempo total del estudio, que comprende desde enero del año 2010 hasta agosto del año 2015. Tal como se aprecia en la figura 6.3 se divide en Tiempo requerido y Tiempo Stand by.
- **Tiempo requerido:** Es el tiempo durante el cual se requieren equipos y personal para realizar las actividades de operación, mantención y producción.
- **Tiempo Stand By:** Es el tiempo en que el equipo no es requerido o no está disponible debido a condiciones o motivos que escapan al control directo de la administración del proceso. Por ejemplo, estructura de turnos, disputas laborales, feriado legal, fallas en el servicio que prestan terceros, desastres naturales declarados y otros eventos de fuerza mayor, como ejemplo está el terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero del año 2010.
- **Tiempo disponible:** Es el tiempo en el cual la máquina está disponible para operar y producir papel y se divide en tiempo de operación y tiempo de producción.
- **Tiempo de Detención (Downtime):** es el tiempo durante el cual no se está desarrollando la función productiva u operativa requerida e incluye tanto el Tiempo de Detención de Proceso como el Tiempo de detención de equipo y se divide en Tiempos De Detención Programada y Tiempos de Detención No Programada.

Para el análisis del tipo de detención existentes en la MP-01, se utiliza el Tiempo de Detención No Programada y Tiempo de Detención Programada tanto de Equipo como de Proceso y para los posteriores análisis de componentes y mantención preventiva se utilizan los Tiempos de Detención No Programada de Equipo. Los motivos de detención más representativos se pueden apreciar en la tabla siguiente:

Tabla 6.3 Motivos de detención MP-01 (Proceso y Equipo)

Tipo de detención	Afectado	Motivo de detención
Detención Programada	Equipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Mantención preventiva.</li> <li>*Mantención predictiva.</li> <li>*Mantención Sintomática.</li> <li>*Tareas de parada de planta.</li> <li>*Reparación de falla programada.</li> <li>* Reparaciones a condición.</li> </ul>
	Proceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Por cambio de tipo de papel.</li> <li>*Falta de operadores.</li> <li>*Falta de insumos.</li> <li>* Cambio de condiciones operacionales.</li> </ul>
Detención No Programada	Equipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Alargues de parada de planta.</li> <li>* Atascos por falla componente.</li> <li>* Reparación de falla imprevista.</li> <li>* Actividades de preparación:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de diagnóstico.</li> <li>- Tiempo de respuesta.</li> <li>- Tiempo de espera por repuestos.</li> <li>- Aseos antes de comenzar reparación.</li> </ul> </li> </ul>
	Proceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Retrasos de producción.</li> <li>* Atascos por proceso.</li> <li>* Tareas de limpieza de componente.</li> <li>* Demoras de proceso no programados (aguas arriba y/o aguas abajo).</li> <li>* Eventos rutinarios de cambio turno.</li> </ul>

Cabe destacar que como el proceso de fabricación de papel es en serie, una detención de algún equipo en particular origina una detención de todo el proceso, no obstante, se clasifican para análisis posteriores de los datos proporcionados.

## 7. Análisis de la base de datos

### 7.1. Análisis del tipo de detenciones

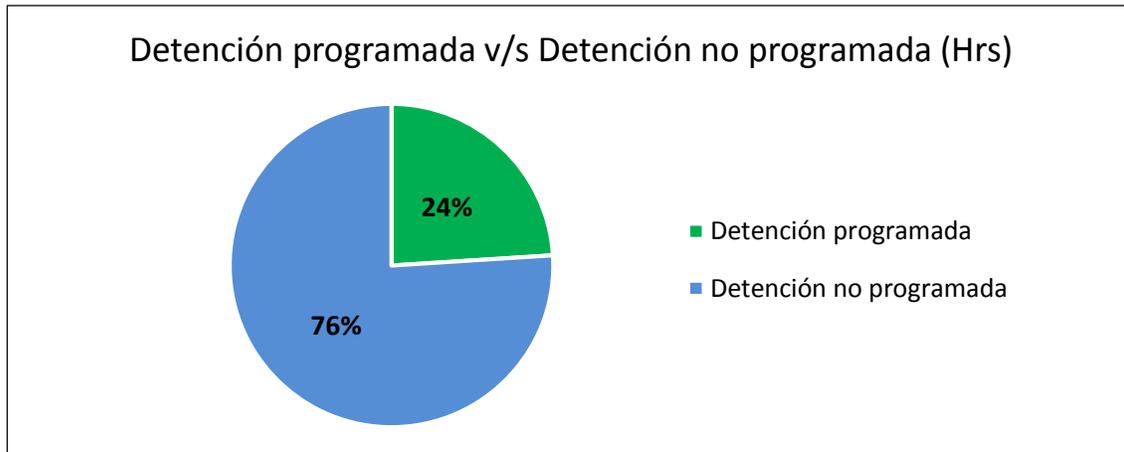


Figura 7.1 Detenciones programadas v/s detenciones imprevistas

Según el gráfico existe un 24% de detenciones programadas versus un 76% de detenciones no programadas en la MP-01, lo que no es un buen indicador, ya que, al existir mayormente paradas imprevistas se pierde tiempo de disponibilidad de la máquina, lo que se traduce finalmente en mayores costos por reparación y mayores costos al dejar de producir papel y aplicar mayor porcentaje de mantención correctiva con respecto a preventiva o predictiva, por esto, para lograr maximizar el tiempo disponible y finalmente el tiempo de producción es necesario reducir el tiempo de las detenciones no programadas o idealmente evitarlas.

Se realizan paradas programadas largas cada 6 semanas de aproximadamente 800 minutos y dos paradas cortas (entre paradas largas) de aproximadamente 300 minutos cada una, no obstante, se producen las llamadas alargues de paradas que corresponden a tiempos imprevistos, es decir, no están programados en el plan de mantención.

Se hace necesario a partir de los resultados obtenidos en este gráfico de torta, concentrarse en las detenciones no programadas, para poder identificar él o los componentes que están originando este tipo de imprevistos (fuera de servicio de la máquina). Al identificar él o los componentes críticos, se puede tomar medidas de mitigación de fallas y aumentar notoriamente la disponibilidad total de la MP-01, reducir cuota de riesgos de accidentes laborales al intervenir menos veces para reparar y

también poder planificar de mejor manera una mantención, evitando los llamados alargues de paradas que corresponden a fallas ya sea por un trabajo de mantención deficiente o problemas en puesta en marcha.

## 7.2. Análisis del tiempo disponible o disponibilidad

Este estudio comienza analizando la disponibilidad de tiempo que posee la MP-01 para ser utilizada en la producción de papel, es decir, no necesariamente se encuentra produciendo, pero si puede estar operando (ver Figura 6.3), disponibilidad que queda representada en el gráfico siguiente contemplando desde enero del año 2010 hasta agosto (inclusive) del año 2015.

### 7.2.1. Disponibilidad MP-01 desde año 2010 hasta año 2015

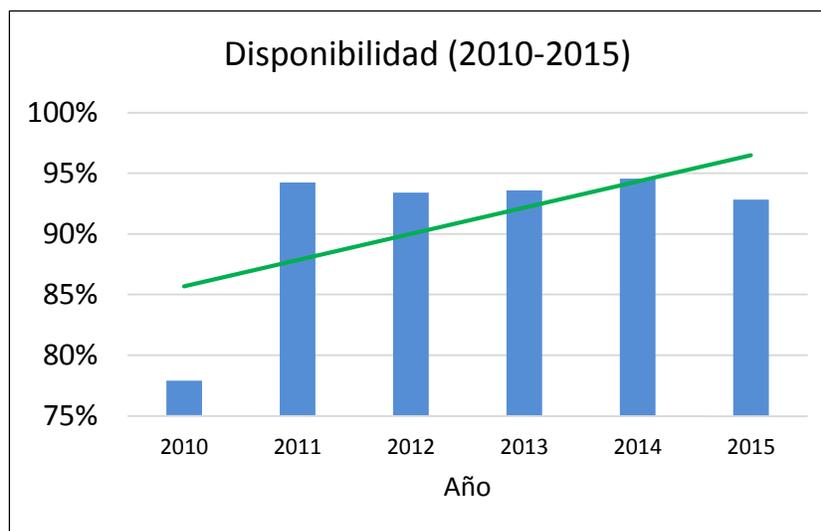


Figura 7.2.1 Disponibilidad MP-01 (2010-2015)

Se observa una línea de tendencia color verde con pendiente positiva, debido a que esta se encuentra en función de los datos de sucesos ocurridos en el año 2010, en el que ocurrió el terremoto del 27 de febrero en Chile y por esto, la máquina estuvo detenida dos meses (marzo y abril), lo que corresponde a un tiempo definido anteriormente como Stand By, el que influyó negativamente en la disponibilidad, 77% para ese año.

Para un próximo gráfico se omite el año 2010 con el fin de analizar la disponibilidad en el Tiempo Requerido (ver Figura 6.3) de la MP-01 y así tener una buena aproximación de lo que ocurre en funcionamiento normal, sin la influencia de eventos naturales que no son temas de este estudio.

### 7.2.2. Disponibilidad MP-01 desde año 2011 hasta año 2015

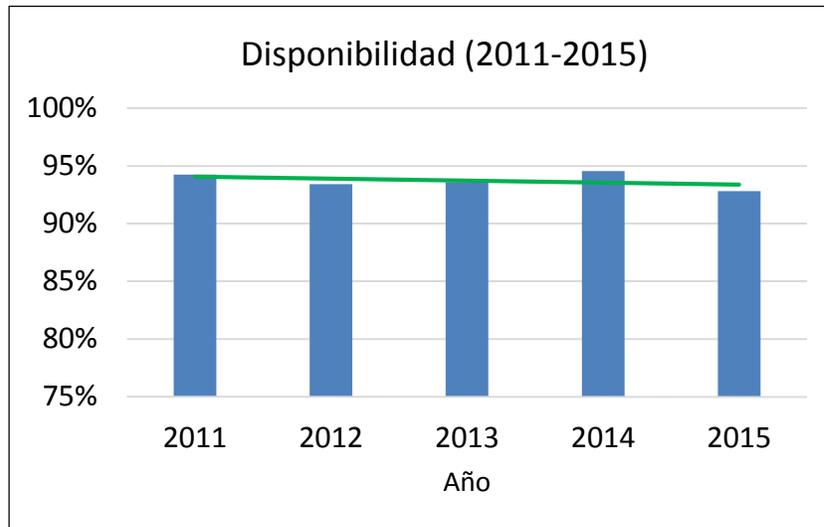


Figura 7.2.2 Disponibilidad MP-01 (2011-2015)

En verde se muestra la línea de tendencia del periodo de estudio comprendido entre enero de 2011 hasta agosto de 2015, como se mencionó anteriormente fue excluido el año 2010 por causa externa (terremoto), el cual influye en la tendencia normal del proceso y no es representativo para el estudio. Al graficar los datos se observa que la tendencia de la disponibilidad es con suave pendiente negativa, es decir, que la máquina tiene una disponibilidad con tendencia a ir disminuyendo a medida que pasa el tiempo, aunque se han implementado mejoras, estas no son suficientes para tener una disponibilidad y confiabilidad creciente según el gráfico. A modo de conclusión se puede decir que la disponibilidad del equipo es relativamente constante para el periodo de estudio y se mantiene dentro de 92% a 95%.

A simple vista esta disponibilidad podría considerarse poco crítica, pero cada porcentaje menos, influye considerablemente de manera negativa en la empresa, ya que disminuye el tiempo en que la máquina está produciendo papel para generar ingresos, aumenta la probabilidad de accidentes en intervenciones de mantención, en algunas ocasiones se hace necesario la sub-contratación de empresas especializadas, baja la competitividad de la empresa, entre otras.

### 7.3. Análisis de Indicadores de eficiencia en mantenimiento

Para estar informado de la confiabilidad y mantenibilidad de la máquina es necesario conocer indicadores de eficiencia en mantenimiento, como lo son MTBF (tiempo promedio de buen funcionamiento entre paradas) y MTTR (tiempo promedio de reparación), esto dará una noción de la eficiencia de mantención aplicada a la máquina, con lo que se puede sacar conclusiones y tomar medidas de mitigación de detenciones en caso de ser necesario.

En la siguiente tabla se muestra la Disponibilidad, MTBF y MTTR desde enero de 2011 hasta agosto de 2015 y el promedio del periodo.

Tabla 7.3 Resumen indicadores de eficiencia en mantenimiento

<b>Año</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>MTBF (Hrs)</b>	<b>MTTR (Hrs)</b>
2011	94,25%	11,44	0,70
2012	93,41%	11,50	0,70
2013	93,58%	7,85	0,54
2014	94,56%	9,28	0,53
2015	92,82%	7,36	0,57
<b>Promedio</b>	<b>93.73%</b>	<b>9,49</b>	<b>0,61</b>

Como se mencionó anteriormente se excluye el año 2010 del análisis de indicadores de eficiencia en mantenimiento. Los datos de este periodo no son representativos, ya que la influencia del terremoto del año 2010 no otorga tiempos de buen funcionamiento entre paradas (MTBF) concluyentes para el estudio.

### 7.3.1. Tiempo promedio de buen funcionamiento entre paradas (MTBF)

Se presenta en el gráfico siguiente los tiempos promedio de buen funcionamiento entre paradas de la MP-01 desde enero de 2011 hasta agosto de 2015.

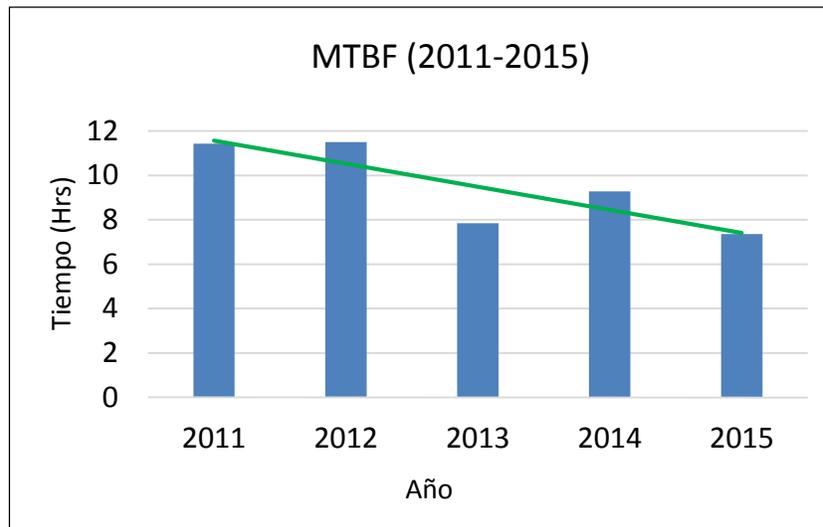


Figura 7.3.1 Tiempo promedio de buen funcionamiento entre paradas MP-01 (2011-2015)

En la gráfica se observa la tendencia de MTBF (tiempo promedio de buen funcionamiento entre paradas) de la MP-01 con un promedio de 9.49 horas y tendencia decreciente, lo que influye negativamente en la confiabilidad de la máquina, es decir, tiene una mayor probabilidad de falla a medida que va pasando el tiempo, es necesario solucionar este problema si se requiere obtener una mayor confiabilidad a futuro. El MTBF se convierte en este caso en un buen indicador de confiabilidad de la MP-01.

### 7.3.2. Tiempo promedio de reparación (MTTR)

A continuación, se presenta la gráfica de los tiempos promedio de reparación (MTTR) presentes en la MP-01:

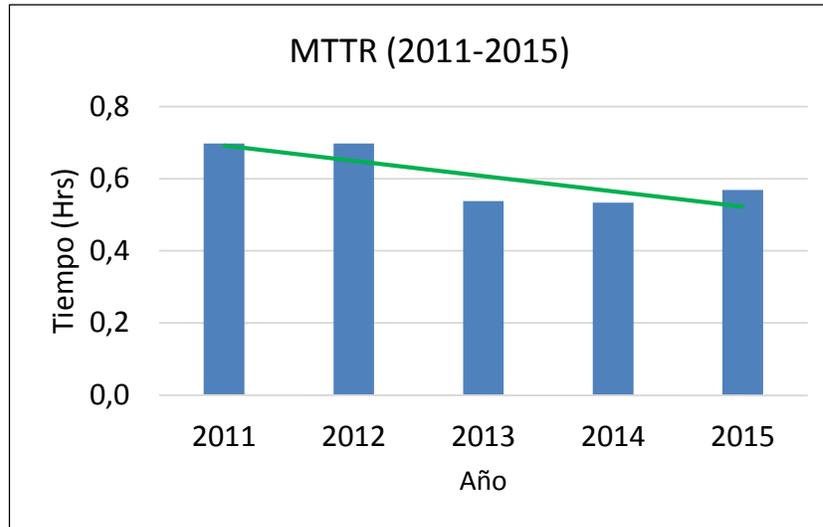


Figura 7.3.2 Tiempo promedio de reparación (MTTR) en MP-01 (2011-2015)

En el gráfico se observa que el MTTR (tiempo promedio de reparación) tiene una línea de tendencia con pendiente negativa y con un promedio de 0.61 horas, esto quiere decir que a medida que pasa el tiempo las reparaciones en la máquina se hacen de manera más rápida, por ende, se aumenta la mantenibilidad del equipo. Es este indicador que aporta para aumentar la disponibilidad total de la máquina.

Si bien va disminuyendo el MTBF (disminuye la confiabilidad) también disminuye MTTR (aumenta mantenibilidad), esto porque según el gráfico, se han intensificado las tareas de mantención, inyectando cada vez más recursos de tiempo, pero no se da soluciones concretas para aumentar la confiabilidad, es decir, que se está manteniendo la disponibilidad de la máquina a costas de intensificar las tareas de mantención, pero no llegando a solucionar o identificar las causas que originan los problemas.

A modo de conclusión se puede decir que la disponibilidad de la máquina se mantiene gracias a un equilibrio entre MTBF Y MTTR, siendo este último el factor que aumenta la disponibilidad, lo cual no es conveniente, ya que siempre se busca aumentar la confiabilidad de la máquina.

#### **7.4. Aplicación método de Pareto**

Para realizar este análisis se procedió a buscar en toda la base de datos de fallas imprevistas de la MP-01 del total de periodo de estudio (2010-2015) la cual se clasificó por sistemas:

- Prensas
- Secador
- Formación
- Calandria-pope
- Sistema eléctrico
- Causa ext. (pulpa)
- Sistema hidráulico
- Causa ext. (preparación pasta)
- Sistema neumático
- Sistema de vacío
- Causa ext. (caldera)
- Causa ext. (vapor)
- Causa ext. (red de incendios)
- Causa ext. (terremoto)

Se decide no excluir el año 2010 en esta sección, ya que para la realización de los diagramas de Pareto interesan las frecuencias de ocurrencia de los eventos y no su duración.

### 7.4.1. Detenciones MP-01 por sistemas

Para realizar el diagrama de Pareto de las detenciones totales de la máquina papelera N°1, es necesario extraer desde la base de datos los números de detenciones por sistema, para así saber cuál es el más influyente en la obstrucción del proceso, tal como se aprecia en la tabla a continuación:

Tabla 7.4.1 Resumen de base de datos detenciones MP-01 por sistemas

<b>Sistemas MP-01</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Frecuencia acumulada</b>	<b>% Acumulado</b>
Prensas	471	471	44,35
Secador	194	665	62,62
Formación	120	785	73,92
Calandria-pope	96	881	82,96
Sistema eléctrico	58	939	88,42
Causa ext. (pulpa)	47	986	92,84
Sistema hidráulico	19	1005	94,63
Causa ext. (prep. pasta)	16	1021	96,14
Sistema neumático	13	1034	97,36
Sistema de vacío	12	1046	98,49
Causa ext. (caldera)	12	1058	99,62
Causa ext. (vapor)	2	1060	99,81
Causa ext. (red de incendios)	1	1061	99,91
Causa ext. (terremoto)	1	1062	100,00
<b>Total</b>	<b>1062</b>		

Una vez realizada dicha clasificación se puede graficar el diagrama de Pareto asociado a la tabla 7.4.1 y discernir el sistema en que se debe enfocar:

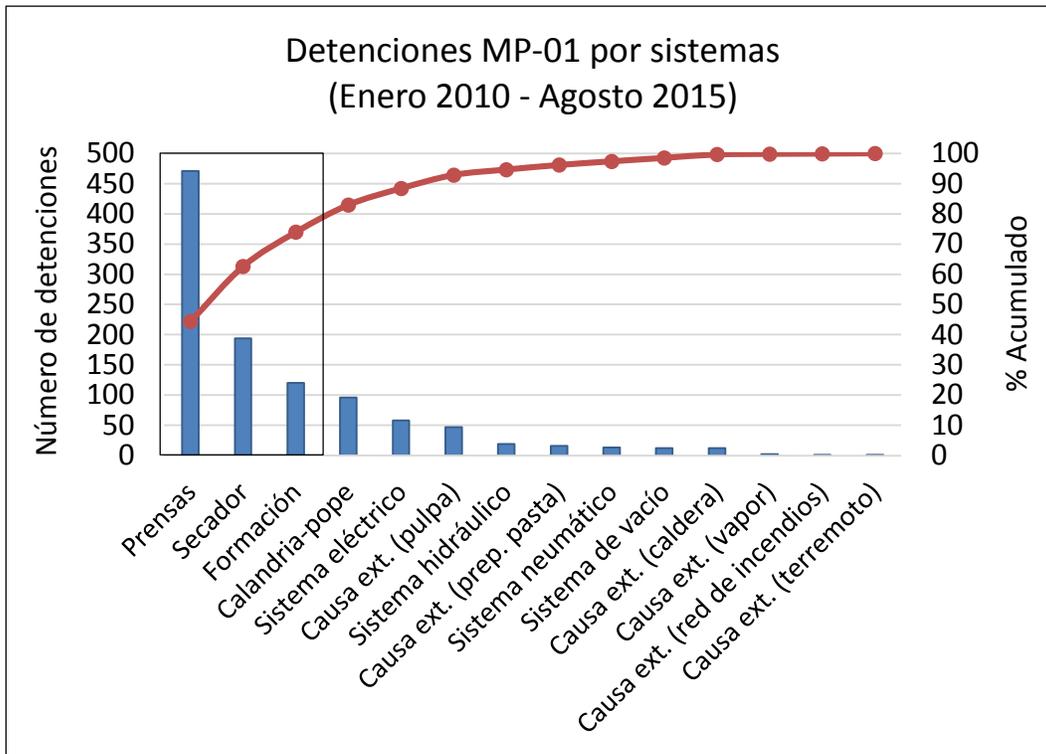


Figura 7.4.1 Diagrama de Pareto detenciones en MP-01 por sistema

En el diagrama se muestra los principales sistemas de la MP-01, que ocasionan el mayor número de detenciones en el proceso según teoría del 80:20, entre ellos están:

- Sistema Prensas
- Sistema Secador
- Sistema Formación

Según el gráfico basado en teoría de Pareto, el 80% de las detenciones totales de la MP-01 son causadas solo por el 20% de los sistemas, donde predomina el Sistema Prensas con un total de 471 detenciones, provocando más del doble de detenciones del sistema siguiente (Secador) con 194 detenciones, esto hace al Sistema Prensas motivo de atención dentro de análisis siguientes, los demás sistemas también pueden ser analizados posteriormente de ser necesario.

Como en Sistema Prensas se ocupan grandes presiones para llevar a cabo la fabricación del papel no es extraño que sus aportes a las detenciones totales de la máquina sean altos, ya que los componentes están mayormente exigidos.

Como se identificó a Sistema Prensas como el causante de la mayoría de las detenciones, en un análisis posterior se graficará un diagrama de Pareto de segundo orden de dicho sistema, para identificar los sub-sistemas críticos de este, en términos de detenciones.

### 7.4.2. Detenciones MP-01 por fallas

Para realizar el siguiente gráfico se filtró desde la base de datos, seleccionando en ella solamente las fallas que ocasionan las detenciones en el proceso, dicha base de datos se puede ver en la sección Anexos (Pág. 108). El diagrama de Pareto asociado a esta tabla fue truncado solo por motivo de formato de hoja y se presenta a continuación:

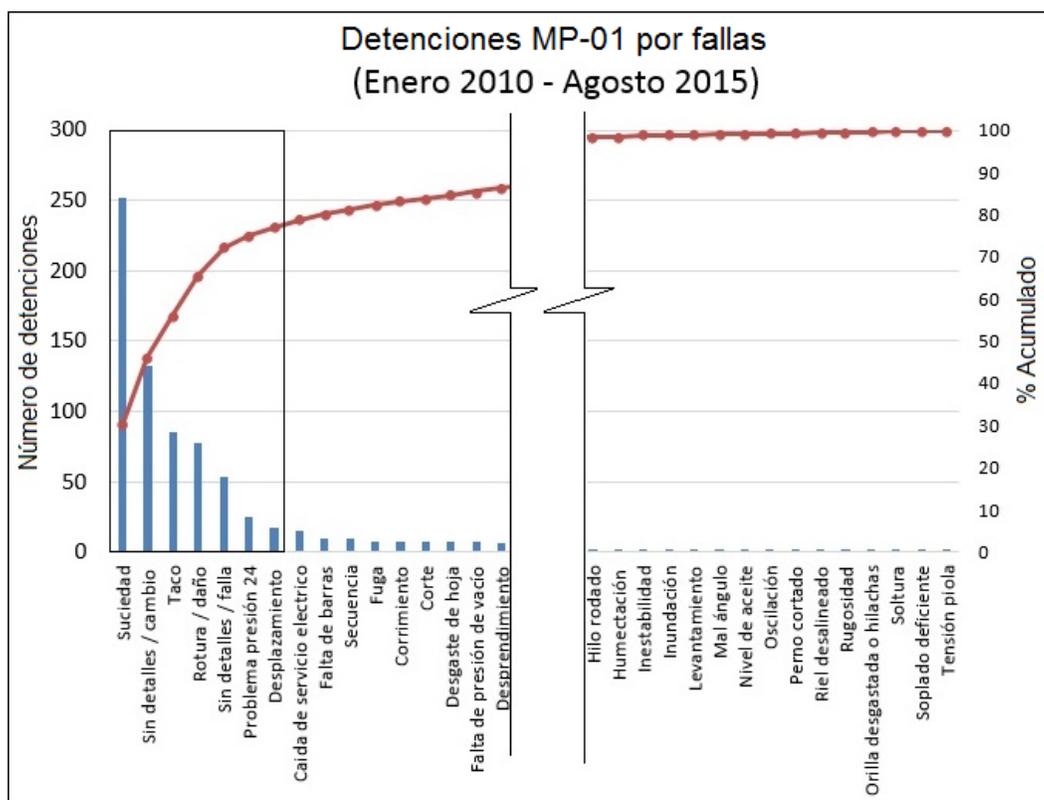


Figura 7.4.2 Diagrama de Pareto detenciones en MP-01 por fallas

Según el gráfico basado en teoría de Pareto, el 80% de las detenciones totales de la MP-01 son causadas solo por el 20% de las fallas, estas fallas son las siguientes:

- Suciedad
- Sin detalles / cambio
- Taco
- Rotura / daño
- Sin detalles / falla
- Problemas de presión
- Desplazamiento

Como se puede observar, la mayoría de las detenciones son causadas por factores de suciedad presente en la MP-01, esta suciedad corresponde principalmente a pasta proveniente del mismo proceso de fabricación, que queda alojada en los componentes, lo anterior muestra la deficiencia en los sistemas de limpieza que están instalados actualmente.

La segunda causa de detención es Sin Detalles/cambio, lo que proporciona información acerca de lo poco detallados que es la toma de datos en los procesos de intervención, esto influye negativamente en la toma de medidas de mitigación de fallas para lograr aumentar la confiabilidad.

En conjunto con el análisis de indicadores de medida de eficiencia en mantenimiento, esto podría ser una de las principales causas de baja confiabilidad, porque al no tener información de buena calidad, no se pueden identificar plenamente los componentes críticos y con ello mejorar disponibilidad.

Una propuesta de un plan de buena toma de datos o registros de información de intervenciones, sería un buen primer paso para aumentar y mejorar confiabilidad.

#### **7.4.3. Detenciones Prensas por sub-sistemas**

Como el diagrama de Pareto general determinó que el mayor número de detenciones es originado por la influencia de Sistema Prensas, se realizará un diagrama de Pareto de segundo orden para identificar los sub-sistemas críticos de dicho sistema.

Tabla 7.4.3 Resumen base de datos detenciones en Prensas por sub-sistemas

Sub-sistemas de Prensas	N° Detenciones	Frecuencia acumulada	% Acumulado
Cuarta prensa	174	174	36,94
Tri Nip	119	293	62,21
Prensa pick up	108	401	85,14
Primera prensa	38	439	93,21
Sin clasificación	16	455	96,60
Tercera prensa	16	471	100,00
<b>Total</b>	<b>471</b>		

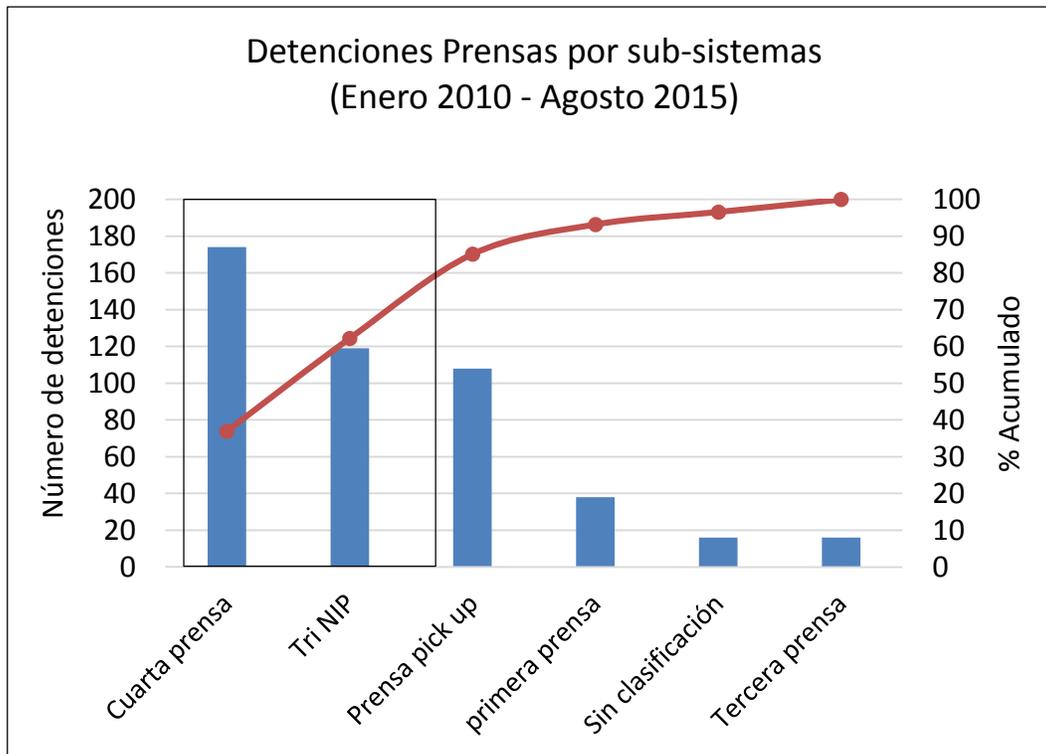


Figura 7.4.3 Diagrama de Pareto detenciones en Prensas por Sub-sistemas

Como se puede apreciar en el diagrama de Pareto el Sub-sistema Cuarta Prensa es el que aporta mayor número de detenciones (174) a la MP-01, por lo que es motivo de estudio según teoría del 80:20, queda en evidencia que este sub-sistema es crítico en la máquina, por lo que posteriormente se procederá a hacer un análisis de tercer orden.

#### 7.4.4. Detenciones Prensas por falla

Tabla 7.4.4 Resumen base de datos detenciones en Prensas por fallas

<b>Fallas en Prensas</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Frecuencia acumulada</b>	<b>% Acumulado</b>
Suciedad	215	215	51,07
Sin detalles / cambio	88	303	71,97
Rotura / daño	24	327	77,67
Desplazamiento	13	340	80,76
Taco	13	353	83,85
Problema de presión	10	363	86,22
Desgaste de hoja	6	369	87,65
Desprendimiento	6	375	89,07
Falta de presión de vacío	6	381	90,50
Taponamiento	4	385	91,45
Cuña hidráulica	3	388	92,16
Orificio	3	391	92,87
Secuencia	3	394	93,59
Arruga	2	396	94,06
Flameo	2	398	94,54
Marca en hoja	2	400	95,01
Regulación	2	402	95,49
Accionamiento	1	403	95,72
Corrimiento	1	404	95,96
Corte	1	405	96,20
Corte defectuoso	1	406	96,44
Enclavamiento	1	407	96,67
Falla rodamiento	1	408	96,91
Falla toberas	1	409	97,15
Fuga de aire	1	410	97,39
Levantamiento	1	411	97,62
Oscilación	1	412	97,86
Pliegue	1	413	98,10
Problema de pasada cinta	1	414	98,34
Rodamiento	1	415	98,57
Rugosidad	1	416	98,81
Soltura	1	417	99,05
Tensión	1	418	99,29
Trabamiento	1	419	99,52
Transferencia hoja	1	420	99,76
Vibraciones	1	421	100,00
<b>Total</b>	<b>421</b>		

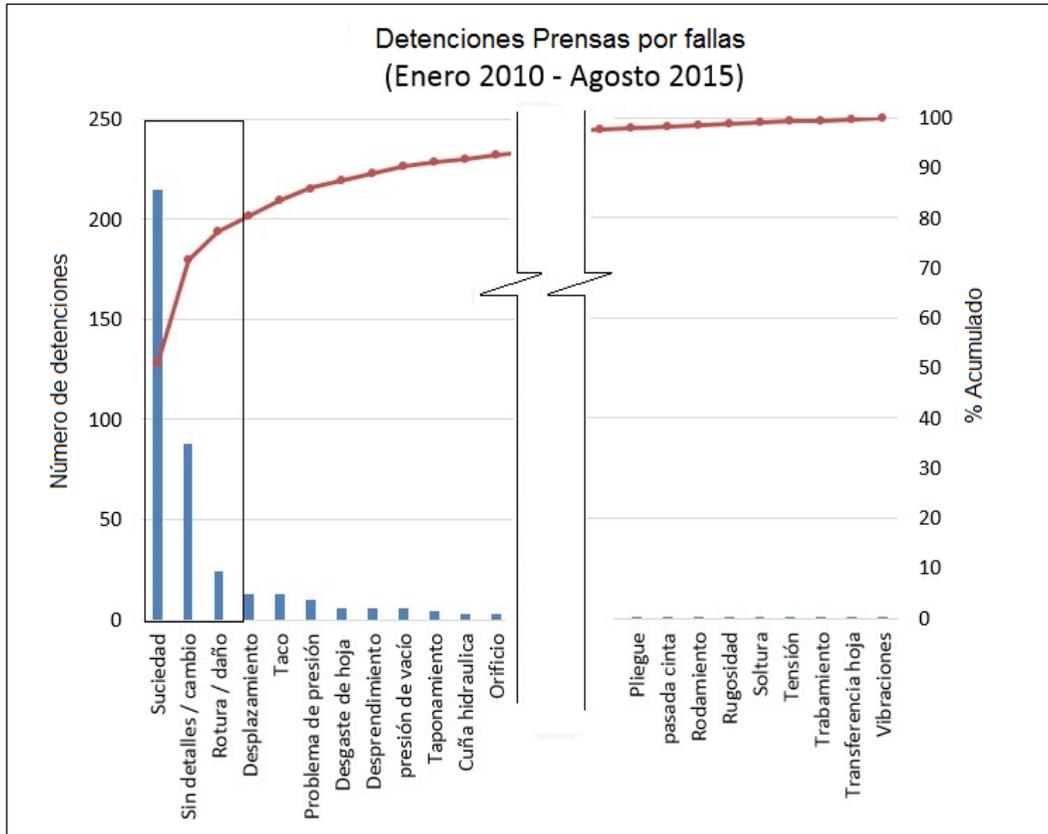


Figura 7.4.4 Diagrama de Pareto detenciones en Prensas por fallas

Según el gráfico basado en teoría de Pareto, el 80% de las detenciones totales de Sistema Prensas, son causadas solo por el 20% de las fallas, estas fallas son las siguientes:

- Suciedad
- Sin detalles / cambio
- Rotura /daño
- Desplazamiento

Nuevamente al igual que el total de detenciones de la MP-01 la mayoría de las detenciones son originadas por la deficiencia en los sistemas de limpieza y en segundo lugar Sin Detalles / Cambio, por lo que se concluye lo mismo mencionado anteriormente acerca de la deficiencia en la toma de datos en las intervenciones a equipos.

#### 7.4.5. Detenciones Cuarta Prensa por componentes

Como anteriormente se determinó mediante análisis de Pareto a un 2° nivel (ver Figura 6.2.2), que el Sub-sistema Cuarta Prensa es el que origina mayoría de las detenciones del proceso, se procede a realizar un análisis de Pareto de 3° orden para identificar los componentes de Cuarta Prensa que influye mayormente en estas detenciones.

Tabla 7.4.5 Resumen base de datos detenciones en Cuarta Prensas por componentes

Componentes Cuarta prensa	N° Detenciones	Frecuencia acumulada	% Acumulado
Paño	75	75	43,10
Raspadores	69	144	82,76
Bandeja	5	149	85,63
Rodillo aspirante 3.4	5	154	88,51
Sin clasificación	5	159	91,38
Rodillo copado variable 4.3	3	162	93,10
Transmisor presión raspador	3	165	94,83
Caja antiglobos	2	167	95,98
Cortador de hoja	1	168	96,55
Desagüe	1	169	97,13
Encoder	1	170	97,70
Motorreductor	1	171	98,28
Rodillo granito 4.28	1	172	98,85
Tirante de bandeja	1	173	99,43
Tobera de regadera	1	174	100,00
<b>Total</b>	<b>174</b>		

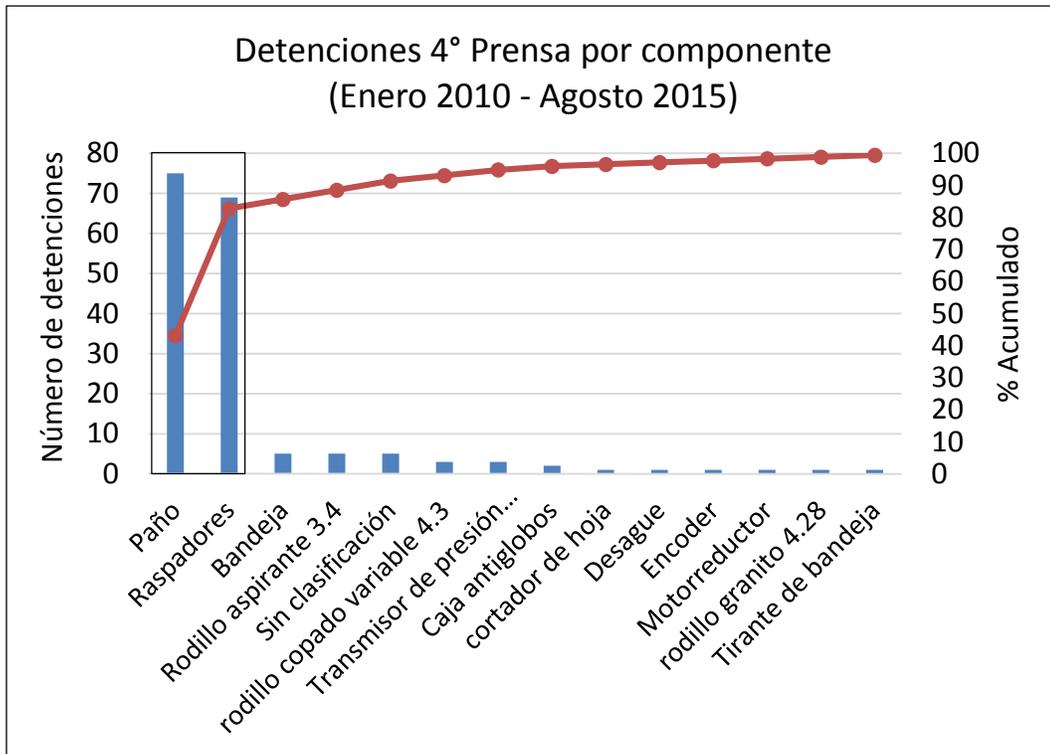


Figura 7.4.5 Diagrama de Pareto detenciones Cuarta Prensas por componente

Según el diagrama, se evidencia que los componentes de Cuarta Prensa que producen mayor número de detenciones al proceso según teoría de Pareto, son los siguientes:

- Paño
- Raspadores

Los diagramas de Pareto realizados permiten identificar a estos dos elementos como críticos para el proceso en términos de detenciones y también asociarlos. *Un raspador permite que no se acumule mugre en los rodillos, los que están en contacto directo con el paño, entonces, si falla un raspador, el paño fallará por acumulación de suciedad entre Paño-Rodillo.* Para confirmar que está sucediendo lo descrito en esta hipótesis, en siguientes secciones se procederá a realizar análisis de Pareto de las fallas que producen las detenciones tanto para Paño y Raspadores por separado.

#### 7.4.6. Detenciones Cuarta Prensa por fallas

En este análisis, se efectuará un diagrama de Pareto de las detenciones del Sub-sistema Cuarta Prensa ocasionadas por fallas, con el fin de identificar las fallas que aportan la mayoría de detenciones a este sub-sistema.

Tabla 7.4.6 Resumen base de datos detenciones en Cuarta Prensas por fallas

<b>Fallas en Cuarta Prensa</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Frecuencia acumulada</b>	<b>% Acumulado</b>
Suciedad	75	75	44,91
Sin detalles / cambio	38	38	67,66
Rotura / daño	8	8	72,46
Taco	8	8	77,25
Desprendimiento	6	6	80,84
Presión	4	4	83,23
Taponamiento	4	4	85,63
Cuña hidráulica	3	3	87,43
Desplazamiento	3	3	89,22
Falta presión de vacío	3	3	91,02
Enclavamiento	2	2	92,22
Marca en hoja	2	2	93,41
Accionamiento	1	1	94,01
Arruga	1	1	94,61
Desgaste de hoja	1	1	95,21
Doble corte	1	1	95,81
Flameo	1	1	96,41
Levantamiento	1	1	97,01
Oscilación	1	1	97,60
Pliegue	1	1	98,20
Secuencia	1	1	98,80
Tensión	1	1	99,40
Vibraciones	1	1	100,00
<b>Total</b>	<b>167</b>		

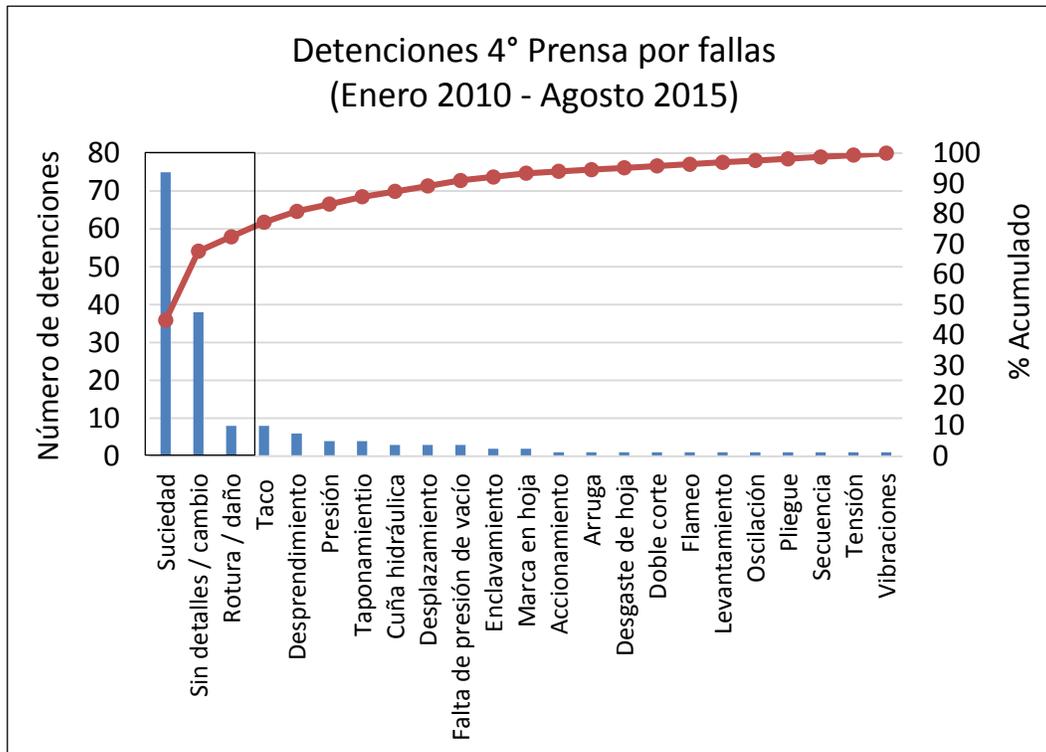


Figura 7.4.6 Diagrama de Pareto detenciones Cuarta Prensa por fallas

Según el diagrama basado en la teoría de Pareto, la mayoría de detenciones son producto de:

- Suciedad
- Sin detalles / cambio
- Rotura / daño

El análisis del gráfico indica que el 80% de las detenciones del Sub-sistema Cuarta Prensa son ocasionadas solo por el 20% de las fallas totales de dicho Sub-sistema, estas corresponden a Suciedad, Sin detalles/cambio y Rotura/daño, según la teoría del 80:20 propuesta por Pareto.

Con el fin de identificar una relación Paño – Raspadores se realizará un análisis de Pareto de cada uno por separado, tomando en cuenta las fallas que originan detenciones en estos.

### 7.4.7. Detenciones Paño Cuarta Prensa por fallas

Tabla 7.4.7 Resumen base de datos detenciones Paño Cuarta Prensas por fallas

Fallas Paño 4° Prensa	N° Detenciones	Frecuencia acumulada	% Acumulado
Suciedad	42	42	57,53
Sin detalles / cambio	9	51	69,86
Rotura / daño	7	58	79,45
Desprendimiento	6	64	87,67
Desplazamiento	3	67	91,78
Marca en hoja	2	69	94,52
Arruga	1	70	95,89
Levantamiento	1	71	97,26
Pliegue	1	72	98,63
Vibraciones	1	73	100,00
<b>Total</b>	<b>73</b>		

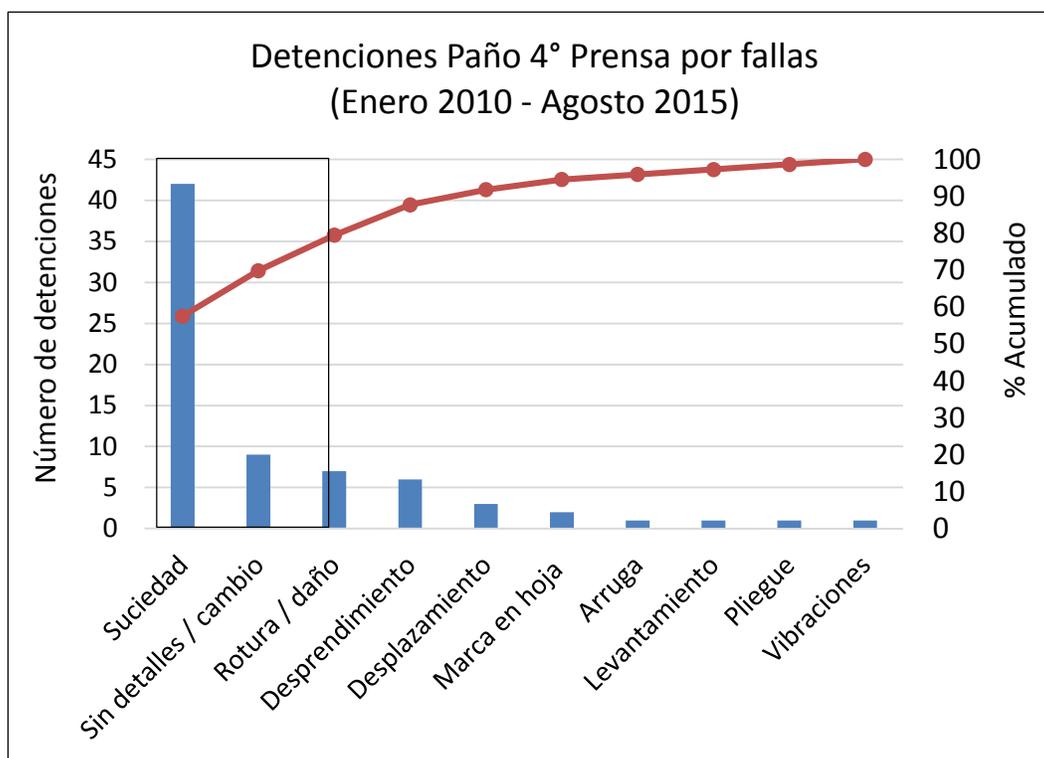


Figura 7.4.7 Diagrama de Pareto detenciones Paño Cuarta Prensas por fallas

Según el diagrama basado en teoría de Pareto, el 80% del total de detenciones del Paño, son causadas por el 20% del total de fallas, estas son Suciedad, Sin detalles/cambio y Rotura/daño.

### 7.4.8. Detenciones Raspadores Cuarta Prensas por fallas

Tabla 7.4.8 Resumen base de datos detenciones Raspadores Cuarta Prensas por fallas

Fallas Raspadores 4° Prensa	N° Detenciones	Frecuencia acumulada	% Acumulado
Suciedad	31	31	44,9
Sin detalles / cambio	26	57	82,6
Taco	6	63	91,3
Desgaste de hoja	1	64	92,8
Enclavamiento	1	65	94,2
Secuencia	1	66	95,7
Oscilación	1	67	97,1
Falsa alarma	1	68	98,6
Gotera	1	69	100,0
<b>Total</b>	<b>69</b>		

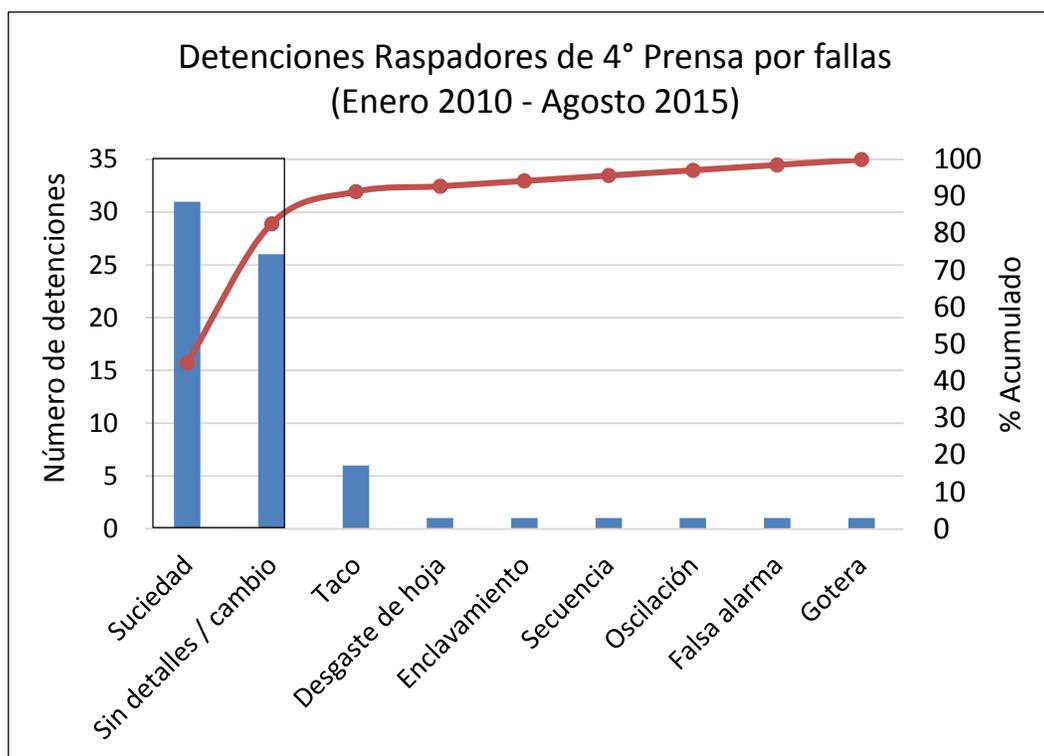


Figura 7.4.8 Diagrama de Pareto detenciones Raspadores Cuarta Prensas por fallas

Según el diagrama basado en teoría de Pareto, el 80% del total de detenciones de los Raspadores de Cuarta Prensa, son causadas por el 20% del total de fallas, estas son Suciedad, Sin detalles/cambio.

#### **7.4.9. Conclusiones de análisis de Pareto**

Como el análisis de Pareto tanto de las detenciones de Paño y Raspadores de Cuarta Prensa, ambos realizados por separado, dieron como resultado que la mayoría de las detenciones de estos componentes eran ocasionadas por Suciedad, se confirma entonces, la hipótesis propuesta en la sección 7.4.5, que dice:

*Un raspador permite que no se acumule mugre en los rodillos, los que están en contacto directo con el paño, entonces, si falla un raspador, el Paño fallará por acumulación de suciedad entre Paño-Rodillo. (Ver sección 8.2).*

Es decir, se puede afirmar bajo análisis respaldado por teoría de Pareto que, el paño falla mayormente producto una deficiencia en las tareas de limpieza efectuada por los Raspadores, los cuales no están especificados en la base de datos, por lo que no se puede individualizar algún raspador en particular, ya que están todos en una misma clasificación (Raspadores Cuarta Prensa).

A modo de complementar el estudio realizado mediante método de Pareto, se efectuará un análisis mediante el método de Jackknife, el que da una visión en función de la repetición de los eventos y además, tiempos promedio de reparación (MTTR), esto permite tener mejores criterios de determinación de elementos críticos para el sistema.

## 7.5. Aplicación método de Jackknife

### 7.5.1. Detenciones MP-01 por sistemas

Tabla 7.5.1 Resumen base de datos detenciones MP-01 por sistemas

Código	Sistemas MP-01	Nº Detenciones	Tiempo (Hrs)	MTTR (Hrs)
1	Prensas	471	613,50	1,30
2	Secador	194	194,00	1,00
3	Formación	120	257,80	2,15
4	Calandria-Pope	96	106,90	1,11
5	Sistema eléctrico	58	160,80	2,77
6	Sist. Externo. (Pulpa)	47	179,60	3,82
7	Sistema hidráulico	19	38,90	2,05
8	Sist. Externo. (Prep. pasta)	16	17,80	1,11
9	Sistema neumático	13	12,40	0,95
10	Sistema de vacío	12	5,80	0,48
11	Sist. Ext. (caldera)	12	19,25	1,60
12	Sist. Ext. (vapor)	2	1,50	0,75
13	Sist. Ext. (red de incendios)	1	4,10	4,10
		<b>1061</b>	<b>1612,35</b>	

Del análisis anterior fue excluido el ítem Terremoto, ya que no es una causa atribuible al proceso y su influencia en términos de tiempo no es representativa para el estudio.

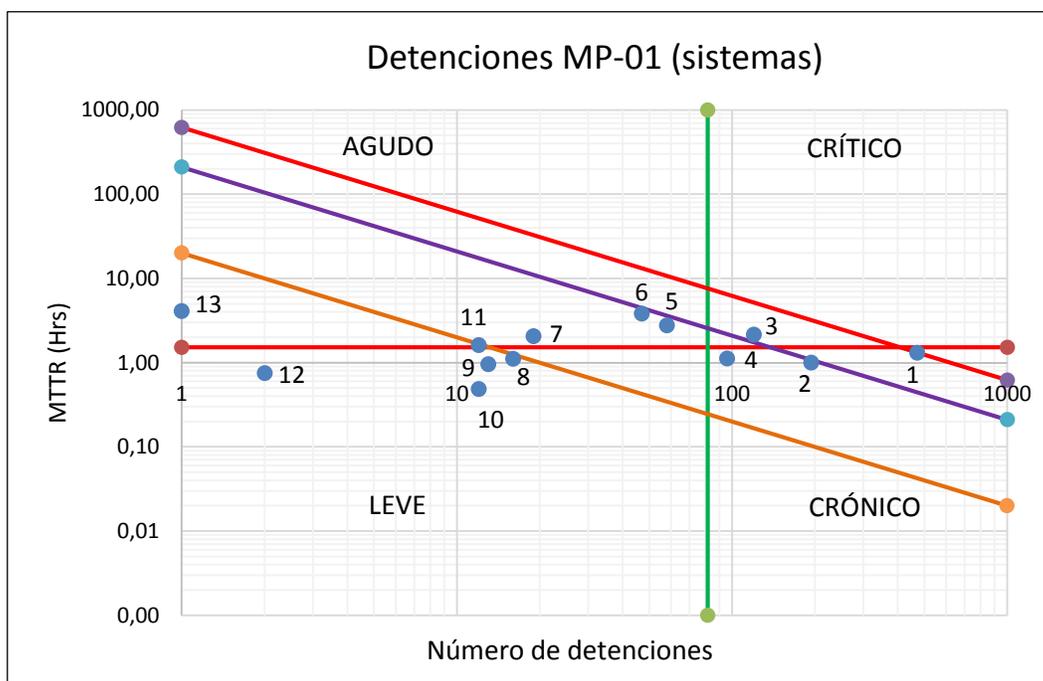


Figura 7.5.1 Diagrama de Jackknife detenciones en MP-01 por sistemas

En el diagrama de Jackknife presentado anteriormente se pueden apreciar 4 cuadrantes (AGUDO, LEVE, CRÍTICO, CRÓNICO), que representan:

- AGUDO: Detenciones con alto tiempo de reparación y baja frecuencia.
- LEVE: Detenciones con bajo tiempo de reparación y baja frecuencia.
- CRÍTICO: Detenciones con alto tiempo de reparación y alta frecuencia.
- CRÓNICO: Detenciones con bajo tiempo de reparación y alta frecuencia.

En el diagrama de la Figura 7.5.1 se puede observar que los sistemas con menos mantenibilidad (ver Sección 5.3.3) corresponden a los códigos ubicados en los cuadrantes superiores. Como el objetivo del estudio corresponde a generar aumento de confiabilidad, se decide poner atención en sistemas con baja confiabilidad, los que corresponden a los códigos ubicados más a la derecha en el diagrama, códigos 1 y 2, correspondientes a sistema Prensas y Secador.

Dentro de estos 4 cuadrantes, se clasifican las detenciones de los distintos sistemas de la MP-01 obteniendo distinto grado de criticidad, según criterios de MTTR (Hrs) y n° de detenciones. Se presentan además, las líneas de Iso-indisponibilidad que como su nombre lo indica son las detenciones en la MP-01 que provocan igual indisponibilidad en el proceso, por ejemplo, los códigos 2, 3, 5 y 6 producen cada uno una indisponibilidad en el proceso de aproximadamente 0.4% es decir, que los cuatro puntos juntos suman una indisponibilidad de aproximadamente 1.2% y el código 1 por si solo produce indisponibilidad de 1.2%, ambos en todo el periodo de estudio, esto quiere decir que, en términos de mejorar la disponibilidad de la MP-01, solucionar el problema en Prensas, sería igual que solucionar los problemas en Secador, Formación, Sistema eléctrico y Falta de pulpa.

Notas:

1. Se dejó fuera el ítem Terremoto de 2010 por tratarse de una causa no atribuible al sistema de producción, no obstante, este ítem representaba una indisponibilidad de un 3%.
2. Para mejorar mantenibilidad en Sistema Formación sería conveniente reducir MTTR.
3. El Sistema con mayor número de detenciones corresponde a Prensas, el cual está a punto de pasar al cuadrante de crítico y es necesario prestar atención ya que pertenece al cuadrante de fallas crónicas, concordando así con el análisis de Pareto, el cual tiene como base el número de detenciones producidas por cada elemento o sistema de la MP-01 en este caso.

### 7.5.2. Detenciones MP-01 por fallas

Para realizar el siguiente diagrama de Jackknife, se utilizaron los datos proporcionados, estos se encuentran en la sección Anexos (Pág. 110)

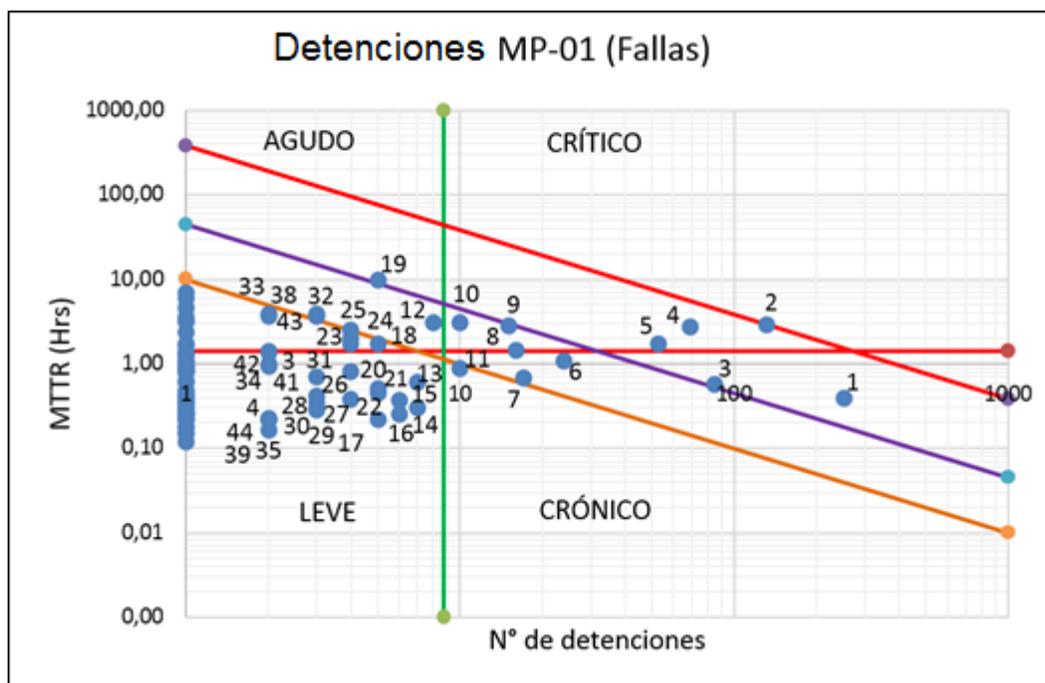


Figura 7.5.2 Diagrama de Jackknife detenciones en MP-01 por fallas

Por un motivo gráfico, en el diagrama se omitió la numeración de aquellas fallas que se repiten solo una vez ( $N^{\circ}$  de detenciones = 1), no obstante, la omisión de esta numeración es solo gráfica y no influye en la correcta interpretación de los datos de mayor importancia, que son aquellos que pertenecen a los cuadrantes crítico y crónico.

Tal como se determinó mediante método de Pareto, la falla que aporta la mayoría de detenciones al proceso según método de Jackknife, es Suciedad (código 1), que, al encontrarse dentro del cuadrante de fallas crónicas, no es beneficioso para mejorar confiabilidad, ahora bien, si se requiere aumentar mantenibilidad, es necesario prestar atención a las fallas ubicadas en los cuadrantes superiores, procurando disminuir los tiempos promedios de intervención (MTTR).

**7.5.3. Detenciones Prensas por Sub-sistemas**

Tabla 7.5.3 Resumen base de datos detenciones Prensas por Sub-sistemas

Código	Sub-sistemas de Prensas	N° Detenciones	Tiempo (Hrs)	MTTR (Hrs)
1	Cuarta prensa	174	211,20	1,21
2	Tri Nip	119	77,20	0,65
3	Prensa pick Up	108	168,70	1,56
4	Primera prensa	38	90,60	2,38
5	Tercera prensa	16	47,40	2,96
6	Todas prensas	8	14,80	1,85
		<b>463</b>	<b>609,90</b>	

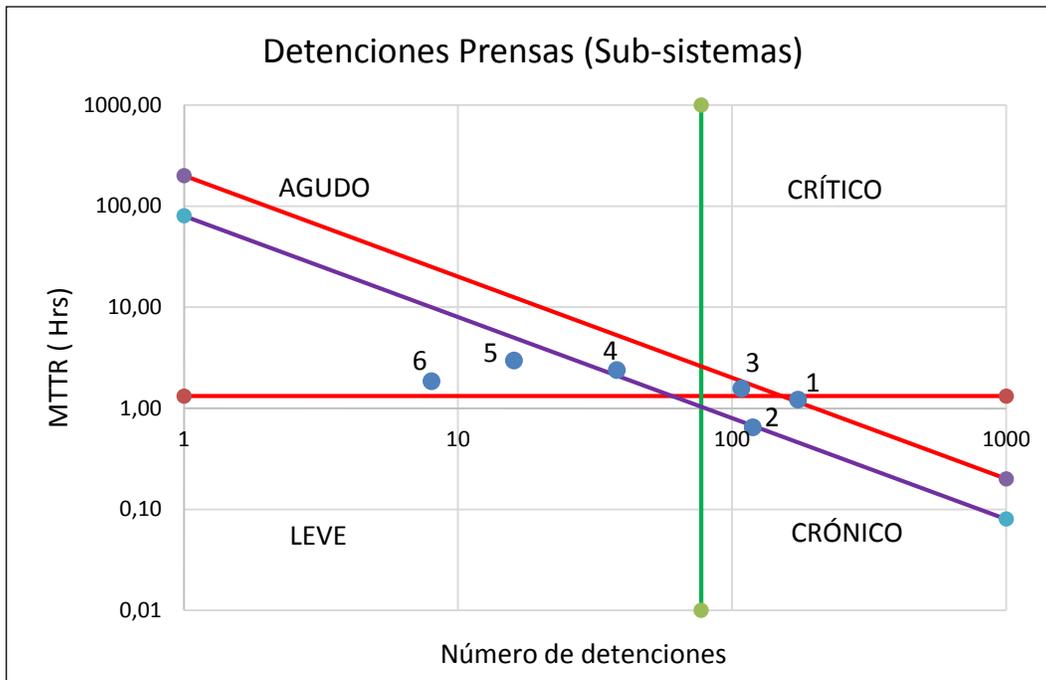


Figura 7.5.3 Diagrama de Jackknife detenciones en Prensas por Sub-sistemas

Al igual que por método de Pareto, el análisis mediante Jackknife, da como resultado al Sub-sistema Cuarta Prensa como problemático, al encontrarse cercano a la línea límite de MTTR, considerándolo como crónico-crítico, además, causando la mayor indisponibilidad para el proceso (sobre línea roja de iso-indisponibilidad), lo que reafirma las conclusiones mediante la teoría de Pareto.

### 7.5.4. Detenciones Prensas por fallas

La tabla asociada al diagrama de Jackknife siguiente se encuentra en la sección Anexos (Pág. 113).

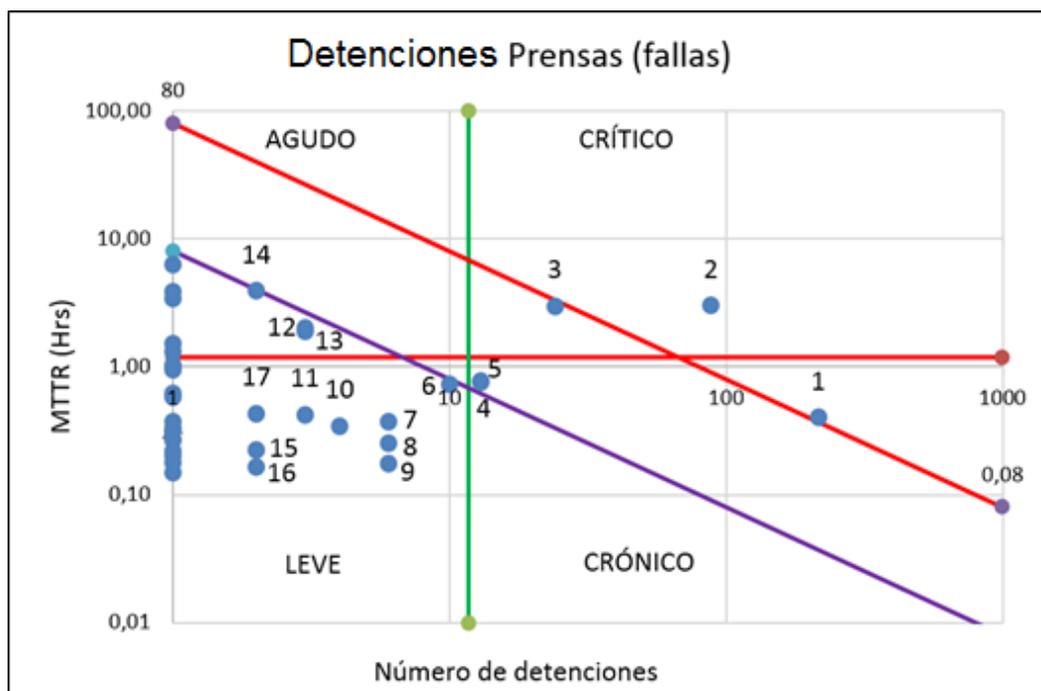


Figura 7.5.4 Diagrama de Jackknife detenciones en Prensas por fallas

Se observa en la gráfica de Jackknife que los ítems 1 y 3, correspondientes a fallas: Suciedad y Rotura/daño, están en la misma línea de iso-indisponibilidad (de 0.15% para el periodo completo de estudio), lo que quiere decir según el gráfico, que estas fallas generan la misma indisponibilidad al proceso completo, por ende, si se quieren solucionar problemas en términos de disponibilidad, se obtendrían los mismos resultados mitigando fallas de Suciedad o Rotura/Daño, por supuesto, en caso de ser necesario, se tomaría la opción que represente mayor conveniencia en términos económicos y de seguridad.

La falla que genera mayor indisponibilidad a la máquina es Sin Detalles/Cambio, por ende, al no existir detalles, no se pueden tomar decisiones influyentes que mejoren el sistema, no obstante, la falla con un alto índice de prioridad de mejoramiento es Suciedad.

### 7.5.5. Detenciones Cuarta Prensa por componente

Tabla 7.5.5 Resumen base de datos detenciones Cuarta Prensa por componentes

<b>Código</b>	<b>Componentes Cuarta Prensa</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Tiempo Total (Hrs)</b>	<b>MTTR (Hrs)</b>
1	Paño	75	124,90	1,67
2	Raspadores	50	19,08	0,38
3	Raspador principal	14	6,16	0,44
4	Bandeja	5	2,38	0,48
5	Rodillo aspirante 3.4	5	19,01	3,80
6	Rodillo copado variable 4.30	3	26,25	8,75
7	Transmisor presión raspador	3	1,20	0,40
8	Caja antiglobos	2	0,50	0,25
9	Cortador de hoja	1	0,40	0,40
10	Desagüe	1	0,30	0,30
11	Encoder	1	1,03	1,03
12	Moto-reductor	1	0,75	0,75
13	Raspador abierto	1	0,22	0,22
14	Raspador auxiliar	1	0,32	0,32
15	Raspador cilindro	1	0,32	0,32
16	Raspador inferior	1	0,35	0,35
17	Raspador secundario	1	4,67	4,67
18	Rodillo de granito 4.28	1	0,70	0,70
19	Tirante de bandeja	1	0,27	0,27
20	Tobera regadera raspador sup.	1	0,55	0,55
		<b>169</b>	<b>209,36</b>	

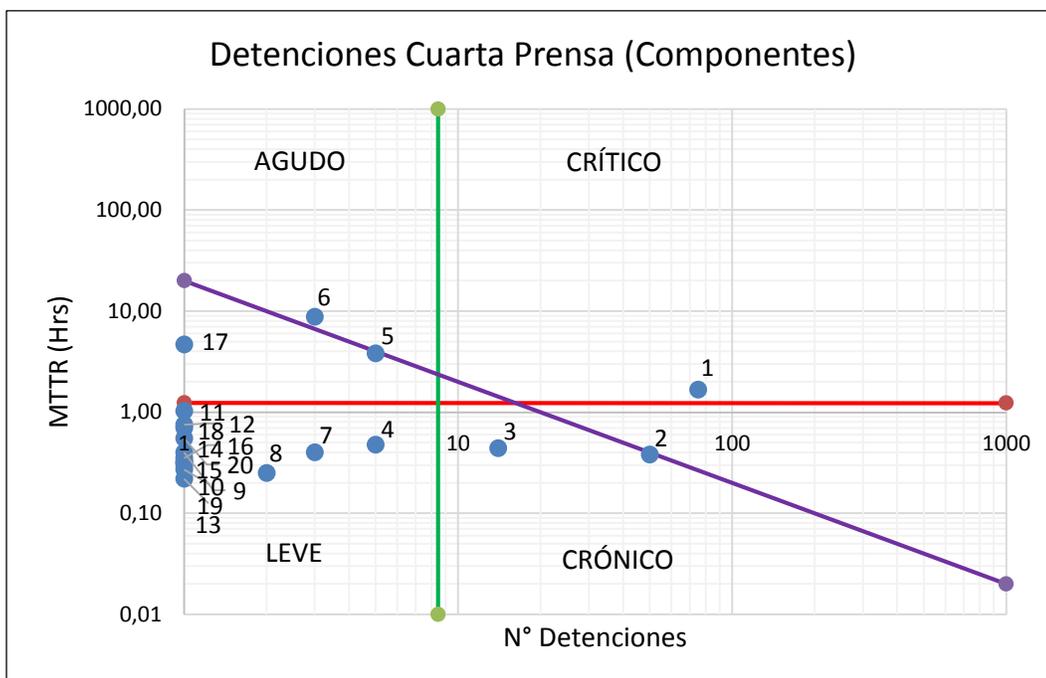


Figura 7.5.5 Diagrama de Jackknife detenciones en Cuarta Prensa por componente

Según el gráfico, se tiene un elemento que destaca en criticidad, este es el Paño de Cuarta Prensa, identificación que viene a complementar lo concluido mediante análisis de Pareto, dicho elemento por encontrarse en el cuadrante correspondiente a críticos, lo hace motivo de estudio para poder tomar acciones de mitigación de detenciones para lograr aumentar la confiabilidad, al igual que el Sistema Raspadores, que se encuentra en el cuadrante de componentes crónicos, de los cuales solo un mínimo porcentaje (27.5%) se encuentran especificados, por este motivo, en un análisis posterior, se decide agruparlos todos en una misma clasificación (Raspadores de Cuarta Prensa). De la misma manera que mediante aplicación del método de Pareto, asociando los componentes problemáticos, se puede decir que: *Un raspador permite que no se acumule mugre en los rodillos, los que están en contacto directo con el paño, entonces, si falla un raspador, el paño fallará por acumulación de suciedad entre Paño-Rodillo.*

A modo de apoyo y tal como lo muestra el gráfico, los códigos 2 y 5 se ubican sobre la misma línea de iso-indisponibilidad, ello indica que estos puntos correspondientes a Raspadores y Rodillo aspirante 3.4, generan igual indisponibilidad (0,04%) en el proceso, es decir, cada uno genera en promedio, aproximadamente una indisponibilidad de 0,02%, tienen tiempos de detenciones totales muy similares de alrededor de 19 horas cada uno, esto para los Raspadores de Cuarta Prensa que se encuentran sin clasificación.

### 7.5.6. Detenciones Cuarta Prensa por fallas

Se procede a realizar el mismo procedimiento anterior, pero esta vez codificando las fallas del Sub-sistema Cuarta Prensa que ocasionan detenciones del proceso.

Tabla 7.5.6 Resumen base de datos detenciones Cuarta Prensas por fallas

<b>Código</b>	<b>Fallas Cuarta Prensa</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Tiempo (Hrs)</b>	<b>MTTR (Hrs)</b>
1	Suciedad	74	26,35	0,36
2	Sin detalles / cambio	38	94,93	2,50
3	Rotura / daño	8	27,40	3,43
4	Taco	8	7,20	0,90
5	Desprendimiento	6	1,52	0,25
6	Presión	4	1,40	0,35
7	Taponamiento	4	1,38	0,35
8	Cuña hidráulica	3	1,27	0,42
9	Desplazamiento	3	6,58	2,19
10	Falta de presión de vacío	3	1,07	0,36
11	Enclavamiento	2	0,22	0,11
12	Marca en hoja	2	0,33	0,17
13	Accionamiento	1	1,03	1,03
14	Arruga	1	0,33	0,33
15	Desgaste de hoja	1	0,00	0,00
16	Doble corte	1	0,40	0,40
17	Flameo	1	0,22	0,22
18	Levantamiento	1	0,27	0,27
19	Oscilación	1	0,95	0,95
20	Pliegue	1	0,32	0,32
21	Secuencia	1	4,67	4,67
22	Tensión	1	0,27	0,27
23	Vibraciones	1	6,25	6,25
		<b>166</b>	<b>184,36</b>	

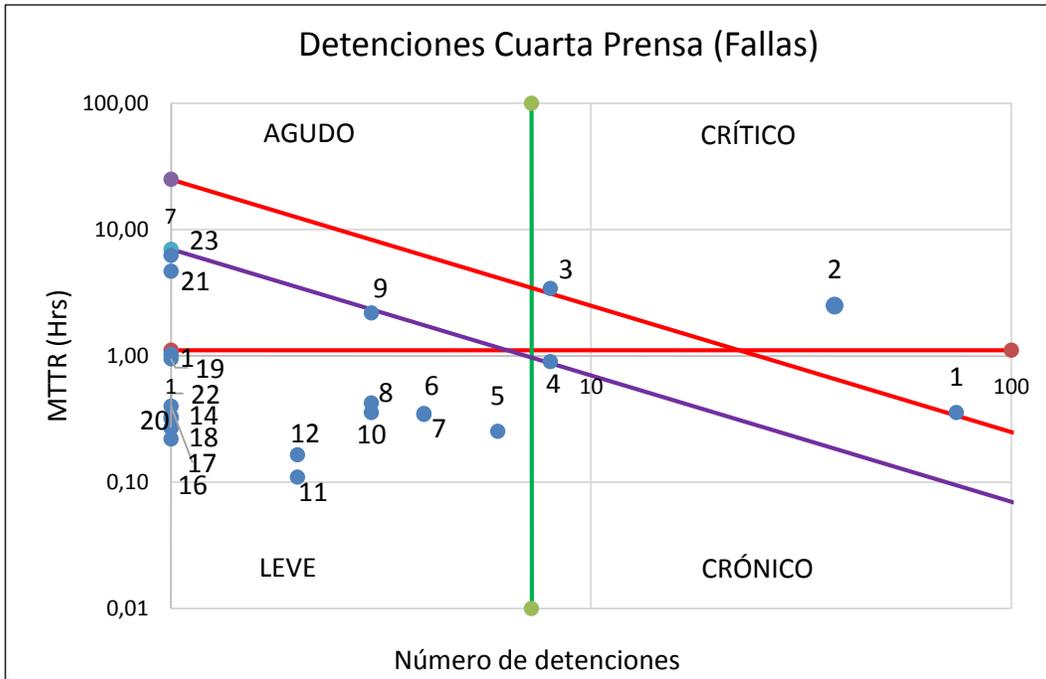


Figura 7.5.6 Diagrama de Jackknife detenciones en Cuarta Prensa por fallas

Como muestra el gráfico la detención que genera mayor indisponibilidad en el proceso es Sin Detalles/Cambio, por lo que no se pueden tomar decisiones de mejoras relacionadas con este concepto, no obstante, se está generando una consciencia de la importancia que tiene la toma de datos de buena calidad en las decisiones estratégicas de la empresa. La falla que presenta un alto índice de detenciones, corresponde a Suciedad, ya que se encuentra en el cuadrante crónico según análisis de Jackknife.

Como apoyo, se muestra en la gráfica las líneas de iso-indisponibilidad para el proceso, en la línea roja de iso-indisponibilidad total 0.05% se encuentran Suciedad y Rotura/Daño, lo que indica que ambos están generando la misma indisponibilidad en el proceso.

**7.5.7. Detenciones Paño de Cuarta Prensa por fallas**

Tabla 7.5.7 Resumen base de datos detenciones Paño por fallas

Código	Fallas Paño 4° Prensa	N° Detenciones	Tiempo (Hrs)	MTTR (Hrs)
1	Suciedad	42	17,16	0,41
2	Sin detalles / cambio	9	67,77	7,53
3	Rotura / daño	7	19,67	2,81
4	Desprendimiento	6	1,52	0,25
5	Desplazamiento	3	6,58	2,19
6	Marca en hoja	2	0,33	0,17
7	Arruga	1	0,33	0,33
8	Levantamiento	1	0,27	0,27
9	Pliegue	1	0,32	0,32
10	Vibraciones	1	6,25	6,25
		<b>73</b>	<b>120,20</b>	

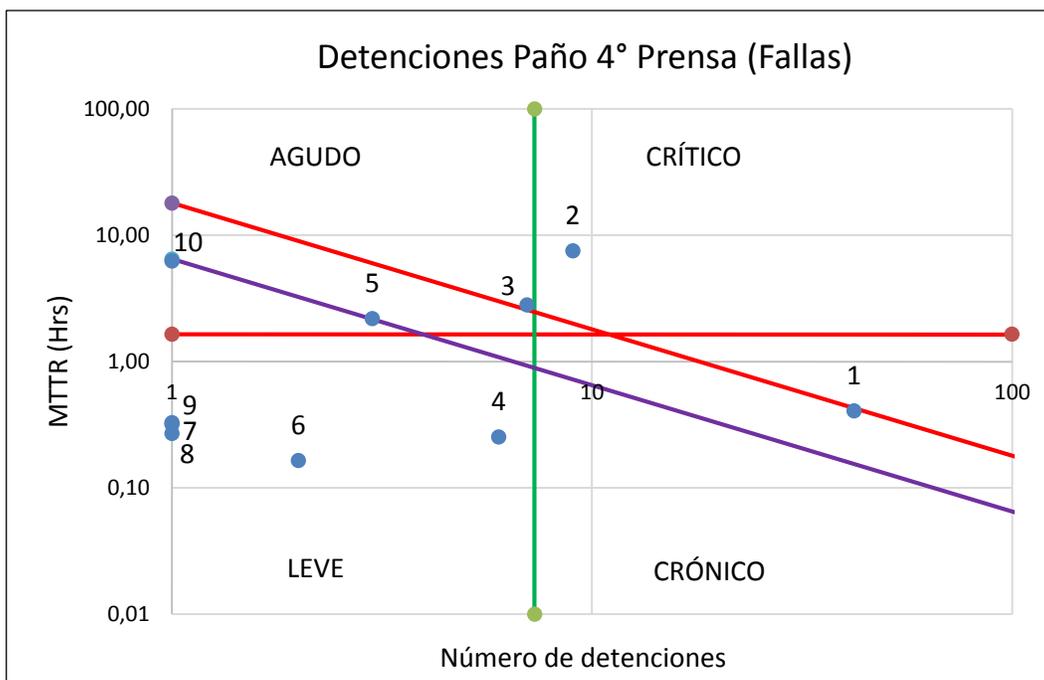


Figura 7.5.7 Diagrama de Jackknife detenciones Paño Cuarta Prensa por fallas

Según el gráfico basado en teoría de Jackknife, la falla que causa la mayoría de detenciones en el Paño de Cuarta Prensa es Suciedad, esta se encuentra en el cuadrante de fallas crónicas, por lo que se puede concluir que es la falla identificable que presenta mayores problemas para el paño, también está presente Sin detalles/cambio, con lo cual no se pueden tomar decisiones concluyentes para este concepto.

A modo de apoyo se trazaron en el gráfico de Jackknife, las líneas de iso-indisponibilidad (diagonales), para la línea roja de 0,036% de indisponibilidad total en el proceso, se tiene que las fallas que generan dicha indisponibilidad, corresponden a Suciedad y Rotura/Daño, que al igual que en análisis de Jackknife anterior, indica que cada uno de estos ítems generan en promedio una indisponibilidad de 0,018% en el proceso, para el tiempo estudiado, mismo análisis se puede hacer para la línea morada de iso-indisponibilidad 0,013% en la cual se ubican las fallas por desplazamientos y vibraciones.

#### 7.5.8. Detenciones Raspadores de Cuarta Prensa por fallas

Tabla 7.5.8 Resumen base de datos detenciones Raspadores Cuarta Prensa por fallas

<b>Código</b>	<b>Fallas Raspadores 4° Prensa</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Tiempo (Hrs)</b>	<b>MTTR (Hrs)</b>
1	Suciedad	29	8,45	0,29
2	Sin detalles / cambio	26	10,20	0,39
3	Taco	6	5,58	0,93
4	Desgaste de hoja	1	0,00	0,00
5	Enclavamiento	1	0,22	0,22
6	Secuencia	1	4,67	4,67
7	Oscilación	1	0,95	0,95
8	Falsa alarma	1	0,30	0,30
9	Gotera	1	0,23	0,23
		<b>67</b>	<b>30,60</b>	

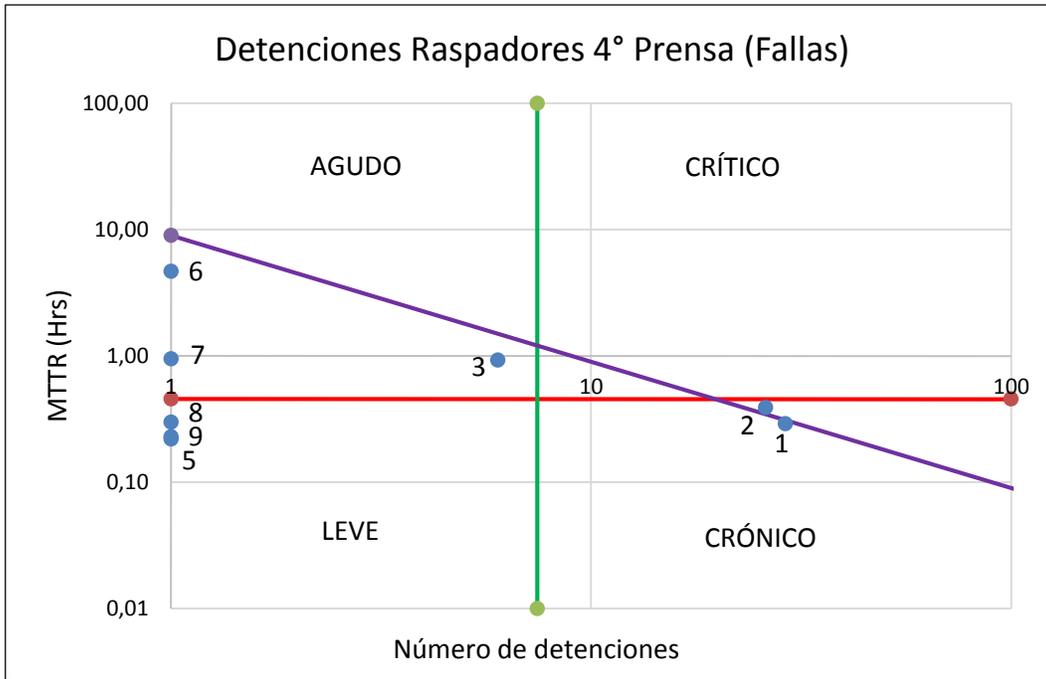


Figura 7.5.8 Diagrama de Jackknife detenciones Raspadores Cuarta Prensa por fallas

Según indica el gráfico, la fallas por conceptos de Suciedad y Sin Detalles/Cambio representan problemas crónicos para el proceso por lo que se deben considerar los raspadores si se requiere aumentar la confiabilidad total del sistema, ya que los elementos pertenecientes al cuadrante crónicos, afectan directamente en este aspecto, lo que no es conveniente para la empresa, además, podría potencialmente estar representando un problema mayor, al influir negativamente en el funcionamiento normal de los paños asociados, lo que significaría incurrir en gastos mayores por parte del departamento de mantención.

### 7.5.9. Conclusiones análisis de Jackknife

Como el análisis de la base de datos mediante la aplicación de la metodología de Jackknife, dio como resultado que los componentes que presentan un alto grado de prioridad de mejoramiento, si se requiere un aumento en la confiabilidad de la máquina, son tanto Raspadores como Paño, ambos de Cuarta Prensa (analizados por separado), se encontró que el problema en común para estos dos componentes es la falla asociada a Suciedad, por lo tanto, basado en la función de los raspadores, se puede confirmar que:

*Un raspador permite que no se acumule mugre en los rodillos, los que están en contacto directo con el paño, entonces, si falla un raspador, el Paño fallará por acumulación de suciedad entre Paño-Rodillo. (Ver sección 8.2).*

Es decir, se puede afirmar respaldado por la aplicación de la metodología de Jackknife, que el Paño de Cuarta Prensa falla mayormente producto una deficiencia en las tareas de limpieza efectuada por los Raspadores, los cuales no están especificados en la base de datos, por lo que no se puede individualizar algún raspador en particular, ya que están todos en una misma clasificación (Raspadores Cuarta Prensa), pero teniendo en cuenta que la raíz del problema se encuentra en este ítem.

## 8. Características y funciones de elementos críticos

### 8.1. Características y funciones de Paños del Sistema Prensas

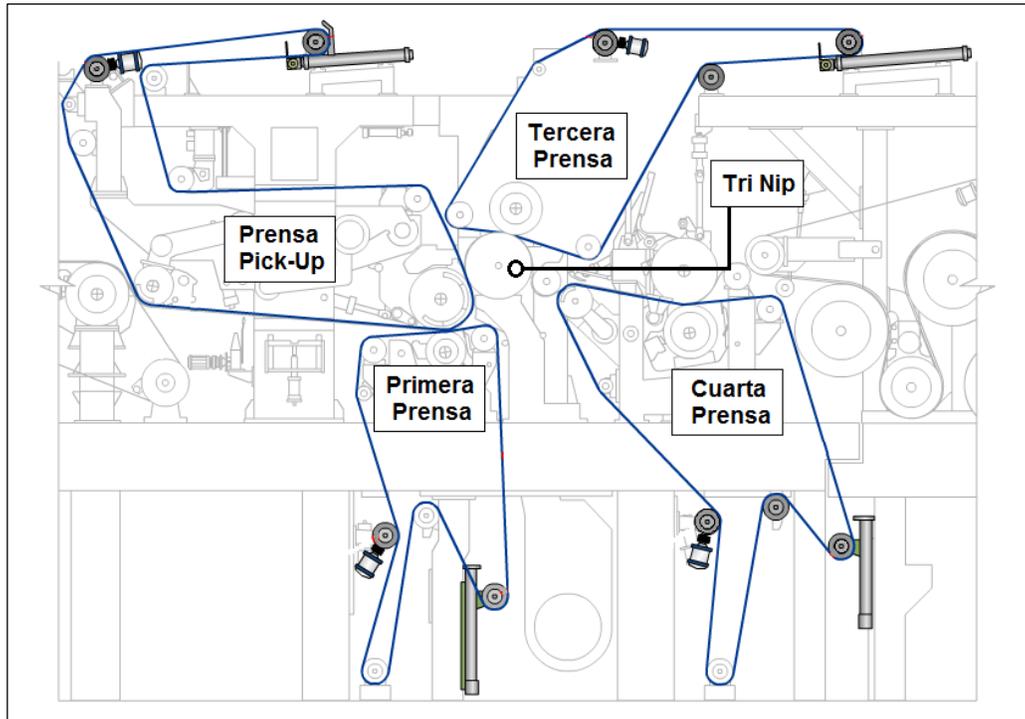


Figura 8.1.1 Paños del Sistema Prensas (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A. Editado)

Los paños son telas que tienen como función ser el soporte permeable de la hoja de papel y maximizar la remoción de agua en los Nip (puntos de contacto de la hoja con rodillos), donde se aplica prensado.

En el Sistema Prensas existen cuatro paños:

- Paño Primera Prensa
- Paño Tercera Prensa
- Paño Prensa Pick Up
- Paño Cuarta prensa

Y tres puntos de contacto entre el papel, rodillos y paños donde se produce el prensado:

- Tri Nip

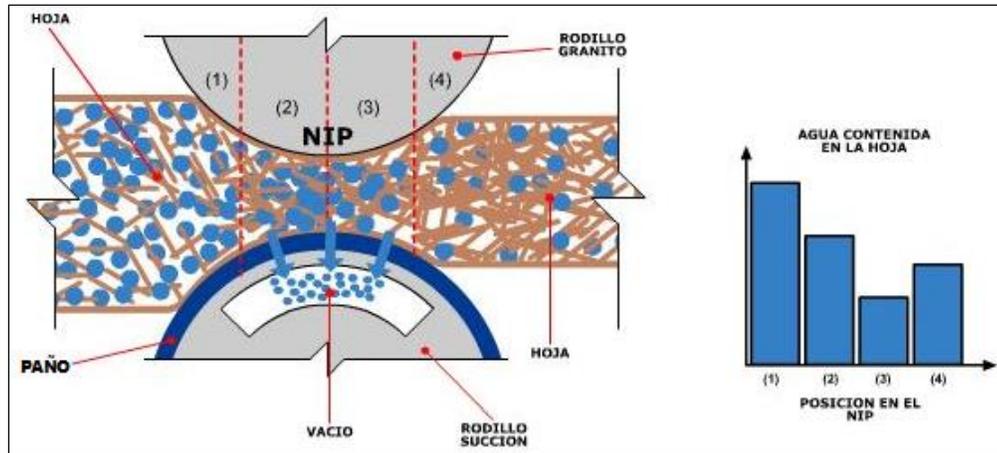


Figura 8.1.2 Diagrama de proceso en Nip (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.)

Como se puede observar en la Figura 8.1.2, la remoción de agua desde el papel se realiza reduciendo el volumen de la hoja mediante compresión en el Nip (estrujamiento), lo que provoca que se sature con agua y se libere el agua residual. Para la remoción, el agua contenida en la hoja se transfiere al paño y desde este al rodillo de succión que forma el Nip, por lo anterior, tanto el paño como el rodillo deben estar destapados, de lo contrario no se produce la remoción de agua y una parte pasaría al rodillo de succión y la otra permanecería en el paño, ocasionando fallas en el paño y problemas operacionales, al no tener un paño con las permeabilidades adecuadas.

La etapa 1 comienza a la entrada de la zona de contacto, donde comienza la compresión y se extiende hasta el punto en donde la hoja se ha saturado, es decir, el agua ha ocupado todos los espacios vacíos existentes entre las fibras, debido a la presión ejercida por la prensa. No existe presión hidráulica y la remoción de agua ocurre solo por fuerzas capilares. La segunda etapa se extiende hasta el punto central del Nip, la hoja se ha saturado y el incremento de la presión hidráulica, hace que el agua sea expulsada desde la hoja al Paño. En esta etapa el Paño llega a su punto máximo de saturación. La etapa 3 comienza en este punto y se extiende hasta el punto de máxima presión y máxima sequedad en la hoja. Esto corresponde al punto en que la presión hidráulica en la hoja es nula, además el Paño comienza a expandirse y a salir de la saturación. La etapa 4 comprende el punto en que la hoja también se expande y deja su saturación y el paño sigue expandiéndose.

En ocasiones, durante la última etapa de la remoción se produce a la salida de Nip un flujo de agua que va desde el Paño a la hoja, fenómeno conocido como rehumectación. Este fenómeno se debe a que la expansión de la hoja crea una entrada de aire en ella, el vacío generado por la expansión de la hoja es mayor que en el paño, lo que produce la circulación de aire y agua en el interior del paño y desde este hacia la hoja. La Figura 8.1.2, la gráfica indica el contenido de agua en el interior de la hoja, la que muestra un leve aumento a la salida del Nip producto de la rehumectación. Para reducir este efecto, debe reducirse al máximo el tiempo de permanencia de la hoja en el Nip.

En la imagen siguiente se aprecian los Paños del Sistema Prensas en operación:



Figura 8.1.3 Paño MP-01 en operación (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.)

El prensado se ve afectado por una serie de factores que pueden ser agrupadas en dos grandes variables, variables de proceso y variables de equipo. Los efectos de cada variable que favorece la remoción de agua se describen en la siguiente tabla.

Tabla 8.1 Factores que favorecen la remoción de agua en los Nip

<b>Naturaleza</b>	<b>Variable</b>	<b>Efecto</b>
<b>Variables de proceso</b>	Presión del Nip	Alta Presión
	Temperatura de la hoja	Alta temperatura
	Contenido de agua en la hoja	Alto contenido de agua
	Rigidez de la fibra	Baja rigidez
<b>Variables de equipo</b>	Superficie rodillo de succión	Alta limpieza de superficie
	Ranuras rodillo de succión	Alta abertura de ranuras
	Permeabilidad del Paño	Alta permeabilidad
	Compactación del Paño	Baja compactación
	Limpieza del Paño	Alta limpieza

Como lo indica la tabla anterior, las condiciones para permitir una buena operación exigen que los Paños tengan una alta permeabilidad y una baja compactación, así como también una alta limpieza y alta abertura de las ranuras en los rodillos asociados. En el caso contrario, que no se den estas condiciones, la máquina presentaría problemas para operar y en particular el Paño, que es un elemento crítico para el proceso, en este se presentaría los modos de falla típicos determinados por el estudio, los cuales son corrimientos, desplazamientos, pliegues y/o deslizamientos, etc. Que son condiciones típicas de acumulación de suciedad (residuos de pasta) en el Paño, lo que significa que permanecerá húmedo, no cumpliendo su función principal, que es ser un soporte permeable para remover la mayor parte de agua de la hoja.

## 8.2. Características y funciones de Raspadores de Sistema Prensas

La función de los raspadores es eliminar del proceso los depósitos de pasta que quedan adheridos a los rodillos, producto del roce con los paños Pick Up, Primera Prensa, Tercera Prensa, Cuarta Prensa. Esta operación permite evitar que los depósitos se impregnen en el papel causando defectos de formación, fallas en componentes asociados y/o cortaduras en el proceso. Un mal funcionamiento se manifiesta en forma de anillos de pasta en los rodillos.

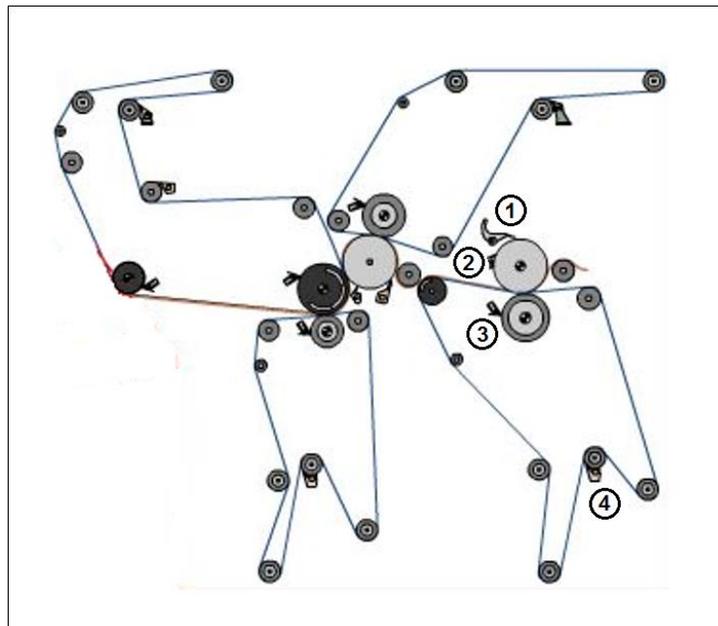


Figura 8.2 Diagrama Raspadores de Sistema Prensas  
(Fuente: Papeles Bío-Bío S.A)

Como se mencionó anteriormente, los raspadores del Sub-sistema Cuarta Prensa no están especificados en la base de datos, motivo por el cual, no se puede individualizar alguno en particular, quedando todos en una misma clasificación (Raspadores de Cuarta Prensa), no obstante, en la Figura 8.2 se especifica según numeración:

- 1) Raspador principal.
- 2) Raspador secundario.
- 3) Raspador Wipper Blade.
- 4) Raspador rodillo guía paño.

En la operación de los raspadores participan dos elementos principales:

- Porta lámina
- Lámina

### 8.2.1. Características de Porta lámina

Los porta lámina permiten sujetar la lámina y dar soporte cuando esta se apoya contra el rodillo, existen diferentes tipos, entre las que se destacan las siguientes:

- Porta lámina fijo.
- Porta lámina ajustable.
- Porta lámina autoajustable.

*Porta lámina autoajustable (utilizado en Sistema Prensas)*

La siguiente figura muestra el porta lámina autoajustable DST utilizado en los rodillos de granito del Sistema Prensas de la MP-01.

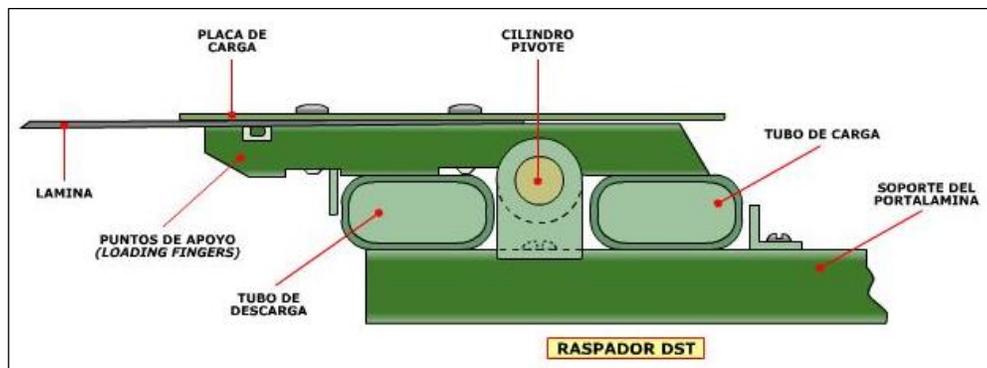


Figura 8.2.1 Porta lámina autoajustable DST (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A.)

Este tipo de porta lámina, utiliza un sistema de ajuste mediante tubos sellados llenos de fluidos. Cualquier irregularidad del rodillo, genera una presión sobre uno de los tubos y empuja el fluido hacia el otro que ofrece menos resistencia. Esto permite que la lámina se ajuste continuamente a la superficie del rodillo durante la operación.

Los porta laminas DST utilizan un sistema de carga neumática para distribuir en forma uniforme la presión a lo largo de la superficie del rodillo a través de una serie de superficies de apoyo (loading fingers), esto resulta de una adaptación exacta de la lámina con dicha superficie.

### 8.2.2. Características de Láminas

Las láminas consisten en placas metálicas con un extremo cortante, el que se localiza sobre la superficie del rodillo, para ejercer presión sobre él y actuar como raspador.

Existen diversos materiales para las láminas, sin embargo, las principales son de metal y sintéticas, el tipo y material de la lámina están determinados, entre otras cosas, por los siguientes factores:

- El uso específico del raspador, tomando en cuenta el ancho de la máquina y su velocidad, la función y localización del rodillo.
- El porta láminas utilizado.
- Perfil (puntos de presión) adecuado para evitar daños en el rodillo.
- No debe generar chispas que puedan producir fuego.
- Debe poseer suficiente capacidad de raspado.

En el Sistema Prensas, las láminas utilizadas presentan las siguientes características:

- Diaclouth-600: Lámina de resina fenólica, con una fina estructura de fibra de algodón y grafito. Soporta temperaturas de hasta 135°C
- Monel: Lámina de aleación metálica de cobre níquel.
- Clouth: Lámina de polietileno de alta densidad. Soporta temperaturas de hasta 80 °C

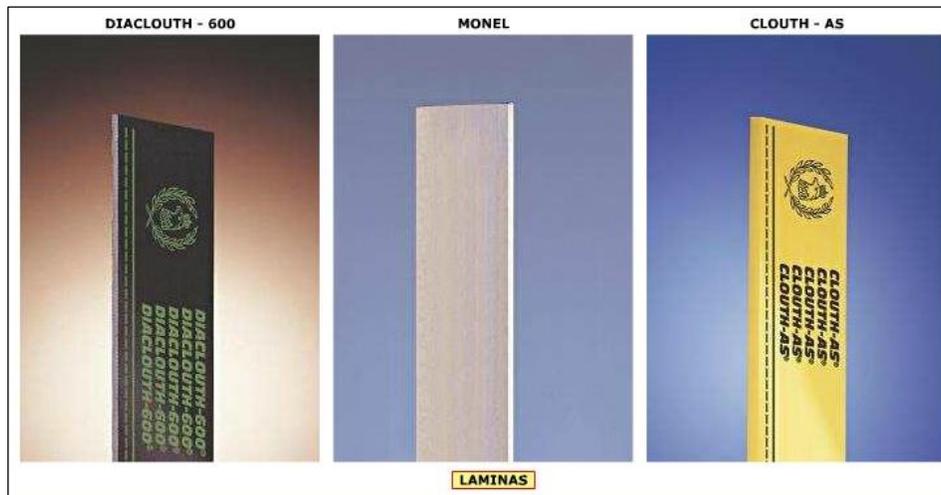


Figura 8.2.2 Láminas utilizadas en Sistema Prensas (Fuente: Papeles Bío-Bío S.A)

Además, las láminas raspadoras de los rodillos poseen oscilación, lo que ofrece las siguientes ventajas:

- Mejora la acción penetrante de la punta, incrementando la capacidad de limpieza.
- Reduce la acumulación de partículas entre la punta y el rodillo, minimizando el riesgo de rayado en su superficie.
- Reduce la fricción en la punta, incrementando la vida útil del rodillo y la lámina.

## 9. Análisis de Weibull

### 9.1. Aplicación a Paño Cuarta Prensa

En esta tabla se muestra el cálculo del Rango de mediana (RM), los valores de la abscisa y ordenada según el método de los mínimos cuadrados, para luego poder graficar dichos puntos en un gráfico de dispersión y ajustar una recta, a la pendiente de dicha recta se le denomina parámetro de forma ( $\beta$ ).

Tabla 9.1 Resumen base de datos de análisis de Weibull para Paño

Código	TBF	RM	$xi[\ln(t-\delta)]$	$yi[\ln[\ln(t/(1-F(t-\delta)))]]$
1	0,01666667	0,01038576	-4,094345	-4,562104471
2	0,01666667	0,02522255	-4,094345	-3,667270912
3	0,25	0,04005935	-1,386294	-3,197020981
4	0,7	0,05489614	-0,356675	-2,874214791
5	0,83333333	0,06973294	-0,182322	-2,627158419
6	5,98333333	0,08456973	1,7889778	-2,426323598
7	7,91666667	0,09940653	2,0689702	-2,256643555
8	17,75	0,11424332	2,8763855	-2,109381317
9	23,2333333	0,12908012	3,145588	-1,979015083
10	24	0,14391691	3,1780538	-1,861831065
11	24	0,15875371	3,1780538	-1,755210743
12	33,7166667	0,1735905	3,5179923	-1,657237994
13	38,2333333	0,1884273	3,6437077	-1,566467946
14	48,0333333	0,20326409	3,8718952	-1,481783685
15	51,5166667	0,21810089	3,9419054	-1,402303578
16	54,6333333	0,23293769	4,0006442	-1,32731915
17	69,2333333	0,24777448	4,2374824	-1,256252173
18	75,2	0,26261128	4,3201512	-1,188624249
19	76,3666667	0,27744807	4,3355463	-1,124034755
20	77,4833333	0,29228487	4,3500629	-1,062144534
21	78,8	0,30712166	4,366913	-1,002663622
22	88,9666667	0,32195846	4,4882618	-0,945341859
23	91,1666667	0,33679525	4,5126893	-0,889961614
24	99,5333333	0,35163205	4,6004926	-0,836332068
25	106,45	0,36646884	4,6676754	-0,784284663
26	117,116667	0,38130564	4,7631706	-0,733669451
27	124,883333	0,39614243	4,82738	-0,68435212
28	126,833333	0,41097923	4,8428739	-0,636211557
29	132,683333	0,42581602	4,8879653	-0,589137825

30	144,766667	0,44065282	4,9751233	-0,543030472
31	180,233333	0,45548961	5,1942523	-0,497797093
32	184,05	0,47032641	5,2152075	-0,453352112
33	186,533333	0,4851632	5,22861	-0,409615714
34	204,016667	0,5	5,3182017	-0,366512921
35	273,5	0,5148368	5,6113016	-0,323972765
36	296,883333	0,52967359	5,6933392	-0,281927546
37	306,433333	0,54451039	5,7250002	-0,240312138
38	323,533333	0,55934718	5,7793021	-0,199063355
39	326,966667	0,57418398	5,7898582	-0,158119334
40	426,433333	0,58902077	6,055456	-0,117418922
41	450,966667	0,60385757	6,1113934	-0,076901074
42	459,916667	0,61869436	6,1310453	-0,036504219
43	472,016667	0,63353116	6,1570143	0,003834414
44	475,733333	0,64836795	6,1648575	0,044179523
45	496,9	0,66320475	6,2083888	0,084598554
46	559,716667	0,67804154	6,3274307	0,125162635
47	605,4	0,69287834	6,4058894	0,165947665
48	612,15	0,70771513	6,4169774	0,207035618
49	661,083333	0,72255193	6,4938799	0,248516123
50	663,15	0,73738872	6,4970012	0,290488415
51	712,133333	0,75222552	6,5682652	0,333063791
52	811,383333	0,76706231	6,6987406	0,376368755
53	869,533333	0,78189911	6,7679567	0,42054912
54	879,766667	0,79673591	6,7796567	0,465775444
55	952,816667	0,8115727	6,8594225	0,512250423
56	999,45	0,8264095	6,9072051	0,560219135
57	1011,93333	0,84124629	6,919618	0,609983633
58	1039,66667	0,85608309	6,9466554	0,661924348
59	1048,48333	0,87091988	6,9551	0,716532594
60	1138,06667	0,88575668	7,0370862	0,774462012
61	1514,65	0,90059347	7,3229397	0,836614203
62	1585,81667	0,91543027	7,3688548	0,904290554
63	1947,71667	0,93026706	7,574413	0,97948429
64	2317,46667	0,94510386	7,7482299	1,065507729
65	2513,8	0,95994065	7,8295508	1,16857148
66	5248,46667	0,97477745	8,5656912	1,302917308
67	5323,58333	0,98961424	8,5799019	1,518926591

### 9.1.1. Parámetros de Weibull Paño Cuarta Prensa

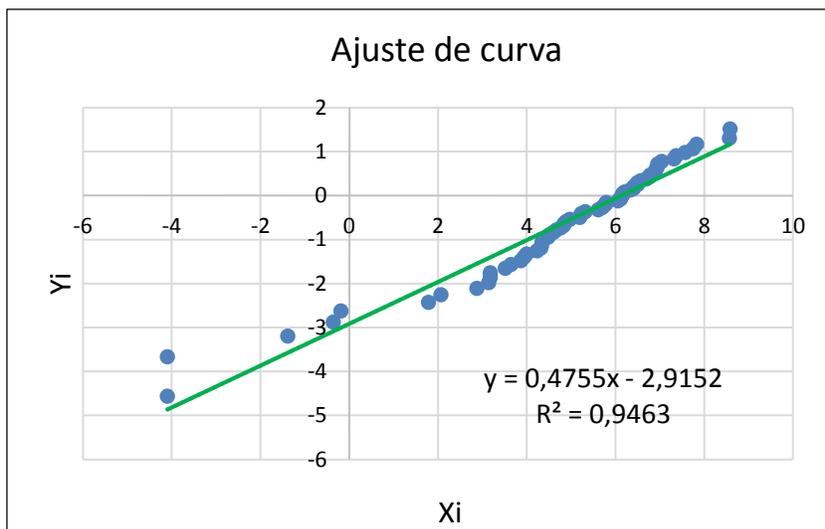


Figura 9.1.1 Ajuste de curva para determinar parámetros de Weibull, Paño

Tabla 9.1.1.1 Resumen valores obtenidos de ajuste de curva, Paño

Concepto	Valor
Pendiente	0,475528
Intercepción eje Y (b)	-2,915218756
Coef. Correlación Pearson (r)	0,9727964
Coef. Determinación (r <sup>2</sup> )	0,94633282

Se presenta en la Tabla 9.1.1.1 un resumen de los valores obtenidos del ajuste de curva de los datos de tiempo de buen funcionamiento entre paradas (TBF) del Paño, se observa que existe alta relación lineal ( $r = 0.9728$ ) entre ellos. El ajuste de curva entrega los valores de pendiente e intersección con eje Y, los que serán utilizados para determinar parámetros de Weibull.

Tabla 9.1.1.2 Resumen de obtención de parámetros de Weibull, Paño

Parámetro	Valor
Parámetro de localización ( $\delta$ )	0
Parámetro de forma ( $\beta$ )	0,475528
Parámetro de escala ( $\theta$ )	459,66046

Después de realizar un ajuste de curva con los datos disponibles, se procede a obtener desde ella, los parámetros de Weibull mediante su pendiente que representa el parámetro de forma ( $\beta$ ) y el valor de intersección ( $b$ ) que se utiliza en la formula presentada en el marco teórico para la determinación del parámetro de escala ( $\theta$ ), también, se calcula el parámetro de localización, que es un poco menor al RM más pequeño, estos parámetros serán de utilidad para la realización de gráficas de función confiabilidad y distribución acumulada, así como también determinar qué tipo de fallas están ocurriendo, ya sea mortalidad infantil, aleatoria o envejecimiento, según análisis de curva de la bañera.

### **9.1.2. Análisis de curva de la bañera, Paño de Cuarta Prensa**

La curva de la bañera puede ayudar a entender la relación entre  $\beta$  y los mecanismos de falla a través de la vida de un componente. Weibull provee una pista acerca de los mecanismos de falla, con las diferentes pendientes o parámetro de forma, implicado en las diferentes formas de falla.

Para el caso del Paño de Cuarta Prensa de este estudio se tiene  $\beta=0.47$ , con lo que se puede clasificar las fallas ocurridas como Mortalidad Infantil.

A modo de conclusión para un análisis de las fallas del Paño de la Cuarta Prensa, se puede decir que se trata de mecanismos de falla por Mortalidad Infantil ( $\beta = 0.47$ ), que pudiesen ser originadas por problemas de producción, condiciones operacionales y/o también problemas de diseño (debido a la antigüedad de la máquina), según la curva de la bañera se indica a estos modos de falla como los principales para Mortalidad Infantil, lo que ha llevado a implementar mejoras al equipo a través del tiempo para lograr un adecuado funcionamiento, no obstante, el paño falla demasiado rápido y se producen detenciones del proceso asociados a él, sería adecuado prestar especial atención al componente, ya que de sobrevivir a la mortalidad infantil, mejoraría su desempeño notoriamente, aumentando su resistencia a las fallas, a partir de esto, mejorar la disponibilidad del sistema.

### 9.1.3. Función Confiabilidad Paño de Cuarta Prensa

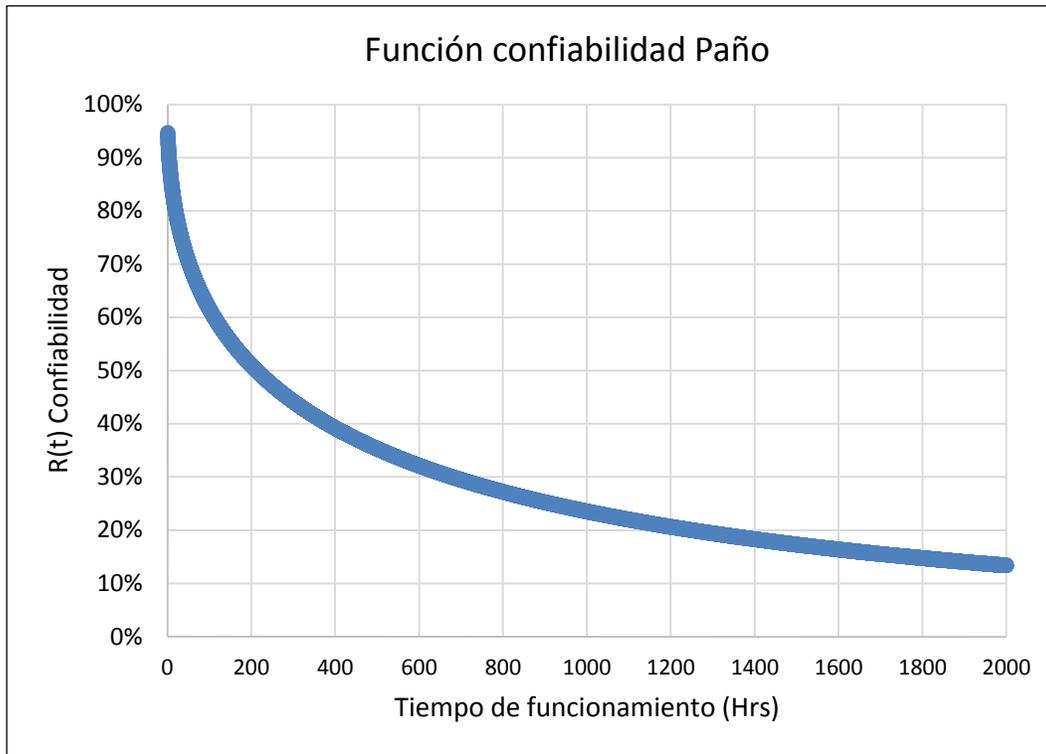


Figura 9.1.3 Función confiabilidad Paño de Cuarta Prensa

Se presenta la gráfica de la función confiabilidad del Paño de Cuarta Prensa, en la que se puede apreciar: En eje y: el porcentaje de confiabilidad, en eje x: el tiempo de funcionamiento medido en horas.

Para este análisis fue omitido el año 2010 (en el cual ocurrió el terremoto del 27 de febrero en Chile), ya que este afecta la correcta interpretación del TBF (tiempo de buen funcionamiento entre paradas) y no es representativo para la confiabilidad real del paño de la cuarta prensa, para esto, se necesita que, en el periodo de estudio, el componente esté funcionando bajo su régimen normal de producción. Mismo análisis se hace para la función distribución acumulada, entendida en el ámbito de la confiabilidad, como la probabilidad de falla del paño de la cuarta prensa.

Consideraciones:

- Los datos anteriores son tiempos históricos reales, no obstante, los resultados son una aproximación estadística del comportamiento del componente en estudio.
- Los porcentajes de confiabilidad anteriores no necesariamente quieren decir que el componente falle y tenga que ser cambiado, sino que indica que el proceso fue detenido a causa del propio componente, ya sea por motivos de suciedad, desplazamiento, desprendimiento, corrimiento, etc, lo que genera o cambio del componente o bien reparación.
- Analizando la base de datos se puede observar que la mayor parte de las detenciones son causadas por suciedad en Paño de Cuarta Prensa, por lo que sería conveniente revisar los procedimientos de limpieza y proponer rediseños, ya que la acumulación de suciedad produce reiteradas cortaduras en el proceso productivo, al tener que limpiar ya sea con aseo químico, automático o con hidro-lavado a alta presión.
- Ver posibilidad de implementar un proceso de limpieza automática de Paño con el que se evite parar el proceso por este concepto y de este modo, se conseguiría aumentar la confiabilidad del paño y también del proceso completo, al tratarse de un elemento crítico para el sistema.
- La acumulación de suciedad en el Paño, puede ser la causante de que este comience con problemas mayores como desplazamientos, roturas/daño, pliegues, vibraciones, etc. Por este motivo, es necesario prestar especial atención y proponer un plan de mantención preventiva y/o predictiva.

#### 9.1.4. Función de distribución acumulada Paño de Cuarta Prensa

El diagrama muestra el comportamiento del Paño de Cuarta Prensa, es decir, la probabilidad de quedar indisponible para cierto tiempo de funcionamiento. Por ejemplo, para un tiempo de funcionamiento de 1200 Hrs, el Paño tiene aproximadamente 80% de probabilidades de quedar fuera de servicio por algún motivo relacionado a sus modos de falla, a medida que va aumentando su tiempo de funcionamiento, mayores son sus probabilidades de presentar algún problema.

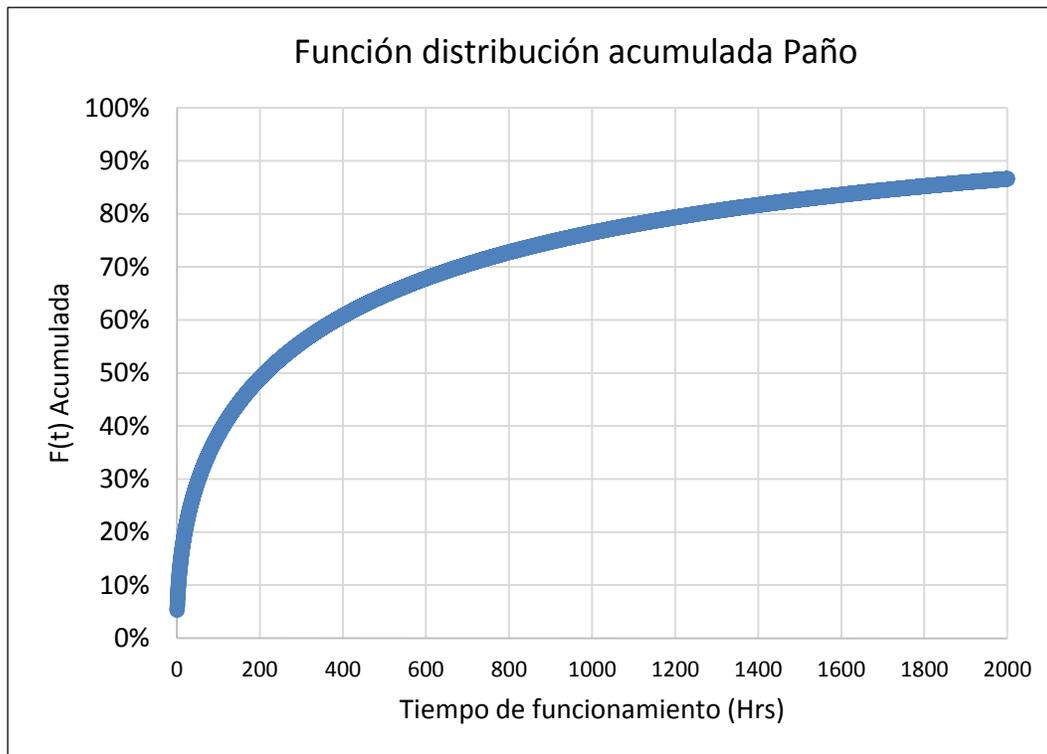


Figura 9.1.4 Función distribución acumulada Paño de Cuarta Prensa

Actualmente se tiene como meta de duración 80 días para el Paño de Cuarta Prensa, no obstante, para este tiempo correspondiente a 1920 Hrs el componente presenta un 86% de probabilidades de presentar un imprevisto o falla, lo que se considera muy alto. En análisis posteriores se estudiará la posibilidad de reducir esta meta de duración, con el objetivo de no tener porcentajes elevados de probabilidad de falla.

## 9.2. Aplicación a Raspadores Cuarta Prensa

Para desarrollar el análisis siguiente se utilizó los datos obtenidos desde la base de datos, no obstante, en ella no se individualiza el raspador que origina la detención, estos raspadores fueron todos clasificados en un único grupo (Raspadores de Cuarta Prensa), con el objetivo de obtener conclusiones que puedan dar indicios de relaciones causa-raíz de las fallas del Paño De Cuarta Prensa, que es el componente que origina el mayor número de detenciones en el proceso, se decide realizar dicho análisis. A continuación, se presenta la base de datos para el análisis:

Tabla 9.2 Resumen base de datos de análisis de Weibull para Raspadores

Código	TBF	RM	$\xi[\ln(t-\delta)]$	$\eta[\ln[\ln(t/(1-F(t-\delta)))]]$
1	0,16666667	0,01241135	-1,791759	-4,382906096
2	0,2	0,03014184	-1,609438	-3,486577211
3	0,21666667	0,04787234	-1,529395	-3,014789576
4	0,68333333	0,06560284	-0,380772	-2,690401319
5	4,05	0,08333333	1,3987169	-2,441716399
6	16,75	0,10106383	2,8183983	-2,239204293
7	17,4	0,11879433	2,8564702	-2,067795814
8	20,5833333	0,13652482	3,0244817	-1,91875141
9	33,7	0,15425532	3,5174978	-1,786546517
10	38,6166667	0,17198582	3,653684	-1,667464383
11	46,8833333	0,18971631	3,8476622	-1,558883303
12	72,7833333	0,20744681	4,287487	-1,458883734
13	76,4166667	0,2251773	4,3362008	-1,366017115
14	76,65	0,2429078	4,3392496	-1,279162557
15	110,766667	0,2606383	4,7074259	-1,197434129
16	143,7	0,27836879	4,9677278	-1,120118704
17	155,166667	0,29609929	5,0444998	-1,046633013
18	179,583333	0,31382979	5,1906394	-0,976493178
19	180,066667	0,33156028	5,1933272	-0,909292616
20	181,466667	0,34929078	5,201072	-0,844685667
21	186,833333	0,36702128	5,230217	-0,782375261
22	189,566667	0,38475177	5,2447408	-0,722103453
23	229,45	0,40248227	5,4356851	-0,663644067
24	260,8	0,42021277	5,5637538	-0,606796874
25	278,633333	0,43794326	5,6298967	-0,551382935
26	309,733333	0,45567376	5,7357117	-0,49724081
27	335,166667	0,47340426	5,8146279	-0,444223432

28	350,666667	0,49113475	5,8598361	-0,392195487
29	353,133333	0,50886525	5,8668457	-0,341031169
30	464,133333	0,52659574	6,1401719	-0,290612237
31	467,4	0,54432624	6,1471854	-0,240826265
32	529,316667	0,56205674	6,2715869	-0,191565049
33	563,566667	0,57978723	6,3342856	-0,142723095
34	581,266667	0,59751773	6,3652096	-0,094196143
35	641,483333	0,61524823	6,4637832	-0,045879661
36	678,65	0,63297872	6,5201055	0,002332735
37	697,95	0,65070922	6,5481475	0,050551016
38	736,883333	0,66843972	6,6024296	0,098890703
39	737,85	0,68617021	6,6037406	0,147475179
40	761,633333	0,70390071	6,6354653	0,196438475
41	807,05	0,72163121	6,6933856	0,245928743
42	821,383333	0,7393617	6,7109899	0,296112683
43	904,05	0,7570922	6,8068847	0,34718135
44	1126,23333	0,7748227	7,026634	0,399357941
45	1161,66667	0,79255319	7,057611	0,452908535
46	1263,56667	0,81028369	7,1416937	0,508157317
47	1270,58333	0,82801418	7,1472314	0,565508832
48	1327,76667	0,84574468	7,1912536	0,625481713
49	1593,43333	0,86347518	7,3736463	0,688761994
50	1649,18333	0,88120567	7,4080355	0,756291746
51	1876,53333	0,89893617	7,5371814	0,829426101
52	1894,15	0,91666667	7,5465255	0,910235093
53	2633,36667	0,93439716	7,8760184	1,002151438
54	4103,18333	0,95212766	8,3195184	1,111600043
55	5414,86667	0,96985816	8,5969035	1,253288804
56	5894,85	0,98758865	8,6818344	1,479134243

### 9.2.1. Parámetros de Weibull Raspadores Cuarta Prensa

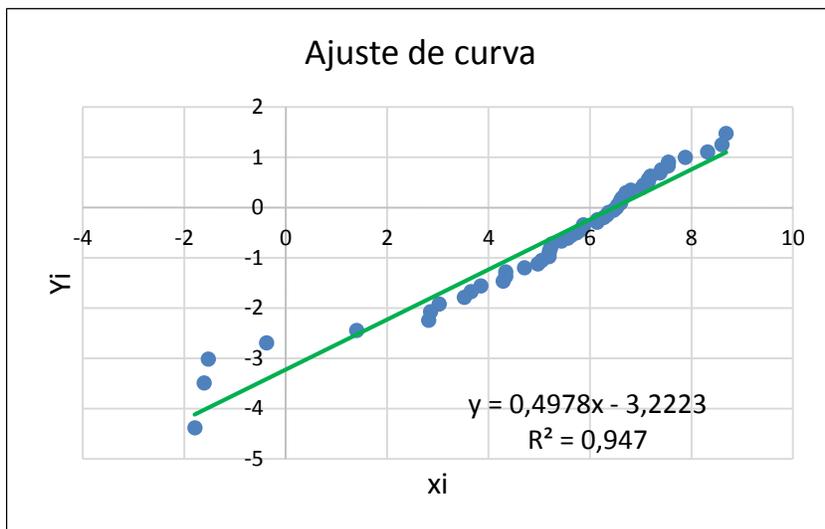


Figura 9.2.1 Ajustes de curva para determinar parámetros de Weibull, Raspadores

Tabla 9.2.1.1 Resumen valores obtenidos de ajuste de curva, Raspadores

Concepto	Valor
Pendiente	0,4978361
Intercepción eje Y (b)	-3,222265513
Coef. Correlación Pearson (r)	0,9731619
Coef. Determinación (r <sup>2</sup> )	0,94704401

Tabla 9.2.1.2 Resumen de obtención de parámetros de Weibull, Raspadores

Parámetro de Weibull	Valor
Parámetro de localización ( $\delta$ )	0
Parámetro de forma ( $\beta$ )	0,4978361
Parámetro de escala ( $\theta$ )	647,12723

Al igual que el análisis para el Paño, se desarrolla el análisis para los Raspadores del Sistema Cuarta Prensa. Según la Tabla 9.2.1.1, se tiene una buena relación lineal entre tiempos de buen funcionamiento entre paradas (TBF), con lo que se pueden determinar de buena manera los parámetros de Weibull y diagramas de función confiabilidad R(t) y distribución acumulada F(t).

### 9.2.2. Análisis de curva de la bañera, Raspadores Cuarta Prensa

Para el caso de los Raspadores de Cuarta Prensa de este estudio se tiene  $\beta=0.49$ , con lo que se puede clasificar en mortalidad infantil las fallas que están ocurriendo en los raspadores.

Para los raspadores de la cuarta prensa, se sabe que es el sistema que elimina desechos de pasta acumulados en los rodillos, y además permite que esta pasta acumulada considerada suciedad, se pegue también a los paños.

El parámetro de forma de Weibull, beta ( $\beta=0,49$ ), para los raspadores de la cuarta prensa es muy similar al parámetro beta ( $\beta=0,47$ ) del paño de la cuarta prensa, lo que indica que existe una relación entre las fallas de ambos (Paño/Raspador), o más bien que la acumulación de pasta producto de una mala limpieza por parte de los raspadores está produciendo las fallas tempranas, consideradas mortalidad infantil en estos componentes. Sería entonces necesario revisar por parte del departamento de mantenimiento, los sistemas de limpieza y de ser necesario, cambiar o mejorar los sistemas de raspadores, ya que, de superar el periodo de mortalidad infantil, tanto Paño como Raspadores mejorarían su desempeño aumentando su resistencia a las fallas.

Se podría concluir que una detención del paño es a causada por acumulación de suciedad, a causa de los raspadores, lo que produce problemas de mayor tiempo de intervención en el paño de la Cuarta Prensa como lo son desplazamientos, corrimientos, roturas, desprendimientos, etc., es decir, que de requerir continuidad y buen funcionamiento del Paño de Cuarta Prensa se debe poner especial atención a los raspadores.

Una conclusión que entrega este análisis es que si se requiere evitar problemas y gastos mayores como lo es un cambio de paño, sería conveniente tener un plan de mantenimiento preventiva para el cambio de raspadores o bien implementar mejoras a este sistema de limpieza, de este modo se da continuidad al proceso productivo, se mejora la disponibilidad y finalmente la confiabilidad de toda la MP-01.

### 9.2.3. Función Confiabilidad de Raspadores Cuarta Prensa

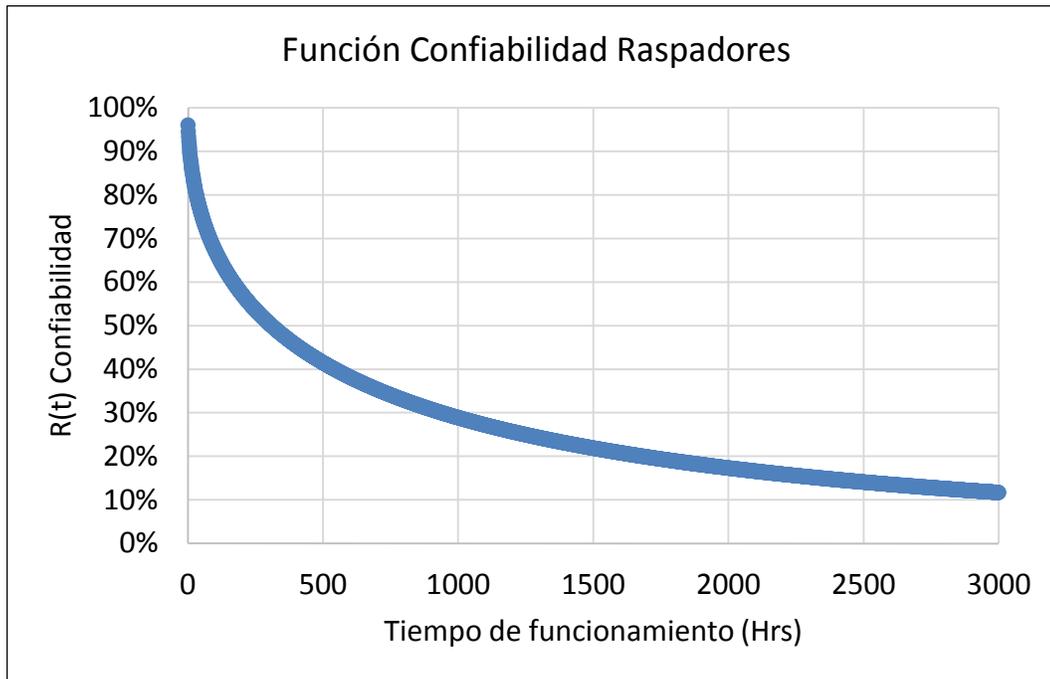


Figura 9.2.3 Función confiabilidad Raspadores de Cuarta Prensa

Como en la base de datos utilizada para graficar el diagrama anterior están incluidos los datos de todos los raspadores de la Cuarta Prensa no se puede decidir un cambio o mantenimiento preventivo, ya que conceptualmente al tomar una decisión, esta incluiría a todos los raspadores, no obstante, el objetivo por el cual se decidió trazar estas gráficas (encontrar una relación entre Raspadores y fallas del Paño de Cuarta Prensa) fue logrado y se pudo establecer que las detenciones del Paño eran originadas por acumulación de suciedad producto de la deficiencia en las funciones de los raspadores.

Según el gráfico, la confiabilidad de los Raspadores para 1000 Hrs de funcionamiento es:

- Confiabilidad Raspadores = 29%

Es decir, los raspadores presentan un 29% de probabilidades de tener un buen funcionamiento a las 1000 Hrs de operación.

#### 9.2.4. Función distribución acumulada Raspadores Cuarta Prensa

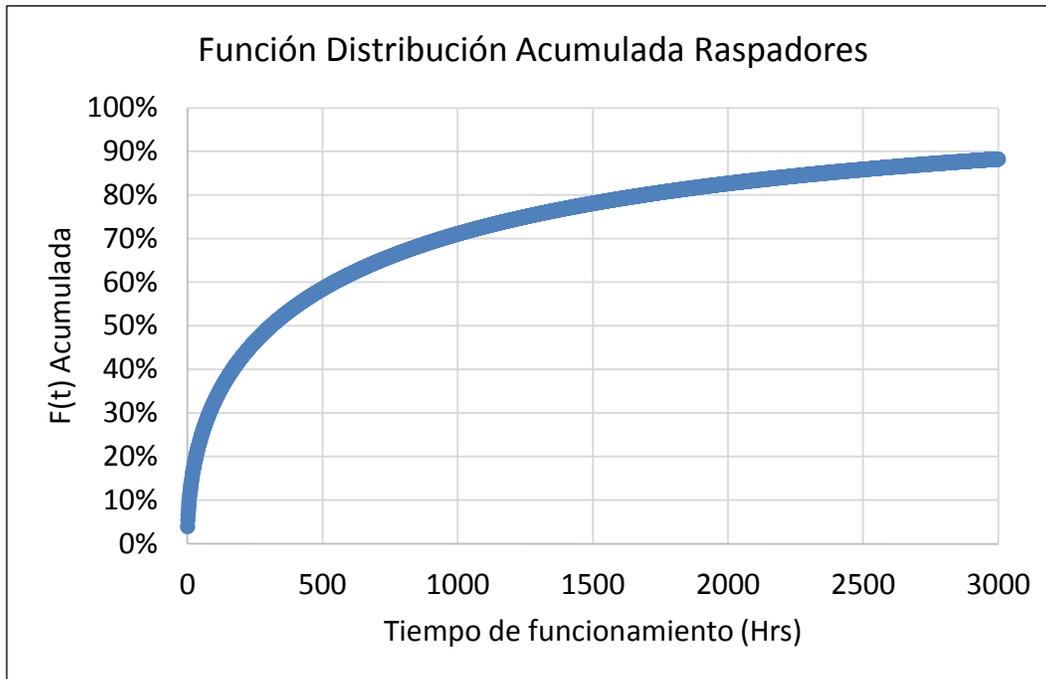


Figura 9.2.4 Función distribución acumulada Raspadores de Cuarta Prensa

Según el gráfico, entendido como probabilidad de falla de los Raspadores de Cuarta Prensa, estos fallarían, por ejemplo, a las 1000 Hrs de funcionamiento, con un 70% de certeza o seguridad, no obstante, no se puede afirmar esto, ya que en el desarrollo de la gráfica se incluyeron las fallas de los 4 raspadores existentes en Cuarta Prensa y decidir una mantención preventiva en función de lo concluido por este diagrama, no sería conveniente para el ahorro de recursos en el área.

La utilización de estos diagramas es de gran importancia en el ámbito de la mantención preventiva, ya que da ideas del estado de un componente, para un periodo de utilización definido y se pueden programar mantenciones en función de sus resultados.

## 10. Análisis funcional

### *Función primaria:*

- La máquina papelera N°1 es considerada como el componente principal de la empresa Papeles Bío-Bío S.A. en el proceso de fabricación del papel y tiene como función en conjunto con sus procesos asociados, producir papel de periódico para imprentas rotativas, tanto de la industria nacional como internacional y de acuerdo a las especificaciones técnicas determinadas para cada producto, para esto, se debe realizar una serie de funciones específicas, que van desde preparar pasta hasta el embalaje de las bobinas de papel producidas, las que finalmente son dispuestas en las bodegas para ser enviadas a los clientes.

### *Funciones secundarias:*

Las funciones secundarias de la MP-01 fueron clasificadas por sub-sistema de la máquina:

- **Formación:** La función del sistema formación es extraer el agua contenida en la pasta proveniente del cajón de entrada de la máquina, permitiendo que la pasta en suspensión se transforme en papel, con una distribución de fibras uniformes.
- **Prensas:** La función del Sistema Prensas es recibir la hoja del Sistema Formación, distribuir la hoja a lo ancho de la máquina y realizar la extracción de agua por medio del prensado (compresión mecánica en el NIP), de esta forma el agua es removida por presión hidráulica creada en el interior de la hoja. Adicionalmente se mejoran las propiedades de resistencia de la hoja, dado que la presión ejercida produce aplastamiento de las fibras, mejorando el enlace entre fibras, creando una hoja más resistente para ser transportada hacia el Sistema Secador, el agua extraída es recibida parcialmente por el paño y los rodillos de succión perforados.
- **Secador:** La función del sistema secador es recibir la hoja con un cierto porcentaje de humedad proveniente del Sistema Prensas, transportarla por cilindros, que son calentados desde su interior por vapor a alta temperatura, evaporando el agua que contiene la hoja, manteniendo un perfil de humedad determinado en la hoja.

- Calandria-Pope: Su función es, a través de trabajo mecánico directo sobre la hoja, modelar sus propiedades de estructura superficial como rugosidad o grado de lisado con el fin de mejorar sus propiedades de impresión. Adicionalmente controla las características del papel como la densidad y el espesor, garantizando un buen comportamiento de calidad y operación de la hoja en el sector de bobinadora e impresoras rotativas, con el fin de entregar satisfacción a clientes. Es decir, es una última oportunidad de mejorar las condiciones solicitadas para el papel.

### 10.1. Diagrama entrada – función – salida (EFS)

El diagrama Entrada – Función – Salida toma todo el sistema bajo un enfoque de caja negra, la cual para cumplir su función específica, se requiere de elementos de entrada y su procesamiento genera elementos de salida.

Entradas:

- Materia prima: Material a transformar, como ejemplo, pasta proveniente de preparación Pasta.
- Servicios (entrada): Servicios como energía, agua de enfriamiento para proceso, vapor, etc. proveniente de otros procesos asociados.

Funciones:

- Funciones: Descripción simple de las funciones unitarias a realizar por el sistema, por ejemplo, en el caso de la MP-01, producir papel para imprentas rotativas de acuerdo a especificaciones requeridas por clientes de la empresa.

Salidas:

- Productos Primarios: Principales productos del sistema y propósito de éste.
- Productos Secundarios: Derivados aprovechables resultados del proceso principal (Ejemplo, disposición de recortes)
- Desechos: Productos que se deben descartar, se deben generar funciones para tal fin.
- Servicios (salida): En algunos casos se debe generar servicios a otras plantas/sistemas.

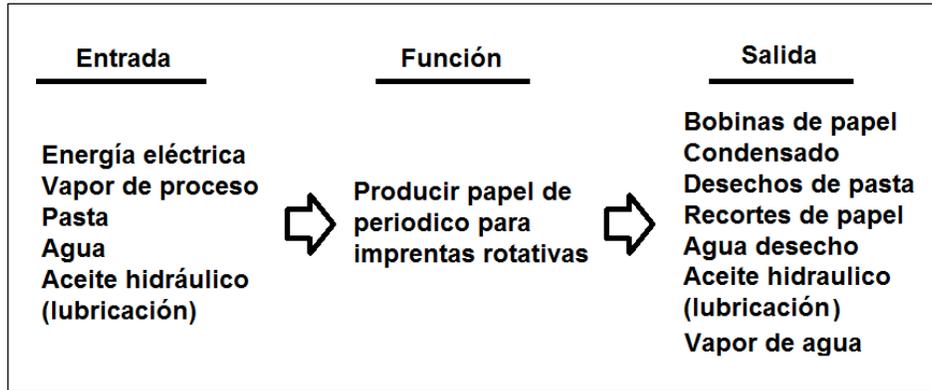


Figura 10.1 Diagrama Entrada-Función-Salida, MP-01

## 11. Análisis de modos y efectos de fallas (FMEA)

A continuación, se presenta el análisis FMEA cuya finalidad es analizar todas las fallas potenciales que puedan originarse en el sistema en estudio, en este caso es la Cuarta Prensa del Sistema Prensas. Este tipo de análisis pretende identificar los componentes y sistemas donde existe una mayor probabilidad de generarse una falla. Se identifican las Fallas Funcionales, Modos de Falla y Efectos de Falla.

Según los análisis previos mediante los diagramas de Pareto se logró identificar que el Paño de la Cuarta Prensa presenta las fallas más recurrentes junto con los raspadores, también perteneciente a la Cuarta Prensa, sin embargo, a pesar que poseen diferentes clasificaciones en la base de datos, están directamente relacionadas ya que una mala eliminación de la suciedad por parte del raspador puede ocasionar problemas mayores como una falla en el paño.

En este análisis FMEA se analizará Paño y Raspadores de Cuarta Prensa con sus fallas funcionales más importantes (corrimientos, desplazamientos, arrugas, etc.), que originan detenciones en el proceso, al no permitir que el componente siga cumpliendo su función.

Algunas definiciones para esta sección:

- **Falla funcional:** Un estado en el cual un equipo o sistema es incapaz de realizar una función específica a un nivel deseado de desempeño. (Norma SAE JA1011, 1990)
- **Modo de falla:** Es cualquier evento que genera una falla funcional. (Norma SAE JA1011, 1990)
- **Efecto de falla:** Es aquello que sucede cuando ocurre un Modo de Falla. (Norma SAE JA1011, 1990)

Para asociar las detenciones se utiliza un diagrama conocido como Diagrama Ishikawa (o Diagrama Espina de pescado), el cual es un diagrama de causa y efecto que representa varios elementos de un sistema que pueden contribuir a un problema. Fue desarrollado por Kaoru Ishikawa (Tokio 1943) y es una herramienta efectiva para estudiar procesos y situaciones mediante la recopilación de datos, principalmente de modos de falla. *Los modos de falla deben ser definidos con el detalle suficiente como para posibilitar la selección de una adecuada política de manejo de falla,* (Moubroy, 1991)

### 11.1. Análisis modos y efectos de falla (FMEA) Paño Cuarta Prensa

A continuación, se presenta un Análisis de modos y efectos de fallas para el paño de la Cuarta prensa, el cual consiste en un cuadro que contiene equipo, función, falla funcional, modo de falla y efectos de la falla. También se presenta el diagrama de Ishikawa asociado, a modo de tener una idea gráfica de los eventos que están ocurriendo en el componente.

#### 11.1.1. Diagrama de Ishikawa Paño de Cuarta Prensa

En la siguiente figura se muestra el Diagrama Ishikawa para el Paño de la Cuarta Prensa, en el cual se clasifica el equipo en seis secciones para identificar los distintos modos de falla de cada una de ellas.

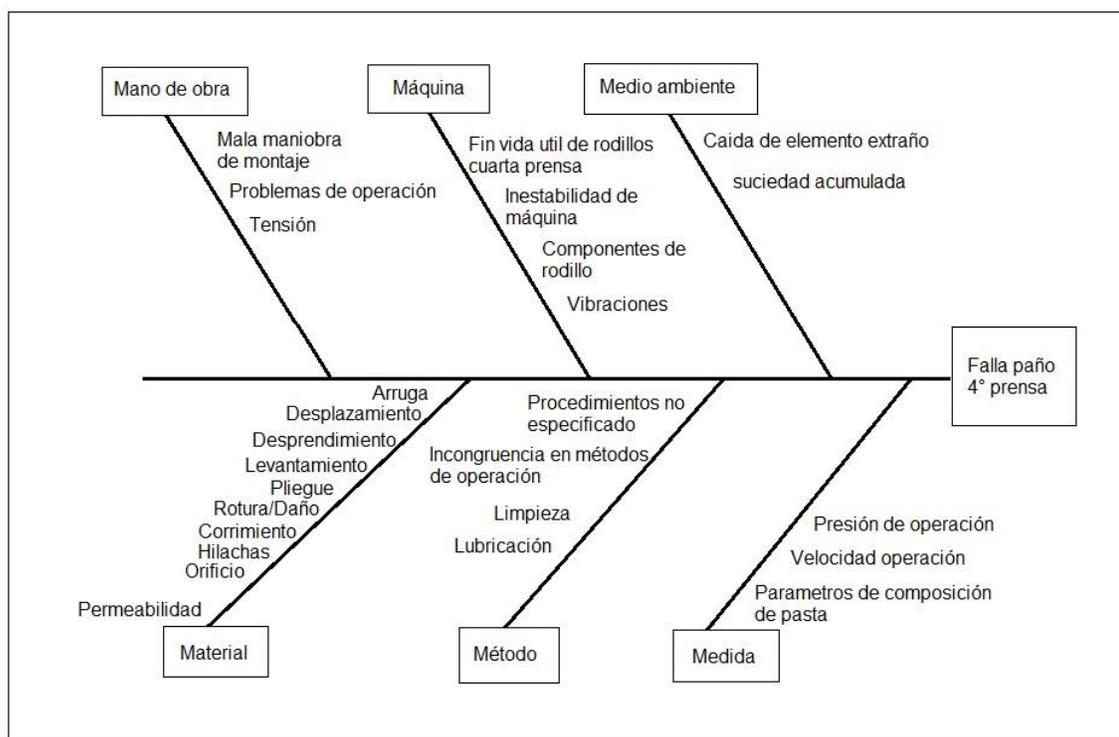


Figura 11.1.1 Diagrama de Ishikawa Paño de Cuarta Prensa

**11.1.2. Cuadro resumen FMEA para Paño de Cuarta Prensa:**

Tabla 11.1.2 Resumen FMEA Paño Cuarta Prensa

Equipo	Función (¿De qué es capaz el equipo?)	Falla Funcional (Negar función)	Modo de Falla (Causa de falla)	Efectos de Falla (¿Cómo el operador se da cuenta?)
Paño Cuarta Prensa	Extraer el agua de la lámina de papel húmeda por medio de compresión mecánica y transportar el papel hacia el grupo de secadores.	No permite extraer el agua de la hoja húmeda ni permite el paso del papel hacia los secadores, obstruyendo el proceso	Suciedad acumulada	El sistema de control de vacío de la MP-01 avisa problemas de taponamiento en rodillos asociados y se aprecia suciedad mediante inspección visual. Se generan reiteradas cortaduras.
			Desplazamiento	Pliegues y arrugas en el paño.
			Rotura / Daño	Defectos en el papel, visible en sistema Pope.
			Corrimiento	Se producen hilachas en el paño al rozar con el borde de la estructura.
			Vibraciones	Vibraciones en Prensas (rodillos) detectado por instrumentos acelerómetros.
			Fundidura	Se presenta marcas en la hoja, en sistema Calandria-Pope.
			Dañado por cuerpo extraño	Se produce rotura visible en el paño.
			Compactación	Falta de permeabilidad, sensores de vacío acusan una variación en la presión.
			Baja permeabilidad	Sensores de presión, acusan problemas de vacío.
			Caída de aceite	Deslizamiento longitudinal del paño

## 11.2. Análisis modos y efectos de falla (FMEA) Raspadores Cuarta Prensa

A continuación, se presenta un Análisis de modos y efectos de fallas para Raspadores de Cuarta Prensa, el cual consiste en un cuadro que contiene equipo, función, falla funcional, modo de falla y efectos de la falla. También se presenta el diagrama de Ishikawa asociado, a modo de tener una idea gráfica de los eventos que están ocurriendo en el componente.

### 11.2.1. Diagrama de Ishikawa Raspadores de Cuarta Prensa

En la siguiente figura se muestra el Diagrama Ishikawa para Raspadores de la Cuarta Prensa, en el cual se clasifica el equipo en seis secciones para identificar los distintos modos de falla de cada una de ellas.

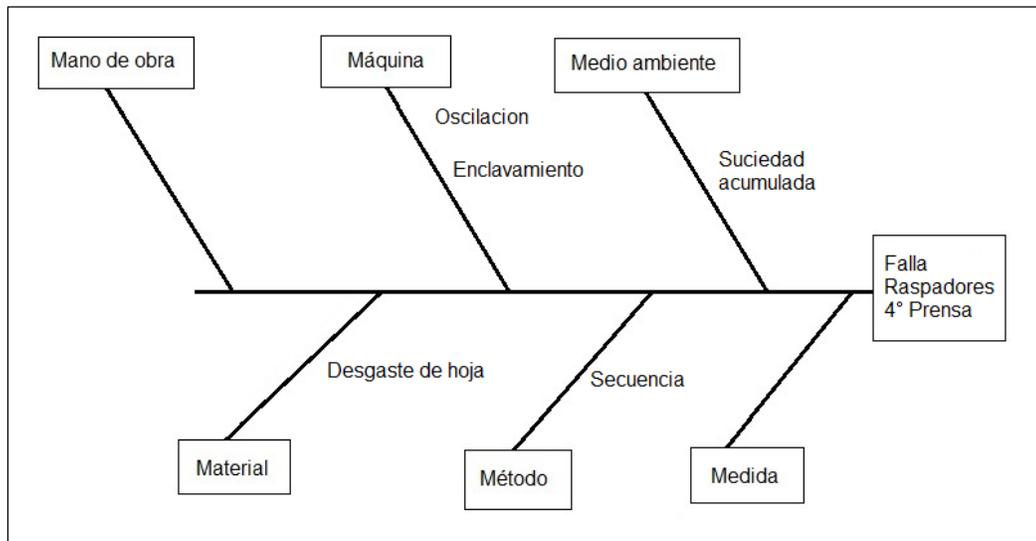


Figura 11.2.1 Diagrama de Ishikawa Raspadores de Cuarta Prensa

**11.2.2. Cuadro resumen FMEA para Raspadores de Cuarta Prensa**

Tabla 11.2.2 Resumen FMEA Raspadores Cuarta Prensa

<b>Equipo</b>	<b>Función (¿De qué es capaz el equipo?)</b>	<b>Falla Funcional (Negar función)</b>	<b>Modo de Falla (Causa de falla)</b>	<b>Efectos de Falla (¿Cómo el operador se da cuenta?)</b>
Raspadores Cuarta Prensa	Liberar desde el proceso los depósitos de pasta que quedan adheridos a los rodillos, producto del roce con los paños y evita que los depósitos de pasta se impregnen en el papel	No permite liberar los depósitos de pasta adheridos a los rodillos y no evita que la pasta se impregne en el papel	Suciedad acumulada	Se producen reiteradas cortaduras en el proceso, se puede apreciar mediante inspección visual en raspador, se producen problemas de presión de vacío en rodillos asociados.
			Desgaste de hoja	Se producen reiteradas cortaduras en el proceso, se puede apreciar mediante inspección visual y vida útil de hoja.
			Oscilación	Motor no produce oscilaciones, acusa en panel de control.

## 12. Mantenimiento preventiva

### 12.1. Análisis de mantenimiento preventiva Paño Cuarta Prensa

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los cambios de Paño de Cuarta Prensa para el periodo de estudio, con su promedio de duración en operación y la confiabilidad proporcionada por el análisis de Weibull correspondiente, para el elemento crítico correspondiente, extraída desde base de datos de la empresa.

Tabla 12.1 Porcentaje de mantenimiento programada v/s no programada, Paño

Cambios de Paño programados	17,00%
Cambios de Paño no programados	83,00%
Promedio de duración (días)	25
Confiabilidad asociada a promedio de duración (%)	32,00%

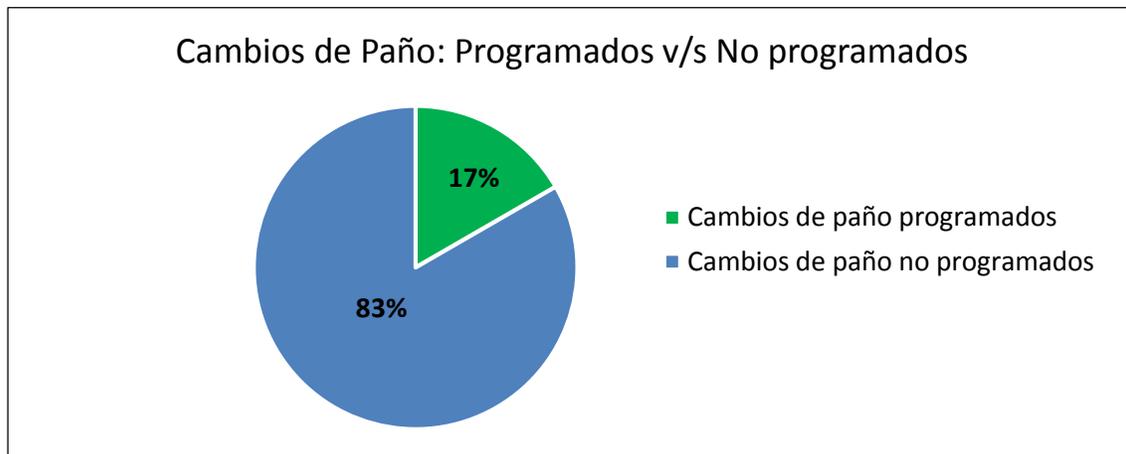


Figura 12.1 Porcentaje de mantenimiento programada v/s no programada

Al ver el gráfico, se observa que el porcentaje de las mantenciones no programadas (83%) aplicadas al Paño de la Cuarta Prensa es bastante mayor que el porcentaje de las mantenciones programadas (17%), lo que indica que está en condiciones deficientes de mantenimiento, al predominar las mantenciones debidas a imprevistos, lo que se puede solucionar al aplicar un plan de mantenimiento preventivo de acuerdo a los resultados del análisis de confiabilidad mediante Weibull y así evitar

problemas mayores, tales como averías de componentes complementarios al funcionamiento del Paño, asociados a detenciones imprevistas en la máquina o en un peor caso, causar accidentes laborales al no tener personal operacional consciente de las fallas imprevistas.

### 12.2. Estrategia de mantención preventiva Paño Cuarta Prensa

Actualmente se establece como meta, una duración de 80 días (1920 Hrs) de operación para el Paño de la Cuarta Prensa, entonces, para esta duración según el diagrama de confiabilidad de Weibull, el Paño tiene asociada una confiabilidad de 14%, dicha meta no se cumple para la mayoría de los casos, ya que estadísticamente según el análisis, sería muy exigente, ya que en el periodo evaluado (2011-2015), el estudio determinó que el promedio de duración del Paño fue 25 días (600 Hrs o 3.6 semanas), con una confiabilidad asociada de 32%.

Debido a lo anterior se está implementando un cambio de Paño de manera preventiva, en las denominadas Paradas Largas de mantención para la máquina, las cuales son distribuidas como muestra el ejemplo en la Figura 12.2.1:

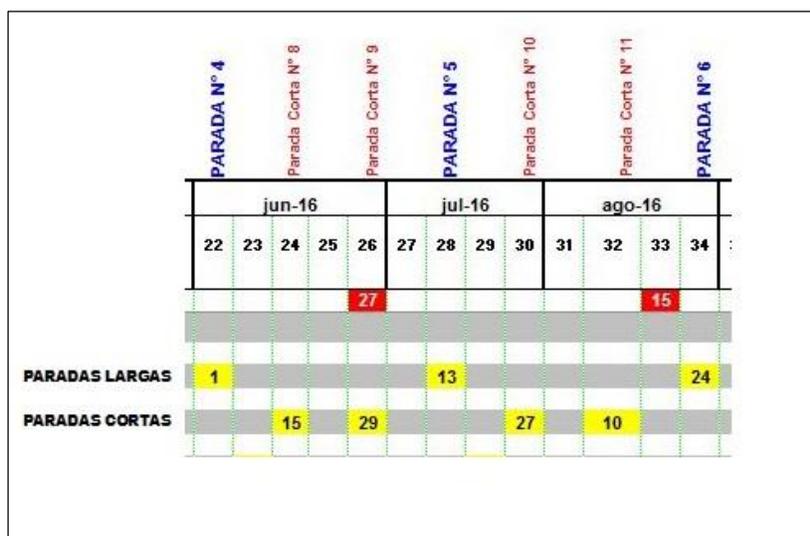


Figura 12.2.1 Ejemplo frecuencia de paradas programadas

Como se dijo anteriormente, la meta de duración del Paño propuesta por la empresa son 80 días (1920 Hrs), esto no se cumple en la mayoría de los casos, ya que la confiabilidad asociada para esta duración según análisis de Weibull, es de solo un 14%, lejano al promedio de duración determinado en el periodo de estudio según análisis de Weibull, el cual determinó una duración de 25 días (600 Hrs), con una confiabilidad asociada de 32 %, se procede a programar en conjunto con la jefatura de mantención, los cambios de manera preventiva en el intervalos de tiempo siguiente:

- Cada 6 semanas = 1008 Hrs.....Confiabilidad asociada = 23.40%

Que es un valor comprendido entre el promedio de duración según análisis estadístico de la base de datos y el valor de duración determinado como meta en la empresa.

Con este tiempo de mantención preventiva se disminuirán considerablemente los imprevistos por falla del Paño en la Cuarta Prensa, al cambiar el componente con una mayor confiabilidad asociada, y de este modo evitar problemas que se traducen en mayores costos para el departamento de mantención, entonces, la estrategia de mantención queda como se ve en el siguiente ejemplo:

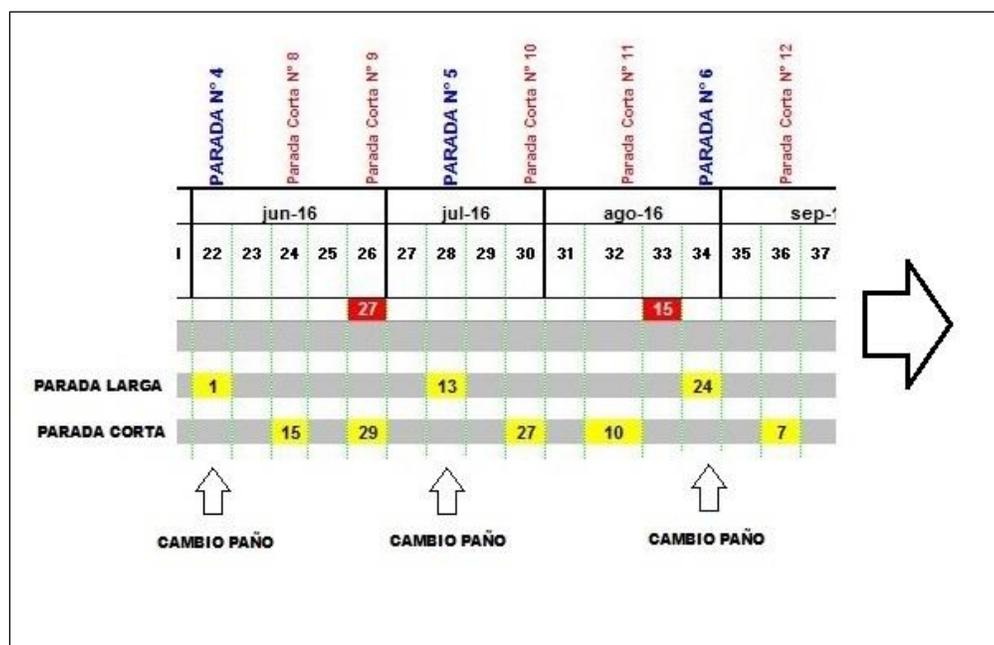


Figura 12.2.2 Ejemplo frecuencia de cambio de Paño de Cuarta Prensa

Tal como lo muestra la Figura 12.2.2, los cambios de paños serán programados en las Paradas Largas de mantención con una frecuencia de 6 semanas, a modo de evitar el mayor número posible de detenciones por imprevistos y aprovechar las detenciones programadas, con todos los beneficios implicados en términos de tiempo, seguridad, ahorro de costos, continuidad de producción, etc.

No se determinó un cambio con una a una mayor confiabilidad asociada, netamente por motivos económicos y operacionales, ya que no se sabe con exactitud la duración operacional de un paño (existen valores por sobre la meta de duración y otros muy por debajo), se toma como base el promedio de duración en el periodo de estudio (2011-2015) que son aproximadamente 4 semanas, y la meta de duración propuesta por la empresa, aproximadamente 11 semanas.

Como el análisis para los Raspadores de la Cuarta Prensa fue realizado para el total de raspadores, debido a la falta de datos concluyentes, no se puede implementar un plan preventivo para estos, ya que esto significaría una intervención o reemplazo que incluye a todos los raspadores, lo cual no sería factible económicamente ni estaría conceptualmente correcto.

### 13. Conclusiones

En el presente trabajo de habilitación profesional se realizó un estudio de mantenimiento basado en la confiabilidad, aplicado a la máquina papelera N°1 de la empresa Papeles Bío-Bío S.A., ubicada en la ciudad de San Pedro de la Paz, Región del Bío-Bío, Chile. Se analizó la base de datos proporcionada por la empresa, después de prepararla, clasificarla, organizarla y filtrarla por medio de software Excel, se encontró que existía 76% de detenciones imprevistas versus 24% de detenciones programadas, lo que para el cumplimiento de objetivos estratégicos no es conveniente, ya que esto no se favorece la confiabilidad del equipo, por ello, se están dedicando esfuerzos a mejorar indicadores de eficiencia en mantenimiento, aumentar la disponibilidad, el tiempo de buen funcionamiento entre detenciones (TBF) y reducir tiempos de reparación (TTR), con esto poder aumentar la confiabilidad total de la máquina, que es el objetivo principal.

Una vez realizado el análisis de disponibilidad, tiempos de buen funcionamiento y de reparación, se llegó a identificar el problema, concluyendo que la máquina mantiene una disponibilidad relativamente constante a lo largo de un periodo normal de producción (sin influencia de eventos ocasionales, por ejemplo, terremotos), esto gracias a un equilibrio entre los tiempos promedio de buen funcionamiento entre paradas (MTBF) y los tiempos promedio de reparación (MTTR), es decir, a medida que el MTBF disminuye, también lo hace el MTTR, de este modo se puede mantener una disponibilidad del equipo y poder seguir produciendo, no obstante, esto no presenta beneficios estratégicos para la empresa, ya que si se requiere aumentar la confiabilidad de los activos, se debe apuntar a aumentar MTBF y para mejorar la mantenibilidad de los equipos, reducir MTTR.

Como se concluyó que no existen buenos indicadores de eficiencia en mantenimiento, se procede a identificar los componentes críticos para el funcionamiento del sistema en términos de detenciones imprevistas (lo que afecta directamente a la confiabilidad), esto por medio de dos métodos de evaluación de criticidad y priorización de mejoramiento, Pareto y Jackknife, los que entregan principalmente al Sistema Prensas con alta prioridad de mejoramiento, así como también los Sistemas Formación y Secador, los cuales no fueron analizados en este estudio, ya que el Sistema Prensas presenta más del doble de detenciones del sistema que lo sucede (Formación). Posteriormente se realizó un análisis de Pareto y Jackknife de segundo orden solo del Sistema Prensas, dando como resultado el Sub-Sistema Cuarta Prensa como crítico, mismo procedimiento (análisis de Pareto y Jackknife) pero de tercer orden, fue aplicado al Sub-Sistema Cuarta Prensa, obteniendo como elementos críticos de la máquina, el Paño y los Raspadores de la Cuarta Prensa.

Al igual que para identificar componentes críticos para el sistema, en este trabajo se analizaron las fallas que afectan mayormente a la confiabilidad de la máquina, mediante los mismos métodos de análisis de los sistemas, con lo cual se encontró un problema crónico debido a Suciedad, la cual puede ser relacionada directamente con el Paño, ya que cuando los paños se ensucian, producto de mal estado de los Raspadores, se producen condiciones de operación desfavorables para la máquina, lo que generan roturas, desplazamientos, desprendimientos, arrugas u otros problemas asociados.

Al analizar la base de datos se determinó que el Paño sumado a los Raspadores de la Cuarta Prensa generan una alta indisponibilidad (6.5 días) para el periodo de estudio.

Luego de identificar el Paño como componente a analizar y las roturas, daños, desplazamientos, etc. asociado a la Suciedad según estudio, se procede a realizar un análisis funcional de todos los sistemas de la máquina, dando una descripción para cada uno de ellos.

Siguiendo con el análisis de confiabilidad, se realizó un análisis de modos y efectos de falla (FMEA) del Paño y Raspadores, para implementar una solución a las fallas analizadas, lo cual dio como resultado realizar un mantenimiento preventivo del Paño, para aumentar la confiabilidad y disponibilidad de la máquina.

Lamentablemente la calidad de los datos proporcionados no permitió obtener una clasificación adecuada para los Raspadores de la Cuarta Prensa, ya que no se especifica el raspador en particular que presentó la falla, o bien el raspador que ocasiona que el proceso se detenga, teniendo que disponerlos todos en una misma clasificación (Raspadores de Cuarta Prensa), no pudiendo presentar un plan de mantenimiento preventivo o de cambio para todos los raspadores, ya que conceptualmente no estaría correcto y además no sería económicamente conveniente para la empresa, no obstante, se propuso una revisión del diseño de los raspadores, no así con el Paño de la Cuarta Prensa, el cual se pudo identificar satisfactoriamente y se pudo concluir con un plan de mantenimiento preventivo.

Como, según el presente estudio determinó que, los elementos que causan mayores detenciones al proceso son Paño y Raspadores de la Cuarta prensa, y el principal modo de falla de ambos es Suciedad. se dice que, el Paño falla producto del mal funcionamiento de los raspadores, porque la principal función del raspador es eliminar la suciedad de los rodillos, estos rodillos, al estar en contacto con el paño, le traspasan su suciedad, provocando que este falle por la misma causa, tal como lo determinó el estudio.

Se concluye entonces, que los problemas ocasionados en el Paño de la Cuarta Prensa, es producto de un defecto en las tareas de limpieza realizadas por los raspadores, problemas que podrían evitarse potencialmente al incorporar mejoras al sistema de limpieza, o implementar un buen plan de cambio de raspadores, lo que no se pudo determinar en este estudio por los motivos explicados anteriormente.

Como método de apoyo para generar el mantenimiento preventivo del Paño se desarrolló el análisis estadístico de Weibull mediante el método de los mínimos cuadrados, que entregó información valiosa con respecto a la confiabilidad y tiempo de cambio de Paño. Esta información que se traduce en el diagrama de confiabilidad de Weibull, que permitió identificar el tiempo óptimo de cambio de Paño, para una determinada confiabilidad, mayor a la cual se trabaja actualmente, esto pretende contrarrestar el porcentaje de cambios programados versus los cambios no programados que son de un 17% contra un 83%, lo que no es conveniente para la empresa en términos económicos y/o de seguridad, al no tener certeza de la detención del proceso. Lo anterior llevó a realizar un mantenimiento preventivo del componente y así mejorar la confiabilidad y disponibilidad de la máquina, como también reducirá la probabilidad de fallas catastróficas al dañarse componentes asociados o producirse accidentes laborales.

La estrategia de mantención a optar para la máquina implica cambiar el Paño cada 42 días (1008 Hrs) con una confiabilidad asociada de 23.4% y no cada 80 días como se fijaba anteriormente, ya que el 92.5% de los Paños no llegaban a esta meta de duración, debido a que a estas horas de operación presentan solo un 14% de confiabilidad según análisis de Weibull. Estas mantenciones serán realizadas en las Paradas largas de mantención, a modo de aprovechar el tiempo de detención y poder programar los cambios, lo que otorga diversos beneficios al proceso de producción como, por ejemplo, asegurar la continuidad, ya que como se trata de un proceso en serie, al detenerse algún componente, este produce cortadura o detención general.

Con este estudio se logró concientizar al personal operacional de planta de la importancia que tiene el registro de información para lograr los objetivos de la institución, como, por ejemplo, lograr aumentar confiabilidad de los activos para asegurar una disponibilidad elevada, de este modo obtener mayores ganancias económicas y una buena satisfacción de todos los grupos de interés.

## 14. Bibliografía

- Moubray, J. (1991). RCM II Mantenimiento Centrado En Confiabilidad .
- Norma ISO 14224. (1999). Industrias de petróleo y gas natural - Recolección de intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos.
- Norma SAE JA1011. (1990). Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).
- Documento Auto-Capacitación. Papeles Bío-Bío S.A.
- [www.papelesbiobio.cl](http://www.papelesbiobio.cl)
- Adolfo Arata. (1999). Ingeniería y Gestión de Confiabilidad Operacional en Plantas Industriales
- Fredy Kristjampoller. Dcto. Diplomado en Ingeniería del Mantenimiento. Universidad Técnica Federico Santa María.

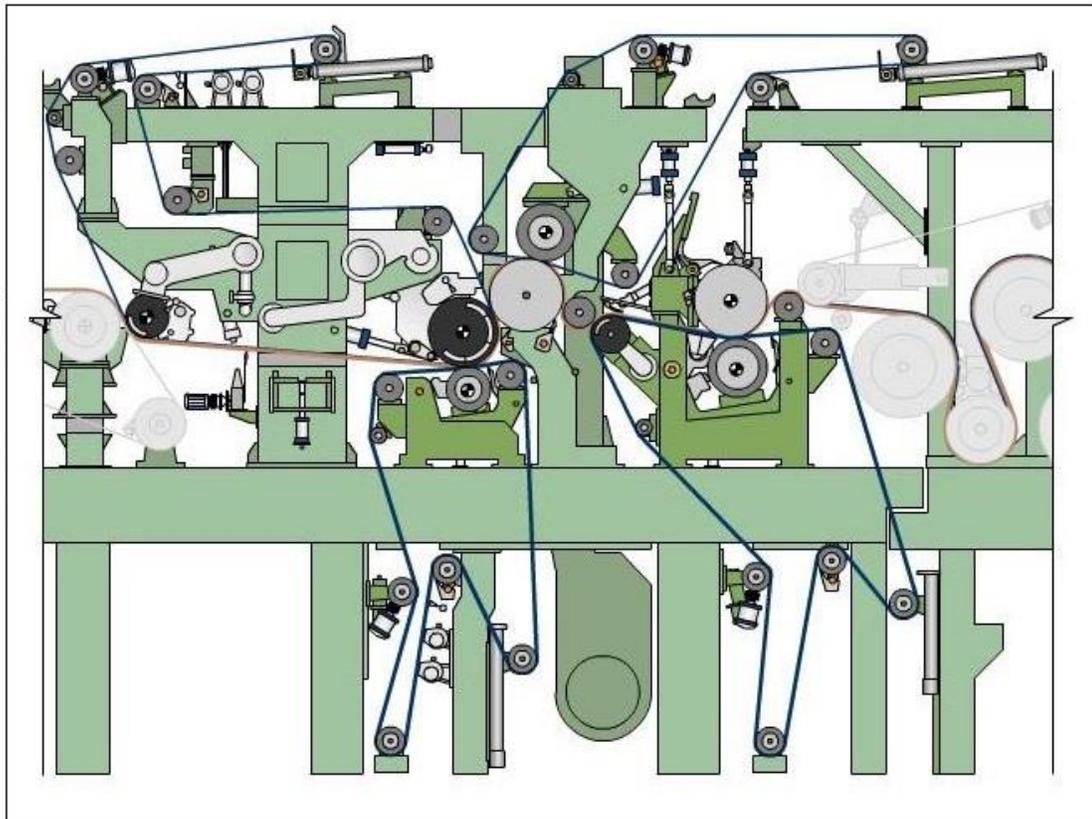
**ANEXOS**

## **ANEXO N°1**

### **Diagrama de Sistema Prensas**

Descripción: En este anexo se presenta el diagrama del Sistema Cuarta Prensa perteneciente a Máquina papelera N°1 de la Empresa Papeles Bío-Bío S.A.

## Diagrama de Sistema Prensas MP-01



En el diagrama anterior se puede ver los componentes del Sistema Prensas de la MP-01:

- Primera Prensa: Esquina inferior izquierda.
- Tercera Prensa: Esquina superior derecha.
- Prensa Pick Up: Esquina superior izquierda.
- Cuarta prensa: Esquina inferior derecha.
- Tri Nip: Sector medio de la imagen.

## **ANEXO N°2**

### **Base de datos para elaboración de diagramas Pareto y Jackknife**

Descripción: En este anexo se presenta la base de datos de fallas en MP-01 por fallas, utilizada para la realización de los diagramas de Pareto y Jackknife necesarios para el estudio:

- Base de datos fallas MP-01 utilizada para diagrama de Pareto
- Base de datos fallas MP-01 utilizada para diagrama de Jackknife
- Base de datos fallas Sistema Prensas utilizada para diagrama de Jackknife

**Base de datos fallas MP-01 utilizada para diagrama de Pareto**

<b>Fallas MP-01</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Frecuencia acumulada</b>	<b>% Acumulado</b>
Suciedad	252	252	30,22
Sin detalles / cambio	132	132	46,04
Taco	85	85	56,24
Rotura / daño	78	78	65,59
Sin detalles / falla	53	53	71,94
Problema presión 24	25	25	74,94
Desplazamiento	17	17	76,98
Caída de servicio eléctrico	15	15	78,78
Falta de barras	10	10	79,98
Secuencia	10	10	81,18
Fuga	8	8	82,13
Corrimiento	7	7	82,97
Corte	7	7	83,81
Desgaste de hoja	7	7	84,65
Falta de presión de vacío	7	7	85,49
Desprendimiento	6	6	86,21
Taponamiento	6	6	86,93
Corte defectuoso	5	5	87,53
Falta de vapor	5	5	88,13
Sobrecarga	5	5	88,73
Falla tobera	5	5	89,33
Vibraciones	5	5	89,93
Accionamiento	4	4	90,41
Alta temperatura	4	4	90,89
Falla fuente de poder	4	4	91,37
Orificio	4	4	91,85
Cuña hidráulica	3	3	92,21
Regulación	3	3	92,57
Trabamiento	3	3	92,93
Arruga	2	2	93,17
Control de hora punta	2	2	93,41
Flameo	2	2	93,65
Fuga de condensado	2	2	93,88
Marca en hoja	2	2	94,12
Picaduras en hoja	2	2	94,36
Pliegue	2	2	94,60
Problema pasada de cinta	2	2	94,84
Rodamiento	2	2	95,08
Variación de presión	2	2	95,32

Aire cortado	1	1	95,44
Bloqueo de señal	1	1	95,56
Cable suelto	1	1	95,68
Condensación paneles elect.	1	1	95,80
Corte de piola	1	1	95,92
Defecto rodillo	1	1	96,04
Defecto de hoja	1	1	96,16
Demora en posicionamiento	1	1	96,28
Desalineamiento	1	1	96,40
Descontrol	1	1	96,52
Diferencia de presión	1	1	96,64
Doble corte	1	1	96,76
Drenaje	1	1	96,88
Elisado	1	1	97,00
Enclavamiento	1	1	97,12
Falla accionamiento	1	1	97,24
Falla porta fusible	1	1	97,36
Falla power track	1	1	97,48
Falla rodamiento	1	1	97,60
Falla TDC	1	1	97,72
Falla en toberas	1	1	97,84
Falla válvula	1	1	97,96
Fuga de aire	1	1	98,08
Fusible quemado	1	1	98,20
Hilo rodado	1	1	98,32
Humectación	1	1	98,44
Inestabilidad	1	1	98,56
Inundación	1	1	98,68
Levantamiento	1	1	98,80
Mal ángulo	1	1	98,92
Nivel de aceite	1	1	99,04
Oscilación	1	1	99,16
Perno cortado	1	1	99,28
Riel desalineado	1	1	99,40
Rugosidad	1	1	99,52
Orilla desgastada o hilachas	1	1	99,64
Soltura	1	1	99,76
Soplado deficiente	1	1	99,88
Tensión piola	1	1	100,00
<b>Total</b>		<b>834</b>	

**Base de datos detenciones MP-01 por fallas utilizada para diagrama de Jackknife**

<b>Código</b>	<b>Fallas de MP-01</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Tiempo Total</b>	<b>MTTR</b>
1	Suciedad	252	100,58	0,40
2	Sin detalles / Cambio	132	382,28	2,90
3	Taco	85	48,00	0,56
4	Rotura / daño	69	189,30	2,74
5	Falla	53	91,80	1,73
6	Problema de presión	24	25,70	1,07
7	Desplazamiento	17	11,58	0,68
8	Corte de piola	16	22,90	1,43
9	Caída de servicio eléctrico	15	41,60	2,77
10	Falta de barras	10	30,90	3,09
11	Secuencia	10	8,90	0,89
12	Fuga	8	24,40	3,05
13	Corrimiento paño	7	4,16	0,59
14	Taponamiento	7	2,13	0,30
15	Desgaste de hoja	6	2,25	0,38
16	Desprendimiento	6	1,51	0,25
17	Corte defectuoso	5	1,08	0,22
18	Falta de vapor	5	8,68	1,74
19	Incendio	5	48,80	9,76
20	Sobrecarga	5	2,53	0,51
21	Tobera	5	2,25	0,45
22	Accionamiento	4	1,53	0,38
23	Operacional	4	6,75	1,69
24	Orificio	4	10,11	2,53
25	Vacío	4	8,08	2,02
26	Alta temperatura	4	3,16	0,79
27	Cuña hidráulica	3	1,26	0,42
28	Detención	3	0,88	0,29
29	Falta de presión vacío	3	1,06	0,35
30	Regulación	3	0,86	0,29
31	Trabamiento	3	2,10	0,70
32	Vibraciones paño	3	11,00	3,67
33	Arruga	2	7,83	3,92
34	Falla fuente de poder	2	1,96	0,98
35	Flameo	2	0,45	0,23
36	Fuente de poder	2	1,90	0,95
37	Fuga de condensado	1	0,25	0,25
38	Manguera	2	7,28	3,64
39	Marca en hoja	2	0,33	0,17
40	Picaduras en hoja	2	0,43	0,22

41	Pliegue	2	2,70	1,35
42	Problema de pasada de cinta	2	2,81	1,41
43	Falla Rodamiento	3	11,53	3,84
44	Variación de presión	2	0,43	0,22
45	Defecto en hoja	1	0,25	0,25
46	Actuador	1	0,43	0,43
47	Aire cortado	1	0,15	0,15
48	Baja generación	1	1,03	1,03
49	Bloqueo	1	0,93	0,93
50	Bloqueo de señal	1	0,18	0,18
51	Cable suelto	1	0,47	0,47
52	Condensación paneles eléctricos	1	2,33	2,33
53	Control hora punta	1	1,22	1,22
54	Desalineamiento	1	6,92	6,92
55	Descontrol	1	0,22	0,22
56	Diferencia de presión	1	0,27	0,27
57	Doble corte	1	0,40	0,40
58	Drenaje	1	1,08	1,08
59	Elisado	1	0,22	0,22
60	Enclavamiento	1	0,22	0,22
61	Falla accionamiento	1	0,48	0,48
62	Falla porta fusible	1	0,83	0,83
63	Falla power track	1	1,68	1,68
65	Falla TDC	1	6,08	6,08
66	Falla toberas	1	1,32	1,32
67	Falla válvulas	1	1,43	1,43
68	Falsa alarma	1	0,30	0,30
69	Filtro	1	0,80	0,80
70	Fuga de aire	1	0,62	0,62
71	Fusible quemado	1	0,92	0,92
72	Gotera	1	0,23	0,23
73	Hilo rodado	1	0,42	0,42
74	Inestabilidad	1	3,28	3,28
75	Inexistencia barras	1	4,50	4,50
76	Interno	1	1,70	1,70
77	Inundación	1	3,52	3,52
78	Levantamiento	1	0,27	0,27
79	Mal ángulo rodillo	1	0,85	0,85
80	Manguera cilindro hidráulico	1	1,30	1,30
81	Módulo	1	0,60	0,60
82	Nivel de aceite	1	0,25	0,25
83	Oscilación	1	0,95	0,95

84	Perno cortado	1	0,85	0,85
85	Problema de presión en lisas	1	0,35	0,35
86	Revisión	1	0,78	0,78
87	Riel desalineado	1	1,08	1,08
88	Rugosidad	1	0,33	0,33
89	Salida de tambor	1	0,12	0,12
90	Soltura manguera	1	0,15	0,15
91	Soplado deficiente	1	0,38	0,38
93	Tensión	1	0,27	0,27
94	Transferencia de hoja	1	0,18	0,18
95	Unión paño	1	0,35	0,35
96	Variación de velocidad	1	0,35	0,35
97	vibración chorro formato	1	0,30	0,30
98	Vibraciones rodillo 2.1	1	3,17	3,17
		<b>856</b>	<b>1193,33</b>	

**Base de datos fallas Sistema Prensas utilizada para diagrama de Jackknife**

<b>Código</b>	<b>Fallas Prensas</b>	<b>N° Detenciones</b>	<b>Tiempo (Hrs)</b>	<b>MTTR (Hrs)</b>
1	Suciedad	215	86,10	0,40
2	Sin detalles / cambio	88	262,45	2,98
3	Rotura / daño	24	71,40	2,98
4	Desplazamiento	13	10,13	0,78
5	Taco	13	9,78	0,75
6	Problema de presión	10	7,31	0,73
7	Desgaste de hoja	6	2,25	0,38
8	Desprendimiento	6	1,51	0,25
9	Falta presión de vacío	6	1,06	0,18
10	Taponamiento	4	1,38	0,35
11	Cuña hidráulica	3	1,26	0,42
12	Orificio	3	6,01	2,00
13	Secuencia	3	5,65	1,88
14	Arruga	2	7,83	3,92
15	Flameo	2	0,45	0,23
16	Marca en hoja	2	0,33	0,17
17	Regulación	2	0,86	0,43
18	Accionamiento	1	1,03	1,03
19	Corrimiento	1	0,37	0,37
20	Corte	1	0,20	0,20
21	Corte defectuoso	1	0,58	0,58
22	Enclavamiento	1	0,22	0,22
23	Falla rodamiento	1	3,42	3,42
24	Falla toberas	1	1,32	1,32
25	Fuga de aire	1	0,62	0,62
26	Levantamiento	1	0,27	0,27
27	Oscilación	1	0,95	0,95
28	Pliegue	1	0,32	0,32
29	Problema pasada cinta	1	0,98	0,98
30	Rodamiento	1	3,87	3,87
31	Rugosidad	1	0,33	0,33
32	Soltura	1	0,15	0,15
33	Tensión	1	0,27	0,27
34	Trabamiento	1	1,52	1,52
35	Transferencia hoja	1	0,18	0,18
36	Vibraciones	1	6,25	6,25
		<b>421</b>	<b>498,61</b>	

### **ANEXO N°3**

#### **Procedimiento de cambio de Paño en Cuarta Prensa.**

Descripción: En este anexo se presenta el procedimiento para realizar el cambio de Paño de Cuarta Prensa.

### Medidas de Seguridad en procedimiento de cambio de Paño en Cuarta prensa

En el momento de realizar el procedimiento se debe tener en cuenta las siguientes medidas de seguridad (que aplican para cualquier cambio de paño en MP-01)

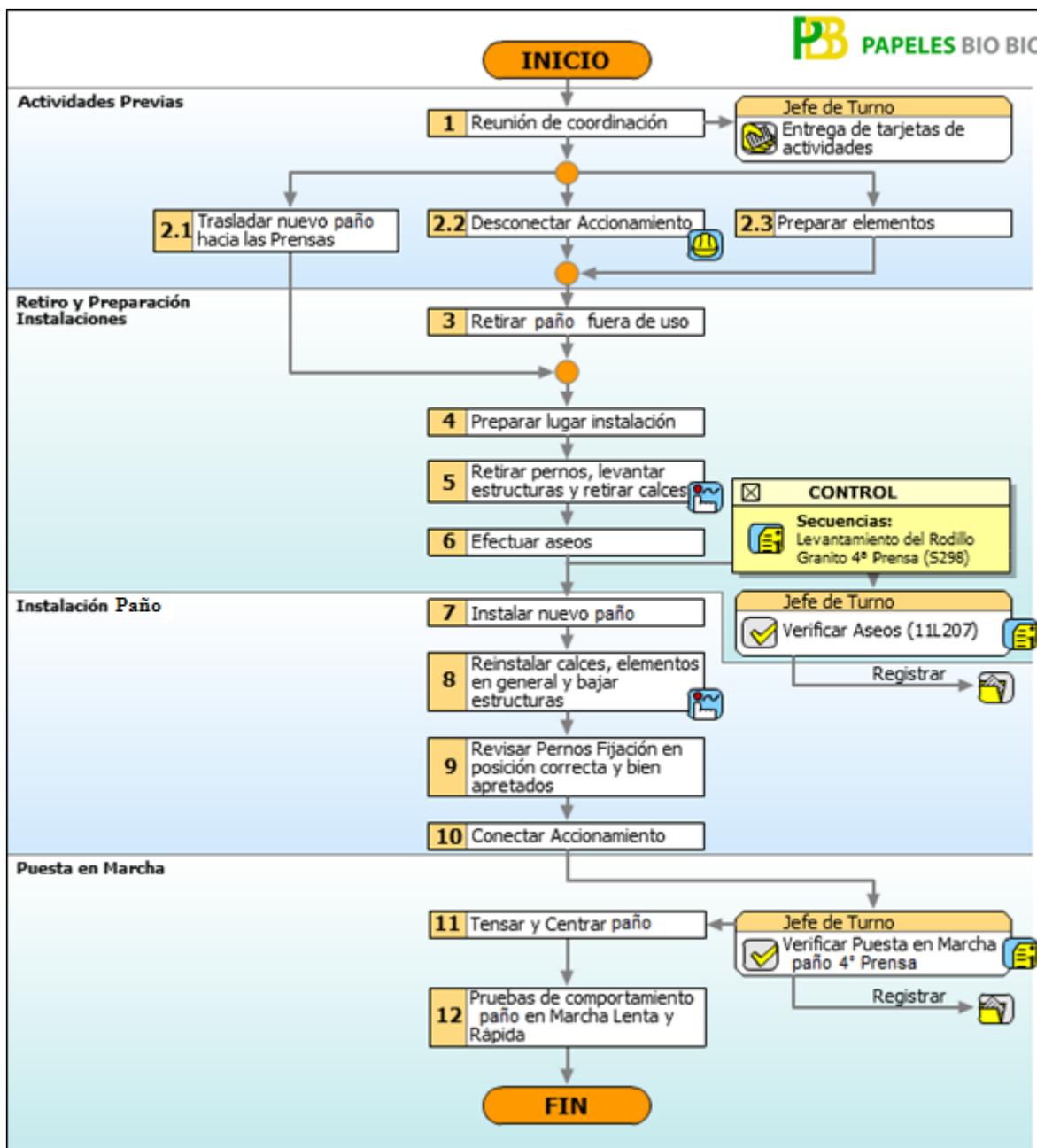
E.P.P. CON MAQUINA DETENIDA	E.P.P. CON MAQUINA EN OPERACION
	 <p data-bbox="846 569 1333 653">  El uso de protector auditivo es obligatorio a partir de la Etapa de Puesta en marcha del nuevo paño                 </p>

ACCIONES SEGURAS
<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="272 804 1365 856">  El Trabajo debe ser realizado con las herramientas establecidas y procurando su buen uso.                 </li> <li data-bbox="272 884 938 936">  No portar objetos innecesarios para el trabajo.                 </li> <li data-bbox="272 972 1284 1024">  El trabajo es realizado en altura, por lo que el Operador debe trabajar con precaución para evitar caídas a desnivel.                 </li> <li data-bbox="272 1060 1373 1140">  Debido al peso de los rodillos, calces y elementos asociados al paño de 4ª Prensa, el Operador debe efectuar los movimientos adecuados para evitar hacer sobre esfuerzo.                 </li> <li data-bbox="272 1155 1349 1207">  Se debe trabajar en forma ordenada y dejar los elementos retirados en lugares seguros para evitar tropezos o caídas a nivel.                 </li> <li data-bbox="272 1243 1390 1320">  Existen zonas estrechas en lugar de la instalación del paño de 4ª Prensa por lo que se debe tener cuidado con los golpes, especialmente en la cabeza (el uso del casco es obligatorio).                 </li> <li data-bbox="272 1356 1260 1434">  Se debe evitar estar bajo la Grúa cuando ésta trasporta algún elemento (estructuras, escaleras, paño, etc), debido a que se puede soltar y caer sobre algún Operador.                 </li> </ul>

 ADVERTENCIA
<p data-bbox="272 1619 1284 1682">Antes de comenzar el trabajo, se deben conocer todos los peligros existentes en cada una de las tareas del Procedimiento.</p> <p data-bbox="272 1713 1382 1776">La seguridad durante el Procedimiento de Cambio de paño 4ª Prensa es responsabilidad de los Operadores a cargo de la operación.</p>

### Diagrama Procedimiento de cambio de Paño de Cuarta Prensa

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de las diferentes etapas y actividades a realizar durante el cambio de Paño de la Cuarta Prensa y los detalles de cada una:



#### **ANEXO N°4**

##### **Imagen Máquina papelera N°1**

Descripción: En este anexo se presenta una imagen de la máquina papelera N°1 estudiada.

# **Visión General**

## **Máquina papelera N°1**

